



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Numerisk analyse av hybridbjelke bestående av LVL og aluminiumlegering med bolteforbindelse

Numerical analysis of LVL–aluminium hybrid beam
with bolt connection

Qile Wang
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven er mitt avsluttende arbeid for 5-årig masterstudie i Byggteknikk og arkitektur med studieretning konstruksjonsteknikk. Masterstudien er tatt på Norges miljø- og biovitenskapelig universitet. Oppgaven utgjør 30 studiepoeng og er utarbeidet i våren 2023.

Motivasjonen til å gjøre masteroppgaven med dette temaet kommer fra en stor interesse av tre og aluminium som byggematerialer og elementmetode. Stadig seriøse miljøproblemer påvirker alle levende på jorda og er en bekymring i dag og for fremtiden. Derfor er det viktig å benytte eksisterende ressurser på en optimal måte som gir minst mulig miljøbelastning.

Trematerialer er generelt mer miljøvennlig enn byggematerialer som betong, men det finnes begrensninger med dette materialet som gjør at det ikke kan brukes til å konstruere like sterke og høye bygninger som betongelementer kan. Derfor er det nødvendig å finne en bærekraftig løsning slik at tremateriale kan brukes og erstatte byggematerialer som fører til mye klimagassutslipp. Denne oppgaven vil mest sannsynlig bidra til å finne en slik løsning.

Jeg vil først og fremst takke masterveilederen min, førsteamanuensis Themistoklis Tsalkatidis, for alle presise og faglige veiledninger underveis i arbeidet. Takk for gode motivasjoner som støtter meg til å gjennomføre arbeidet. Til slutt vil jeg takke alle mine venner som har hjulpet meg og motivert meg under hele prosessen.

Abstract

Environmental problems such as global warming have long been a major problem. Sustainable materials are therefore desired to adapt to stricter climate targets. Hybrid elements are one of the construction elements that help reduce greenhouse gas emissions and at the same time offer equally good mechanical properties. The mechanism of the hybrid elements is to combine two or more materials and benefits from each material. It ensures that resources are used in an optimal way. Aluminium alloy has low weight, high corrosion resistance and high strength in relation to its low weight. LVL is a wood-based construction element with a high load-bearing capacity. It is environmentally friendly and easy to shape. The hybrid beam, which consists of the two materials, can therefore be a sustainable solution for the future.

This assignment numerically analyzes how changes in stiffness occur when the thickness of parts of the hybrid beam changes. The effect of bolted connection has also been investigated. The assignment has focused on interpretation of ultimate deflection in the middle of the hybrid beam and slip between the parts of the hybrid beam. Numerical analysis is done with the help of three-dimensional models built in Ansys Mechanical APDL 2022 R1 which uses finite element method. The model is verified by comparing results from an experimental bending test. Both elastic and plastic material properties have been defined. LVL is considered an orthotropic material and aluminium alloy an isotropic material.

Results from the analysis show that numerical models can simulate experiments with little deviation. The accuracy of models can be adjusted by changing built-in parameters in Ansys as needed. A thicker LVL beam will contribute to a stiffer hybrid beam, but it also increases the slip from the aluminium beam. It provides a rigid connection with 66 bolts and can be improved by increasing the number of bolts, but reducing more bolts is not recommended. The change in stiffness is not significant when the thickness of the web on the aluminium beam is changed and, on the other hand, results in greater slip. In general, the hybrid beam of LVL and aluminium alloy has high stiffness in relation to its low weight and is corrosion resistant. It can be a good alternative to traditional building materials.

Sammendrag

Miljøproblemer som globaloppvarming har lenge vært et stort problem. Bærekraftige materialer blir derfor ønsket for å tilpasse strengere klimamål. Hybridelementer er et av de byggevarene som bidrar til å minske klimagassutslipp og samtidig tilbyr de like gode mekaniske egenskaper. Mekanismen til hybridelementene er å kombinere to eller flere materialer og drar nytter fra hvert materiale. Det sørger for at ressursene blir benyttet på en optimal måte. Aluminiumlegering har lav vekt, høy korrosjonsbestandighet og høy styrke i forhold til sin lave vekt. LVL er et trebasert konstruksjonselement med høy bærende evne. Den er miljøvennlig og lett å forme. Hybridbjelken som består av de to materialene, kan derfor være en bærekraftig løsning for fremtiden.

Denne oppgaven analyserer numerisk hvordan endring av stivhet oppstår når tykkelse på deler av hybridbjelken endrer seg. Effekten av bolteforbindelse er også undersøkt. Oppgaven har tatt fokus på tolkning av ultimate nedbøying i midten av hybridbjelken og glidning mellom delene av hybridbjelken. Numerisk analyse er gjort ved hjelp av tredimensjonale modeller bygd i Ansys Mechanical APDL 2022 R1 som benytter elementmetode. Modellen blir verifisert ved å sammenligne resultater fra en eksperimentell bøyetest. Både elastiske og plastiske materialeegenskaper har blitt definert. LVL anses som et ortotrop materiale og aluminiumlegering som et isotropt materiale.

Resultater fra analysene viser at numeriske modeller kan simulere eksperimenter med lite avvik. Nøyaktigheten av modeller kan justeres ved å endre innebygde parametere i Ansys etter behov. En tykkere LVL-bjelke vil bidra til en stivere hybridbjelke, men det øker også glidingen fra aluminiumbjelken. Det gir en stiv forbindelse med 66 bolter og kan forbedres ved å øke boltantallet, men det anbefales ikke å redusere flere bolter. Stivhetsendring er lite signifikant når tykkelse av steget på aluminiumbjelke er forandret og gir derimot større glidning. Generelt har hybridbjelken av LVL og aluminiumlegering høy stivhet i forhold til sin lave vekt og er korrosjonsbestandige. Den kan være et godt alternativ til tradisjonelle byggematerialer.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Abstract	II
Sammendrag	III
Innholdsfortegnelse	IV
Figurliste	VI
Tabelliste	VIII
1 Innledning:	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål	2
1.3 Problemstilling	2
1.4 Begrensninger.....	3
2 Teori:	4
2.1 Materialer	4
2.1.1 Hybridbjelke.....	4
2.1.2 LVL-bjelke	5
2.1.3 Aluminium og aluminiumlegering.....	6
2.1.4 Bolteforbindelse	8
2.2 Elementmetode (FEM).....	9
2.3 Elementtype.....	9
2.3.1 SOLID185:	10
2.3.2 BEAM188	10
2.3.3 CONTA174	11
2.3.4 TARGE170.....	12
2.4 Materialegenskaper	12
2.4.1 Friksjonskoeffisient.....	13
2.4.2 Elastisk og plastisk deformasjon	14
2.4.3 Ortotropt, isotropt og anisotropt materiale.....	19
2.4.4 Poissons tall.....	20
2.4.5 Frihetsgrader.....	22
2.5 Fritt opplagt bjelke	22
2.6 Kontakt	24
2.6.1 Kontaktstivhet og penetrasjon.....	25
2.6.2 Kontakttyper.....	25
2.7 Punktsveis.....	26
2.8 Nedbøyning og glidning.....	27
2.9 Von Mises flytegrensekriterium	28

2.10	Hills flytegrensekriterium	28
2.11	Billinear og multilineær isotrop herdingsmodell.....	29
2.12	Fire - punktet bøyetest.....	31
3	Metode:.....	32
3.1	Geometri.....	32
3.2	Elementtype.....	34
3.3	Materialegenskap	35
3.3.1	Elastisitet	35
3.3.2	Plastisitet	36
3.4	Elementinndeling	40
3.5	Forbindelse og kontakt	41
3.6	Påføring av laster.....	44
3.7	Les av resultater	45
3.8	Parametriske studier	46
3.8.1	Parametrisk studie 1: Endre tykkelse på LVL-bjelke.....	46
3.8.2	Parametrisk studie 2: Endre antall bolter	47
3.8.3	Parametrisk studie 3: Endring av aluminiumbjelken	48
4	Resultater	49
4.1	Verifisering av tredimensjonale modellen.....	49
4.2	Parametriske studier	54
4.2.1	Parametrisk studie 1: Endre tykkelse på LVL-bjelke.....	54
4.2.2	Parametrisk studie 2: Endre antall bolter	56
4.2.3	Parametrisk studie 3: Endring av aluminiumbjelken	57
5	Diskusjon:	59
5.1	Verifisering av den tredimensjonale modellen.....	59
5.2	Parametriske studier	60
5.2.1	Parametrisk studie 1	61
5.2.2	Parametrisk studie 2	61
5.2.3	Parametrisk studie 3	62
5.2.4	Tillegg kommentar	63
6	Konklusjon.....	64
7	Videre arbeid	66
8	Referanser:.....	67

Figurliste

Figur 2.1: Hybrid-sandwichelementet av Metsä (Metsä Group, 2021).....	4
Figur 2.2: Produksjonsprosess for LVL (Hiziroglu, 2016).....	5
Figur 2.3: Et eksempel på LVL-bjelke limt langs fiberretning (STEICO, u.å).....	6
Figur 2.4: Aluminiumskinner laget av AW6060 T6 (Norsk Stål, 2022).	7
Figur 2.5: En illustrasjon av de ulike delene bolter består av (ClubTechnical, 2019).	8
Figur 2.6: Plassering av knutepunkter og mulig geometri for elementtypen SOLID185. (Ansys Inc., 2022)	10
Figur 2.7: Geometrien av BEAM188 (Ansys Inc., 2022e).	11
Figur 2.8: Geometrien til CONTA174. (Ansys Inc., 2022e)	11
Figur 2.9: Geometrien til TARGE170. (Ansys Inc., 2022b)	12
Figur 2.10: Retninger til kreftene i formel 2.3 (Bird, 2001).	13
Figur 2.11: Et eksempel på spenning og tøyningsskurv (Lim & Hoag, 2013).	14
Figur 2.12: Eksempler på materialer som har tydelig flytegrense og definisjon av flytegrense for materialer som ikke har tydelig flytegrense (Johansen, 2010).	15
Figur 2.13: Tre spenningstyper (Hofstad, 2023).	16
Figur 2.14: Forlengelser under strekk (Engineering).	16
Figur 2.15: Sammenligning av konvensjonell og sann spenning-tøyingskurv (Callister & Rethwisch, 2020).	17
Figur 2.16 a): Spenninger på spenningsflater (Budynas & Nisbett, 2006).	18
Figur 2.17: Tre akser i et ortotropisk materiale som står vinkelrett på hverandre (Ross, 2021).	19
Figur 2.18: Trestokk med tre symmetriplan (Alves et al., 2015).	20
Figur 2.19: En forklaringsfigur som forklarer normal deformasjon og skjærdeformasjon.....	21
Figur 2.20: Et tredimensjonale solidelement har seks frihetsgrader (Baker et al., 2023).	22
Figur 2.21: Et eksempel på fritt opplagt bjelke og fritt opplagt bjelke med utkraging (Frøstrup, 2012).	23
Figur 2.22: Tredimensjonale reaksjonskrefter og momenter på et fastlager (Hibbeler, 2016).	23
Figur 2.23: Tredimensjonale reaksjonskrefter på et glidelager (Hibbeler, 2016).....	24
Figur 2.24: Et eksempel på «pinball region» (Ansys Inc., 2022).	26
Figur 2.25: Spenning og tøyningsskurv ved en bilinear isotrop herdingsmodell (Ansys Inc., 2022c).	30
Figur 2.26: En typisk spenning-tøyningsskurv under strekk (Callister & Rethwisch, 2020)...	30

Figur 2.27: Et eksempel av fire-punktet bøyetest (Wang et al., 2022).....	31
Figur 3.1: Koordinatsystem definert for tredimensjonal modell.....	32
Figur 3.2: Geometrien for den tredimensjonale modellen basert på prøvebjelker brukt under bøyetesten gjort av Chybiński og Polus (2021).	33
Figur 3.3: Definert elastiske og plastiske materialegenskaper til LVL i Ansys.	39
Figur 3.4: Definert elastiske og plastiske materialegenskaper til aluminiumlegering i Ansys.	39
Figur 3.5: Definert elastiske og plastiske materialegenskaper til stål i Ansys.	40
Figur 3.6: Elementinndeling uten ekspansjon om xy-planet.....	40
Figur 3.7: Elementinndeling med ekspansjon om xy-planet.....	41
Figur 3.8: Knutepunkter koblet av kommandoen – SWGEN.	42
Figur 3.9: Alle 66 simulerte bolter brukt under numerisk analyse.....	42
Figur 3.10: Detaljer om simulerte bolter i Ansys.	43
Figur 3.11: Hybridbjelke med begrenset frihetsgrader.....	43
Figur 3.12: Posisjoner av knutepunktene som brukes til å beregne glidning på enden av hybridbjelken.....	46
Figur 4.1: Påføring av nedbøyning på numeriske modellen i Ansys.	49
Figur 4.2: Nedbøyning i midten av hybridbjelken (FKN = 10).	50
Figur 4.3: Glidning på enden av hybridbjelken (FKN = 10).....	51
Figur 4.4: Nedbøyning i midten av hybridbjelken (FKN = 1).	52
Figur 4.5: Glidning på enden av hybridbjelken (FKN = 1).....	52
Figur 4.6: Konturplott som viser deformasjon i y-retning når FKN er definert som 1.....	53
Figur 4.7: Konturplottet som viser glidningen på enden av hybridbjelken (deformasjon i x-retning) når FKN er definert som 1.....	53
Figur 4.8: Nedbøyninger av hybridbjelken når tykkelsen av LVL-bjelken endres.	55
Figur 4.9: Glidning på enden av hybridbjelken når tykkelsen av LVL-bjelken endres.	55
Figur 4.10: Nedbøyning i midten av hybridbjelken når antall bolter endres.	56
Figur 4.11: Glidning på enden av hybridbjelken når antall bolter endres.....	57
Figur 4.12: Nedbøyning i midten av hybridbjelken når tykkelsen av steget til aluminiumbjelken endres.	58
Figur 4.13: Glidning på enden av hybridbjelken når tykkelsen av steget til aluminiumbjelken endres.	58

Tabelliste

Tabell 2.1: En oppsummering av konstanter for å definere elastisk egenskap for trematerialer.	19
Tabell 2.2: Poissons tall og tilsvarende flate	21
Tabell 3.1: Oversikt over elastiske materialegenskaper i den tredimensjonale modellen.....	36
Tabell 3.2: Nødvendige parametere for å definere plastiske egenskaper for LVL-bjelken.....	37
Tabell 3.3: Sann spenning og tøyning for å definere plastiske materialegenskaper til aluminiumbjelken.....	38
Tabell 3.4: Relevante parametere brukt for å definere plastiske egenskaper til stål.	38
Tabell 3.5: Endring i tykkelsen til LVL-bjelken.....	47
Tabell 3.6: Økning og redusering av boltantall.	48
Tabell 3.7: Ulike tykkelser av steg på aluminiumbjelke vurdert i parametrisk studie 3.	48
Tabell 4.1: Resultat fra eksperiment vs. numerisk analyse i Ansys (FKN = 10).....	50
Tabell 4.2: Resultat fra eksperiment vs. numerisk analyse i Ansys (FKN = 1).....	51
Tabell 4.3: Resultat for når tykkelse av LVL-bjelken endres.	54
Tabell 4.4: Resultater når antall bolter endres.	56
Tabell 4.5: Resultater når tykkelsen på steget endres.....	57

1 Innledning:

1.1 Bakgrunn

Utvikling mot et mer bærekraftig samfunn er avhengig av hvordan eksisterende ressurser blir behandlet og benyttet (Sverdrup, 2019). Det er viktig å bruke tilgjengelige ressurser på en optimal og miljøvennlig måte. Ved å bruke hybridelement, der elementene består av flere materialer, kan det åpne opp for nye muligheter enn det som har vært med tradisjonelle materialer alene. Hybridbjelken er et type hybridelement som er konstruert av ulike materialer og kombinerer fordeler av hvert materiale, for å oppnå bedre ytelser og funksjonalitet (Tsalkatidis et al., 2018).

Hybridbjelken av aluminiumlegering og LVL (Laminated Veneer Lumber) er et relativt nytt konstruksjonselement i forhold til tre-stål-hybridbjelke og tre-betong-hybridbjelke. Det finnes flere fordeler ved å bruke aluminiumlegering i konstruksjonsprosjekter, inkludert lav vekt, rustfrihet og relativt høy styrke (Pedersen & Allkunne, 2023). LVL har også mange gode egenskaper som høy bærende evne, lav miljøbelastning og god formstabilitet (Kamke, 2004). Ved å kombinere disse fordelene fra de to materialene kan det bidra til et sterkt, lett og stabilt konstruksjonselement.

Strengere klimamål gjør at mindre klimagassutslipp er nødvendig. Importering av byggevarer utgjør en del av klimagassutslipp (Hauge, 2021). Norge er en av de største produsentene av aluminium i Europa. Ved å utnytte denne ressursen mer aktivt, istedenfor å importere, kan dette bidra til lavere klimagassutslipp. Derfor kan lett tilgjengelighet av aluminium kombinert med LVL være en bærekraftig løsning og en god erstatning for mange byggematerialer som er mindre miljøvennlig, for eksempel betong (Bruno et al., 2019). Av den grunn er det interessant å studere hybridbjelken som består av LVL og aluminiumlegering.

En betydelig innsikt i hvordan materialene vil oppføre seg i ulike situasjoner kan oppnås ved å bygge en numerisk modell med elementmetoden og parametriske studier. Mekanismen for å gjøre analyser ved elementmetoden er å dele opp store og komplekse geometrier og materialkombinasjoner som ikke er lett å undersøke eksperimentelt, til små og løsbare elementer (Bell & Meyer, 2022). I forhold til tradisjonelle eksperimenter gir modeller bygd på elementmetoden muligheten til å gjenta det samme forsøket flere ganger uten høye kostnader.

Det kan bidra til å utvikle bedre og mer effektive materialer og samtidig optimaliserer bruk av materialet.

1.2 Formål

Denne oppgaven analyserer hybridbjelken som består av aluminiumlegering og LVL, ved hjelp av FEM-modelleringsprogramvaren, Ansys Mechanical APDL 2022 R1, som benytter elementmetoden. Formålet er å få mer kunnskap om materialegenskapene til LVL og aluminiumlegering. I tillegg til å få en dypere forståelse i opptredenen av hybridbjelken som er boltforbundet ved hjelp av numeriske analyser.

Hybridbjelker kan være en bærekraftig løsning som er i stand til å erstatte byggematerialer som har mer miljøbelastning. For at hybridbjelkene kan være i bruk, er det viktig å bli kjent med de mekaniske egenskapene og hvordan de reagerer under ulike forhold. Mer kjennskap til bjelkene bidrar til høyest mulig benyttelsesgrad av materialeressursene. Det er flere fordeler med å studere de mekaniske egenskapene ved hjelp av FEM-modelleringsprogramvaren som Ansys Mechanical APDL. På den ene siden vil det spare mye materialer som må bortkastes etter eksperimenter, på den andre siden vil det forenkle beregningsprosessen og gi visuelle resultater som konturplotter.

I denne oppgaven skal en tredimensjonal modell bygges i Ansys, og verifiseres ved å sammenligne resultatene til prøvebjelker som utsettes for en bøyetest (bending test). Modellen skal gi nøyaktige resultater slik at den kan brukes til parametriske studier og gjenbrukes til videre arbeid. Resultatene blir presentert og organisert i form av tabeller og grafer. Ekstra relevant informasjon som ikke er presentert i resultatdelen er lagt i vedlegg.

1.3 Problemstilling

Denne oppgaven skal analysere hvordan stivheten til hybridbjelken endrer seg når tykkelse på deler av hybridbjelken og boltantallet, endres. Analysen skal tolkes ved å svare følgende spørsmål:

- Gir den numeriske modellen en god simulering av hybridbjelken?

- Hvordan vil endring av tykkelser på deler av hybridbjelken påvirke ultimat nedbøyning i midten av hybridbjelken og glidning på enden av hybridbjelken?
- Hvordan vil endring av boltantall påvirke ultimat nedbøyning i midten av hybridbjelken og glidning på enden av hybridbjelken?

1.4 Begrensninger

Analysen gjort i oppgaven er kun numerisk og basert på en tredimensjonal modell bygd i Ansys og løst av elementmetoden. Nøyaktigheten på modellen er begrenset av Ansys Mechanical APDL 2022 R1 med skolelisens som tilbys til studenter for pedagogiske formål. Oppgaven er konsentrert til å undersøke oppførselen av hybridbjelken numerisk og modellen er verifisert mot resultater av prøvebjelken 1 under bøyetesten gjort av Chybiński og Polus (2021). Data brukt under modellering er hentet fra relevante akademisk kilder og artikkelen skrevet av Chybiński og Polus (2021). Tolkning av mekaniske egenskaper til hybridbjelken er basert på glidning mellom LVL-bjelken og aluminiumbjelken og nedbøyning i midten av hybridbjelken under ulike forhold.

2 Teori:

2.1 Materialer

2.1.1 Hybridbjelke

Når en konstruksjonsbjelke består av ulike materialer, er den bjelken en hybridbjelke. Formålet med en hybridbjelke er å utnytte de beste egenskapene til materialene for å oppnå styrke og stivhet etter behov (Naseri & Singh, 2021). Tre-stål- hybridbjelke er en vanlig type hybridbjelke hvor treverk har lav vekt og gir gode isolerende egenskaper, mens stål gir styrke og stivhet. Det er også vanlig å bruke tre-betong-hybridbjelker til byggeprosjekter på grunn av de samme prinsippene som tre-stål-hybridbjelken.

Hybrid-sandwichelement blir presentert i (Metsä Group, 2021) er et godt eksempel på hybrid konstruksjonselement som kombinerer LVL-panel og betongelement. Elementet består av betongelement, isolasjon og LVL-panel (figur 2.1). I stedet for betong, tar LVL over belastning og blir det bærende materialet i hybridelementet (Metsä Group, 2021). Fordelen med dette elementet er at det gir like mye bærende evne som veggen bygd med betong, men det gir mindre utslipp. Elementene kan prefabrikeres som også sparer mye tid på byggeplass.



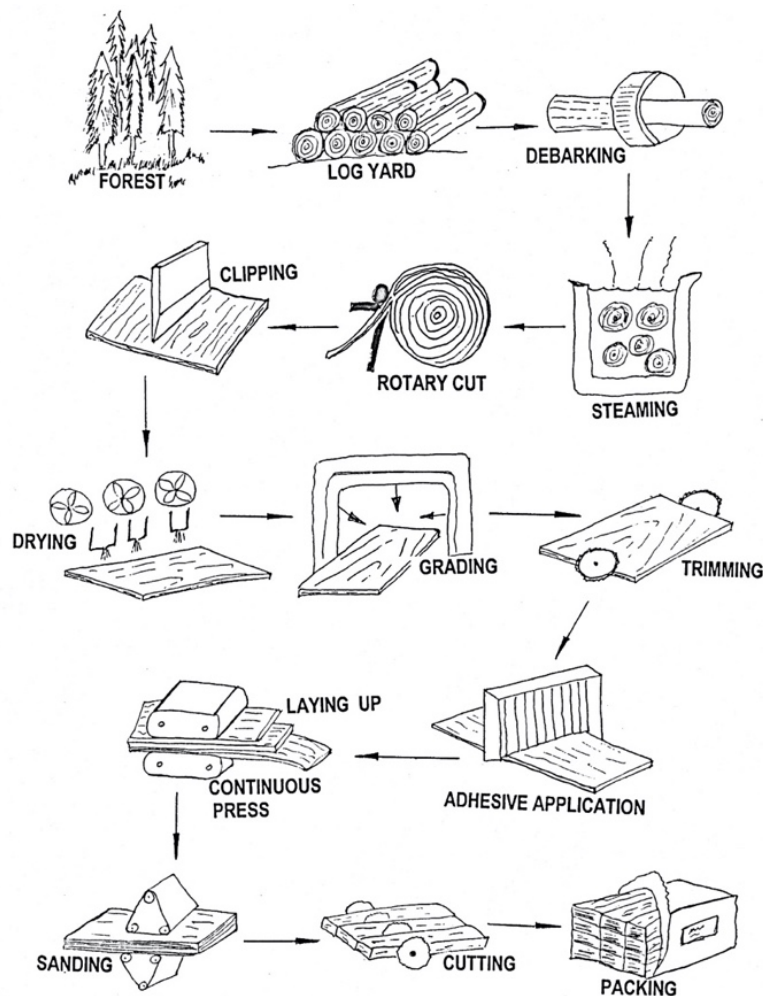
Figur 2.1: Hybrid-sandwichelementet av Metsä (Metsä Group, 2021).

Hybrid-sandwichelementet utviklet av Metsä Group (2021) blir for første gang brukt i prosjektet av Metsä Group (2022). Ifølge beskrivelsen tok det kun 5 timer for å installere elementene i første etasjen på et 100 kvadratmeter areal. Hybrid produkter, inkludert

hybridbjelker og hybridelementer sammen med tremateriale, vil være mer miljøvennlig på grunn av lite utslipp i forhold til andre produkter som har like bra bærendeegne. Dette bidrar til å stanse globaloppvarming og kan bli et mer bærekraftig alternativ for fremtiden (Moore, 2021).

2.1.2 LVL-bjelke

LVL er et trebasert konstruksjonselement som består av mange finerlag av tykkelsen 3 til 4 mm limt sammen (Solli & Glasø, 2021). Hovedhensikten med å opprette produkter som LVL, er å utnytte finerlagene optimalt ved å fordele virkesfeil jevnt over hele produktet. På denne måten kan bjelken oppføre seg som et homogent materiale med relativ konstante fasthetsegenskaper og stivhetsegenskaper. I forhold til kryssfiner som også er et trebasert konstruksjonselement bestående av limt finerlag, ligner materialegenskapen til LVL mer på solidtrevirke (Hiziroglu, 2016). Figur 2.2 viser prosessen for å produsere LVL steg for steg.



Figur 2.2: Produksjonsprosess for LVL (Hiziroglu, 2016).

Det finnes ulike bruksområder for LVL. I tillegg kan de også konstrueres på ulike måter. LVL-bjelker kan bli konstruert ved at finerlagene blir limt sammen langs fiberretning, men det finnes også bjelker med enkelte finerlag limt på tvers, slik at langsgående bøyefasthet og stivhet til bjelken forbedres (SINTEF, 2004). Figur 2.3 viser et eksempel av en type LVL-bjelke som har finerlagene limt langs fiberretning.



Figur 2.3: Et eksempel på LVL-bjelke limt langs fiberretning (STEICO, u.å).

Mange produsenter i hele verden leverer LVL-bjelker (se for eksempel STEICO (u.å) og UNILIN PANELS (u.å)). De leverer mange ulike trebasert konstruksjonsprodukter til store deler av verden. Keto-S er en LVL-bjelke som brukes i Norge og har fått SINTEF godkjenning. Både styrken og dimensjon av Keto-S ligner på produktet LVL-R som blir studert i oppgaven. De består av mange finerlag limt langs fiberretningen og kan brukes som for eksempel gulvbjelke, taksperre, bunnsvill, toppsvill og ikke minst bjelkeforsterkning.

2.1.3 Aluminium og aluminiumlegering

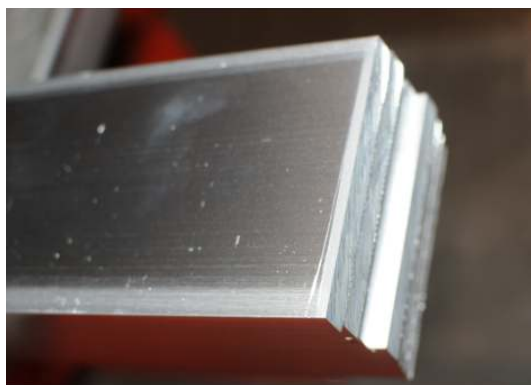
Aluminium er et lettmetall som kan lett formes og omarbeides under strekk, trykk, pressing, rulling (Pedersen & Allkunne, 2023). Det er et type metal som kommer fra råmaterialet bauksitt. Bauksitt inneholder Alumina som danner primæraluminium ved å fjerne oksygen gjennom elektrolyse. (Hydro, 2019)

I forhold til stål har aluminium ikke like god styrke, men ved legering med andre metaller, kan styrken forbedres signifikant (Chybiński & Polus, 2019). En gunstig egenskap hos aluminium og aluminiumlegering er at de har en relativ lav egenvekt, noe som kan være én mer bærekraftig løsning sammenlignet med bruk av andre metall typer. For eksempel kan stål erstattes med aluminium i produkter som biler, resulterer i nedsatt drivstoff bruk. En annen fordel med

materialet er at det ikke ruster og dermed krever mindre vedlikehold enn mange andre metaller. Metallet korroderer ikke i lufta på grunn av den tynne og sammenhengende oksidfilm på overflate, noe som gjør det motstandsdyktig mot oksidasjon (Pedersen & Allkunne, 2023).

Aluminium og aluminiumlegeringer blir mye brukt til kjøretøy, bygninger og emballasje (Hofstad, 2021; Norsk Industri, u.å). Norge har rik ressurs av aluminium og er den største produsenten av primæraluminium i Europa. En fjerdedel av aluminiumproduksjon fra Europa er eksportert fra Norge og fire prosent av verdensproduksjonen av aluminium er fra norske produsenter (Norsk Industri, u.å). Dagens situasjon krever strengere klimamål og tiltak for å unngå unødvendig klimagassutslipp. Import av byggevarer utgjør en del av klimagassutslippet (Hauge, 2021). Å utnytte ressursene som er lett tilgjengelig vil spare både tiden og kostnaden som importeringen krevet, i tillegg til at det bidra til mindre CO₂ utslipp. Med andre ord kan aktiv bruk av aluminiumproduksjon i Norge være en framtidig og bærekraftig løsning.

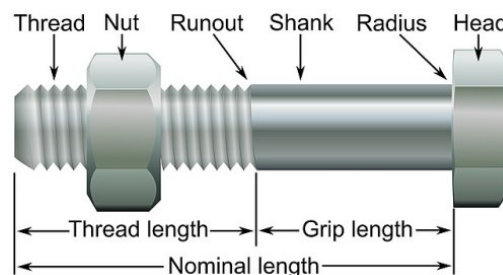
Som nevnt tidligere er aluminiumbjelken som er brukt til å bygge hybridbjelken og som er studert i denne oppgaven, AW6060-T6. Den er en type aluminiumlegering under legeringsserien – 6000. Attpåtil har bjelken en legering med medium styrke. T6 tyder på at styrken av dette materialet er oppnådd ved hjelp av varmebehandling, avkjøling og kunstig aldret (Chybiński et al., 2019). Materialet har høy fleksibilitet og kan forme kompliserte seksjoner under ekstrudering uten høye kostnader (Reinhold, 2008). Som et eksempel er aluminiumbjelken som blir studert i oppgaven I-profil et mer krevende profil i forhold til profilen til skinner. Figur 2.4 viser AW6060 T6 i form av aluminiumskinner.



Figur 2.4: Aluminiumskinner laget av AW6060 T6 (Norsk Stål, 2022).

2.1.4 Bolteforbindelse

Bolter eller skruebolter er en type forbindelse for å holde to eller flere elementer sammen (ClubTechnical, 2019). De består av et hode og en kropp. Hodet er ofte rundt, firkantet eller sekskantet. Kroppen består av skaft og gjenger. Det er vanlig å bruke mutter og underlagsskiver sammen med boltene. Figur 2.5 viser de ulike delene av boltene består av.



Figur 2.5: En illustrasjon av de ulike delene bolter består av (ClubTechnical, 2019).

Bolter kan brukes hvis demontering eller gjenmontering er nødvendig. Etter bolteforbindelse er valgt, må det være nok plass til bolthoder, muttere og til skiftenøkkel som brukes under monteringsprosessen. Bolter blir mye brukt til å feste sammen bjelker, flenser, plater som er laget av både metaller og tremateriale. (ClubTechnical, 2019)

Bolter klassifiseres med diameter av gjenger, fasthetsklasser, bruddgrense og flytegrense. (Standard Norge, 2005a) For eksempel en M12 4.6 bolte har en skaftdiameter på 12 mm. Det første nummeret forteller om at bruddgrensen til denne bolten er 400 megapascal og det andre nummeret betyr at flytegrensen til denne bolten er 60% av bruddgrensen, som i dette tilfellet er 240 megapascal. Formel 2.1 og formel 2.2 viser hvordan bruddgrense og flytegrense beregnes ut ifra klassifisering av M12 4.6 bolt (Standard Norge, 2005a).

$$\text{Bruddgrense: } 4 * 100 = 400 \text{ (Mpa)} \quad (2.1)$$

$$\text{Flytegrense: } 400 * 60\% = 240 \text{ (Mpa)} \quad (2.2)$$

2.2 Elementmetode (FEM)

Elementmetoden (FEM) er mye brukt til å gjøre styrkeberegning for ramme-type konstruksjoner som to- og tredimensjonale problemer (Bell & Meyer, 2022). Hovedprinsippet er å dele det store og ukjente systemet til små elementer, slik at det ukjente systemet kan utforskes ut ifra hvordan de små elementene som systemet består av, responderer. Elementene er enten trekantformede eller firkantformede. I tillegg har de en løsning som er enten kjent eller kan anslås. Ved hjelp av elementene kan det ukjente systemet løses analytisk under enkle randbetingelser.

Geometrien til det ukjente systemet er definert av mange knutepunkter (nodes). Knutepunktene har mange variabler som er kontrollert av faktorer utenfor systemet, som for eksempel sammensetninger, temperatur og trykk (Ansys Inc., 2022a). De kan varieres etter behov. Knutepunktene er hengt sammen av elementene som definerer mekaniske frihetsgrader (Thompson & Thompson, 2017). Mer om mekanisk frihetsgrader er forklart i delkapittel 2.4.5.

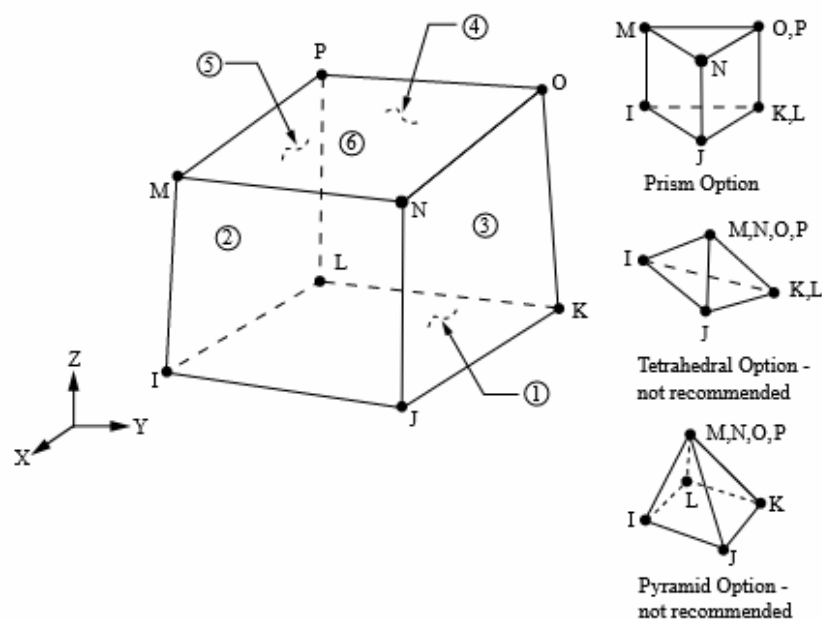
Elementmetode er en praktisk metode som kan brukes til å løse kompliserte analytiske problemer uten høye bekostninger eller tid, i forhold til tradisjonelle håndberegning (Thompson & Thompson, 2017). Metoden gir også mer fleksibilitet av endringer i forhold til håndberegning. Mange programmer kan benyttes for å gjøre numeriske analyser med elementmetode og Ansys er en av de alternativene.

2.3 Elementtype

Elementtype og materialegenskap er viktige parametere som ofte defineres i begynnelsen av modellbygging. Ansys har opprettet et eget bibliotek for de ulike elementene som kan utnyttes ved å gjøre en numerisk analyse. Elementene er identifisert av et navn basert på åtte tegn, inkludert gruppeetikett og identifiseringsnummer. Elementtypen SOLID185 er et eksempel som har navnet i åtte tegn hvor gruppeetikett er SOLID og identifiseringsnummeret er 185 (Ansys Inc., 2022b).

2.3.1 SOLID185:

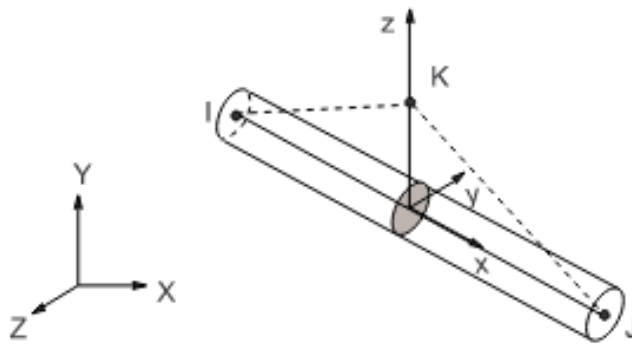
Elementtypen - SOLID185 er brukt for å modellere en tredimensjonal solidstruktur (Ansys Inc., 2022b). Den kan brukes til å simulere legemer i form av homogent solidelement definert med ortotrope materialegenskaper. Ut ifra definisjonen i (Ansys Inc., 2022b) skal SOLID185 inneholde åtte knutepunkter med tre frihetsgrader. Den kan være i form av kube, prisme, tetraedre eller pyramide. Reelle konstanter er konstanter som definerer spesielle egenskaper for en spesifikk elementtype. For SOLID185 kreves ingen reelle konstanter. Figur 2.6 viser mulige geometrier SOLID185 kan ha og tilsvarende plasseringer av knutepunkter.



Figur 2.6: Plassering av knutepunkter og mulig geometri for elementtypen SOLID185. (Ansys Inc., 2022)

2.3.2 BEAM188

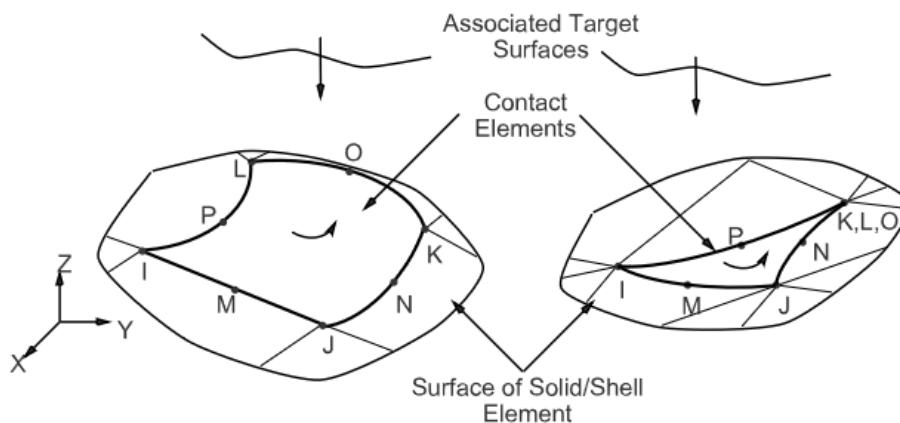
Denne elementtypen er til for å simulere tredimensjonalt bjelkeelementer som har tynn til moderat struktur med to knutepunkter. Hvert knutepunkt har 6 til 7 frihetsgrader og kan bevege seg i og rotere om x, y, og z-aksene. De fleste elastisk, plastisk og ikke-lineære modellene kan definere materialegenskaper for BEAM188. Tverrsnittet kan defineres ved å bygge en seksjonstype. Figur 2.7 viser geometrien av BEAM188.



Figur 2.7: Geometrien av BEAM188 (Ansys Inc., 2022e).

2.3.3 CONTA174

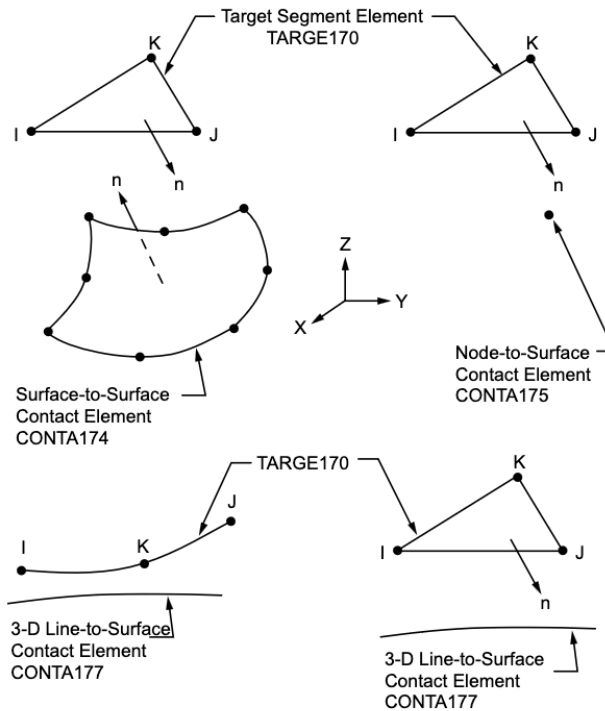
Når det oppstår en kontakt mellom to overflater, er det elementet som ligger på et annet element, kontaktelement (contact element). Elementet som kontaktelementet ligger på eller har kontakt med er da målelementet. Kontaktelementet - CONTA174 brukes i en overflate mot overflate kontakt (Ansys Inc., 2022b). Kontaktelementet beskriver både kontakten og glidning mellom en tredimensjonal måloverflate. Les mer om kontakt i delkapittel 2.6. Kontaktelementet kan brukes for både solidelementer og skallelementer (shell element). CONTA174 er definert av 8 knutepunkter, men kan også omformes til 6 knutepunkter avhengig av utforming av målelementet den ligger på. Plassering av knutepunktene er også avhengig av målelementene de ligger på. I et kontaktpar (contact pair) vil målelementen være TARGE170. Les mer om TARGE170 på delkapittel 2.3.4 og mer om kontakt i delkapittel 2.6. Figur 2.8 viser geometrien for CONTA174.



Figur 2.8: Geometrien til CONTA174. (Ansys Inc., 2022e)

2.3.4 TARGE170

Målelementet som er i kontakt med kontaktelementtype CONTA174 er TARGE170. Den beskriver den tredimensjonale måloverflaten som henger sammen med kontaktelementer, samtidig som den definerer måloverflaten og beskriver randbetingelser for et deformerbart legeme. Figur 2.9 viser geometrier til TARGE170 når den er i kontakt med ulike kontaktelementer.



Figur 2.9: Geometrien til TARGE170. (Ansys Inc., 2022b)

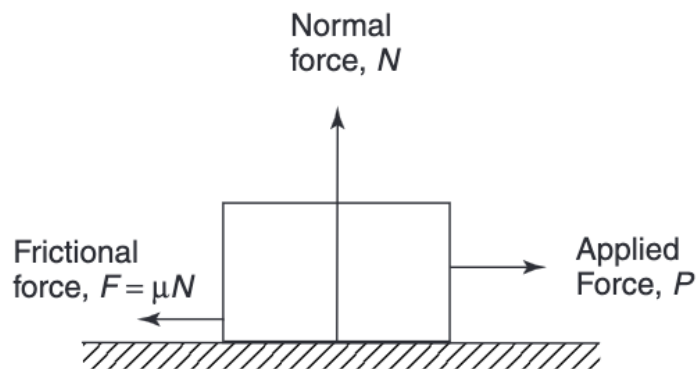
2.4 Materialegenskaper

Materialegenskap handler om kjemiske, fysiske og mekaniske egenskaper et materiale har. De egenskapene bestemmer hvordan materialene ser ut, hva det kan brukes til og hvorfor de oppfører seg som de gjør under ulike sammensetninger (Ashby et al., 2013). Densitet, elastisitetsmodul, Poissons tall er parametere som definerer egenskaper til materialene. I dette delkapittelet skal relevante parametere for den tredimensjonale modellen beskrives.

2.4.1 Friksjonskoeffisient

Friksjonskoeffisient - μ er et mål på friksjon mellom to overflater. Det er et forholdstall mellom normalkraft og friksjonskraft som formel 2.3 viser (Zhang, 2016). Retninger av kreftene i formel 2.3 er vist i figur 2.10. Siden det er et forholdstall, er det ingen dimensjon eller SI-enhet.

$$\mu = \frac{\text{Friksjonskraft (F)}}{\text{Normalkraft (N)}} \quad (2.3)$$



Figur 2.10: Retninger til kreftene i formel 2.3 (Bird, 2001).

Friksjonskraften kan derfor beregnes ved å notere fra formel 2.3 til formel 2.4.

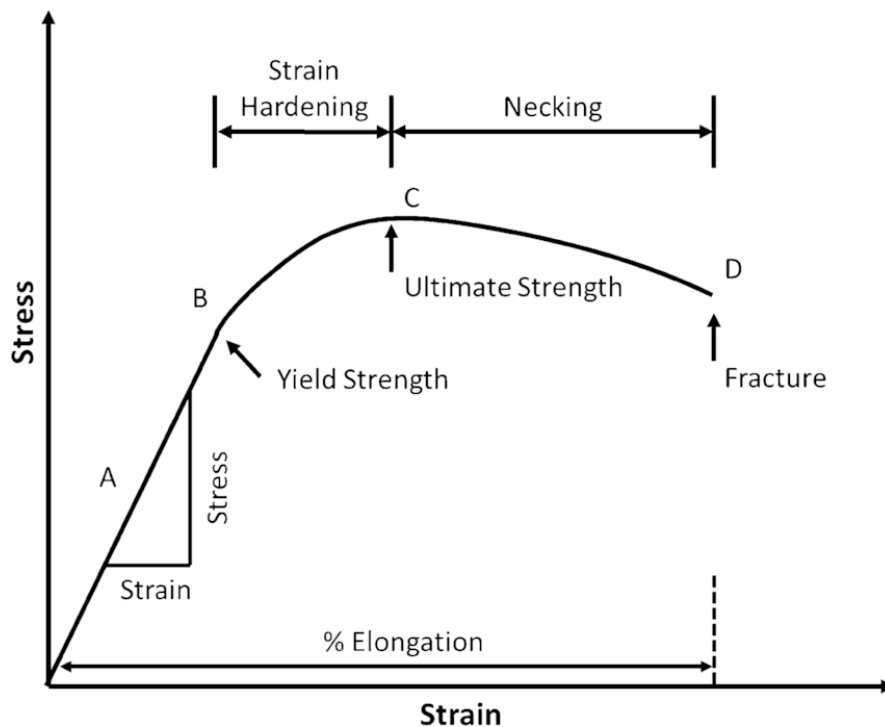
$$F = \mu * N \quad (2.4)$$

En liten friksjonskoeffisient tyder på lite friksjon mellom to overflater i kontakt (Bird, 2001). Friksjonskraften er både påvirket av grovheten til overflatene og vinkelen mellom kraften og overflaten som er i kontakt og retningen. Friksjonskraften har alltid motsatt retning som bevegelsesretningen.

2.4.2 Elastisk og plastisk deformasjon

Elastisitetsmodul bestemmer stivheten til et elastisk materiale (Callister & Rethwisch, 2020). Et lineært elastisk materiale vil alltid komme tilbake til den opprinnelige formen etter avlastning. Når påførte laster og tøying har lineært forhold, vil det forholdstallet være elastisitetsmodul.

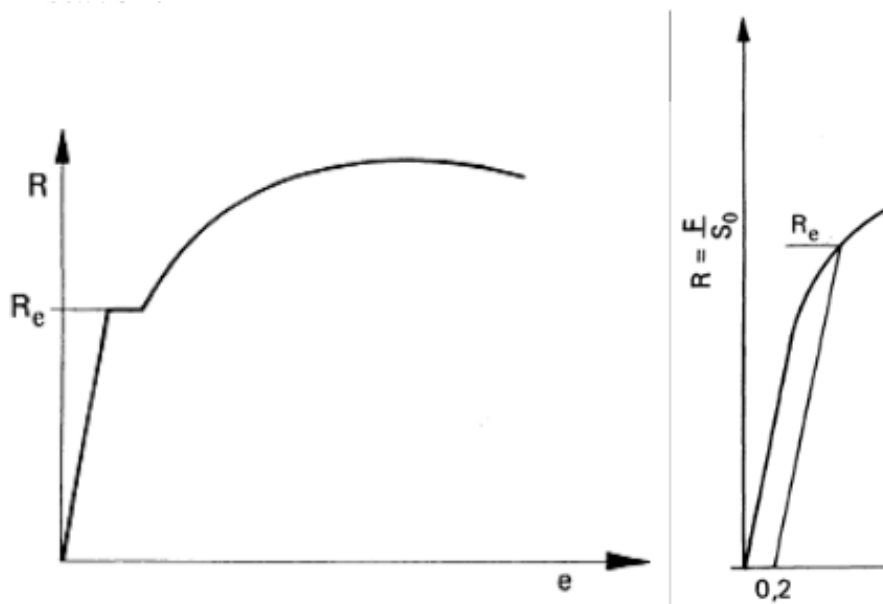
De fleste metaller kan deformeres både elastisk og plastisk. Flytegrensen (yield strength) er en overgang mellom elastisk deformasjon og plastisk deformasjon. Når flytegrensen er oppnådd, vil metaller bli plastisk deformert. Ergo, deler av metallet kan ikke komme tilbake til den opprinnelige formen etter avlastning. Videre pålastning vil til slutt føre til fullstendig brudd. Figur 2.11 viser et eksempel av spenning og tøyningsdiagram til et duktilt materiale.



Figur 2.11: Et eksempel på spenning og tøyningskurv (Lim & Hoag, 2013).

Det er ikke alltid lett å finne flytegrensen til materialer. Materialer som er sprø eller mindre duktil, er det lettere å finne flytegrensen. De har ofte en tydelig avslutning av den elastiske fasen som vist i figur 2.11. Derimot kan det være vanskeligere å bestemme flytegrensen for andre materialer som aluminiumlegeringer (Lohne, 2020). I mange tilfeller kan overgangen fra elastisk til plastisk fasen være mye mindre lesbar som vist i figur 2.11. Flytegrensen kan dermed defineres ved å lage en hjelpelinje parallelt med elastiske fasen fra punktet der tøying er 0,2 prosent. Den venstre grafen i figur 2.12 viser et materiale som har tydelig flytegrense (R_e) og

den høyre grafen viser hvordan flytegrensen kan defineres hvis det er vanskelig å bestemme flytegrensen direkte.



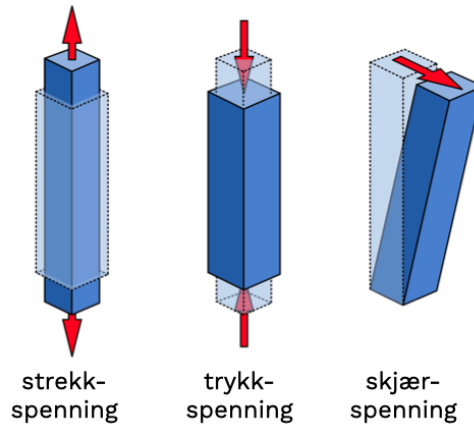
Figur 2.12: Eksempler på materialer som har tydelig flytegrense og definisjon av flytegrense for materialer som ikke har tydelig flytegrense (Johansen, 2010).

Spenning (σ) er et mål på kraften per arealenheter (formel 2.5). SI-enheter for å definere spenninger er newton per kubikkmeter [N/m^2] eller pascal [Pa] (SINTEF, 2010). Ifølge Hooks loven kan spenninger uttrykkes som formel 2.6 (Hibbeler, 2018).

$$\text{Spenning } (\sigma) = \frac{\text{Kraften}(F)}{\text{Tversnittareal } (A_0)} \quad (2.5)$$

$$\text{Spenning } (\sigma) = \text{Elastisitetsmodul } (E) * \text{Tøyning } (e) \quad (2.6)$$

Strekk- og trykkspenning vist i figur 2.13 er normalspenninger hvor kraften virker vinkelrett på arealenheten. Skjærspenning (τ) er definert når skjærkraft (V) virker parallelt med arealenheten (A) og den oppstår ofte inni legemet som er belastet, se formel 2.7 (Hofstad, 2022). Ifølge Hooks lov kan skjærspenning uttrykkes med skjærmodul (G) og skjærtøyning (γ) (formel 2.8).

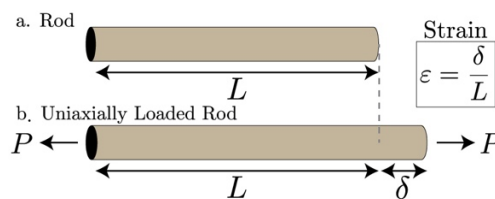


Figur 2.13: Tre spenningstyper (Hofstad, 2023).

$$\text{Skjærspenning } (\tau) = \frac{\text{Skjærkraft } (V)}{\text{Areal } (A)} \quad (2.7)$$

$$\text{Skjærspenning } (\tau) = \text{Skjærmodul } (G) * \text{Skjærtøyning } (\gamma) \quad (2.8)$$

Når et legeme er belastet, vil forholdstallet mellom deformasjonen og den opprinnelige formen være tøyning - ϵ (Callister & Rethwisch, 2020). Figur 2.14 viser et legeme som er belastet av strekk. Både forlengelsen δ og den opprinnelige lengden L har SI-enheten – meter (m). Derfor er tøyning, som er forholdstallet, dimensjonsløst (formel 2.9).



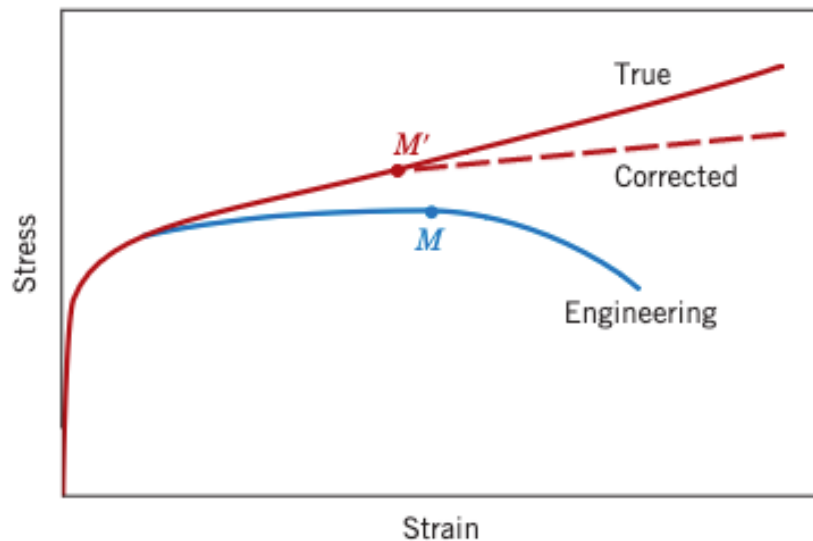
Figur 2.14: Forlengelser under strekk (Engineering).

$$\text{Tøyning } (\epsilon) = \frac{\text{Forlengelse } (\delta)}{\text{Opprinnelig lengde } (L)} \quad (2.9)$$

Det er en forskjell mellom konvensjonell spenning og tøyning, og sann spenning og tøyning (Johansen, 2010). Den konvensjonell tøyning er basert på den opprinnelig lengde (formel 2.9) og konvensjonell spenning er basert på det opprinnelige tversnittarealet. Derimot tar den sanne

spenningen hensyn til innsnevring, som fører til at tverrsnittarealet (A_ϵ) brukt for å beregne sann spenningen, er ofte mindre enn tverrsnittet (A_0) som er brukt for konvensjonell spenning. Sann spenning kan derfor uttrykkes som formel 2.10 viser:

$$\text{Spenning } (\sigma_\epsilon) = \frac{\text{Kraften}(F)}{\text{Tverrsnittareal } (A_\epsilon)} \quad (2.10)$$



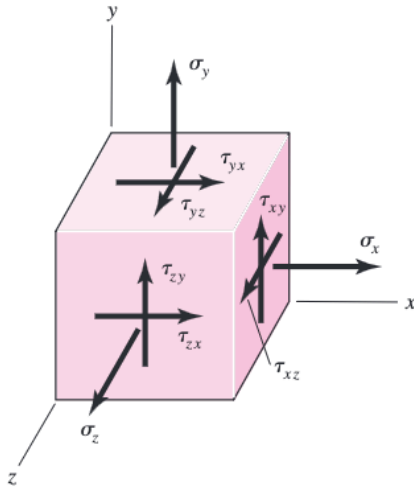
Figur 2.15: Sammenligning av konvensjonell og sann spenning-tøyingskurv (Callister & Rethwisch, 2020).

I en tredimensjonal sammenheng kan Hooks loven utvides i tre akser. Indeksering av spenninger vil orienterer seg langs koordinataksene på en spenningsflate som figur 2.16 viser (Budynas & Nisbett, 2006). Den første indeksen gir retningen på normalen av snittflate som står vinkelrett på snittflaten. Den andre indeksen peker på spenningsretning. Isteden for å beholde begge indeksene på normalspenninger, kan det ofte forkortes som formel 2.11. For en fullstendig oversikt over spenningstilstand, kreves det 9 spenningskomponenter: σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{zy} , τ_{zx} . I de fleste likevektberegninger er skjærspenninger på samme planet, men er motsatt rettet like, som for eksempel τ_{xy} og τ_{yx} vist i figur 2.16 og formel 2.12. På denne måten kan 9 spenningskomponenter forkortes til 6 spenningskomponenter: σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} og τ_{xz} .

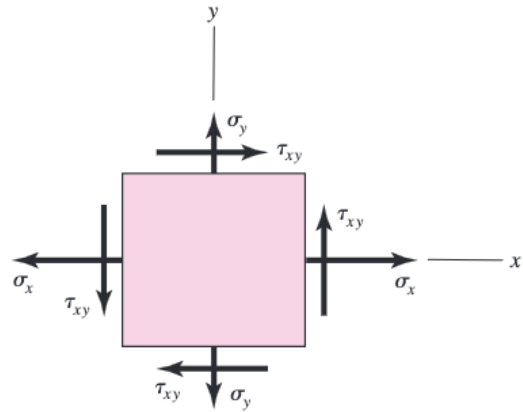
$$\sigma_{xx} = \sigma_x$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_y \quad (2.11)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z$$



Figur 2.16 a): Spenninger på spenningsflater (Budynas & Nisbett, 2006).



Figur 2.16 b): Spenninger i plan (Budynas & Nisbett, 2006).

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}$$

$$(2.12)$$

Dermed kan den tredimensjonale tilstand mellom spenning og tøyning uttrykkes som formel 2.13.

$$\{\sigma\} = [E] * \{\varepsilon\} \quad (2.13)$$

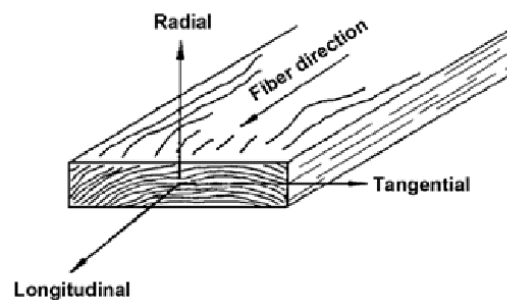
Hvor

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad [E] = \begin{bmatrix} E_{11}, E_{12}, \dots, E_{16} \\ E_{21}, E_{22}, \dots, E_{26} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ E_{61}, E_{62}, \dots, E_{66} \end{bmatrix}$$

2.4.3 Ortotrop, isotropt og anisotrop materiale

Materialeegenskaper kan variere med retninger i materialet. Materialsymmetri har en stor betydning for beregning av spenninger og deformasjon (Cowin & Doty, 2007). Et materiale uten symmetri, men materialeegenskapene er retningsavhengig, er det definert som et anisotrop materiale. Hvis materialeegenskapene ikke er retningsavhengig og har heller ikke en orientering av symmetriplan, er materialet isotropt.

Tremateriale er et anisotrop materiale. Ved mekaniske og numerisk analyser blir det ofte beskrevet som et ortotrop elastisk materiale (Kim & Harries, 2010). Et materiale som har ortotrope materialeegenskaper betyr at materialet har ulike og uavhengige mekaniske egenskaper i tre akser, som står vinkelrett på hverandre: longitudinale, radiale og tangentielle akser (Forest Products Laboratory, 2010). Aksen langs fiberretning er definert som longitudinal akse; radial aksens står vinkelrett på årringer og tangential retning er den som tangerer årringene. Figure 2.17 viser alle aksene i forhold til fiberretning og årringer. For å beskrive elastisk egenskap til et ortotrop materiale, må tolv konstanter defineres hvor ni av dem er uavhengige. Disse konstantene er inkludert tre elastisitetsmoduler (E) i tre aksene, skjærmoduler (τ) i tre symmetriplan og seks Poissons tall (ν) hvor tre av de er uavhengige, se tabell 2.1. Les mer om elastisitetsmodul og skjærmoduler i delkapittel 2.4.2 og om Poissons tall i delkapittel 2.4.4.



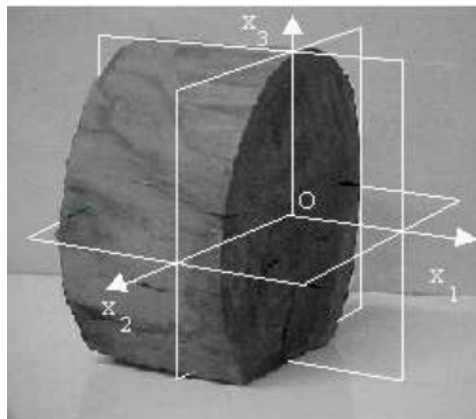
Figur 2.17: Tre akser i et ortotropisk materiale som står vinkelrett på hverandre (Ross, 2021).

Tabell 2.1: En oppsummering av konstanter for å definere elastisk egenskap for trematerialer.

Elastisitetsmoduler [MPa]	Skjærmoduler [MPa]	Poissons tall [Ingen SI-enhet]	
E_x	τ_{xy}	ν_{xy}	ν_{yx}

E_y	τ_{yz}	V_{yz}	V_{zy}
E_z	τ_{xz}	V_{xz}	V_{zx}

Et materiale som tremateriale har ortotrop materiallegenskaper med tre symmetriplan (figur 2.18). Når trevirket er utsatt for spenning, oppstår det tre normalspenninger parallelt med de tre aksene og seks skjærspenninger, som tilsvarer tre normaldeformasjoner og seks skjærdeformasjoner (figur 2.16).



Figur 2.18: Trestokk med tre symmetriplan (Alves et al., 2015).

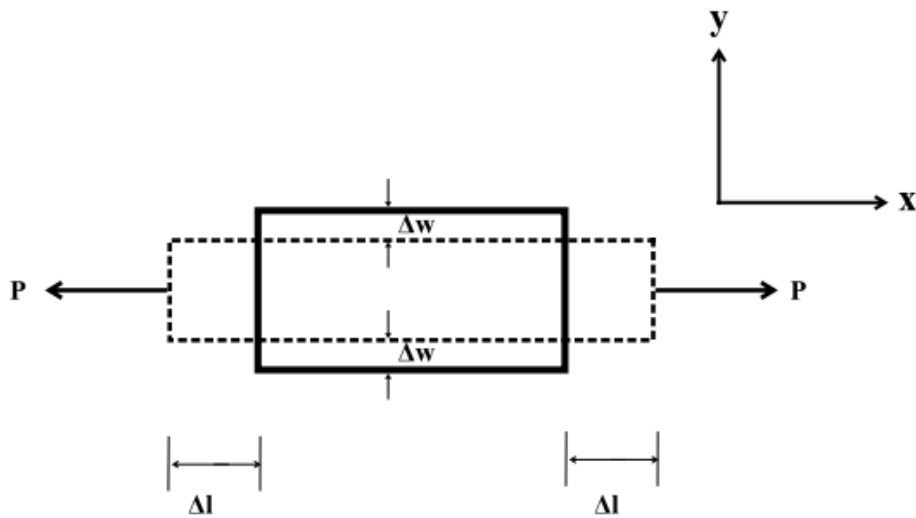
I de fleste tilfeller vil elastisitetsmodulen være størst i lengderetning, mindre i radialretning og minst i tangentiell retning (formel 2.14) (Bodig & Jayne, 1993). Det skyldes av cellene kan utstrekke seg lengst i lengderetningen enn de andre retningene.

$$E_L \gg E_R > E_T \quad (2.14)$$

2.4.4 Poissons tall

Det er to typer deformasjoner: normaldeformasjoner og skjærdeformasjoner, som er forårsaket av normalspenninger og skjærspenninger. Normaldeformasjoner oppstår på samme retning som påførte belaster, mens skjærdeformasjoner oppstår tvers på påførte belaster. Hvis en trestokk er utsatt for strekk, vil det oppstå en forlengelse langs strekkretning, samtidig vil den komprimeres vinkelrett på strekkretning. Forlengelsen er en type normaldeformasjon (Δl) og komprimering er skjærdeformasjon (Δw). Forholdet mellom normaldeformasjoner og den skjærdeformasjoner

er definert som Poissons tall (ν). Figur 2.19 viser forholdet mellom normaldeformasjon og skjærdeformasjon, hvor x er tverretning og y er normalretning.



Figur 2.19: En forklaringsfigur som forklarer normal deformasjon og skjærdeformasjon.

Et trevirke kan analyseres som en kloss med seks spenningsflater (figur 2.16). Når trevirke er utsatt for en spenning, vil hver av flatene danne et Poissons tall som viser forholdet mellom den normal- og skjæredeformasjonen. Poissons tallet antar at indeksen - 1 tilsvarer tangentiell retning, indeksen - 2 tilsvarer lengderetning og indeksen - 3 tilsvarer radiell retning. Ved å kombinere 2 akser om gangen danner det til sammen 6 ulike kombinasjoner. Det vil si at Poissons tall kan defineres som tabell 2.2 viser.

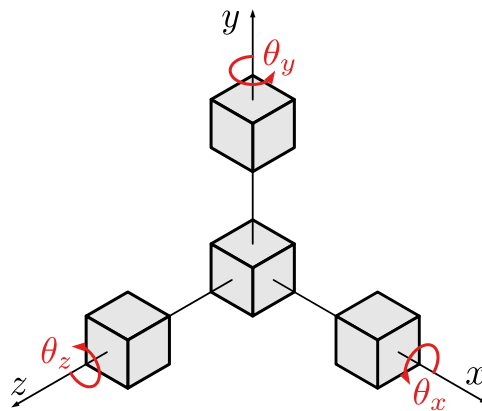
Tabell 2.2: Poissons tall og tilsvarende flate

Poissons tall (ν)	ν_{12}	ν_{31}	ν_{23}	ν_{21}	ν_{13}	ν_{32}
Tilsvarende flater (F)	$F_{T,L}$	$F_{R,T}$	$F_{L,R}$	$F_{L,T}$	$F_{T,R}$	$F_{R,L}$

Poissons tallet er alltid negativ fordi skjærdeformasjoner har alltid motsatt rettet som normaldeformasjoner.

2.4.5 Frihetsgrader

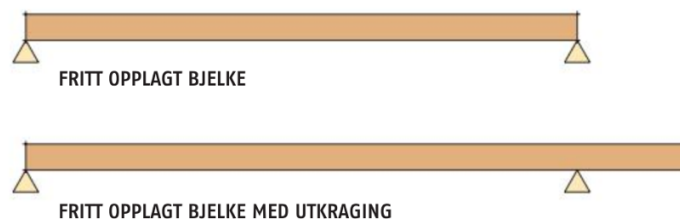
Frihetsgrader er uavhengige parametere som definerer tilstand til et system. I et mekanisk system kan frihetsgrader defineres for å begrense bevegelsesfrihet til systemet. I tredimensjonale problemer kan et solidelement bevege seg fram og tilbake i tre akser som står vinkelrett på hverandre. Elementet kan også rotere rundt de aksene hvis det ikke er begrenset av frihetsgrader. For dette objektet finnes det totalt seks frihetsgrader (Baker et al., 2023). Figur 2.20 viser frihetsgrader for et tredimensjonale solidelement. I statistisk verden kan solidelementet være for eksempel bjelker, plater, stendere osv. Opplagere til elementene kan begrense bevegelsesfriheter. Mer om opplagere er beskrevet i delkapittel 2.5.



Figur 2.20: Et tredimensjonale solidelement har seks frihetsgrader (Baker et al., 2023).

2.5 Fritt opplagt bjelke

Når en bjelke er fritt opplagt, menes det at det er et opplegg på hver ende av bjelken og som spenner fritt (Frøstrup, 2012). Når det er utkraging på en eller begge oppleggene, vil denne bjelken definert som en fritt opplagt bjelke med utkraging. Figur 2.21 viser en bjelke definert som fritt opplagt og en bjelke som er fritt opplagt med utkraging.

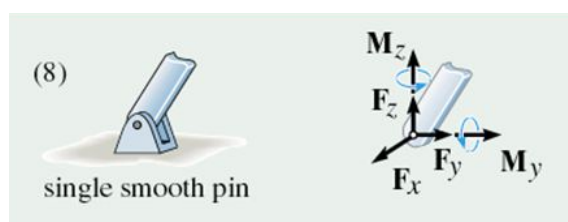


Figur 2.21: Et eksempel på fritt opplagt bjelke og fritt opplagt bjelke med utkraging (Frøstrup, 2012).

Når et legeme står i ro, vil den være i statisk likevekt. Med andre ord, resultatene til kreftene på legemet skal være lik null (Hibbeler, 2018). I den tredimensjonale sammenhengen vil det oppstå tre akser. For å være i statisk likevekt må summen av kreftene i x-retning, y-retning og z-retning være lik null, i tillegg til at summen av momentet rundt de tre retningene skal være lik null (formel 2.15).

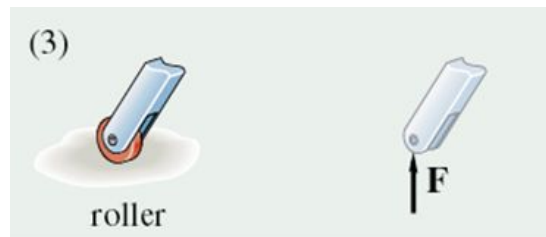
$$\begin{array}{ll}
 \Sigma F_x = 0 & \Sigma M_x = 0 \\
 \Sigma F_y = 0 & \Sigma M_y = 0 \\
 \Sigma F_z = 0 & \Sigma M_z = 0
 \end{array} \quad (2.15)$$

Bjelken som er lagt på et fastlager (pinned support) vil bli begrenset av bevegelse i x-, y- og z-retninger. Rotasjon om to av de retningene vil også begrense bjelken (Hibbeler, 2016). Som figur 2.22 viser, vil begrensning av rotasjoner i dette tilfellet være om z-aksen og y-aksen når bjelken er i statisk likevekt.



Figur 2.22: Tredimensjonale reaksjonskrefter og momenter på et fastlager (Hibbeler, 2016).

Når bjelken er lagt på et glidelager (roller support), er bevegelsen begrenset til å kun kunne bevege seg vinkelrett på overflaten glidelager står på (Hibbeler, 2016). Bjelken kan rotere fritt i alle retninger over et glidelager. Figur 2.23 viser et glidelager og fritt-legeme-diagram med reaksjonskraften som virker på glidelageret.



Figur 2.23: Tredimensjonale reaksjonskrefter på et glidelager (Hibbeler, 2016).

2.6 Kontakt

Det finnes hovedsakelig to typer kontaktproblem definert i Ansys: ubøyelig mot bøyelig (rigid – to – flexible) kontaktproblem og bøyelig mot bøyelig (flexible – to – flexible) kontaktproblem (Ansys Inc., 2022). Når målelementer har mye høyere stivhet enn kontaktelelementer, vil kontaktproblemet være bøyelig mot ubøyelig. Merk at målelementer er alltid de elementene som er ubøyelege under et bøyelig mot ubøyelig kontaktproblem. Derimot vil det være ubøyelig mot ubøyelig. Et ubøyelig mot ubøyelig kontaktproblem kan for eksempel havne mellom to bolteforbundet flenser.

Tre tilnærminger i Ansys for å definere samhandlinger mellom kontakter:

- «Pair-based contact definition»
- «General contact definition»
- «Node – to – node contact element»

Hvor «Pair-based contact definition» og «General contact definition» er mest brukt under kontaktanalyser.

Når kontakten mellom to elementer er definert som en parbasert kontakt, vil samhandling av kontakten være definert mellom kontaktoverflaten av kontaktelelementer og målloverflaten av målelementer. Elementtype for kontaktelelementer har gruppeetikken - CONTA og målelementer har gruppeetikken - TARGE. Kontaktelelementer under definisjon av parbasert kontakt kan være CONTA172, CONTA174, CONTA175 eller CONTA177 og målelementer kan være TARGE169 og TARGE170. Les mer om elementtyper i delkapittel 2.3.

Under definisjon av generell kontakt er generell kontaktoverflater definert. Kontaktelementer er liggende over utvendige overflater av et bøyelig element og målelementer er brukt til å dekke over ubøyelig elementer.

Å definere en kontakt som parbasert kontakt gir en mer effektiv og robust løsning enn en generell kontakt. Ved å definere kontakt som en generell kontakt vil mye av prosedyren bli automatisk definert. Den automatisk definerte prosedyren tilbyr en balanse mellom en forenklet definisjon av kontakt og en velfunksjonerende løsning.

2.6.1 Kontaktstivhet og penetrasjon

For å justere kontaktstivhet, kan man justere reelle konstanter - FKN, FTOLN. Reelle konstanten FKN definerer kontaktstivhets faktor i normal retning. Intervallet for denne konstanten er mellom 0,1 og 10. Standardverdien i ANSYS er 1,0. Reelle konstanten FTOLN er en toleranses faktor som påføres på overflater. Standardverdien av FTOLN er 0,1. Intervallet, derimot, er mindre enn 1,0 men er vanligvis mindre enn 0,2.

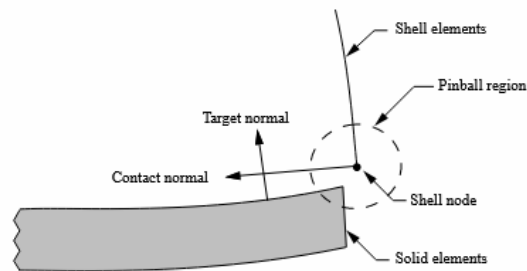
2.6.2 Kontakttyper

I Ansys Mechanical APDL 2022 R1, finnes det 6 typer av kontakt som kan defineres for ulike analyser etter behov:

- «Standard contact»
- «Rough»
- «No separation»
- «Bounded Contact»
- «No separation (always)»
- «Bounded Contact (always)»

Ved å definere en «Standard contact» vil et trykk i normalretning være lik null hvis det oppstår separasjon. En «Rough» kontakt er uavhengig av friksjon og ingen friksjonskoeffisient er nødvendig. Glidning er ikke tillatt, men separering i normalretning kan oppstå. Kontakttypen «No separation» tyder på at en separasjon i normalretningen ikke er tillatt, men glidning er det. Ved en «Bounded Contact» vil det ikke tillatte separasjoner i normalretning, heller ikke glidning. «No separation (always)» og «Bounded (always)» er ment for kontakter der knutepunktene er innenfor «pinball – region» eller har direkte kontakt mellom måloverflater og kontaktoverflater.

«Pinball – region» eller «pinball radius» er den maksimale avstanden mellom kontaktelement og målelementet. Størrelsen av «pinball -region» kan defineres selv, men utenfor denne avstanden, gjenkjenner ikke systemet at det er et kontaktforhold mellom kontaktelementer og målelementer (Ansys Inc., 2004). Figur 2.24 viser et eksempel på pinball region av kontakten mellom et skallelement (shell element) og et solidelement.



Figur 2.24: Et eksempel på «pinball region» (Ansys Inc., 2022).

2.7 Punktsveis

Isteden for å bygge bolter som solidelementer, er det mulig å simulere boltene som en grunnleggende sett av punktsveising (spot welding base set) (Super Pantsu, 2021). Denne metoden kan brukes for å simulere forbindelsen med punktsveising, bolter, festelementer eller lignede. Den kan ikke brukes for å utforske oppførselen av forbindelsen, men kan brukes til å studere et system som er bundet sammen med forbindelsesmetoder nevnt tidligere.

Punktsveis passer spesielt godt for situasjoner hvor forskningsobjekt er festet av store mengder festelementer og hvor festelementene ikke er hovedfokus under forskningen. Ved å bruke denne metoden kan det lett bygges store mengder av festelementer og endre forekomst av festearaler.

Boltene er simulert av koblede knutepunkter. Hver bolt er simulert av 2 knutepunkter koblet av kommandoen «SWGEM». Koblingen kan deretter definerer elementtypen for å simulere boltene, som elementtype BEAM188. Knutepunktene må defineres på overflatene der boltene klemmer, og avstand mellom knutepunktene bestemmer lengder av boltene. Variabler som må defineres for å bruke kommandoen «SWGEM» er blandet annet radius til simulerte bolter,

nummereringer av overflatene der boltene klemmer, nummereringer av knutepunktene som skal kobles og effektiv radius (Ansys Inc., 2022a).

2.8 Nedbøyning og glidning

Foreløpig er det ikke en Eurokode som standardiserer måten konstruksjoner av hybridelementer kan verifiseres. Likevel finnes Eurokode 5 (2005b) og Eurokode 9 (2007) som setter krav for nedbøyning og glidning. Eurokode 5 (2005b) setter alminnelige regler for prosjektering av trekonstruksjoner og Eurokode 9 (2007) setter krav om prosjektering av aluminiumkonstruksjoner. Disse eurokodene er ikke direkte relevante for denne oppgaven, men det gir en bedre forståelse av nedbøyning, glidning og materialegenskaper av tre og aluminium under prosjektering.

Grensetilstander begrenser definerer av om et konstruksjonselement er innenfor kravet som blir stilt etter behov (Forskr. om bærende konstruksjoner, 1984). Bruksgrensestilstand (SLS) setter en grense som sørger for funksjonelle konstruksjonselement. I tillegg til at det skal være bestandig under normal og jevnlig bruk. Dette er for å unngå uønsket deformasjon, riss og lignende skader. Dersom det er behov for å sette et krav til kapasiteten til hele konstruksjon, eller et konstruksjonselement ved brudd, eller store uelastisk deformasjoner, er bruddgrensestilstand (ULS) relevant.

Eurokode 5 (2005b) setter krav for nedbøyning ved både bruksgrensestilstand og bruddgrensetilstand. For å oppfylle kravet for bruddgrensetilstand, skal dimensjonerende bøyespenning ($\sigma_{m,d}$) i y- og z-aksen verifiseres ved hjelp av dimensjonerende bøyefasthet ($f_{m,d}$) og sikkerhetsfaktor (k_m). Verdien av sikkerhetsfaktoren er avhengig av tverrsnittet. For rektangulært tverrsnitt er sikkerhetsfaktor lik 0,7. Ved bruksgrensestilstand er det en grenseverdi for nedbøyning. Grenseverdi er ulike for fritt opplagte bjelker og fritt opplagte bjelke med utkraging. Les mer om fritt opplagt bjelker i delkapittel 2.5.

For aluminiumkonstruksjoner setter Eurokode 9 (2007) krav om at dimensjonering av bøyingsmoment (M_{Ed}) må verifiseres ved hjelp av dimensjonerende bøyingsfastheten (M_{Rd}).

Forholdstallet skal være mindre eller lik 1. Når aluminiumselement er utsatt for bøyning må bøyningmoment, skjærfasthet, bæreevne og knekking sjekkes.

I Eurokode 5 (2005b) er det et krav om beregning av glidning i forbindelsen mellom en konstruksjonsdel som er sammensatt av flere deler ved hjelp av mekaniske forbindelsesmidler. Beregningen skal forutsettes av et lineært forhold mellom kraft og glidning under bruksgrensestilstand. Glidningsmotstand av bolteforbindelse må sjekkes ifølge Eurokode 9 (2007). Under bruddgrensetilstand er dimensjonerende glidningsmotstand avhengig av kraften brukt for å spenne bolter og glidningsfaktor.

2.9 Von Mises flytegrensekriterium

Plastiske egenskaper til et materiale kan defineres på mange måter, inkludert Von Mises flytegrensekriterium (Von Mises yield criterium) eller Hills flytegrensekriterium (Hill's yield criterium). Von Mises flytegrensekriterium brukes for å beskrive den plastiske egenskapen til duktile materialer som metaller. Hovedprinsippet er å utnytte ulike spenninger til å finne flytegrensen til materiale. Den matematiske formelen for kriteriet er vist i formel 2.16 hvor σ_v^2 er Von Mises spenning og σ_{ij} er spenninger ved ulike akser i tredimensjonale sammenheng. Les mer om spenninger og definisjoner i delkapittel 1.4.2.

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{2} * [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2)] \quad (2.16)$$

2.10 Hills flytegrensekriterium

Hills flytegrensekriterium er en av de kriteriene som brukes til å beskrive anisotrop plastisk deformasjon og var utviklet av Rodney Hill. Et av de første versjonene av kriteriet er en utvikling av Von Mises flytegrensekriterium. Videre ble det utviklet ved å inkludere m-faktor som tyder på anisotropgrad av materiale. Formelen 2.17 (Hill, 1979) viser Hills flytegrensekriterium etter generering, hvor σ_i er prinsipielle spenninger; σ_y er flytegrense; F, G, H, L, M og N er konstanter.

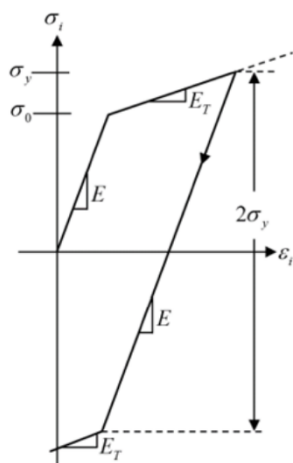
$$\begin{aligned}
\sigma_y^m = & F|\sigma_2 - \sigma_3|^m + G|\sigma_3 - \sigma_1|^m + H|\sigma_1 - \sigma_2|^m \\
& + L|2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + M|2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1|^m \\
& + N|2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Rodney Hills flytegrensekriterium henger sammen med flytegrense av materiale i ulike retninger i forhold til en referanses flytegrense σ_0 (Arvidsson, 2018). Dersom kriteriet vurderes i et koordinatsystem, kan forholdstallet for flytegrenser uttrykkes som formel 2.18.

$$\begin{aligned}
R_{xx} &= \frac{\sigma_x^Y}{\sigma_0} & R_{xy} &= \sqrt{3} \frac{\tau_{xy}^Y}{\sigma_0} \\
R_{yy} &= \frac{\sigma_y^Y}{\sigma_0} & R_{yz} &= \sqrt{3} \frac{\tau_{yz}^Y}{\sigma_0} \\
R_{zz} &= \frac{\sigma_z^Y}{\sigma_0} & R_{xz} &= \sqrt{3} \frac{\tau_{xz}^Y}{\sigma_0}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

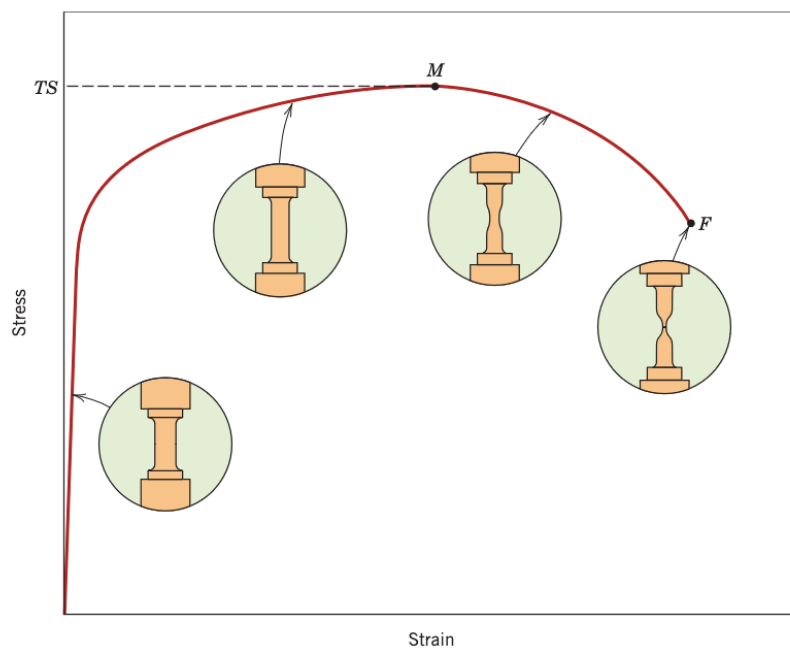
2.11 Billineær og multilineær isotrop herdingsmodell

Von Mises modell i Ansys kan videre deles inn i billineær isotrop herdningmodell eller multilineær isotrop herdningmodell. Forskjellen mellom de to modellene er avhengig av hvilken nøyaktighet som kreves. Billineær isotrop herdningmodell antar forholdet mellom spenning og tøyning i den plastiske fasen som et lineært forhold (figur 2.25). Å definere plastiske egenskaper ved å bruke denne modellen må flytegrense (σ_0) og tangentiell modul (E_T) defineres, hvor den tangentielle stivheten er stigningstallet for det lineære forholdet.



Figur 2.25: Spenning og tøyningskurv ved en bilinear isotrop herdingsmodell (Ansys Inc., 2022c).

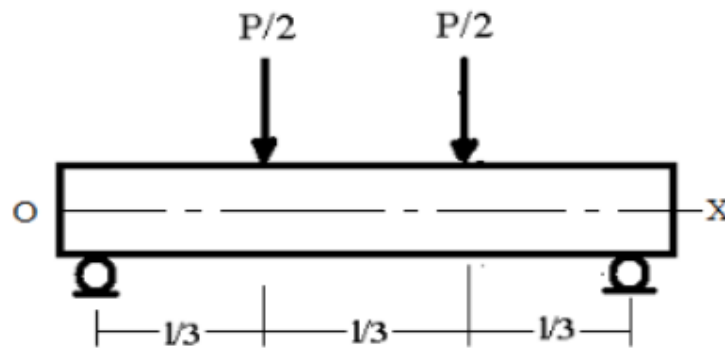
En multilinear isotrop herdningsmodell bruker stykkevis konstante funksjoner til å modellere plastiskegenskaper til et materiale fram til innsnevring oppstår (Ansys Inc., 2022c). Ergo, spenning og tilsvarende tøyning skal defineres parvis fram til bruddfastheten av materialet er oppnådd. Halsing oppstår etter materialet har oppnådd bruddfastheten og prøvens tverrsnitt blir innsnevret før den revner (Callister & Rethwisch, 2020). Figur 2.26 viser en typisk spenning-tøyningkurv under strekkprøving. «TS» står for bruddfasthet strekkprøving og mellom fasen M og F oppstår halsing.



Figur 2.26: En typisk spenning-tøyningkurv under strekk (Callister & Rethwisch, 2020).

2.12 Fire - punktet bøyetest

Fire – punktet bøyetest er en vanlig metode brukt til å teste elastisitetsmodul, Poissons tall og skjærmodul under symmetrisk laster (Wang et al., 2022). I en slik test skal bjelken lastes på 2 steder som er symmetrisk om midtpunktet på lengderetning. Bjelken skal også ha to opplagre som er også symmetrisk om midtpunktet på lengde retning. Et eksempel er vist i figur 2.27.



Figur 2.27: Et eksempel av fire-punktet bøyetest (Wang et al., 2022).

3 Metode:

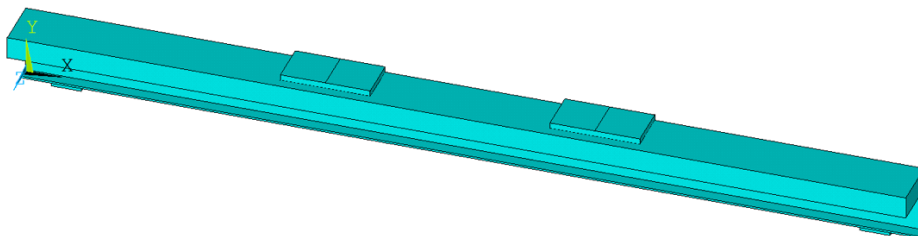
3.1 Geometri

Den hybridbjelken består av LVL og en aluminiumbjelke med I-profil og er forbundet med 66 bolter. Mer om LVL-bjelke og aluminiumbjelke er beskrevet i delkapittel 2.1.2 og delkapittel 2.2.3. I tillegg har den numeriske tredimensjonale modellen bygd i Ansys fire stålplater, hvor to av dem er plassert under hybridbjelken og fungerer som opplagre. Resten ligger på toppen av hybridbjelken for å fordele påførte laster. For at den numeriske tredimensjonale modellen kan verifiseres mot eksperimentell bøyetesten beskrevet av Chybiński og Polus (2021), tar geometrien utgangspunkt i geometrien for prøvebjelker som er brukt under eksperimentet og vist i figur 3.2. Dimensjonen av stålplater er ikke gitt i beskrivelsen og er modellert av antagelse av proporsjonalitet på tegningen vist av Chybiński og Polus (2021).

Koordinatsystem i den tredimensjonale modellen er definert som ortotrope akser vist i figur 3.1 hvor lengderetning er definert som x-aksen; y -aksen viser høyden av hybridbjelken som tilsvarer også radialretning; bredden er definert i z-aksen som er også tangentiell retning på ortotrope akser. Det tilsvarer også globalkoordinatsystem definert som standard koordinatsystem i Ansys. Geometrien til den tredimensjonale modellen er halvert og definert symmetrisk om xy-planet som tilsvarer z-aksen (figur 3.6). Dermed er nullpunktet av systemet på koordinaten (0, 0, 0). Figur 3.7 viser geometrien etter ekspansjon.

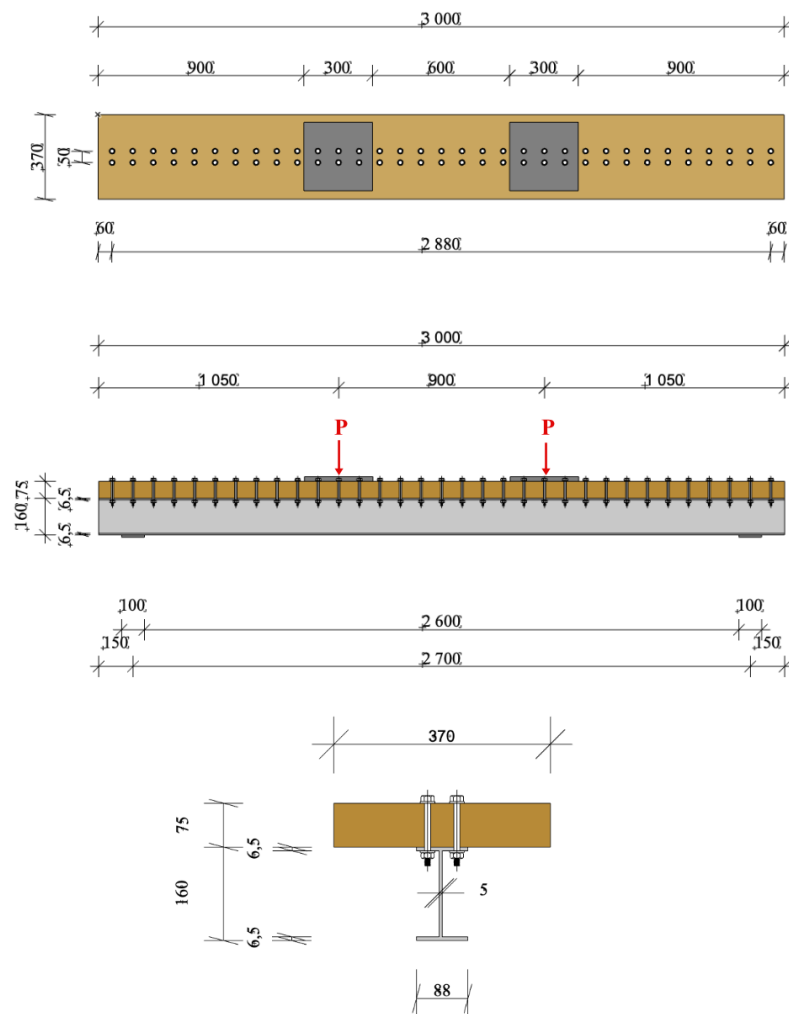
1
VOLUMES
TYPE NUM

Ansys
2022 R1
TEACHING



Figur 3.1: Koordinatsystem definert for tredimensjonal modell.

Ifølge beskrivelsen av eksperimentell bøyetesten skal LVL-bjelken være 3000 mm lang, 370 mm bred og 75 mm tykk. Under numeriske analysen er I – profilen av aluminiumbjelken forenklet som figur 3.2 viser og geometrien tar ikke hensyn til avrundingsradius for kilsveisen ment for kobling av flenser og steg. Aluminiumbjelken er totalt 160 mm høy hvor de to flensene er 6,5 mm tykke og steget er 147 mm høyt. Steget har en tykkelse på 5 mm og flensene er 80 mm bred. Stålplatene på toppen av hybridbjelken er 20 mm tykke og har størrelse på 150 mm i bredde og 150 mm i lengde. Opplagre av hybridbjelken er simulert av to stålplater som er 10 mm tykke og er 88 mm i bredde (som bredden av flenser på aluminiumbjelken) og 100 mm i lengde. Under numeriske modellering er dimensjonen av hybridbjelken vist i figur 3.2 halvert og definert symmetrisk om xy-planet.



Figur 3.2: Geometrien for den tredimensjonale modellen basert på prøvebjelker brukt under bøyetesten gjort av Chybiński og Polus (2021).

3.2 Elementtype

Istedenfor å modellere LVL-bjelken av mange finérslag limt sammen, er den modellert som et solidelement av elementtypen - SOLID185. Som beskrevet i delkapittel 2.1.2 er hensikten med å bruke LVL-bjelker å utnytte tremateriale på en gunstig måte ved å fordele trevirkesfeil jevnt over hele bjelken, slik at den kan vurderes tilnærmet som et homogent materiale. Derfor er SOLID185 valgt for modellering av LVL-bjelken med tanken på at den passer spesielt bra for å simulere homogent solidelement. Den egner seg også for å modellere materialer som har ortotrope egenskaper samtidig vil det forenkle modellbyggingsprosess og beregningsprosess.

Elementtype til aluminiumbjelke og stålplater i den tredimensjonale modellen er SOLID185 også brukt. Både aluminiumbjelke og stålplater er metaller definert som isotrope materialer. De er solide og er stivere enn tremateriale. Derfor kan SOLID185 være en alternativ for å modellere disse to elementene.

Boltene i den numerisk tredimensjonale modellen er simulert som BEAM188 - elementer. Det er en forenklet simulering av boltene fordi detaljer som bolthoder, boltgjenger og muttere ikke er med i geometrien. Funksjonen av boltene i oppgavens tilfelle er kun for å feste delene av hybridbjelken sammen og forskningsfokus i denne oppgaven er ikke om oppførselen av bolter. Derfor kan boltene forenkles som BEAM188 - elementer og hver enkel bolt er simulert av to koblede knutepunkter. Fordelen er at det er lett å plassere boltene på riktig plass ved å definere posisjoner av knutepunkter, i tillegg til at det lett gjør simuleringen av store mengder bolter uten å gjøre det tungt for programvaren til å løse systemet. Les mer om BEAM188 i delkapittel 2.3.2.

Kontaktelementer og målelementer er CONTA174 og TARGE170 valgt automatisk av systemet. Grunnen til at det er kun overflate-mot-overflate kontakttypen brukt i tredimensjonale modellen. Les mer om CONTA174 og TARGE170 i delkapittel 2.3 og mer om definisjon av kontaktpar i delkapittel 3.5.

3.3 Materialegenskap

3.3.1 Elastisitet

Materialegenskap har stor betydning for numerisk analyse fordi det bestemmer oppførselen til materialene under påførte laster. Data for materialegenskaper som blir brukt under modellering i Ansys er hovedsakelig basert på beskrivelsen av bøyetesten gjort av Chybiński og Polus (2021).

Siden LVL-R er definert som et ortotrop materiale under tredimensjonal modellbygging, kreves det 9 uavhengige konstanter til å definere de elastiske materialegenskapene: 3 elastisitetsmoduler, 3 skjærmoduler og Poissons tallet i 3 akser. De uavhengige konstantene har blitt nærmere forklart i delkapittel 2.4.4. Dataene gitt av Chybiński og Polus (2021) ikke er tilstrekkelig nok for å beskrive elastisk oppførsel av LVL-bjelken under modellbygging i Ansys. Manglende data er hentet fra konstruksjonsveiledning for LVL (STEICO, 2019) og fra en annen studien gjort av Hassanieh et al. (2016). Detaljer om definisjon av elastiske materialegenskaper i den tredimensjonale modellen er vist i tabell 3.1.

Aluminiumbjelken som har blitt brukt under eksperimentet er en aluminiumlegering - AW6060-T6. Et isotropt materiale som aluminium krever kun den gjennomsnittlige elastisitetsmodulen og gjennomsnittlige Poissons tallet i numeriske analyser gjort i Ansys. Begge parametere er hentet fra studien til Chybiński og Polus (2021). Materialet for bolter og stålplater er definert med stålsort - S235. Nødvendig data for å definere elastiske materialegenskap til stål er også hentet fra studien til Chybiński og Polus (2021). Tabell 3.1 er en oversikt over alle parametere for elastiske materialegenskaper under numerisk modellering i Ansys.

Friksjonskoeffisientene av materialene er avhengig av grovheten på begge overflater som er i kontakt. I den numeriske modellen er alle elementene i kontakt med mer enn ett materiale. For eksempel er LVL-bjelken i kontakt med både aluminiumbjelken og to stålplater. Derimot er friksjonskoeffisienten mellom LVL-bjelken og aluminiumbjelken ulik friksjonskoeffisienten mellom LVL-bjelken og stålplater. Derfor er friksjonskoeffisientene til materialer definert som en gjennomsnittverdi.

Tabell 3.1: Oversikt over elastiske materialegenskaper i den tredimensjonale modellen.

	LVL – R	AW6060- T6	S235
	Ortotropt materiale	Isotrop materiale	Isotrop materiale
Elastisitetsmodul (MPa)	$E_x = 16000$ $E_y = 430$ $E_z = 426$	$E_x = 66360$	$E_x = 210000$
Skjærmodul (MPa)	$G_{xy} = 600$ $G_{yz} = 96$ $G_{xz} = 600$	Unødvendig	Unødvendig
Poissons tall	$\nu_{xy} = 0,48$ $\nu_{yz} = 0,22$ $\nu_{xz} = 0,48$	$\nu_{xy} = 0,3$	$\nu_{xy} = 0,3$
Friksjons koeffisient	$\mu_{LVL} = 0,41$	$\mu_{AL} = 0,415$	$\mu_{Stål} = 0,605$

3.3.2 Plastisitet

Bruddfastheten er den maksimale spenningen et materiale kan bli belastet før brudd. I den plastiske deformeringsfasen vil halsing oppstå etter bruddfastheten er oppnådd. Plastiske materialegenskaper av ulike materialer er definert på ulike måter i Ansys. Det finnes mange ikke-lineære modeller som kan brukes til å definere plastiske egenskaper. LVL-bjelken er definert med en bilineær isotrop herdingsmodell med hensyn på Hills flytegrensekriterium. Det finnes ikke en egen definisjon for tremateriale i Ansys, men Hills flytegrensekriteriet gir en tilnærming på beregning av fastheter i ortotrope akser. Denne metoden blir også introdusert av Arvidsson (2018).

Å definere bilineær isotrop herdingsmodell med Hills flytegrensekriterium kreves det seks forholdstall (R) mellom flytegrensene som er retningsavhengige. Beregning av forholdstallene er basert på Ansys Inc. (2022d) (formel 3.1).

$$\begin{aligned}
R_{xx} &= \frac{\sigma_{xx}^y}{\sigma_y} & R_{xy} &= \sqrt{3} \frac{\sigma_{xy}^y}{\sigma_y} \\
R_{yy} &= \frac{\sigma_{yy}^y}{\sigma_y} & R_{yz} &= \sqrt{3} \frac{\sigma_{yz}^y}{\sigma_y} \\
R_{zz} &= \frac{\sigma_{zz}^y}{\sigma_y} & R_{xz} &= \sqrt{3} \frac{\sigma_{xz}^y}{\sigma_y}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Hvor σ_{ij}^y er retningsavhengige flytegrenser og σ_y er flytegrensen brukt som referanse. For å definere bilineær isotrop herdingsmodell, er den gjennomsnittlige flytegrensen nødvendig i tillegg til tangentmodul hvor tangentmodul er lik 0,01 ganger elastisitetsmodul, beregnet på samme måte som er beskrevet av Leitner (2011). Tabell 3.2 viser nødvendige verdier for å definere plastiske egenskaper for LVL-bjelken i en bilineær isotrop herdingsmodell og i beregning av forholdstallet (R).

Tabell 3.2: Nødvendige parametere for å definere plastiske egenskaper for LVL-bjelken.

LVL – R	
Retningsavhengige flytegrenser (MPa)	$\sigma_x = 41,9$ $\sigma_y = 10$ $\sigma_z = 10$
Skjærfasthet (MPa)	$\tau_{xy} = 10$ $\tau_{yz} = 5$ $\tau_{xz} = 10$
Gjennomsnittlig flytegrense (MPa)	$\sigma_0 = 53,8$
Tangentmodul (MPa)	$E_T = 160$

Definering av plastiske egenskaper til aluminiumbjelken er derimot basert på Von Misses flytegrensekriterium og multileneær isotrop herdingsmodell. Sann spenning og tøying kreves. Les mer om definisjon av plastiske egenskaper i kapittel 2. Les mer om sann spenning og tøying

i delkapittel 2.4.2. Nødvendige verdier er hentet fra artikkelen skrevet av Chybiński og Polus (2021) og listet i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Sann spenning og tøyning for å definere plastiske materialegenskaper til aluminiumbjelken.

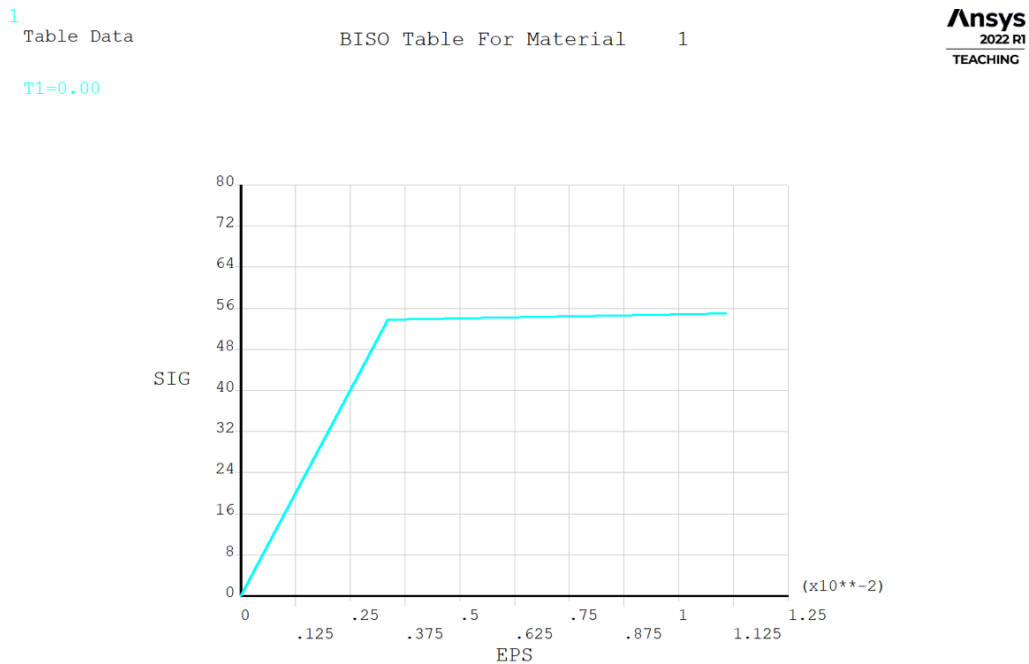
AW6060-T6	
Spenning (MPa)	Tøyning
182,4	0,00275
191,7	0,003
196,2	0,005
198,1	0,007
201,7	0,012
205,6	0,017
209,0	0,022
212,0	0,026
214,7	0,031
216,9	0,036
218,7	0,041
220,2	0,045
221,1	0,049

Billinear isotrope herdingsmodellen med Von Mises flytegrensekriterium er brukt til å definere plastiske egenskaper til stålplater og bolter. Flytegrensen er hentet fra artikkelen skrevet av Chybiński og Polus (2021) og tangentmodulen er beregnet i forhold til beskrivelsen introdusert av Leitner (2011). Tabell 3.4 viser parametere for å definere plastiske materialegenskaper til stålplater og bolter.

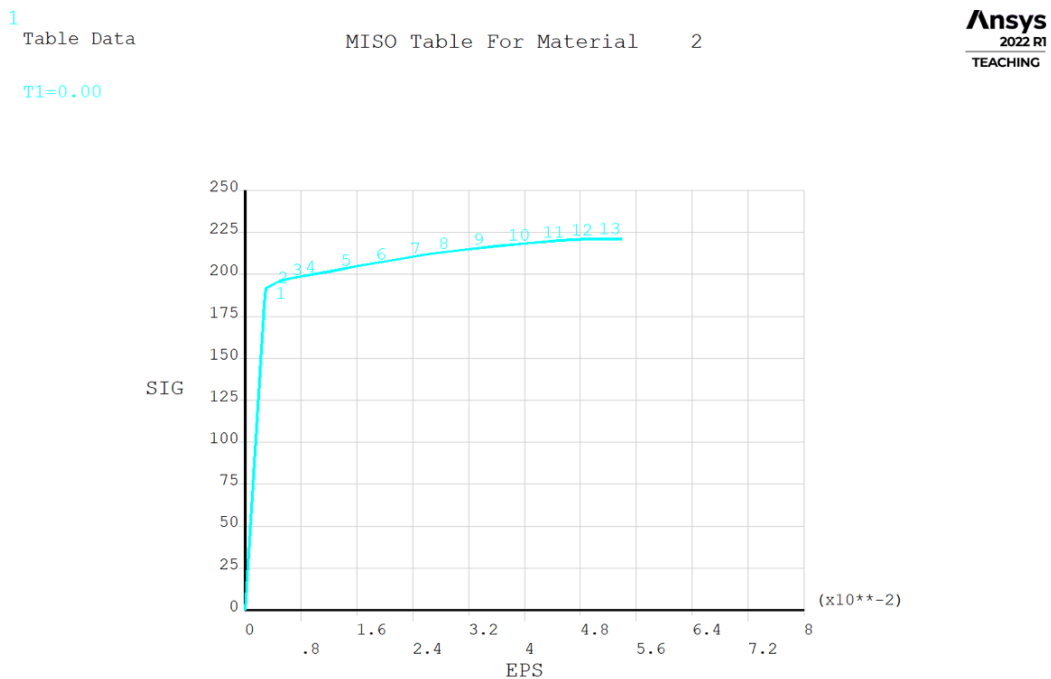
Tabell 3.4: Relevante parametere brukt for å definere plastiske egenskaper til stål.

S235	
Flytegrense (MPa)	$\sigma_{stål} = 235$
Tangentmodul (MPa)	$E_T = 2100$

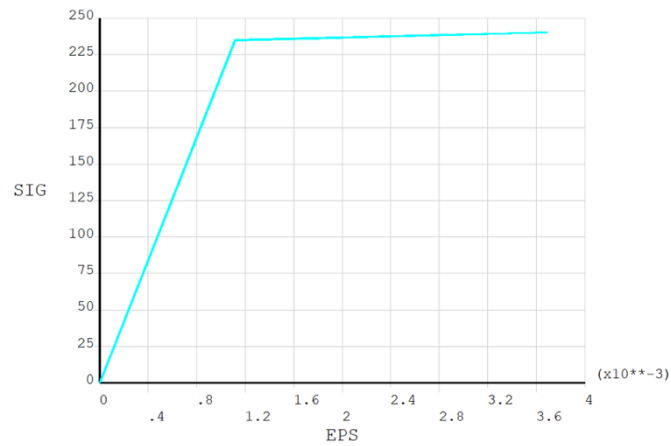
Figur 3.3, 3.4 og 3.5 viser elastiske og plastiske materialegenskaper til LVL-bjelken, aluminiumbjelken og stålmateriale som er definert under numeriske analyser i Ansys. Les mer om bilinear isotrop herdingsmodell og multilinear isotrop herdingsmodell i delkapittel 2.11 og Von misses flytegrensekriterium og Hills flytegrensekriterium i delkapittel 2.9 og 2.10.



Figur 3.3: Definert elastiske og plastiske materialegenskaper til LVL i Ansys.



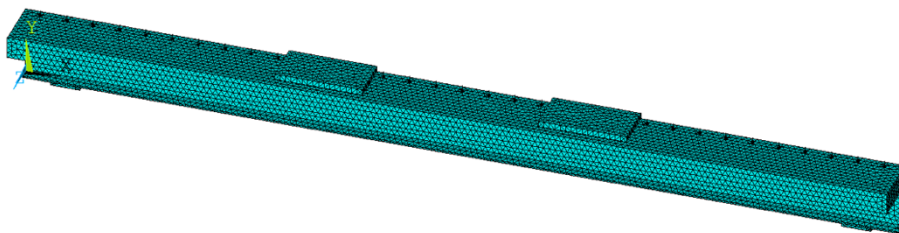
Figur 3.4: Definert elastiske og plastiske materialegenskaper til aluminiumlegering i Ansys.



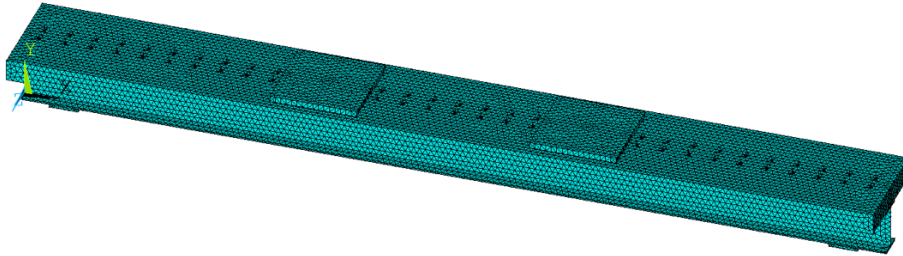
Figur 3.5: Definert elastiske og plastiske materialegenskaper til stål i Ansys.

3.4 Elementinndeling

Etter modellering av geometrien, er bjelken inndelt i mindre tredimensjonale elementer med kantlengde på 20 mm. Dermed blir bjelken delt inn i tetraeder og det blir 72980 elementer totalt uten ekspansjon om xy-planet. Figur 3.6 og 3.7 viser inndeling av elementer, med og uten ekspansjon.



Figur 3.6: Elementinndeling uten ekspansjon om xy-planet.



Figur 3.7: Elementinndeling med ekspansjon om xy-planet.

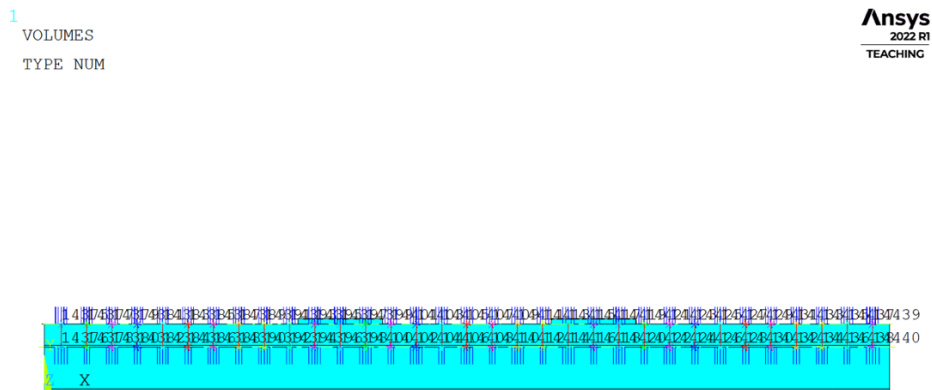
3.5 Forbindelse og kontakt

Hybridbjelken er forbundet av 66 bolter. Boltene er plassert i 2 rader med 50 mm avstand imellom og i x-retning er avstanden mellom boltene 90 mm (figur 3.2). Dimensjonen av boltene er basert på beskrivelsen i artikkelen av Chybiński og Polus (2021). Hensikten med boltene er å feste hybridbjelken slik at alle delene av bjelken kan oppføre seg tilnærmet en helhet. I eksperimentet er M10 5.8 stålbolter brukt som betyr at diameteren av boltgjenger er 10mm. Boltene var ikke forspent, men er montert slik at det blir «snug-tight». Les mer om bolter i delkapittel 2.1.4.

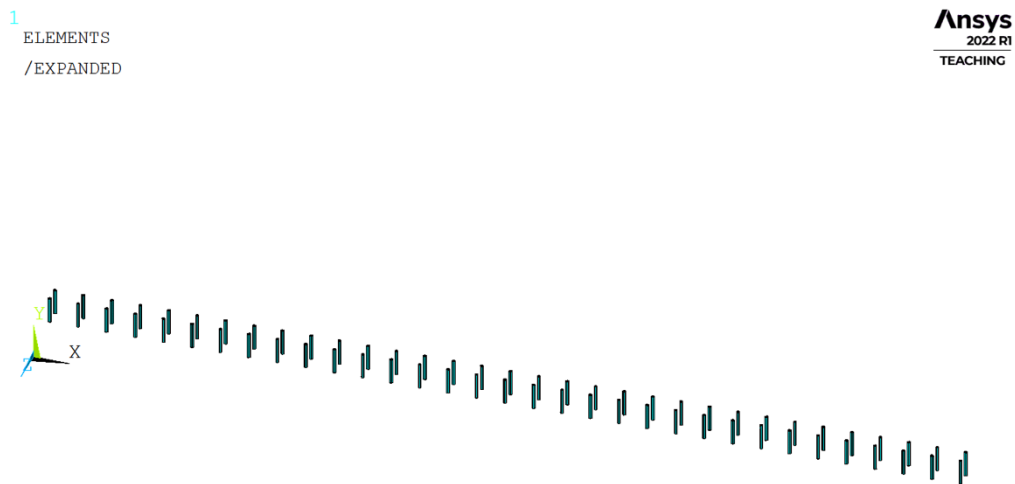
I den tredimensjonale modellen er boltene simulert som BEAM188 - elementer ved hjelp av punktsveisingsmetode. Det er en forenkling fra virkeligheten, men den bidrar til mindre løsnings tid og gir mulighet til å modellere store mengder av festelementer som bolter. Les mer om bolter i delkapittel 2.1.4. Seksjonstypen for boltene er definert som en solidsirkel med 5 mm radius. I tillegg må materialegenskapen for simulerte boltene defineres, og de er definert som alle andre stålelementer i modellen.

Ved hjelp av do-løkke kan 33 par (etter ekspansjon blir det 66 par) av knutepunkter lett lages på overflaten av LVL-bjelken og underflaten på toppflensen av aluminiumbjelken. Do-løkken

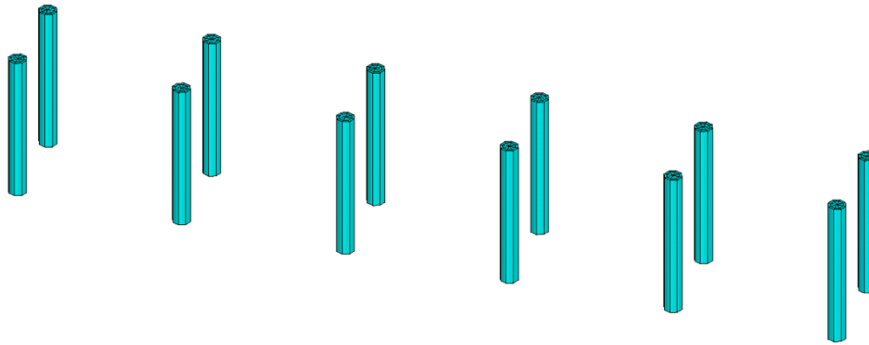
kan brukes til å gjøre gjentagelser på et antall ganger. Den brukes i kombinasjon med kommandoen «ENDDO» (Ansys Inc., 2022a). Knutepunktene plasseres i seksjonssentrum av boltene og koblet sammen av kommandoen «SWGEN» (figur 3.8). Det er viktig med nummerering av punktene for å muliggjøre kobling av knutepunktene. Linjene som kobler knutepunktparene, må defineres med elementtypen - BEAM188 med seksjonstypen 1. Les mer om punktsveisingsmetode i delkapittel 2.7. Simulerte bolter er vist i figur 3.9 og figur 3.10.



Figur 3.8: Knutepunkter koblet av kommandoen – SWGEN.

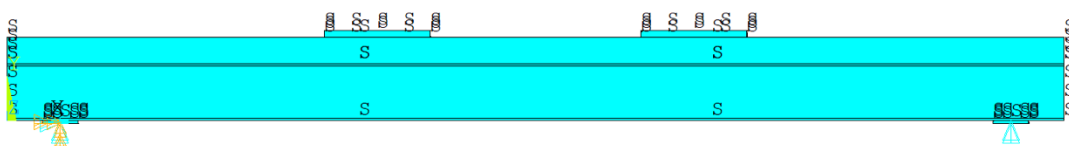


Figur 3.9: Alle 66 simulerte bolter brukt under numerisk analyse.



Figur 3.10: Detaljer om simulerte bolter i Ansys.

Det er to opplagringspunkter på aluminiumbjelken. Den ene er et fastlager som plasseres på koordinaten (150, 0, 0) som betyr at på den ene siden av bjelken kan den rotere fritt på z-aksen, men er begrenset bevegelsen i x, y og z-aksen samt med begrenset rotasjonsfrihet om x, og y-aksen. Den andre er et glidelager som plasseres på koordinaten (2850, 0, 0) og her kan bjelken rotere fritt i x, y og z-aksen, samtidig kan den også bevege seg fritt i alle akser unntatt y-aksen. Figur 3.11 viser begrenset bevegelser og rotasjoner ved opplagre og «S» tyder kun på at symmetri ved xy-planet er definert. Se koordinatsystemet som blir brukt i Ansys i figur 3.1.



Figur 3.11: Hybridbjelke med begrenset frihetsgrader.

Det er viktig å definere kontakter mellom ulike delene av hybridbjelken for at de skal fungere helhetlig som en bjelke og belastning fordeles over hele hybridbjelken. Bortsett fra bolter er alle delene i hybridbjelken definert som SOLID185. Kontakten mellom delene oppstår mellom en flate til en annen flate. Derfor er overflate-mot-overflate kontakttypen valgt.

Det er totalt tre par av kontakter definert: mellom LVL-bjelken og aluminiumbjelken, mellom LVL-bjelken og stålplater som fordeler belastning og mellom aluminiumbjelken og stålplater brukes som opplagre. Kontakttypen er definert som «standard contact» for alle kontakter. Den reelle konstanten FTOLN er definert som standardverdi. Den reelle konstanten FKN justerer kontaktstivheten mellom kontaktene. Ved å definere ulike FKN gir modellen ulike nøyaktighet på resultatene. Det er 2 modeller med ulike FKN og ulike nøyaktige resultater presentert i denne oppgaven. Les mer om kontakt og reelle konstanter i delkapittel 2.6.

3.6 Påføring av laster

Hybridbjelken har blitt studert eksperimentelt ved en fire-punktet bøyetest som betyr at det blir påførte laster på 2 symmetriske posisjoner og bjelken står også på to opplagre som er også symmetrisk plassert. I eksperimentet av Chybiński og Polus (2021) er lastene påført over LVL-bjelken med 900 mm avstand mellom lasteposisjoner, det vil si ved 1050 mm og ved 1950 mm i lengderetning fra nullpunktet (figur 3.2). Les mer om fire-punktet bøyetest i delkapittel 2.12.

Istedenfor å belaste hybridbjelken med kraft, er nedbøyning påført over LVL-bjelken under numeriske analysen. Påførte nedbøyningen er beregnet ut i fra den ultimate nedbøyningen i midten av hybridbjelken (v_{ult}) som blir målt under bøyetesten gjort av Chybiński og Polus (2021). Den numeriske tredimensjonale modellen er verifisert ved å sammenligne resultater av prøvebjelken 1 i bøyetesten. Derfor er påførte nedbøyning i den numeriske analysen også beregnet ut ifra ultimate nedbøyningen for prøvebjelken 1.

Ved å lese grafen for den ultimate nedbøyningen presentert av Chybiński og Polus (2021) kan den ultimate nedbøyningen i midten av prøvebjelken 1 observeres som 104 mm. Påførte nedbøyninger brukt i numeriske analysen blir deretter beregnet som et todimensjonalt problem ved å løse noen andregradslikninger. Kalkulasjonen kan gjøres ved hjelp av punktene (150, 0), (2850, 0) og (1500, -104):

$$\begin{aligned}
150^2 * a + 150 * b + c &= 0 \\
2850^2 * a + 2850 * b + c &= 0 \\
1500^2 * a + 1500 * b + c &= -104
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

Når konstantene a, b og c i formel 3.2 er løst, kan andregradslikningen settes opp som formel 3.3:

$$a * x^2 + b * x + c = 0 \tag{3.3}$$

Ved å utnytte koordinatene (1050, y_1) og (1950, y_2) kombinert med andregradslikningen i formel 3.3 kan y_1 og y_2 løses. De samsvarer nedbøyninger når avstand fra nullpunktet i x-retning er 1050 mm og 1950 mm. Det korresponderer også posisjoner for påføringslaster todimensjonalt.

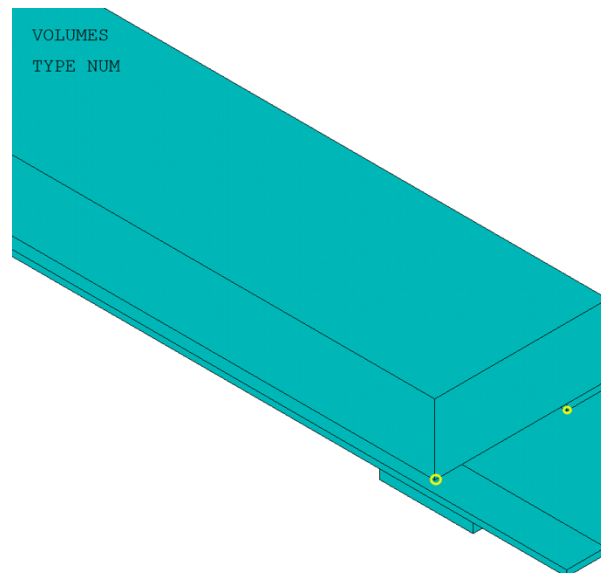
3.7 Les av resultater

I bøyeteksten beskrevet av Chybiński og Polus (2021) er maksimum laster påført med en kontant hastighet på 1,0 mm/min. Siden den ultimate nedbøyningen i midten av prøvebjelken 1 er 104 mm, er total belastningstid beregnet ved hjelp av formel 3.4:

$$\frac{\text{Ultimate nedbøyning (mm)}}{\text{Hastighet } \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right)} = \text{Belastningstid (min)} \tag{3.4}$$

Derfor er 104 definert som total belastningstid. Det er tiden det kommer til å ta etter det siste mellomsteget av belastningen er påført. Tidsenheten trenger ikke å defineres i Ansys, men i dette tilfellet tilsvarer minutter. Automatisk tidskritt er valgt som betyr at systemet kan velge selv hvor mange mellomsteg det trengs for å belaste modellen innen valgt total belastningstid. Grunnen til at mellomstegene er valgt automatisk av systemet er for å sikre elementene kan løses riktig og vellykket gjennom alle mellomstegene. Likevel er antall mellomsteg definert manuelt som 104, maksimalt antall mellomsteg er definert som 1000 og minste antall mellomsteg er definert som 10, i tillegg til automatisk tidskritt, bare for å gi en referanseverdi til Ansys.

Resultatet av ultimate nedbøyning (v_{ult}) i midten av hybridbjelken fra numeriske analysen er lest som den maksimale deformasjon i y-aksen på knutepunktet i midten av hybridbjelken med koordinaten (1500, 0, 0). Den ultimate glidningen (u_{ult}) på enden av hybridbjelken er beregnet som differansen av maksimale deformasjoner av LVL- og aluminiumbjelken i x-aksen. Maksimale deformasjonen i x-aksen for LVL-bjelken er lest fra knutepunktet på nederste hjørnet med koordinaten (1500, 160, 185) og maksimale deformasjonen av aluminiumbjelken er lest fra knutepunktet på nederste hjørne av toppflensen på samme siden av knutepunktet på LVL-bjelken, med koordinaten (1500, 153.5, 44). Figur 3.12 viser knutepunktene i gule ringer som brukt for beregning av glidning. Koordinatsystem er forklart i delkapittel 3.1.



Figur 3.12: Posisjoner av knutepunktene som brukes til å beregne glidning på enden av hybridbjelken.

3.8 Parametriske studier

3.8.1 Parametrisk studie 1: Endre tykkelse på LVL-bjelke

Stivheten til hybridbjelken er en viktig parameter som kan bestemme hva den kan brukes til. For at stivheten til hybridbjelken skal forandres, kan tykkelsen av LVL-bjelken endres. Ved å lese endringer i stivheten, kan nedbøyning i y-aksen observeres, og sammenlignes med

resultater fra eksperimentelle bøyetesten. En tynnere LVL-bjelke vil mest sannsynlig minske stivheten til hybridbjelke og vil dermed gi større nedbøyning i y-aksen midt på hybridbjelken.

For å verifisere hypotesen nevnt over, har tykkelsen på LVL-bjelken redusert fra 75 mm til 50 mm og økt fra 75 mm til 100 mm. Tabell 3.5 gir en oversikt over dimensjonsendringer av LVL-bjelken.

Tabell 3.5: Endring i tykkelsen til LVL-bjelken.

Dimensjon av LVL-bjelker			
	Tykkelse (mm)	Lengde (mm)	Bredde (mm)
25% økning i tykkelsen	50	3000	370
Originale modellen	75	3000	370
25% reduisering i tykkelsen	100	3000	370

3.8.2 Parametrisk studie 2: Endre antall bolter

Boltene i modellen er definert som stålmateriale. Dette materiale har større stivhet enn LVL-bjelken og aluminiumbjelken fordi stål har større elastisitetsmodul enn de andre materialene (tabell 3.1). Siden boltene er i kontakt med både aluminium- og LVL-bjelken, er det rimelig å anta at boltenes store stivhet har påvirkning på nedbøyningen i midten av hybridbjelken, og på glidningen mellom aluminium- og LVL-bjelken.

I denne parametriske studien øker og reduserer antall bolter 25% (1/4) i forhold til det originale antallet. Selv om 25% av 66 bolter er 16,5, må det rundes ned til 16 for at hybridbjelken fortsatt kan ha partall bolter, siden boltene er plassert symmetrisk på 2 rader (figur 3.2). Derfor antar 25% av originale antall som 16 bolter. Da vil 25% reduisering av bolter tilsvare 50 bolter brukt i hybridbjelken og 25% økning av boltantallet blir 82 bolter. Avstanden fra kanten på begge sider til den første boltene i lengderetning er 60 mm og total lengde av hybridbjelken er 3000 mm (figur 3.2). Påførte belastningen og opplagre skal ikke forandres. Tabell 3.6 viser endringer på både plasseringer av boltene og boltantall.

Tabell 3.6: Økning og redusering av boltantall.

	Antall bolter etter ekspansjon (total)	Antall bolter før ekspansjon	Avstand mellom boltene i lengderetning (mm)
25% redusert bolter	50	25	120
Original	66	33	90
25% øket bolter	82	41	72

3.8.3 Parametrisk studie 3: Endring av aluminiumbjelken

Aluminiumbjelken er omtrent 4 ganger stivere enn LVL-bjelken. Derfor er det viktig å studere hvordan den kan påvirke mekanisk stivheten av hybridbjelken. Aluminiumbjelken har I-profil med 2 flenser og et steg hvor flensene er 6,5 mm tykke og steget er 5 mm tykk (figur 3.2). I parametrisk studie 3 endres tykkelsen av steget på aluminiumbjelken endret fra 5 mm til 6,5 mm, som motsvarer tykkelsen på flensene. Tykkelsen av steget er også redusert fra 5 mm til 3,5 mm for å se om det vil gi annerledes resultat på stivhet. Ved å sammenligne resultatene kan påvirkningen av tykkelse på steg oppfattes og tolkes. Tabell 3.7 viser ulike tykkelser av stegene.

Tabell 3.7: Ulike tykkelser av steg på aluminiumbjelke vurdert i parametrisk studie 3.

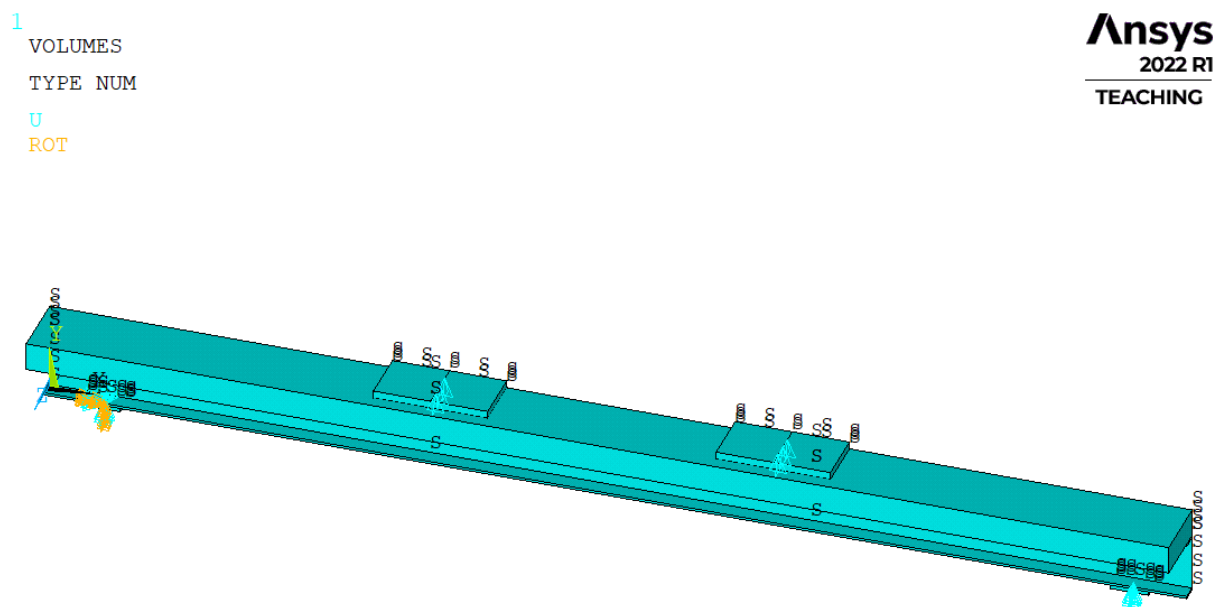
	Tykkelse av stegene (mm)
Fortynnet	3,5
Original	5
Fortykket	6,5

4 Resultater

I dette kapitlet blir resultater presentert og innholdet er hovedsakelig delt i to. I den første delen blir den tredimensjonale modellen, bygd i Ansys, verifisert ved å sammenligne resultater mot resultatene for prøvebjelken 1 under bøyetesten beskrevet av Chybiński og Polus (2021). Den andre delen handler om resultater for parametriske studier som er gjort på samme måte som beskrevet i delkapittel 3.8. Resultatene blir presentert i form av tabeller og grafer. Grafene er laget i programvaren - Python (Langtangen, 2016). Dataene for grafene er hentet fra Ansys og lagt inn i vedlegg.

4.1 Verifisering av tredimensjonale modellen

Ved å bruke beregningsmetoden nevnt i delkapittel 3.6, er den påførte nedbøyningen lik 92,5 mm. Nedbøyningen påføres som $UY = -92,5$ i Ansys ved 1050 mm og 1950 mm i lengderetning over stålplatene som ligger på LVL-bjelken (figur 4.1). Den påførte nedbøyningen er definert negativt for å tilpasse koordinatsystemet den tredimensjonale modellen er bygd på. Geometrien for den tredimensjonale modellen er vist i figur 3.2.



Figur 4.1: Påføring av nedbøyning på numeriske modellen i Ansys.

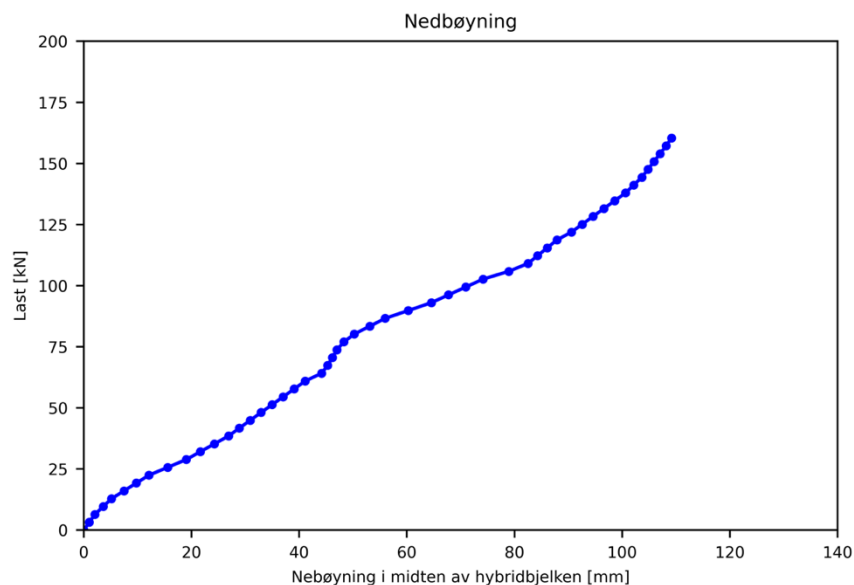
Den reelle konstanten FKN er en konstant brukt for å definere stivhet mellom kontaktene. Tabell 4.1 viser at resultatene fra den numeriske analysen, hvor FKN er definert som 10, gir både

ultimate nedbøyning (v_{ult}) og ultimate glidning (u_{ult}), et 5% avvik fra resultater av prøvebjelken 1 under eksperimentelle bøyetesten. Les mer om konstanten FKN i delkapittel 2.6.1.

Tabell 4.1: Resultat fra eksperiment vs. numerisk analyse i Ansys (FKN = 10).

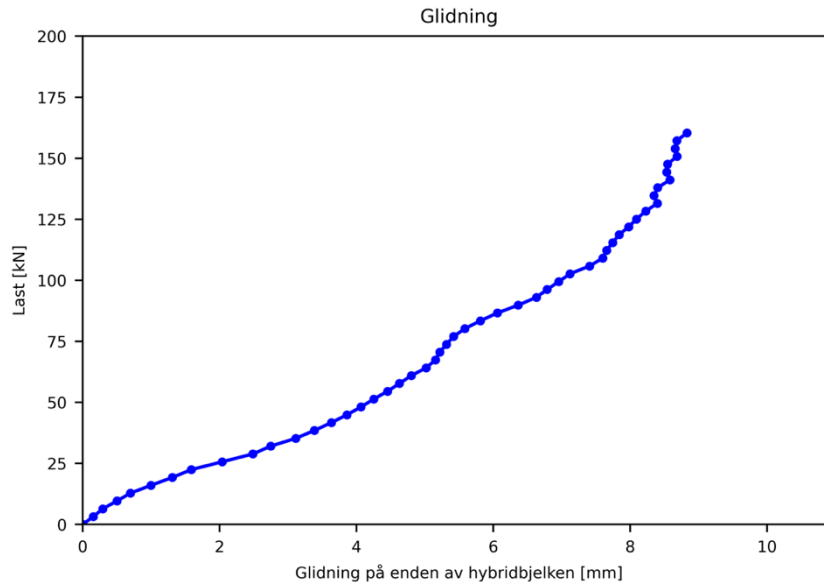
	Eksperiment resultat	Numerisk analyse	Prosent (%)
Påført nedbøyning (mm)	92,50	92,50	
Ultimate nedbøyning i midten av bjelken (v_{ult}) (mm)	104,00	109,14	5
Ultimate glidning ved enden av bjelken (u_{ult}) (mm)	8,40	8,83	5

Figur 4.2 viser endringer av nedbøyning og glidning steg for steg under påført nedbøyning når FKN er 10. Nedbøyningen øker lineært fra 0 kN til 60 kN. Flytegrensen ligger omtrent ved 75 kN med hensyn på 0,02% tøyingsregler. Les mer om flytegrense i delkapittel 2.4.1.



Figur 4.2: Nedbøyning i midten av hybridbjelken (FKN = 10).

Figur 4.3 viser endring av glidning på enden av hybridbjelken når FKN er definert som 10. Grafen øker lineært før flytegrensen ved omtrent 75 kN inntreffer. I tillegg øker den mer uregulert etter flytegrensen enn nedbøyningen.



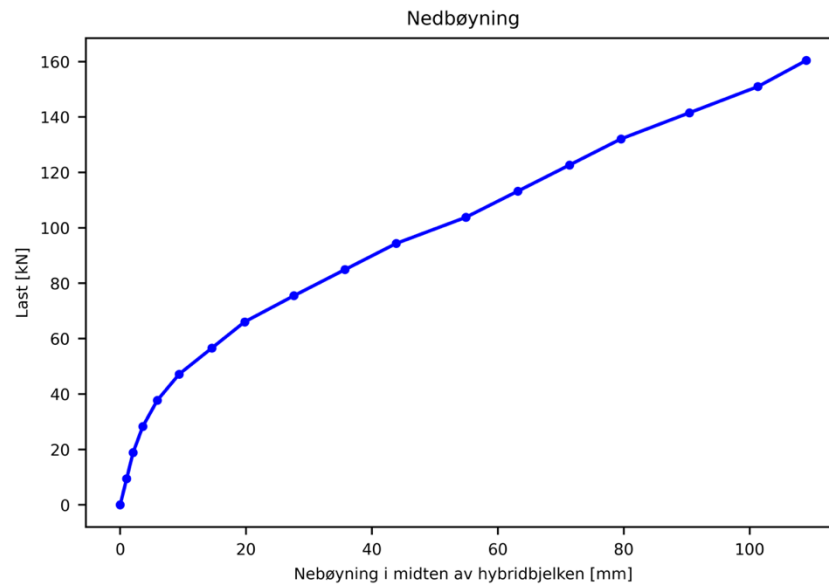
Figur 4.3: Glidning på enden av hybridbjelken (FKN = 10).

I tabell 4.2 viser resultat av ultimate nedbøyning (v_{ult}) og ultimate glidning (u_{ult}) når reelle konstanten FKN er endret fra 10 til 1. Likevel gir det like mye avvik på ultimate nedbøyningen, men øker med 5% avvik på ultimate glidningen.

Tabell 4.2: Resultat fra eksperiment vs. numerisk analyse i Ansys (FKN = 1).

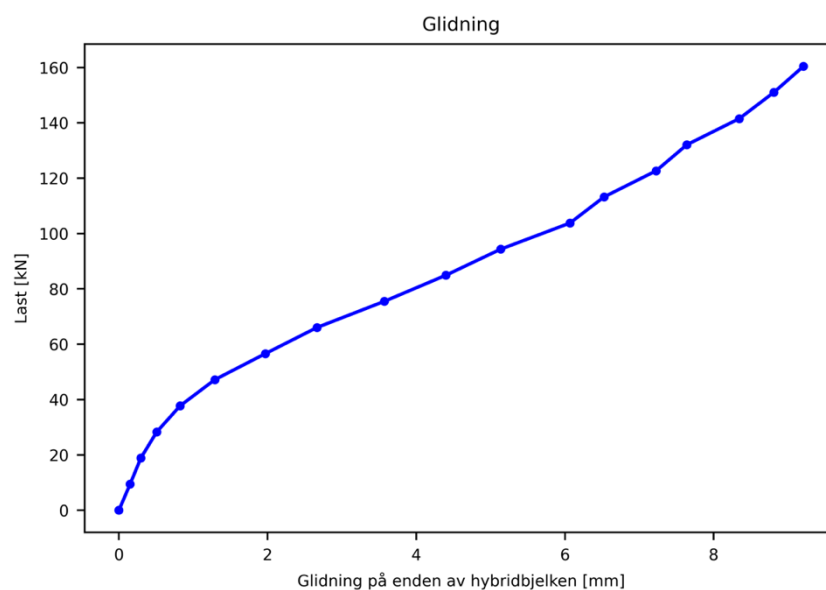
	Ekspériment resultat	Numerisk analyse	Prosent (%)
Påført nedbøyning (mm)	92,50	92,50	
Ultimate nedbøyning i midten av bjelken (v_{ult}) (mm)	104,00	108,98	5
Ultimate glidning ved enden av bjelken (u_{ult}) (mm)	8,40	9,21	10

Endring av nedbøyninger steg for steg under påførte nedbøyning når FKN er definert som 1, er vist i figur 4.4. Flytegrensen ligger omtrent ved 70 kN. Nedbøyningen øker fram til halsing oppstår, men økningen skjer ikke like lineært etter flytegrensen og stigningstallet er heller ikke like stor.



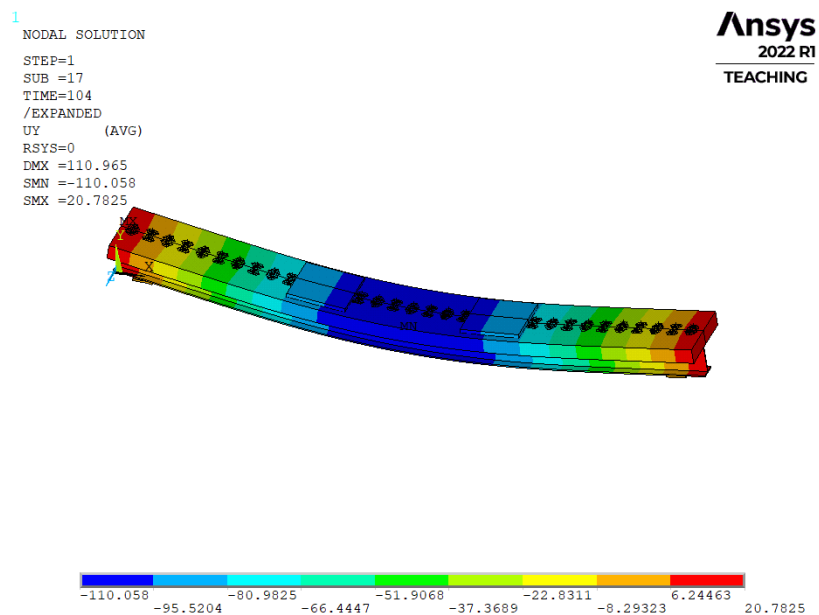
Figur 4.4: Nedbøyning i midten av hybridbjelken (FKN = 1).

Endringen av glidninger er vist i figur 4.5 når FKN er definert som 1. Den har omtrent samme økningstrenden som nedbøyningen vist i figur 4.4. Glidningen øker mer lineært før flytegrensen og stigningstallet er mindre etter flytegrensen.



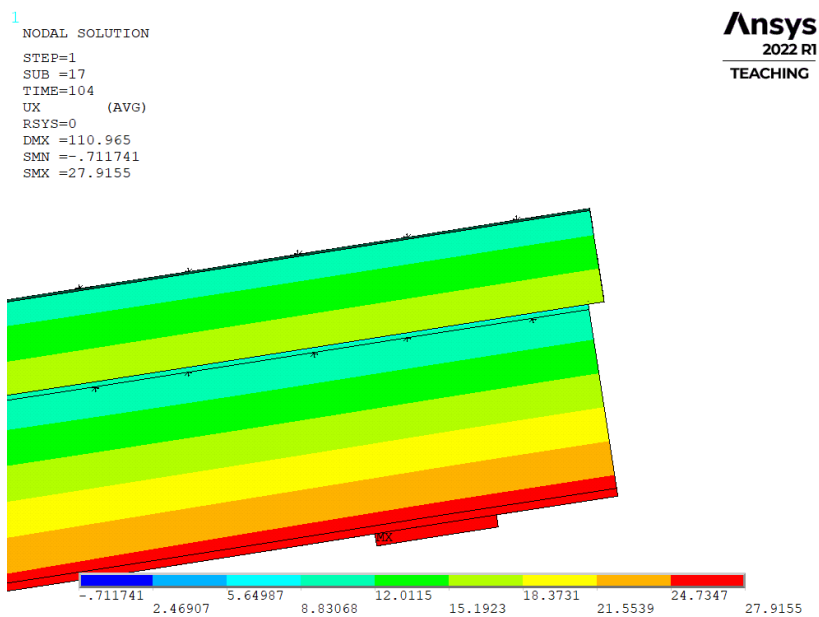
Figur 4.5: Glidning på enden av hybridbjelken (FKN = 1).

Figur 4.6 er et konturplott som viser deformasjon i y-aksen. Den maksimale nedbøyningen ligger i midten av hybridbjelken. For å løse denne modellen er 17 mellomsteg valgt av systemet.



Figur 4.6: Konturplott som viser deformasjon i y-retning når FKN er definert som 1.

Figur 4.7 viser hvordan glidningen på enden av hybridbjelken ser ut i Ansys. Konturplottet viser deformasjon i x-retning og glidningen er differanse mellom deformasjon av LVL – og aluminiumbjelken. Det er en tydelig forskyvning mellom LVL-bjelken og aluminiumbjelken.



Figur 4.7: Konturplottet som viser glidningen på enden av hybridbjelken (deformasjon i x-retning) når FKN er definert som 1.

4.2 Parametriske studier

Ved å endre reelle konstanten FKN fra 10 til 1, blir færre antall mellomsteg valgt automatisk av systemet enn når FKN er lik 10, se vedlegg. Det samme kan ses også ved å sammenligne figur 4.2 og 4.4, og figur 4.3 og 4.5. Siden grafer er laget av resultater fra hvert mellomsteg, vil mindre mellomstegene bidra til færre punkter som kan brukes. Derimot er grafene laget av færre punkter mer lesbare enn grafene med mange punkter, samtidig har de lite nøyaktighetsforskjell. Av den grunn er alle parametriske studier gjort basert på den tredimensjonale modellen hvor FKN er definert som 1.

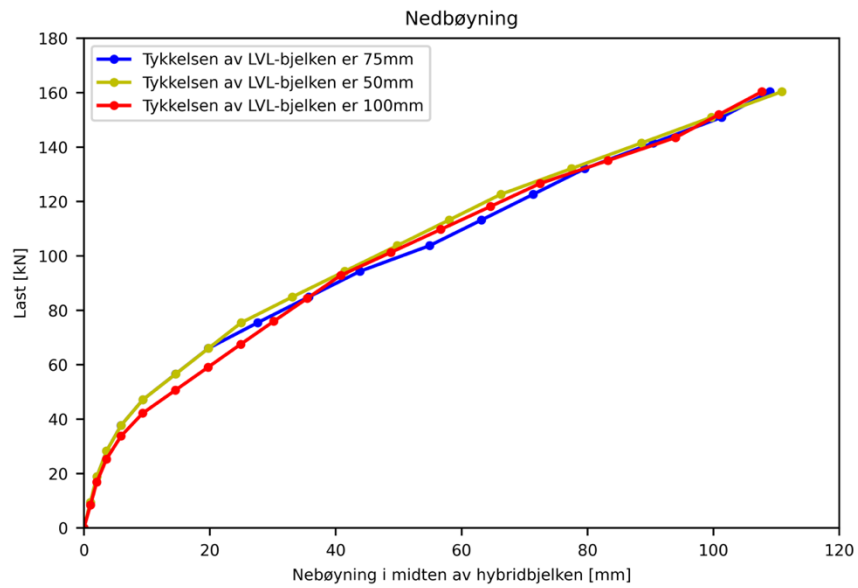
4.2.1 Parametrisk studie 1: Endre tykkelse på LVL-bjelke

Ved den første parameterstudien blir tykkelsen av LVL-bjelken forandret. Den originale tykkelsen er 75 mm og den blir deretter endret til 50 mm og 100 mm. Tabell 4.3 viser resultater på hvordan ultimate nedbøyning (v_{ult}) og ultimate glidning (u_{ult}) forandrer seg ved ulike tykke LVL-bjelker. Ultimate nedbøyning er større enn originale når LVL-bjelken er tykkere og er mindre når LVL-bjelken er tynnere.

Tabell 4.3: Resultat for når tykkelse av LVL-bjelken endres.

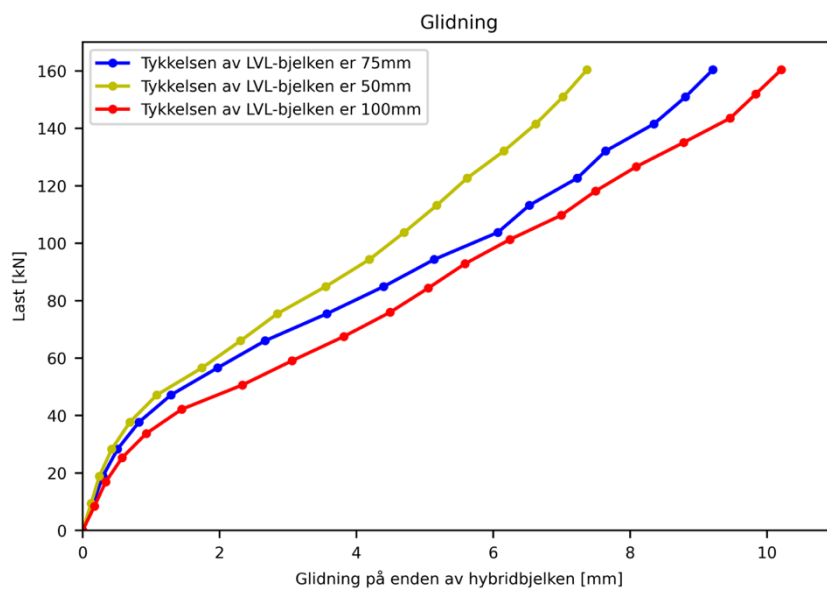
Tykkelse av LVL-bjelken (mm)	50mm	75mm (original)	100mm
Påført nedbøyning (mm)	92,50	92,50	92,50
Ultimate nedbøyning i midten av bjelken (v_{ult}) (mm)	110,85	108,98	107,72
Ultimate glidning ved enden av bjelken (u_{ult}) (mm)	7,37	9,21	10,21

Figur 4.8 viser en sammenligning av nedbøyninger for hybridbjelken steg for steg når tykkelsen av LVL-bjelken endrer seg. Nedbøyninger er annerledes, men forskjellen er ikke signifikant.



Figur 4.8: Nedbøyninger av hybridbjelken når tykkelsen av LVL-bjelken endres.

Figur 4.9 viser glidninger på enden av hybridbjelkene når tykkelser på LVL-bjelker er ulike. Det er tydelig at glidningen er minst når LVL-bjelken er 50 mm tykk og er størst når LVL-bjelken er 100 mm tykk.



Figur 4.9: Glidning på enden av hybridbjelken når tykkelsen av LVL-bjelken endres.

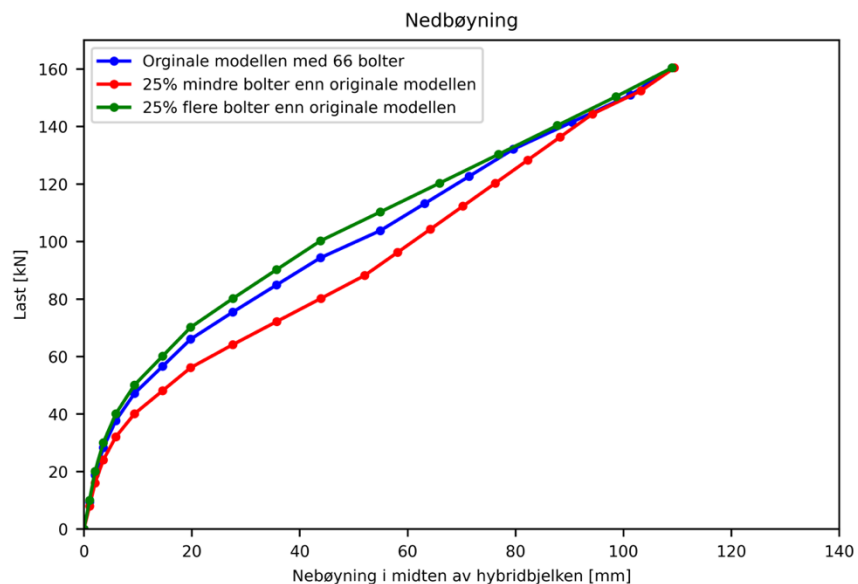
4.2.2 Parametrisk studie 2: Endre antall bolter

Ved den andre parametriske studien er antall bolter endret for å sjekke om det vil påvirke resultater. Det blir 25% økning og reduisering av bolter i forhold til originale antall - 66 bolter. Sammenligning av ultimate resultater er vist i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Resultater når antall bolter endres.

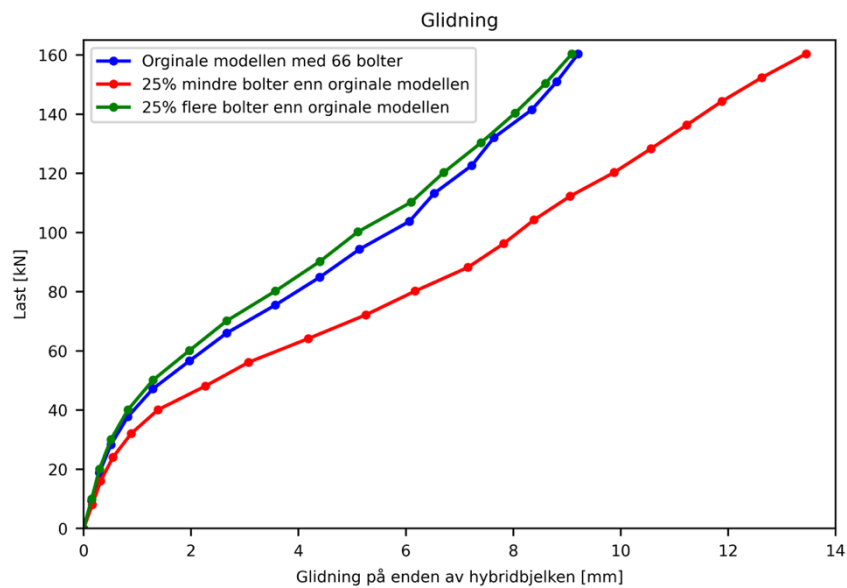
	25% mindre bolter enn originale	Originale antall	25% flere bolter enn originale
Antall bolter (total)	50	66	82
Ultimate nedbøyning i midten av bjelken (v_{ult}) (mm)	109,41	108,98	108,99
Ultimate glidning ved enden av bjelken (u_{ult}) (mm)	13,45	9,21	9,09

Figur 4.10 viser nedbøyninger når antall bolter brukt i hybridbjelkene er ulike. Nedbøyningen er størst når det er færrest bolter brukt og er minst når det er flest bolter brukt.



Figur 4.10: Nedbøyning i midten av hybridbjelken når antall bolter endres.

Figur 4.11 viser glidninger på enden av hybridbjelker når boltantallet endrer seg. Det viser at glidningen er minst når det er flest bolter brukt og størst når det er færrest bolter brukt.



Figur 4.11: Glidning på enden av hybridbjelken når antall bolter endres.

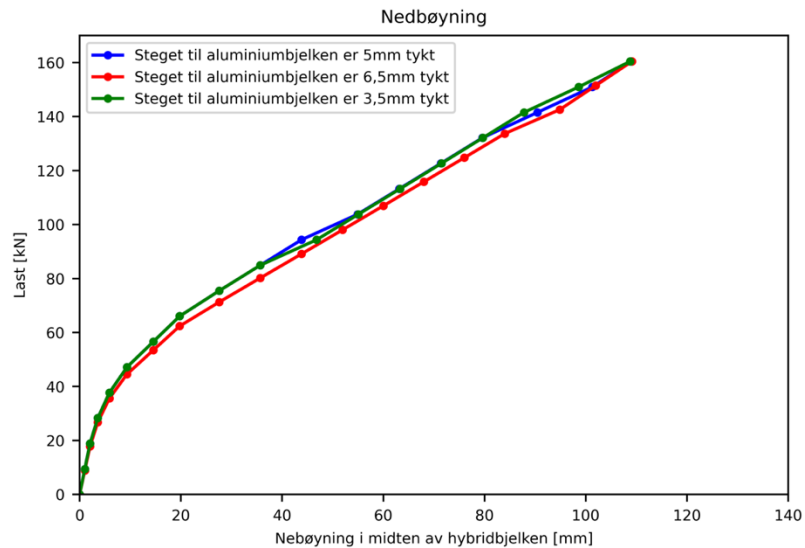
4.2.3 Parametrisk studie 3: Endring av aluminiumbjelken

Elastisitetsmodulen til aluminiumbjelken er omtrent 4 ganger større enn LVL-bjelken. Hvis profilen til aluminiumbjelken endre seg, vil det også påvirke styrken til hybridbjelken. I denne delen av parametriske studien, blir tykkelsen til steget endret fra 5 mm til 3,5 mm og til 6,5 mm. Tabell 4.5 viser ultimate nedbøyning i midten av hybridbjelken og ultimate glidning på enden av hybridbjelken når tykkelsen av steget på aluminiumbjelken endres.

Tabell 4.5: Resultater når tykkelsen på steget endres.

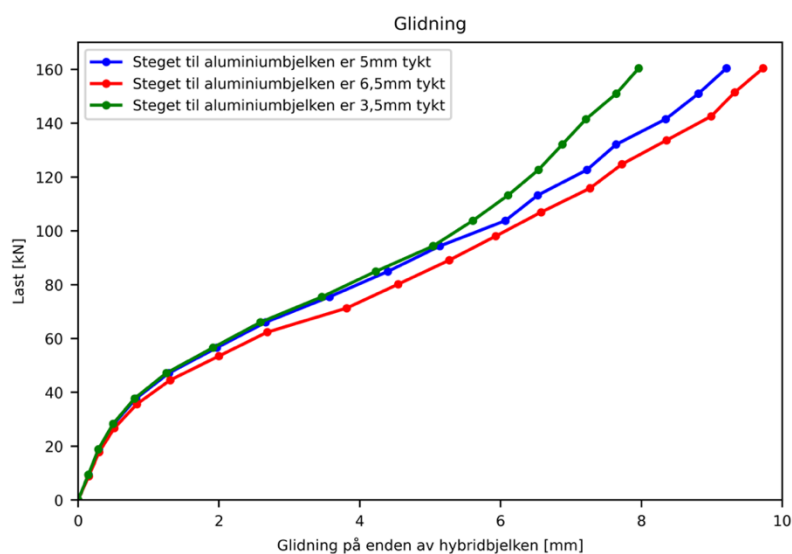
Tykkelsen på steget (mm)	3,5	5	6,5
Ultimate nedbøyning i midten av hybridbjelken (v_{ult}) (mm)	108,75	108,98	109,10
Ultimate glidning ved enden av hybridbjelken (u_{ult}) (mm)	7,96	9,21	9,73

Figur 4.12 viser økende nedbøyninger av hybridbjelker når steg på aluminiumbjelker er ikke like tykke. Nedbøyningen er størst når aluminiumbjelken har tykkeste steget og er minst når den har tynneste steget. Generelt er forskjellen ikke signifikant.



Figur 4.12: Nedbøyning i midten av hybridbjelken når tykkelsen av steget til aluminiumbjelken endres.

Figur 4.13 viser glidningen på enden av hybridbjelken når tykkelsen av steget på aluminiumbjelken endrer seg. Glidningen er størst når steget er like tykt som flenser (6,5 mm) og er minst når steget er 3,5 mm.



Figur 4.13: Glidning på enden av hybridbjelken når tykkelsen av steget til aluminiumbjelken endres.

5 Diskusjon:

I denne delen av oppgaven skal resultatet fra kapittel 4 oppsummeres og tolkes. Det er ikke bare en analyse av mekanisk reaksjon av hybridbjelken under belastning, men også en dypere forståelse av implikasjoner og begrensinger.

5.1 Verifisering av den tredimensjonale modellen

Formålet med å bygge en numerisk modell i en FEM-modelleringsprogramvare, er å gjøre en nøyaktig simulering av hybridbjelken brukt i eksperimentell bøyetest, slik som vist i eksperimentet til Chybiński og Polus (2021). Et nøyaktig resultat fra numeriske modellen bidrar til en troverdig basis for parametriske studier. Slike studier er ment for å gjøre en tilnærmet vurdering av faktorer som kan påvirke materialeegenskaper og oppførselen av hybridbjelken.

Resultatet i delkapittel 4.1 viser at simuleringen av hybridbjelken, ved å bygge og løse en tredimensjonal modell i FEM-modelleringsprogramvaren som Ansys, gir kun 5 til 10 prosent avvik fra de eksperimentelle resultater. Det påviser at den numeriske modellen gir en god simulering av hybridbjelken og nøyaktigheten av simuleringen kan justeres etter behov, ved å endre parametere innbygd i programvaren, som den reelle konstanten FKN.

Den reelle konstanten FKN bestemmer kontaktstivheten i normalretning. Endring av kontaktstivheten har gitt relativt lite påvirkning på ultimate nedbøyning, men avviket forårsaket av ultimate glidning har økt med 5%, se tabell 4.1 og tabell 4.2. En mulig forklaring er at nedbøyningen av hybridbjelken er et resultat av påført trykk og den virker i samme retning som trykket. Siden trykket har ingen separeringseffekt, vil kontaktstivheten ha lite å si for endring av ultimate nedbøyningen. Derimot hvis påførte laster var strekk istedenfor trykk, vil resultatet av ultimate nedbøyningen mest sannsynlig påvirkes mer av kontaktstivheten.

Som nevnt tidligere har avviket av glidning økt med 5% når konstanten FKN reduseres fra 10 til 1. Dette er fordi glidningen er en differanse av deformasjoner fra LVL-bjelken og aluminiumbjelken i x-retning (figur 4.7). Større kontaktstivhet gir mindre differanse. Avviket oppstår når kontaktstivheten avtar, altså når FKN endres fra 10 til 1.

Figur 4.2 viser at nedbøyningen øker relativt lineært fra 0 kN til 60kN. Det tyder på at dette er den elastiske deformasjonsfasen hvor bjelken kan komme tilbake til den opprinnelige formen når belastningen synker. Stigningen avtar fra og med 75 kN, dette er altså flytegrensen. Det er grensen hvor hybridbjelken går fra den elastiske fasen til den plastiske fasen. Hybridbjelken vil deretter øke fastheten til det høyeste punktet som vist både i figur 4.2 og figur 4.4. Forskjellen fra figur 4.4 er at flytegrensen i figur 4.4 ligger omtrent ved ca. 70kN, men økningstrend er det samme. Grafene har ulike nøyaktigheter i figur 4.3 og figur 4.5, men resultater for glidningen har felleskap. Under den elastiske deformasjonsfasen øker glidningen lineært og etter flytegrensen øker glidningen stadig fram mot halsing oppstår.

Konturplottet for nedbøyninger (figur 4.6) viser at ultimate nedbøyningen ligger i midten av hybridbjelken. Det er forventet fordi hybridbjelken ligger på to opplagre og svake punktet er derfor i midten av opplagerne. I tillegg til stivheten til materialer, er nedbøyningen også avhengig av lastspenn som er altså avstand mellom opplagerne. Hvis avstanden øker, vil ultimate nedbøyningen være større. Figur 4.7 er et konturplott som viser glidning på enden av hybridbjelken. Grunnen til at det blir en forskyvning fra LVL- til aluminiumbjelken er for det første har bjelkene ulike stivheter som gjør at de deformerer ulikt under påførte laster og for det andre er kontaktstivheten ikke stor nok til at de kan fungere 100% som en helhet.

Fokuset i denne oppgaven er å studere materialegenskaper ved hjelp av en verifisert numerisk modell. Bruk av elementmetoden øker effektiviteten og produktiviteten. Manuelle eksperimenter er både tidskrevende og ressurskrevende noe som gjør at det blir vanskelig og kostbart å gjenta prosessen mange ganger. Likevel er det viktig å gjøre eksperimenter med ekte materialer fordi FEM-modellen må verifiseres. Uten verifisering av FEM-modellen, vil parametriske studier gjort videre miste troverdigheten sin.

5.2 Parametriske studier

Parametriske studier er basert på modellen hvor konstanten FKN er lik 1. Selv om nøyaktigheten av resultatet er mindre når FKN er lik 1, er grafene bygd av færre punkter mer lesbare og lettere å forstå. Hensikten med parametriske studier er å studere materialegenskaper ved å endre parametere av hybridbjelken og se hvordan ulike parametere påvirker bjelkens oppførsel. Via parametriske studier kan materialegenskaper forstås på et dypere nivå. Dermed

kan det bidra til å utvikle materialets funksjonalitet, design og gi en dypere forståelse av bruksområdet. I denne oppgaven er tre parametriske studier gjort ved å endre tykkelsen av LVL-bjelke, endre antall bolter i hybridbjelken og endre tykkelse av steget til aluminiumbjelken.

5.2.1 Parametrisk studie 1

Den første parametriske studien er gjort ved å endre tykkelsen på LVL-bjelken for å se hvordan det påvirker styrken. Den originale tykkelsen er 75 mm og under denne parametriske studien har tykkelsen til LVL-bjelken blitt både redusert til 50 mm og økt til 100 mm. Tabell 4.3 viser at den ultimate nedbøyningen, i midten av bjelken, øker når tykkelsen av LVL-bjelken reduseres til 50 mm. Derimot har glidningen mellom bjelkene blitt redusert relativt mye når LVL-bjelken blir tynnere. Det motsatte skjer når tykkelsen øker til 100 mm: nedbøyningen i midten av bjelken minsker, mens glidningen øker.

Det samme fenomenet vises også på figur 4.8 og figur 4.9. Det er tydelig fra figur 4.8 at det ikke er store forskjeller av nedbøyninger i midten av bjelken selv om tykkelsen av LVL-bjelken endres. Det sammenfaller med forventet resultat med tanken på LVL-bjelken ikke har like store elastisitetsmodul som aluminiumbjelken. Dermed gir den lite påvirkning på stivheten når tykkelsen av LVL-bjelken endres. Glidningen vist i figur 4.9 forteller derimot at tykkere LVL-bjelken vil forårsake større glidning. En mulig forklaring kan være at den tykkere LVL-bjelken er stivere enn den tynnere LVL-bjelken. Stivere LVL-bjelker føre også til mindre deformasjon i x-retning. Dette skaper en større differanse mellom LVL-bjelke og aluminiumbjelken i x-retning. Denne differansen er altså glidningen. Ved å endre tykkelsen på LVL-bjelken, under samme belastning, vil deformasjonen til LVL-bjelken i x-retning endrer seg mye mer en aluminiumbjelken (se vedlegg). En tynnere LVL-bjelken kan brukes for å oppnå omtrent samme effekt som den originale tykkelsen, men det virker unødvendig å øke tykkelsen på LVL-bjelken.

5.2.2 Parametrisk studie 2

For å se hvordan antall bolter vil påvirke hybridbjelken har antall bolter bli økt med 25% og redusert med 25% fra det originale antallet. Det er viktig å bruke partall antall bolter. Derfor er 25% av 66 bolter rundet ned til 16, istedenfor 17. Grunnen til at partallbolter kreves er fordi boltene er plassert symmetrisk på 2 rader som figur 3.2 viser. Derfor blir antall boltene endret fra 66 til 50, 25% reduksjon, og fra 66 til 82, 25% økning, for å se hvordan endring av antall bolter vil påvirke hybridbjelkens respons.

Tabell 4.4 viser at ultimate nedbøyningen i midten av bjelken blir større når det er færre bolter, og mindre når det er flere bolter. Den ultimate glidningen på enden av hybridbjelken øker signifikant når antall boltene minskes med 25% og reduseres når antall bolter økes. Resultatene samsvarer med forventningene. Den ultimate nedbøyningen, ved bruk av færre bolter, er ikke mye lavere enn den originale modellen. Ut ifra figur 4.10 er det tydelig at nedbøyningen øker raskere enn den originale hybridbjelken, ved samme belastning. Når det er færre bolter, vil LVL-bjelken og aluminiumbjelken være dårligere festet og dermed blir det en større glidning mellom bjelkene. Det samme kan ses i Figur 4.11. Likevel er det tydelig i figur 4.11 at virkningen av å redusere antall bolter er større enn virkningen av å øke antall bolter. Det tyder på at 66 bolter gir allerede god stivhet for å feste LVL-bjelken og aluminiumbjelken sammen. Boltantallet kan økes, men det anbefales ikke å minske flere bolter.

5.2.3 Parametrisk studie 3

Tabell 3.1 viser at aluminiumbjelken har høyere elastisitetsmodul enn LVL-bjelken. Derfor når tykkelse av steget på aluminiumbjelken endres, vil styrken til hybridbjelken være påvirket. I den tredje parametriske studien er tykkelsen til steget endret fra 5 mm til 6,5 mm. Dette er fordi tykkelsen på flensene er 6,5mm. Tykkelsen på steget er også endret til 3,5 mm. Ultimate nedbøyninger i midten av hybridbjelkene er vist i tabell 4.5. Den ultimate nedbøyningen øker når steget blir fortykket og reduseres når steget blir fortynnet. Det samme gjelder for den ultimate glidningen på enden av bjelken. Likevel gir ikke endring av tykkelsen til steget en tydelig forskjell, for nedbøyning, fra den originale modellen. Dette kan også ses i figur 4.12.

Det er vanskelig å se forskjellen på ultimate nedbøyninger på figur 4.12, men utviklingen av nedbøyninger, i midten av hybridbjelker, øker signifikant raskere når steget er 6,5 mm enn ved andre tykkelser. En mulig årsak kan være at tykkere steg gir større tyngde for hybridbjelken i y-retning. Dermed forårsaker tykkere steget større nedbøyning enn tynnere steget. Likevel er variasjonen av nedbøyning ikke signifikant (figur 4.12). Det tyder på at endring av tykkelsen på steget bidrar, men lite på den helhetlige stivheten av hybridbjelken.

I forhold til utvikling av nedbøyninger varierer veksten av glidninger relativt betydelig når tykkelsen av steget endrer seg. Når steget er 6,5 mm, øker glidningen jevnt oppover og den har en lignende økningstrend som den originale modellen (figur 4.13). Når steget er 3,5 mm, endres

glidningen omtrent på samme måte som den originale modellen, før flytegrensen. Fra og med midtfasen av plastisk deformasjon avtar glidningsutvikling og ultimate glidningen er dermed mindre enn i den originale grafen. Det kan være forårsaket av at stivheten på aluminiumbjelken blir mindre når steget blir 3,5 mm. Stivhetsforskjell er ikke signifikant før 70 kN. Som nevnt tidligere ligger flytegrense ved omtrent 70kN og den plastiske deformasjonsfasen starter. Tynnere steg, på aluminiumbjelken, påvirker i større grad den plastiske deformasjonsfasen enn den elastiske deformasjonsfasen.

Glidningen øker når steget er tykkere og reduseres når steget er tynnere. En mulig årsak kan være at tykkere steg gir høyere stivhet og dermed får aluminiumbjelken mindre deformasjon i x-retning. Forskjellen mellom LVL-bjelken og aluminiumbjelken blir større, noe som betyr at glidningen øker. Hvis steget blir tynnere, skjer det motsatte.

5.2.4 Tillegg kommentar

Det som er felles for alle parametriske studier er at de endelig ultimate nedbøyningene i midten av hybridbjelkene har ulikheter, men ikke betydelige mye. Potensielle årsaken kan være at påførte nedbøyninger på den tredimensjonale modellen er basert på ultimate nedbøyningen når LVL-bjelken har første gang oppstått brudd. Det kan forstås som starten av halsing i den plastiske deformasjonsfasen for LVL-bjelken. Endring av parametere påvirker stivheten til hybridbjelken, men førstegangsbruddgrensen til LVL-bjelken forandres lite. Hypotetisk sett kan den forbedres ved å bytte til et annet produkt som har høyere bruddgrense enn LVL-R studert i oppgaven. På denne måten vil styrken til LVL-bjelken forbedres.

6 Konklusjon

Denne oppgaven har analysert mekaniske egenskaper av hybridbjelken ved hjelp av elementmetoden og en tredimensjonal modell. Geometrien er basert på eksperimentelt bøyetest illustrert av Chybiński og Polus (2021). Modellen er verifisert mot resultatet av prøvebjelke 1 brukt i bøyetesten. Det er presentert 2 numeriske modeller med ulike nøyaktighet i oppgaven. Nøyaktighetene er mellom 5 og 10 prosent. Generelt gir modellen en god simulering av hybridbjelken.

Verifisering av den numerisk tredimensjonale modellen er viktig for at den skal kunne brukes videre i parametriske studier. Dette øker troverdigheten til modellen slik at den kan brukes i fremtidige studier. Ved å justere parametere innbygd i Ansys, slik som den reelle konstanten FKN, kan nøyaktigheten av simuleringen varieres basert på behov. Den numerisk tredimensjonale modellen har mange fordeler som den tradisjonelle, eksperimentelle metoden ikke kan oppnå. Likevel er det ikke mulig å bygge og løse den numeriske modellen troverdig nok uten verifisering.

Når LVL-bjelken er fortykket vil ultimate nedbøyningen minske og den øker når LVL-bjelken blir tynnere. Dette er fordi stivheten av hybridbjelken vil minske når tykkelsen på LVL-bjelken reduseres. Derimot har glidningen mellom LVL-bjelken og aluminiumbjelken økt ved tykkere LVL-bjelken. Det er mest sannsynlig på grunn av stivhetsendring når tykkelsen på LVL-bjelken endres. En tynnere LVL-bjelke kan brukes til å forbedre glidning mellom delene av hybridbjelken, men en tykkere LVL-bjelke gir ikke signifikant forbedring på stivheten av hybridbjelken.

Antall bolter bestemmer kontaktstivheten. Ved 25% reduksjon av boltantallet har den ultimate nedbøyningen og glidningen økt signifikant. Dette er ikke tilfellet ved 25% økning av boltantallet. Det betyr at det originale antallet, 66 bolter, er tilstrekkelig for å gi en stabil kontakt mellom bjelkene. Antall bolter kan økes hvis det er ønskelig, men det er ikke nødvendig. Det anbefales ikke å redusere boltantallet.

Nedbøyningen i midten av hybridbjelken øker når steget av aluminiumbjelken er like tykt som flensene, og minsker når steget er tynnere enn originalt. Glidningen på enden av hybridbjelken

øker når steget blir tykkere og minsker når steget blir tynnere. Forandring av nedbøyningen forekommer sannsynligvis fordi endring i steget gir konsentrert tyngdeforandring i y-retning. Likevel er endringer av nedbøyning ikke signifikant som indikerer at endring av tykkelse på steget bidra lite til stivheten av hybridbjelken.

Generelt kan hybridbjelken av LVL og aluminiumlegering være et godt alternativ til tradisjonelle byggematerialer. Den kombinerer fordeler fra begge materialene og er et konstruksjonselement som har høy styrke og høy korrosjonsbestandighet. Hybridbjelken har høy stabilitet og stivhet i forhold til sin lave vekt. Disse egenskapene vil skille den fra andre type materialer.

7 Videre arbeid

Dette kapitlet introduserer andre aspekter som kan være interessant å gjøre ved videre arbeid:

- Det vil være interessant å se forskjellen hvis LVL-bjelken erstattes med en annen type av LVL hvor enkelte finérslag er limt på tvers (delkapittel 2.1.2). På denne måten vil styrken og stivheten av LVL-bjelke forbedres. Dermed bør hybridbjelken også være forsterket.
- I tillegg til mekaniske egenskaper, bør termiske egenskaper til hybridbjelken studeres nærmere. For at hybridbjelken skal kunne brukes som et byggemateriale, er det viktig å bli kjent med toleransen av hybridbjelken mot brann.
- Et hybrid-sandwichelement av LVL og aluminiumlegering kan være interessant å studere. Elementet består av 2 LVL -bjelker med en aluminiumbjelke imellom. På denne måten kan dette elementet mest sannsynlig fungere både som en bjelke og som en søyle.

8 Referanser:

- Ashby, M., Cope, E. & Cebon, D. (2013). Chapter 10 - Materials Selection for Engineering Design. I: Rajan, K. (red.) Informatics for Materials Science and Engineering, s. 219-244. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Baker, D. W., Colorado State University, Haynes, W. & Massachusetts Maritime Academy. (2023). Engineering Statics: Open and Interactive Daniel Baker William Haynes Tilgjengelig fra: <https://engineeringstatics.org/pdf/statics.pdf>.
- Bird, J. (2001). Newnes Engineering Science Pocket Book Third Edition utg.: Routledge
- Bodig, J. & Jayne, B. A. (1993). Mechanics of Wood and Wood Composites: Krieger Publishing Company.
- Budynas, R. & Nisbett, J. K. (2006). Shigley's Mechanical Engineering Design. New York McGraw-Hill Companies
- Callister, W. D. J. & Rethwisch, D. G. (2020). Callister's Materials Science and Engineering: An introduction. 10th Edition utg.: John Wiley & Sons Inc.
- Cowin, S. C. & Doty, S. B. (2007). Modeling Material Symmetry. I: Tissue Mechanics, s. 139-167. New York, NY: Springer New York.
- Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook—Wood as an engineering material. Madison, WI: U.S: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Frøstrup, A. (2012). Tømrerteori: Konstruksjoner i tre. Tønsberg: Gyldendal Undervisning
- Hibbeler, R. C. (2016). Engineering Mechanics: Statics, 14 edition Hoboken, New Jersey Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc. .
- Hibbeler, R. C. (2018). Mechanics of Materials. Tenth Edition in SI Units utg. Harlow, United Kingdom: Pearson Education.
- Kamke, F. A. (2004). SOLID WOOD PRODUCTS | Wood-based Composites and Panel Products. I: Burley, J. (red.) Encyclopedia of Forest Sciences, s. 1338-1345. Oxford: Elsevier.
- Langtangen, H. P. (2016). A primer on Scientific Programming with Python Fornebu Norway: Springer
- Lohne, O. (2020). flytegrense. I: Store norsk leksikon Tilgjengelig fra: <https://snl.no/flytegrense> (lest 20.April.2023).

- Sverdrup, H. U. (2019). The global sustainability challenges in the future: The energy use, materials supply, pollution, climate change and inequality nexus. I: What Next for Sustainable Development?, s. 49-75: Edward Elgar Publishing.
- Thompson, M. K. & Thompson, J. M. (2017). Chapter 1 - Introduction to ANSYS and Finite Element Modeling. I: Thompson, M. K. & Thompson, J. M. (red.) ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis, s. 1-9: Butterworth-Heinemann.
- Zhang, H. (2016). 2 - Surface characterization techniques for polyurethane biomaterials. I: Cooper, S. L. & Guan, J. (red.) Advances in Polyurethane Biomaterials, s. 23-73: Woodhead Publishing.
- Forskr. om bærende konstruksjoner, u. (1984). Forskrift for bærende konstruksjoner til bruk for utvinning eller utnyttelse av petroleumsforekomster (FOR-1984-10-29-1804). 1984 912, ODs regelsamling. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/forskrift/1984-10-29-1804>.
- SINTEF. (2004). Byggforskserien 525.814 Taksperre av tre: SINTEF. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/398/taksperrer_av_tre (lest 10.April).
- SINTEF. (2010). Byggforskserien 421.001 SI - enheter. Omregningstabeller SINTEF. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/182/si-enheter_omregningstabeller (lest 10.April).
- Standard Norge. (2005a). Eurocode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1- 8: Knutepunkter og forbindelser NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009: Standard Norge. Tilgjengelig fra: www.standard.no (lest 10.April).
- Standard Norge. (2005b). Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger NS-EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + NA:2010 Standard Norge Tilgjengelig fra: www.standard.no.
- Standard Norge. (2007). Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler NS-EN 1999 - 1 - 1: 2007 + A1:2009 + NA:2009 Tilgjengelig fra: www.standard.no.
- Ansys Inc. (2022a). Command Reference (Versjon Ansys 2022 R1). Tilgjengelig fra: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v221/en/pdf/Ansys_Mechanical_APDL_Command_Reference.pdf.
- Ansys Inc. (2022b). Element Reference (Versjon Ansys 2022 R1). Tilgjengelig fra: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v221/en/pdf/ANSYS_Mechanical_A_PDL_Element_Reference.pdf (lest 3. Mars.2023).

- Ansys Inc. (2022c). Feature Archive (Versjon Ansys 2022 R1). Tilgjengelig fra:
https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v221/en/pdf/ANSYS_Mechanical_A_PDL_Feature_Archive.pdf.
- Ansys Inc. (2022d). Material reference (Versjon Ansys 2022 R1). Tilgjengelig fra:
https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v221/en/pdf/ANSYS_Mechanical_A_PDL_Material_Reference.pdf.
- Ansys Inc. (2022e). Theory Reference (Versjon Ansys 2022 R1). Tilgjengelig fra:
https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v221/en/pdf/ANSYS_Mechanical_A_PDL_Theory_Reference.pdf.
- Ansys Inc. (2022). Contact Technology Guide (Versjon Ansys 2022 R1). Tilgjengelig fra:
https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v221/en/pdf/ANSYS_Mechanical_A_PDL_Contact_Technology_Guide.pdf (lest 3.mars.2023).
- Hiziroglu, S. (2016). Laminated Veneer Lumber (LVL) as a Construction Material, 405-744-6071: Oklahoma Cooperative Extension Service.
- Solli, K. H. & Glasø, G. (2021). Trebaserte konstruksjonselementer, Nr. 27.
- STEICO. (2019). STEICO LVL Construction Guide STEICO.
- Alves, R., Mantilla, J., Bremer, C. & Carrasco, E. (2015). Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood. *BioResources*, 10. doi: 10.15376/biores.10.1.1845-1856.
- Ansys Inc. (2004). Ansys Contact Technology Guide.
- Arvidsson, D. (2018). Additive weld manufacturing and material properties effect on structural margins the Department off Aeronautical and Vehicle Engineering Division. Trollhättan, Sweden: KTH Kungliga Tekniska högskolan. Tilgjengelig fra:
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1287144/FULLTEXT01.pdf>.
- Bruno, R., Bevilacqua, P., Cuconati, T. & Arcuri, N. (2019). Energy evaluations of an innovative multi-storey wooden near Zero Energy Building designed for Mediterranean areas. *Applied Energy*, 238: 929-941. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.035>.
- Chybiński, M. & Polus, Ł. (2019). Theoretical, experimental and numerical study of aluminium-timber composite beams with screwed connections. *Construction and Building Materials*, 226: 317-330. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.101>.

- Chybiński, M., Polus, Ł., Maria, R. & Piotr, S. (2019). The Evaluation of the Fracture Surface in the AW-6060 T6 Aluminium Alloy under a Wide Range of Loads. *Metals*, 9: 324. doi: 10.3390/met9030324.
- Chybiński, M. & Polus, Ł. (2021). Experimental and numerical investigations of aluminium-timber composite beams with bolted connections. *Structures*, 34: 1942-1960. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.111>.
- ClubTechnical. (2019). Theory of Machines. Bolt | Types, Parts, Manufacturing, Material Selection, Applications, 22.april.
- Hassanieh, A., Valipour, H. R. & Bradford, M. A. (2016). Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 122: 367-378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.005>.
- Hill, R. (1979). Theoretical plasticity of textured aggregates. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 85 (1): 179-191. doi: <https://doi.org/10.1017/S0305004100055596>.
- Kim, Y. J. & Harries, K. A. (2010). Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. *Engineering Structures*, 32 (10): 3225-3234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.011>.
- Leitner, E. J. (2011). THREE DIMENSIONAL MODELING OF WOOD MOMENT CONNECTIONS. College of Engineering: The Pennsylvania State University. Tilgjengelig fra: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/1772.
- Lim, H. & Hoag, S. (2013). Plasticizer Effects on Physical–Mechanical Properties of Solvent Cast Soluplus® Films. *AAPS PharmSciTech*, 14. doi: <https://doi.org/10.1208/s12249-013-9971-z>.
- Naseri, M. & Singh, B. (2021). Seismic analysis of hybrid structures with and without shear walls. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. doi: 10.1088/1755-1315/889/1/012045.
- Reinhold, G. (2008). Design of Aluminium structures : Selection of Structural Alloys
Structural Design according to Eurocode 9 : Essential Properties of Materials and Background Information.
- Tsalkatidis, T., Amara, Y., Embaye, S. & Nathan, E. (2018). Numerical Investigation of Bolted Hybrid Steel-Timber Connections. doi: 10.3389/fbuil.2018.00048
- Wang, Z., Gu, X., Mohrmann, S., Shen, Z., Huang, Y. & Zhou, Y. (2022). Study on the four-point bending beam method to improve the testing accuracy for the Elastic Constants

- of wood. European Journal of Wood and Wood Products. doi:
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1955447/v1>.
- Bell, K. & Meyer, R. W. (2022). Elementmetoden I: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra:
<https://snl.no/elementmetoden> (lest 12.April.2023).
- Engineering, B. U. M. Mechanics of Materials: Strain www.bu.edu: Boston University.
Tilgjengelig fra: <https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-strain/> (lest 10.mai).
- Hauge, G. (2021). Det er ikke synd på byggenæringen. TU.no: TU. Tilgjengelig fra:
<https://www.tu.no/artikler/det-er-ikke-synd-pa-byggenaeringen/513664> (lest 7.mai).
- Hofstad, K. (2022). Skjærspenning I: Store norske leksikon Tilgjengelig fra:
<https://snl.no/skj%C3%A6rspenning> (lest 21.april.2023).
- Hofstad, K. (2023). Spenning - mekanikk I: Store norske leksikon Tilgjengelig fra:
[https://snl.no/spenning - mekanikk](https://snl.no/spenning_-_mekanikk) (lest 21.april.2023).
- Hydro. (2019). Livssyklusen til aluminium. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/livssyklusen-til-aluminium/> (lest 2.January).
- Johansen, H. (2010). Mekaniske egenskaper og testing av dem. Materialære - metaller.
Tilgjengelig fra:
[http://www.ansatt.hig.no/heningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/9.%20mekaniske%20egenskaper%20og%20testing/Materiallaere-TDL-9-Mekaniske%20egenskaper%20og%20testing%20\(IM+TDL\)-10.pdf](http://www.ansatt.hig.no/heningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/9.%20mekaniske%20egenskaper%20og%20testing/Materiallaere-TDL-9-Mekaniske%20egenskaper%20og%20testing%20(IM+TDL)-10.pdf) (lest 5.Mai).
- Metsä Group. (2021). Innovative hybrid sandwich wall element: Metsä Group Tilgjengelig fra: <https://www.metsagroup.com/metsawood/news-and-publications/articles/innovative-hybrid-sandwich-element/> (lest 3.mai).
- Metsä Group. (2022). First time using hybrid-sandwich wall elements: Metsä Group
Tilgjengelig fra: <https://www.metsagroup.com/metsawood/news-and-publications/references/rauma-sawmill/> (lest 13.mai).
- Moore, S. (2021). Hybrid Construction: What Can it Offer?: AZoBuild. Tilgjengelig fra:
<https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8430>. (lest 03.mai).
- Norsk Industri. (u.å). Om Aluminiumsbransjen. Tilgjengelig fra:
<https://www.norskindustri.no/bransjer/aluminium/om-aluminiumsbransjen/> (lest 10.January).
- Norsk Stål. (2022). Aluminiumskinner 6060-T6 www.norskstaal.no. Tilgjengelig fra:
<https://www.norskstaal.no/produkter/alle-produkter/aluminiumskinner-6060-t6> (lest 10.mai.2023).

Pedersen, B. & Allkunne, T. K. (2023). Aluminium. I: Store norsk leksikon Tilgjengelig fra: <https://snl.no/aluminium> (lest 19.april.2023).

STEICO. (u.å). STEICO - LVL Laminated Veneer Lumber. Tilgjengelig fra: <https://www.steico.com/en/products/construction/laminated-veneer-lumber-lvl/steico-lvl-r-laminated-veneer-lumber> (lest 8.april).

Super Pantsu. (2021). ANSYS APDL 点焊基集 模拟点焊, 螺栓, 固紧件等连接方式: 技术邻. Tilgjengelig fra: <https://www.jishulink.com/video/c16776> (lest 23.april).

UNILIN PANELS. (u.å). LVL-R. Structural LVL-R beam for construction: UNILIN PANELS. Tilgjengelig fra: <https://www.unilinpanels.com/en/construction/timber-frame-construction/lvl-r> (lest 12.April).

Vedlegg:

Resultater hentet fra Ansys

Original modell med FKN = 10

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen			
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning	
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying				
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.18	0.16	
2	2	-2.06	2.06	0.05	0.34	0.29	
3.5	3	-3.60	3.60	0.08	0.58	0.50	
5	4	-5.15	5.15	0.11	0.81	0.70	
7.25	5	-7.46	7.46	0.16	1.16	1.00	
9.5	6	-9.78	9.78	0.21	1.52	1.31	
11.75	7	-12.09	12.09	0.28	1.87	1.59	
15.125	8	-15.57	15.57	0.37	2.41	2.04	
18.5	9	-19.05	19.05	0.47	2.96	2.49	
21.031	10	-21.65	21.65	0.56	3.31	2.75	
23.562	11	-24.26	24.26	0.61	3.73	3.11	
26.094	12	-26.89	26.89	0.68	4.06	3.39	
27.992	13	-28.88	28.88	0.74	4.37	3.63	
29.891	14	-30.91	30.91	0.83	4.70	3.86	
31.789	15	-32.94	32.94	0.95	5.02	4.07	
33.688	16	-34.98	34.98	1.09	5.34	4.25	
35.586	17	-37.02	37.02	1.24	5.69	4.45	
37.484	18	-39.07	39.07	1.39	6.02	4.63	
39.383	19	-41.11	41.11	1.55	6.35	4.80	
42.23	20	-44.16	44.16	1.80	6.82	5.02	
43.298	21	-45.30	45.30	1.87	7.02	5.15	
44.099	22	-46.16	46.16	1.92	7.13	5.22	
44.9	23	-47.02	47.02	1.96	7.28	5.32	
46.102	24	-48.31	48.31	2.03	7.45	5.42	
47.904	25	-50.24	50.24	2.16	7.75	5.58	
50.607	26	-53.11	53.11	2.39	8.20	5.81	
53.31	27	-55.98	55.98	2.64	8.70	6.06	
57.364	28	-60.26	60.26	3.09	9.45	6.36	
61.419	29	-64.54	64.54	3.58	10.21	6.63	
64.46	30	-67.75	67.75	3.97	10.76	6.79	
67.501	31	-70.94	70.94	4.38	11.33	6.95	
70.542	32	-74.14	74.14	4.79	11.91	7.12	
75.103	33	-78.92	78.92	5.44	12.84	7.41	
78.524	34	-82.49	82.49	5.93	13.53	7.60	
80.235	35	-84.29	84.29	6.17	13.83	7.66	
81.945	36	-86.08	86.08	6.38	14.12	7.74	
83.656	37	-87.87	87.87	6.61	14.45	7.84	
86.221	38	-90.55	90.55	6.93	14.91	7.98	
88.146	39	-92.57	92.57	7.17	15.26	8.09	
90.07	40	-94.58	94.58	7.42	15.65	8.23	
91.994	41	-96.58	96.58	7.67	16.07	8.40	
93.919	42	-98.60	98.60	8.04	16.38	8.35	
95.843	43	-100.62	100.62	8.50	16.90	8.40	
97.286	44	-102.13	102.13	8.68	17.26	8.58	
98.73	45	-103.64	103.64	9.03	17.56	8.53	
99.812	46	-104.77	104.77	9.16	17.71	8.55	
100.89	47	-105.90	105.90	9.33	18.02	8.68	
101.98	48	-107.03	107.03	9.57	18.23	8.66	
103.06	49	-108.16	108.16	9.74	18.42	8.68	
Ultimate:	104	50	-109.14	109.14	9.86	18.69	8.83

Original modell med FKN = 1

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen			
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning	
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying				
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.17	0.15	
2	2	-2.05	2.05	0.04	0.34	0.30	
3.5	3	-3.59	3.59	0.07	0.58	0.51	
5.75	4	-5.90	5.90	0.12	0.95	0.82	
9.125	5	-9.36	9.36	0.21	1.50	1.29	
14.188	6	-14.57	14.57	0.31	2.28	1.97	
19.25	7	-19.77	19.77	0.46	3.13	2.67	
26.844	8	-27.60	27.60	0.65	4.22	3.57	
34.438	9	-35.70	35.70	1.12	5.52	4.40	
42.031	10	-43.84	43.84	1.71	6.84	5.14	
52.431	11	-54.91	54.91	2.63	8.69	6.07	
60.231	12	-63.16	63.16	3.38	9.90	6.53	
68.031	13	-71.37	71.37	4.20	11.42	7.23	
75.831	14	-79.56	79.56	5.10	12.74	7.64	
86.231	15	-90.43	90.43	6.48	14.82	8.35	
96.631	16	-101.29	101.29	8.01	16.82	8.81	
Ultimate:	104	17	-108.98	108.98	9.18	18.39	9.21

Tykkelen på LVL-bjelken er 50 mm

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen			
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning	
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying				
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.14	0.12	
2	2	-2.05	2.05	0.04	0.28	0.24	
3.5	3	-3.59	3.59	0.07	0.50	0.42	
5.75	4	-5.91	5.91	0.12	0.81	0.69	
9.125	5	-9.37	9.37	0.20	1.29	1.08	
14.188	6	-14.58	14.58	0.30	2.05	1.74	
19.25	7	-19.79	19.79	0.43	2.73	2.31	
24.312	8	-25.00	25.00	0.57	3.41	2.85	
31.906	9	-33.09	33.09	0.97	4.52	3.55	
39.5	10	-41.42	41.42	1.49	5.68	4.19	
47.094	11	-49.74	49.74	2.09	6.78	4.70	
54.688	12	-58.01	58.01	2.76	7.94	5.17	
62.281	13	-66.24	66.24	3.53	9.14	5.62	
72.681	14	-77.44	77.44	4.72	10.87	6.15	
83.081	15	-88.58	88.58	6.06	12.68	6.62	
93.481	16	-99.67	99.67	7.53	14.55	7.02	
Ultimate:	104	17	-110.85	110.85	9.13	16.49	7.37

Tykkelen på LVL-bjelken er 100mm

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen			
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning	
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying				
1	1	-1.02	1.02	0.02	0.19	0.17	
2	2	-2.05	2.05	0.05	0.38	0.34	
3.5	3	-3.58	3.58	0.08	0.66	0.58	
5.75	4	-5.88	5.88	0.14	1.07	0.93	
9.125	5	-9.34	9.34	0.24	1.68	1.45	
14.188	6	-14.53	14.53	0.34	2.68	2.33	
19.25	7	-19.72	19.72	0.48	3.54	3.06	
24.312	8	-24.90	24.90	0.61	4.43	3.82	
29.375	9	-30.15	30.15	0.85	5.34	4.49	
34.438	10	-35.47	35.47	1.23	6.28	5.05	
39.5	11	-40.80	40.80	1.64	7.23	5.59	
47.094	12	-48.76	48.76	2.33	8.57	6.24	
54.688	13	-56.69	56.69	3.13	10.13	6.99	
62.281	14	-64.58	64.58	4.01	11.51	7.49	
69.875	15	-72.46	72.46	4.98	13.07	8.09	
80.275	16	-83.23	83.23	6.47	15.25	8.78	
90.675	17	-93.98	93.98	8.12	17.58	9.46	
97.338	18	-100.85	100.85	9.21	19.05	9.83	
Ultimate:	104	19	-107.72	107.72	10.31	20.52	10.21

25% mindre bolter

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen		
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying			
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.18	0.16
2	2	-2.05	2.05	0.04	0.36	0.32
3.5	3	-3.59	3.59	0.07	0.62	0.55
5.75	4	-5.90	5.90	0.12	1.00	0.89
9.125	5	-9.36	9.36	0.19	1.58	1.39
14.188	6	-14.57	14.57	0.27	2.54	2.27
19.25	7	-19.77	19.77	0.37	3.44	3.07
26.844	8	-27.59	27.59	0.54	4.73	4.18
34.438	9	-35.72	35.72	0.89	6.14	5.25
42.031	10	-43.91	43.91	1.25	7.41	6.17
49.625	11	-52.04	52.04	1.65	8.80	7.15
55.32	12	-58.13	58.13	1.96	9.78	7.82
61.016	13	-64.19	64.19	2.28	10.67	8.38
66.711	14	-70.22	70.22	2.62	11.68	9.06
72.406	15	-76.24	76.24	2.94	12.82	9.88
78.102	16	-82.25	82.25	3.30	13.86	10.56
83.797	17	-88.25	88.25	3.66	14.89	11.23
89.492	18	-94.24	94.24	4.05	15.93	11.88
98.035	19	-103.21	103.21	4.73	17.36	12.63
Ultimate:	104	-109.41	109.41	5.19	18.65	13.45

25% flere bolter

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen		
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying			
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.17	0.15
2	2	-2.05	2.05	0.04	0.34	0.30
3.5	3	-3.59	3.59	0.07	0.58	0.51
5.75	4	-5.90	5.90	0.12	0.95	0.83
9.125	5	-9.37	9.37	0.21	1.50	1.29
14.188	6	-14.57	14.57	0.31	2.28	1.97
19.25	7	-19.77	19.77	0.46	3.13	2.67
26.844	8	-27.60	27.60	0.65	4.22	3.57
34.438	9	-35.71	35.71	1.12	5.52	4.40
42.031	10	-43.85	43.85	1.73	6.84	5.11
52.431	11	-54.92	54.92	2.63	8.72	6.10
62.831	12	-65.90	65.90	3.70	10.41	6.70
73.231	13	-76.83	76.83	4.93	12.33	7.40
83.631	14	-87.72	87.72	6.29	14.32	8.03
94.031	15	-98.59	98.59	7.78	16.37	8.60
Ultimate:	104	-108.99	108.99	9.32	18.41	9.09

Steget til aluminiumbjelken er 6,5 mm

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen		
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying			
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.17	0.15
2	2	-2.05	2.05	0.04	0.34	0.30
3.5	3	-3.59	3.59	0.07	0.58	0.51
5.75	4	-5.90	5.90	0.12	0.95	0.83
9.125	5	-9.36	9.36	0.20	1.51	1.31
14.188	6	-14.56	14.56	0.30	2.29	2.00
19.25	7	-19.76	19.76	0.43	3.12	2.69
26.844	8	-27.59	27.59	0.62	4.43	3.81
34.438	9	-35.70	35.70	1.01	5.56	4.55
42.031	10	-43.84	43.84	1.47	6.74	5.27
49.625	11	-51.94	51.94	2.01	7.94	5.93
57.219	12	-60.00	60.00	2.63	9.20	6.57
64.812	13	-68.01	68.01	3.31	10.58	7.27
72.406	14	-76.00	76.00	4.06	11.79	7.72
80	15	-83.98	83.98	4.90	13.25	8.36
90.4	16	-94.87	94.87	6.18	15.17	8.99
97.2	17	-101.98	101.98	7.05	16.38	9.32
Ultimate:	104	-109.09	109.09	7.98	17.71	9.73

Steget til aluminiumbjelken er 3,5 mm

Tid	Mellomsteg	Deformasjon i y-aksen		Deformasjon i x-aksen		
		Nedbøying		Aluminiumbjelken	LVL-bjelken	Glidning
		(Hentet fra Ansys)	Nedbøying			
1	1	-1.03	1.03	0.02	0.17	0.15
2	2	-2.05	2.05	0.04	0.33	0.29
3.5	3	-3.59	3.59	0.08	0.57	0.50
5.75	4	-5.90	5.90	0.13	0.93	0.80
9.125	5	-9.36	9.36	0.22	1.47	1.25
14.188	6	-14.57	14.57	0.32	2.24	1.92
19.25	7	-19.77	19.77	0.49	3.08	2.59
26.844	8	-27.60	27.60	0.69	4.16	3.46
34.438	9	-35.70	35.70	1.32	5.55	4.23
44.837	10	-46.81	46.81	2.42	7.46	5.04
52.638	11	-55.08	55.08	3.36	8.96	5.60
60.438	12	-63.31	63.31	4.38	10.48	6.11
68.237	13	-71.49	71.49	5.48	12.01	6.54
76.037	14	-79.65	79.65	6.66	13.54	6.88
83.837	15	-87.78	87.78	7.93	15.14	7.21
94.237	16	-98.60	98.60	9.75	17.39	7.64
Ultimate:	104	-108.75	108.75	11.54	19.51	7.96



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway