

## MASTEROPPGAVE 2022

FAGOMRÅDE: TKT 4950 - Konstruksjonsteknikk	DATO: 14. Juni 2022	ANTALL SIDER: 48
---	---------------------	------------------

TITTEL:

**Dynamisk trykkapasitet i treverk og årringsbreddens betydning for materialegenskapene**

Dynamic compression of wood, and annual ring widths impact on material properties

UTFØRT AV:

Martin Melandsø



SAMMENDRAG:

Denne studien ser nærmere på trykkapasitet parallelt med fiberretningen i treverk under dynamiske tøyningshastigheter, samt årringsbreddens betydning for materialegenskaper som elastitetsmodul og trykkapasitet. Tidligere studier som undersøker sammenhengen mellom styrke og tøyningshastighet gir motstridende resultater, der noen rapporterer en økning, mens andre en reduksjon i styrke. Det blir totalt gjennomført 108 trykktester på små prøvestykker i tre. Det blir trykktestet i to kvasistatiske og en dynamisk tøyningshastighet, der det benyttes høyhastighetskamera for å måle tøyningen i hver test. For de dynamiske testene blir det benyttet Split-Hopkinson Pressure Bar. Videre blir det undersøkt om tøyningshastighet har en direkte korrelasjon med trykkapasiteten i prøvestykkene. De kvasistatiske testene legger grunnlaget for årringsstudiet. Her undersøkes sammenhenger mellom ulike parametere som E-modul, trykkapasitet og densitet med årringsbredden. Basert på dette kan det avgjøres hvilke materialegenskaper som påvirkes og delvis styres av årringsbredden. Studien finner en klar sammenheng mellom tøyningshastighet og trykkapasitet. Den karakteristiske trykkapasiteten viser 41% økning fra en kvasistatisk til dynamisk lastsituasjon. Årringsstudien konkluderer med klare sammenhenger mellom E-modul og årringsbredde, der lavere årringsbredde bidrar til høyere E-modul. Studien viser også korrelasjon mellom trykkapasitet og årringsbredde, der tettere årringsbredde bidrar til økt styrke i trykk.

FAGLÆRER: Haris Stamatopoulos

VEILEDER(E): Arild Holm Clausen og Haris Stamatopoulos

UTFØRT VED: Norges Teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU

## MASTER THESIS 2022

SUBJECT AREA: Structural engineering	DATE: June 14. 2022	NO. OF PAGES: 48
--------------------------------------	---------------------	------------------

TITLE:

**Dynamic compression of wood, and annual ring widths impact on material properties**

Dynamisk trykkapasitet i treverk og årringsbreddens betydning for materialegenskapene

BY:

Martin Melandsø



SUMMARY:

This research was conducted to determine the compressive strength parallel to grain of wood under dynamic load-situations. Additionally, it was investigated how the annular ring width affect the material properties. Former research that investigates the correlation between strain rate and strength gives contradicting results, where some report an increase, and some a decrease in strength. In total, 108 pressure tests were completed on small wooden specimens. The tests were performed in three different strain rates, where two were quasistatic and one dynamic. A high-speed camera was used to determine the strain during testing. Split-Hopkinson Pressure bar was used to perform the dynamic testing. Based on the tests in different strain rates, it was investigated if there was a correlation between strain rate and compressive strength. The annual ring study was based on the quasistatic tests, which are used to investigate the correlation between different parameters as Young's modulus, compressive strength and density to annual ring width. The study finds clear correlation between strain rate and compressive strength. When comparing the characteristic compressive strength from the quasistatic and dynamic testing, it shows a 41% increased compressive strength. The annual ring study shows the correlation between Young's modulus and annual ring width. The results also show a clear correlation between annual ring width and compressive strength, where a low width correlates with increased compressive strength.

RESPONSIBLE TEACHER: Haris Stamatopoulos

SUPERVISOR(S): Arild Holm Clausen og Haris Stamatopoulos

CARRIED OUT AT: Norwegian University of Science and Technology - NTNU

---

Masteroppgave 2022



Kunnskap for en bedre verden

## Dynamisk trykkapasitet i treverk og årringsbreddens betydning for materialegenskapene

TKT 4950\_1 Konstruksjonsteknikk

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: 14.06.2022

Hovedveileder: Haris Stamatopoulos

Medveileder: Arild Holm Clausen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk

## Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	1
2. Litteraturstudie .....	2
2.1. Tidligere studier om dynamisk testing treverk .....	2
2.2. Andre parametere som avgjør styrke til treverk.....	6
2.3. Falsk E-modul.....	8
2.4. Split-Hopkinson Pressure Bar.....	10
3. Gjennomføring av laboratorieøvelsene .....	12
3.1. Utskjæring og kartlegging av prøvestykker.....	12
3.1.1. Kartlegging av prøvestykker .....	12
3.1.2. Utskjæring av prøvestykker .....	14
3.2. Prøvestykkets geometri .....	15
3.2.1. Årringer.....	18
3.3. Trykktesting .....	19
3.3.1. Kvasistatisk trykktesting .....	19
3.3.2. Dynamisk trykktesting .....	22
4. Beregning av nøkkeltall .....	25
4.1. Densitet.....	25
4.2. Spenning .....	25
4.3. Tøyning .....	26
4.4. E-modul.....	26
4.5. Split-Hopkinson Pressure Bar .....	29
4.6. Beregning av karakteristisk styrke .....	31
5. Resultat og diskusjon.....	33
5.1. Spenning-tøyningsdiagrammer for kvasistatisk trykktesting.....	33
5.2. E-modul.....	37
5.3. Årringenes påvirkning på materialeegenskaper .....	38
5.5. Tøyningshastighetens påvirkning på trykkapasitet.....	42
5.6. Karakteristisk styrke.....	43
6. Konklusjon.....	45
6.1. Forslag til videre arbeid .....	46
Kildehenvisning .....	47

## 1. Innledning

Treverk er et av de mest tilgjengelige materialene vi har i dag, og det har lange tradisjoner som byggemateriale i Norge. I dagens samfunn er dette mer aktuelt enn noen gang, med tanke på klima og ønsket om å redusere klimautslipp i byggebransjen. Treverk er et materiale som Norge har stor tilgang på og er lett tilgjengelig, samtidig som det har et lavt klimaavtrykk sammenlignet med andre konstruksjonsmaterialer som stål og betong.

Treverk er et porøst materiale, med en densitet som varierer mellom 290 til 900 kg/m<sup>3</sup> og en elastitetsmodul parallelt med fibre på 7000 til 20 000 MPa. Trykkapasitet parallelt med fibre er på mellom 16-34 MPa basert på tall fra Norsk Standard [17]. Relativt sett er ikke dette en veldig høye verdier sammenlignet med andre materialer som for eksempel stål. Setter man derimot styrken i sammenheng med densiteten, viser det seg å være et material med svært gode kvaliteter som kan utnyttes.

Ettersom treverk blir et mer aktuelt materiale å bruke i større konstruksjoner, er det viktig å forstå hvordan treverk oppfører seg i ulike og ekstreme lastsituasjoner. I dag er det relativt begrenset med dokumentert forskning som tar for seg dynamiske egenskaper i treverk. På bakgrunn av dette tar denne studien for seg hvordan treverk oppfører seg i ulike tøyningshastigheter. Dette er data som er nødvendig hvis man ønsker å bygge bygninger med høye sikkerhetskrav. Her er det viktig med forutsigbarhet i materiale, skulle laster som krasj og kollisjon oppstå. Denne studien har derfor som mål og bedre forståelsen av de dynamiske egenskapene til treverk under trykk.

Treverk er et ikke-homogent materiale, med variasjoner i blant annet fiberretning, årringsbredde og densitet. Dette er parametere som også styrer styrkeegenskapene i treverket. Disse kan observeres og vurderes uten å utføre destruktiv testing for å avgjøre styrken og kvaliteten av materialet. Studien ser derfor etter korrelasjoner mellom visuelle og målbare parametere og styrkekapasitet målt gjennom destruktiv testing.

## 2. Litteraturstudie

I dette kapitlet skal det gjennomføres en litteraturstudie. Dette innebærer undersøkelser av tidligere, relevante studier innenfor blant annet statisk og dynamisk testing av treverk, samt årringsbreddens betydning for materialegenskaper. Dette skal legge grunnlaget for drøftingen og vurderingen av resultatet.

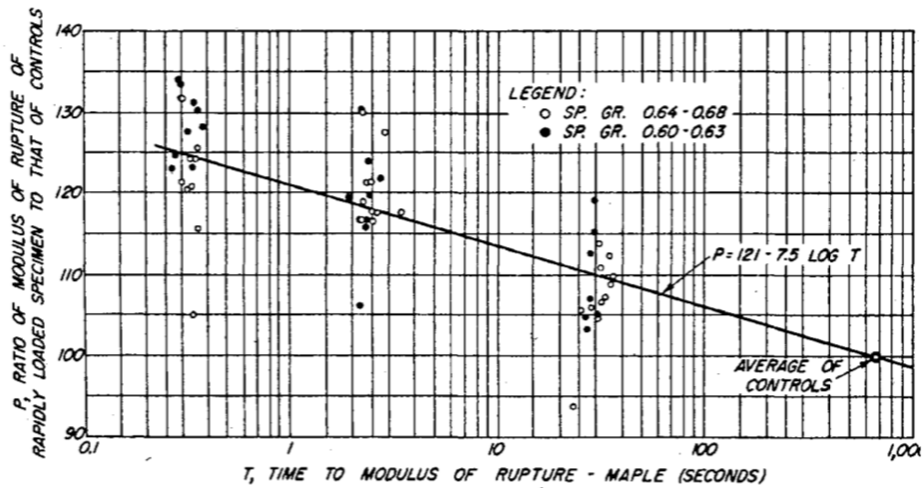
### 2.1. Tidligere studier om dynamisk testing treverk

Det er i dag et begrenset antall studier som undersøker dynamiske egenskaper i tre. Når jeg ser nærmere på tidligere studier vil det være aktuelt å se på eksperimenter gjort med fokus på bøyemoment og trykk. Selv om denne oppgaven tar for seg trykktesting vil studier som tar for seg bøyemoment være aktuelle ettersom en bjelke utsatt for moment vil ha strekk og trykk på hver sin side av nøytralaksen. I NS-EN 338:2016 Annex A kommer det frem at alle trykkapasiteter parallelt med fiber  $f_{c,0,k}$  baserer seg på momentkapasiteten til treverket gjennom formel 1 [18].

$$f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0.45} \quad (1)$$

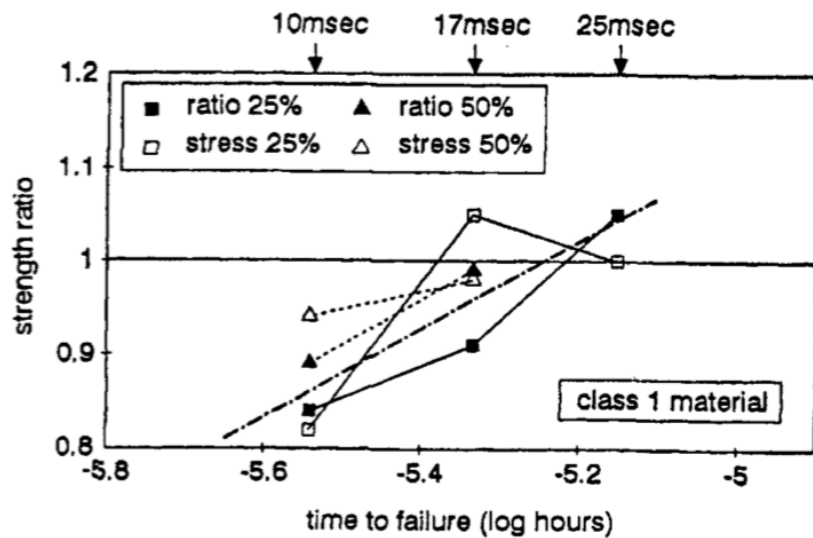
Ulike former for dynamisk testing av treverk har historisk sett blitt utført i lang tid. Hatt-Turner testen ble brukt så tidlig som 1900-tallet [8], og er en test for å primært måle bøyemoments-kapasiteten til en bjelke under dynamisk last [1].

Under andre verdenskrig ble fly med en stor andel strukturelle trekomponenter brukt til treningsflygning. Dette førte til omfattende kollisjonstesting av bøyemoment og trykk parallelt med fiberretningen i relativt små planker uten defekter. Denne testingen ble gjennomført av «Forest Products Laboratory, Madison, US» [9]. Her benyttet de en hydraulisk testmaskin med konstant lastpåføringshastighet som varierte mellom 0.3 til 150 sekunder. Figuren under viser resultatet til testene. Her sammenlignes styrken til treverk som er utsatt for ulik tøyningshastighet. Resultatene av studien viser at prøvestykker med den høyeste lastpåføringshastigheten har en styrke som er 20-30% høyere enn den standardiserte bøyemoment-styrken som er oppgitt som «Average of controls» på Figur 1.



Figur 1: Forholdet mellom statisk og dynamisk bøyestykke mot lastpåføringshastighet for lønn [9]

En studie utført av Jansson undersøkte hvordan fritt opplagte trebjelker utsatt for punktlast midt i feltet oppførte seg under kollisjonstesting [5]. Testingen ble utført ved å slippe en vekt på 345 kg fra ulike høyder. Høydene varierte mellom 50, 150 og 300 mm, noe som resulterte i en maks kollisjonshastighet på 2,3 m/s. Videre ble det undersøkt på hvilket tidspunkt de ulike testene gikk til brudd. Jansson sine resultater viste at bruddet kom etter 25, 17 og 10 millisekunder for de ulike høydene nevnt over. Resultatet viser at forholdet mellom dynamisk og statisk spenning synker med rundt 15% som illustrert på Figur 2.



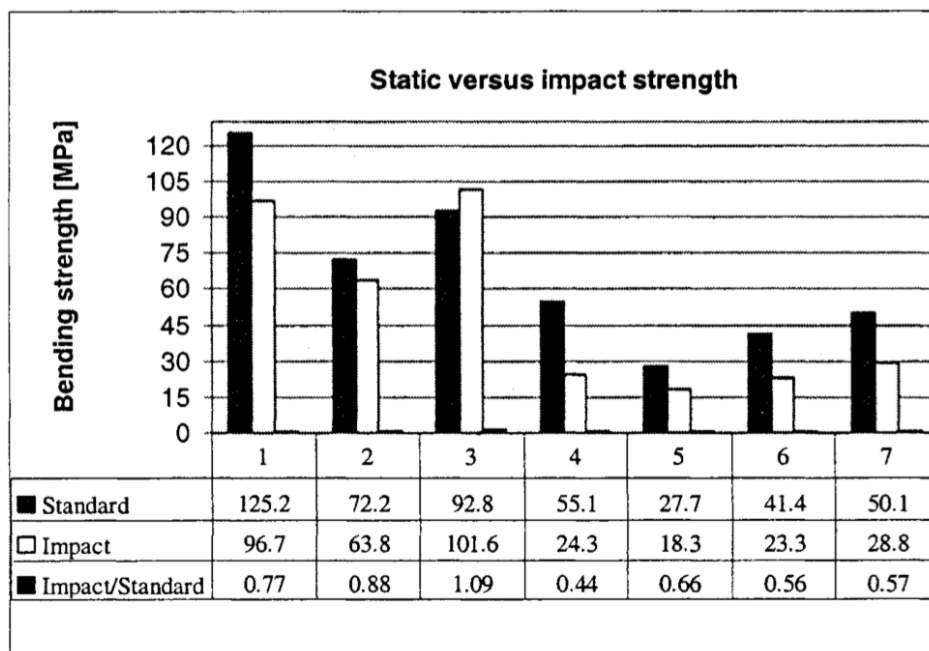
Figur 2: Resultat av kollisjonstest gjennomført av Jansson (1992) [5]

Resultatene av studiene presentert hittil viser til forskjellige resultater. Kapasiteten varierer fra en økning på 20-30 % [9], til en reduksjon på 15 % [5]. Basert på varierende resultater, skal det undersøkes nyere studier for å danne et bedre litteraturgrunnlag.

En nyere relevant studie er «*Impact crash and simulation of timber beams*», skrevet av A.J.M Leijten [7]. Studien skal undersøke om tre kan erstatte metall som et godt alternativ i dagens autovern. Eksperimentet baseres på tester gjort i trepunkts bøyemoment senario, der de undersøker forskjellen på materialets kapasitet når det utsettes for bøyning i standard lastpåføringshastighet og i kollisjonshastighet. Testen er laget for å best mulig simulere en buss på 18 tonn i en hastighet på 70 km/t (19m/s) som kolliderer med en vinkel på 20 grader. Dette resulterer i at den laterale farten på testobjektet er ca. 7.0 m/s, noe studien bruker videre.

Testobjektene er fritt opplagte bjelker med en spennvidde på 1400 mm og tverrsnitt på 40x130 mm. Videre benyttes det syv ulike trearter. For å illustrere kollisjonen brukes to kubiske vekter av stål med en sammenlagt vekt på 199.0 kg. Det ble brukt et høyhastighetskamera for å avgjøre tidspunktet for brudd i materialet. Videre benyttes datasimuleringer for å beregne bøyemomentet under tidspunktet bruddet oppstår.

Resultatene av studien til Leijten er vist på Figur 3.

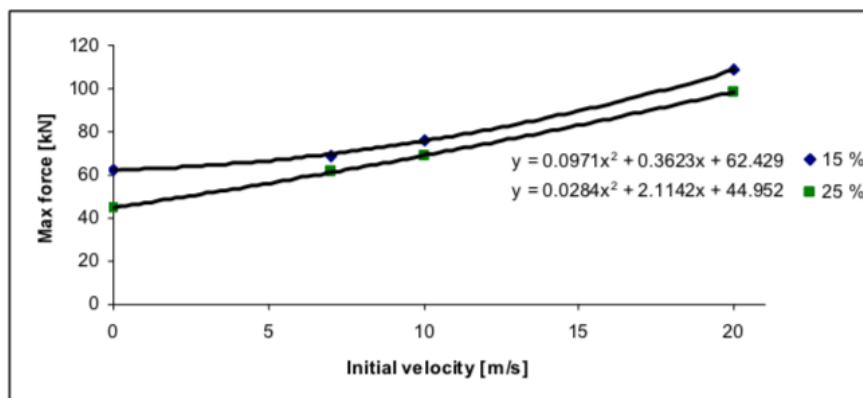


Figur 3: Sammenligning mellom statisk og dynamisk styrke i materialene [7]



Ved å se på forholdstallet «Impact/Standard» kan man se at de statiske testene (standard) har større kapasitet når brudd oppstår for alle treartene utenom nummer 3. Denne korrelasjonen stemmer overens med resultatene presentert av Jansson på Figur 2.

En annen studie utført av Kjell Arne Malo i 2004 tar for seg hvordan runde trestolper oppfører seg under kollisjonslaster med høy tøyningshastighet [11]. Det ble utført tester med både trepunkts bøyemoment og lateralt belastet fast innspent utkrager. Det ble gjennomført statiske og dynamiske tester for å gi sammenligningsgrunnlaget for studien. De dynamiske testene hadde en kollisjonshastighet på 10.3 m/s, mens de statiske ble antatt som kvasistatiske. Kvasistatisk testing betyr at tøyningshastigheten er så lav at man kan anta en statisk situasjon på et hvert tidspunkt underveis i testen. Det ble også undersøkt hvordan materialegenskapene endret seg ettersom temperatur og fuktighet endret seg. Jeg velger å legge vekt på de mest relevante resultatene og trekker derfor ikke frem disse. Studien kom blant annet frem til at lastpåføringshastigheten hadde en klar korrelasjon med styrken, som vist på Figur 4.



Figur 4: Sammenheng mellom kraft og kollisjonshastighet, konstant fuktighet (15 og 25%) [11]

Resultatet viser at en høy kollisjonshastighet resulterer i en høyere kapasitet for bøyemoment. Dette samsvarer med forskningen gjennomført av A. J. Liska i 1955 [9].

Til nå har litteraturstudien sett på et utvalg studier som tar for seg tøyningshastighetens påvirkning på styrkeegenskapene til treverk. Liska [9] og Malo [11] konkluderer med at en økt lastpåføringshastighet gir en økt styrke, mens A.J.M. Leijten [7] og Jansson [5] konkluderer med en redusert styrke. De ulike studiene har benyttet seg av ulike metoder for å beregne dette, og alle baserer seg på tester utført i bøyemoment. Jeg kan derfor ikke konkludere med et forventet resultatet før senere trykktesting.

## 2.2. Andre parametere som avgjør styrke til treverk

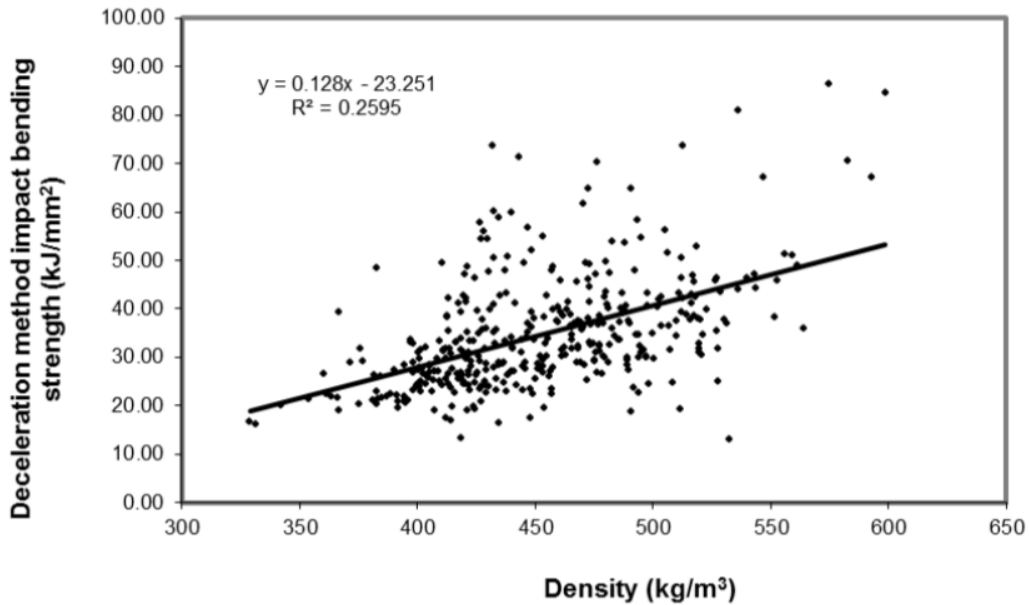
Det er avgjørende med gode, ikke-destruktive metoder for å vurdere styrken til treverk. Tradisjonelt har man brukt en visuell vurdering av blant annet årringer, densitet og fiberretning i treverket til å avgjøre styrken. I dag finnes det mer avanserte metoder, og man bruker gjerne en kombinasjon av flere av disse [12].

Det vil være interessant å undersøke et utvalg parametere og deres påvirkning på styrken til materialet. Årringstetthet, densitet og E-modul er parametere som varierer relativt mye i treverk og har en klar innvirkning på styrken til treverk. I dette kapittelet skal jeg se nærmere på tidligere studier som undersøker korrelasjoner mellom de nevnte parameterne og styrke.

Først skal jeg undersøke studien «*Impact and Dynamic Bending strength determination of Norway Spruce by impact Pendulum Deceleration*» utført av Bucar og Merhar [2]. Denne studien ser nærmere på bøyestyrken til gran ved bruk av slagpendel. Det ble brukt Norsk gran fra Slovenia-regionen som var visuelt styrke-gradert etter kravene i «SIST DIN 4074-1:2009». Visuell vurdering og målbare verdier som kvist, fuktinnhold, årringstetthet, densitet og vinkel på fiberretningen er noen av parameterne som blir brukt i styrkevurderingen.

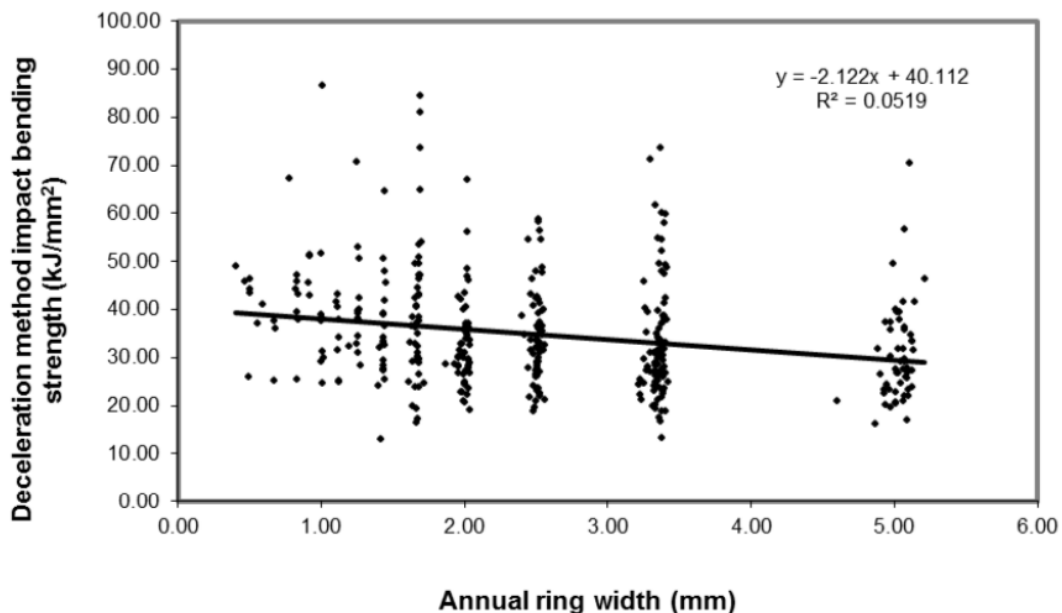
Hensikten med studien til «Bucar & Merhar» [2] er å se om disse visuelle styrkevurderingene stemmer overens med destruktive tester utført på treverket. Fra 198 planker ble det kuttet ut to prøvestykker på 10 x 10 mm uten defekter (clearwood) fra hver planke. Videre ble fuktinnhold, geometri, vekt og årringsbredde målt for alle prøvestykkene med nøyaktige måleapparater. Dette er noe som vil være svært viktig underveis i min studie, ettersom teststykkene er så små, vil nøyaktighet være vesentlig.

Ved å gjøre de visuelle målingene parallelt med destruktiv testing har man et grunnlag for å se på korrelasjoner mellom visuelle og destruktive målinger. Det første resultatet i studien til «Bucar og Merhar» var å se på korrelasjon mellom bøyemoment målt av slagpendel og densitet og årringstetthet, som vist på Figur 5 og Figur 6.



Figur 5: korrelasjon mellom densitet og bøyemoment målt av slagpendel [2]

I resultatet på Figur 5 kan man se sammenhengen mellom densitet og bøyemomentskapasiteten. Jo høyere densiteten er, jo høyere blir kapasiteten. R-koeffisienten ( $R^2 = 0.2595$ ) var ikke veldig høy, men treverk er et ikke-homogent materiale og man kan regne med variasjon, spesielt i datasett på denne størrelsen. Dette resultatet var som forventet, der man generelt kan regne med at et tettere treverk har høyere styrke.



Figur 6: Korrelasjon mellom årringsbredde og bøyemoment målt ved slagpendel [2]

Resultatet i Figur 6 viser at tettere årringer gir høyere kapasitet for bøyemoment. Dette gir mening med tanke på resultatet i Figur 5. Dette er fordi årringer og densitet har en direkte sammenheng. Hvis man ser på forholdet mellom sommerved og vårved, vil større andel sommerved gi høyere densitet. Det som styrer forholdstallet, er hvor rask veksten er. Ved treg vekst vil andel sommerved være større fordi mengden vårved blir mindre. Med andre ord blir årringsbredden mindre [16].

Dette er sammenhenger som blir viktig å undersøke senere i oppgaven. Det blir derfor viktig å kartlegge årringsbredde, densitet og annen geometri. Dette gjør at vi senere kan ha sammenligningsgrunnlag for destruktiv og ikke-destruktiv testing av egenskapene til materialet.

### 2.3. Falsk E-modul

I dette delkapittelet skal jeg se nærmere et fenomen som kan oppstå ved beregning av E-modul basert på testing av små prøvestykker. En studie som heter «*revisiting the neutral axis in wood beams*», skrevet av P. Davies ser nærmere på dette fenomenet [15].

I homogene og isotopiske materialer antar man at nøytralaksen til materialet er i senteret av en bjelke. For et ikke-homogent materiale som treverk er ikke dette tilfellet. Her må man se nærmere på uregelmessigheter som kvist og fiberretninger, og hvordan dette påvirker nøytralaksen. Studien undersøker målte verdier fra tester utført i bøyemoment, strekk og trykk. For å analysere disse testene har de brukt «digital image correlation technique (speckle photography)».

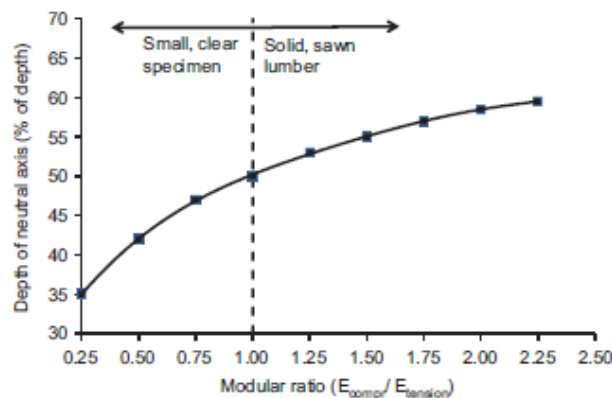
Nøytralaksen er etter definisjon det punktet der spenningene går fra trykk til strekk i en bjelke utsatt for bøyemoment. Hvis E-modulen er lik i strekk og trykk, vil også nøytralaksen være midt i en bjelke. Dette er riktig når man ser på homogene materialer. For trebjelker vil ikke dette alltid være tilfellet, ettersom uregelmessigheter som kvist og lokale fiberretninger gir avvik fra et ideelt scenario. Ettersom treverk er et ortotropisk materiale, vil egenskapene være avhengig av tre retninger.

Studien ser på en rapport utført av Kollen Cumbie i 2008 som forteller at E-modul og styrke målt i strekk er større enn i trykk for små prøvestykker. Dette er vist i Tabell 1. [15].

Anatomical direction	Bending		Tension		Compression	
	Strength (MPa)	MOE (GPa)	Strength (MPa)	MOE (GPa)	Strength (MPa)	MOE (GPa)
Radial	8.763 (11, 4)	0.669 (11, 4)	5.244 (9, 7)	0.009 (9, 11)	7.73 (10, 30)	0.530 (10, 26)
Tangential	4.830 (10, 8)	0.676 (10, 4)	2.691 (10, 14)	0.010 (10, 11)	8.83 (15, 19)	0.526 (15, 18)
Longitudinal	86.25 (10, 8)	15.53 (10, 10)	75.21 (9, 10)	6.49 (9, 10)	52.51 (11, 4)	4.57 (11, 2)

Tabell 1: Gjennomsnittlig styrke og E-modul (MOE) for bøyning, strekk og trykk i tre ortogonale retninger [15]

Videre undersøker studien til P. Davies i hvilken grad store og små prøvestykker av samme treverk ga forskjellige målte materialegenskaper. Ved hjelp av kamera (digital image correlation technique) kunne de svært nøyaktig måle forskyvningen til materialet under styrketesten. Basert på disse dataene kunne de beregne E-modulen i strekk- og trykksonen i bjelken. Figur 7 viser sammenhengen mellom stivheten til materialet i trykk og strekk uttrykt med forholdstallet  $[E_{\text{trykk}} / E_{\text{strekk}}]$  og størrelsen til prøvestykket. Som man kan observere blir  $E_{\text{trykk}}$  tydelig lavere relativt til  $E_{\text{strekk}}$  jo mindre prøvestykket blir.



Figur 7: Sammenheng mellom E-modul og størrelsen på prøvestykket. [15]

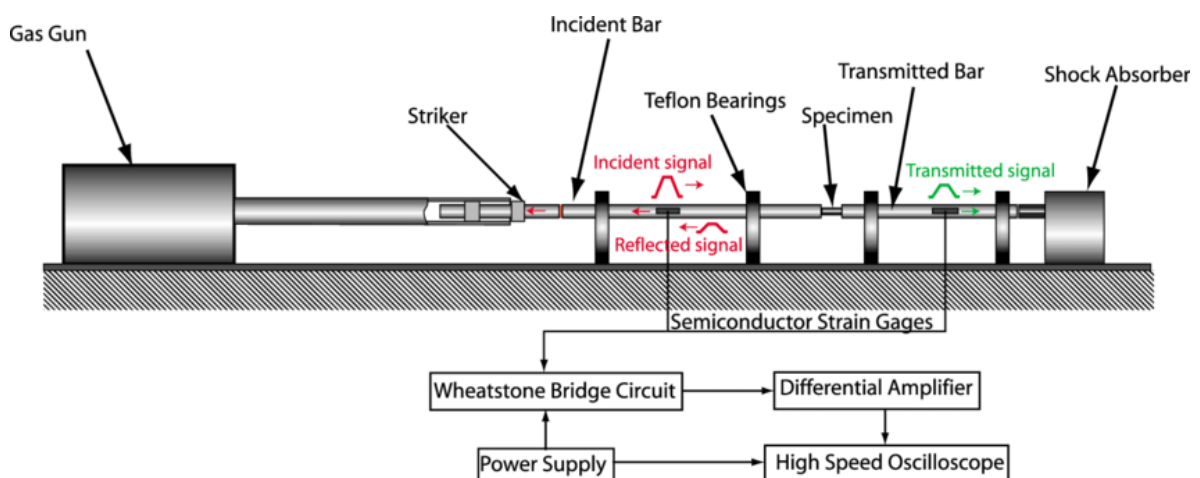
Senere i studien skal jeg utføre trykktest på små prøvestykker. Det kan basert på denne rapporten være forventet å få en lavere «falsk» E-modul ved beregninger basert på data fra eksperimentet. Dette er både fordi at E-modul målt fra tester i trykk blir lavere enn i strekk som vist i Tabell 1, men også fordi små prøvestykker gir en lavere E-modul basert på tester i trykk, som vist på Figur 7.

## 2.4. Split-Hopkinson Pressure Bar

Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) er en av de tilgjengelige maskinene på NTNU for testing av dynamiske egenskaper. Av praktiske årsaker er dette maskinen som skal benyttes senere i studien. Dette kapittelet skal derfor se nærmere på hvordan denne fungerer, og om SHPB er et gunstig verktøy for testing av tre.

Tøyningshastigheten til et materiale har ofte en stor effekt på ulike materialer der treverk ikke er noe unntak. Split-Hopkinson Pressure bar er en av de vanligste metodene man bruker for å undersøke materialers egenskaper under tøyningshastigheter i orden  $10^2$  til  $10^4$  s<sup>-1</sup>. Dette er hastigheter som simulerer situasjoner som kollisjon og eksplosjon. [6]

En skisse av en Split-Hopkinson Pressure bar er illustrert på Figur 8. Denne benytter seg av spenningsbølger som beveger seg gjennom lange stenger for å belaste prøvestykket. Disse bølgene dannes i enden av «incident bar» ved hjelp av et gasskammer som danner en trykkbølge som slår på enden av staget. Dette danner en spenningsbølge som beveger seg gjennom «incident bar» og inn i prøvestykket. På veien mot prøvestykket blir «Incident signal» målt før bølgene går videre inn i prøvestykket. En andel av bølgene vil bevege seg gjennom prøvestykket, mens noe vil reflektere tilbake. De bølgene som beveger seg gjennom prøvestykket blir målt i «transmitted bar» som «transmitted signal», mens de reflekterte blir målt i «incident bar» som «reflected signal». Disse målingene kan benyttes til å beregne materialegenskaper som spenning og tøying til materialet under høye tøyningshastigheter.



Figur 8: Bildebeskrivelse av Split-Hopkinson Pressure Bar [20].

Denne metoden for testing av treverk i høye tøyningshastigheter har vært benyttet tidligere. Christopher G. Gilbertson undersøkte i 2013 om SHPB var et gunstig verktøy for å teste treverk utsatt for høy tøyningshastighet [4]. Motivasjonen bak undersøkelsen var at det fantes mye data for materialeegenskaper for treverk fra tester utført med en lav tøyningshastighet for å simulere kryp og statiske situasjoner. Det fantes derimot veldig lite informasjon om dynamiske materialeegenskaper. Studien tar videre for seg testing av ulike trearter som furu og lønn og utførte tester fra ulike retninger på disse. Konklusjonen av studien var at SHPB var et tilfredsstillende verktøy for å teste trykk i treverk i tøyningshastighet fra 70 til 340 s<sup>-1</sup>.

Denne studien viser at SHPB er et gunstig og representativt verktøy for å undersøke dynamiske egenskaper for tre og kan benyttes videre i studien.

### 3. Gjennomføring av laboratorieøvelsene

Dette kapittelet tar for seg gjennomføringen av laboratorieøvelsene. Dette inkluderer forberedelser, planlegging og utførelse.

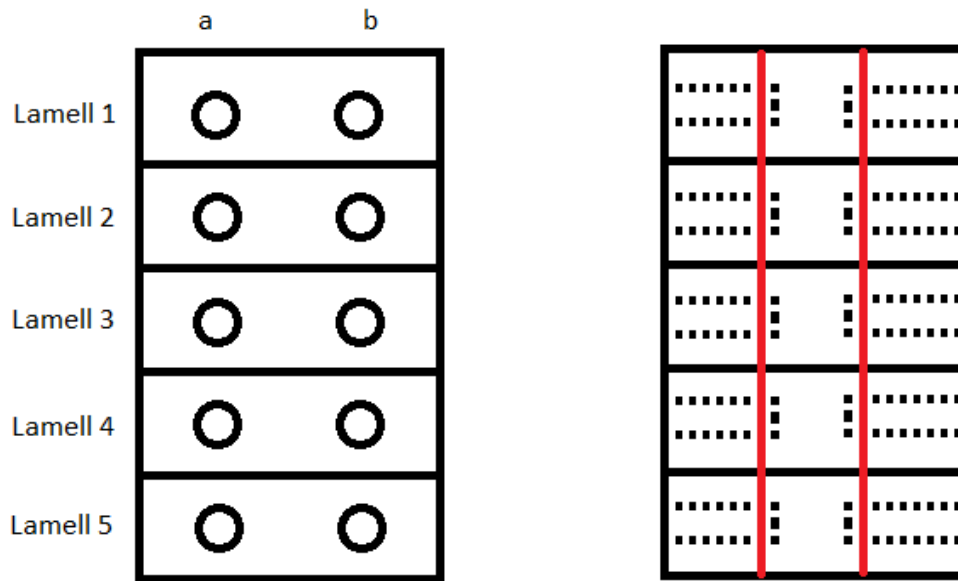
#### 3.1. Utskjæring og kartlegging av prøvestykker

Den første delen av laboratorieøvelsen innebærer utskjæring og kartlegging av prøvestykkene. Målet er å få gjennomført så mange tester som mulig for å gi et tilstrekkelig datagrunnlag. Det vil derfor være viktig med et enkelt og oversiktlig system for å identifisere hvert enkelt prøvestykke. En viktig del av oppgaven handler om å undersøke effekten av tøyningshastighet på treverk. Dette blir gjort ved å kjøre tre «identiske» prøvestykker gjennom ulike lastpåføringshastigheter. Det vil derfor være viktig å utvikle en metode for utskjæring av prøvestykker som representerer det samme treverket på best mulig måte. Materialet jeg fikk jobb med var endestykker fra ti limtrebjelker på ca. 20 cm, der hver bjelke hadde fem lameller.

##### 3.1.1. Kartlegging av prøvestykker

Jeg fikk tildelt endestykker av ti limtrebjelker hvor hver har fem lameller. Før utskjæring av prøvestykkene måtte jeg lage et system for å kartlegge hver av de individuelle testene. Jeg bestemte meg for å skjære ut to prøvestykker fra hver lamell representert med a og b fra hver side av bjelkebiten, illustrert på Figur 9. Ved å skjære ut fra hver side av bjelken øker jeg sannsynligheten for at disse prøvestykkene er så identiske som mulig, ettersom det er en forlengelse av samme fiberstruktur. Dette er avgjørende for å oppnå et godt resultat ved testing med ulike tøyningshastigheter. Ved å skjære ut mange prøvestykker tar jeg også høyde for at det kan være defekter og irregulariteter i noen av dem.





Figur 9: System for utskjæring og kartlegging av prøvestykker

Dette betyr at jeg har ti bjelker med fem lameller hver, der jeg skjærer ut to par prøvestykker fra hver lamell, fra hver side. Figur 10 viser kartleggingssystemet utviklet for å referere til individuelle prøvestykker. For å skille mellom «identiske» prøvestykker i de delene av studiet det er nødvendig, skilles de ved hjelp av en bokstav på slutten. Bokstavenes betydning er beskrevet i Tabell 2.

**Lamellnummer . a / b . Bjelkenummer . (bokstav)**

Figur 10: System for kartlegging av prøvestykker

Oversikt over bokstavbeskrivelse	
Kort prøvestykke (ca. 15mm)	K
Langt prøvestykke (ca 30mm)	L
Kvasistatisk_1 (0.065 s <sup>-1</sup> )	Q
Kvasistatisk_2 (6.54 s <sup>-1</sup> )	S
Dynamisk (ca. 2720.1 s <sup>-1</sup> )	D

Tabell 2: Bokstavbeskrivelse for kartleggingssystem

### 3.1.2. Utskjæring av prøvestykker

Ved utskjæringen av prøvestykkene var det vesentlig at prøvestykkene som skulle sammenlignes var så like som mulig, med samme antall årringer og samme trekvalitet.

Det første jeg gjorde var å skjære ut sylindere fra begge sider av bjelkeenden ved hjelp av bormaskin med hullbor som illustrert på Figur 11. Videre brukte jeg en båndsaag til å skjære av endene på hver side av bjelken som illustrert med røde streker på Figur 11. Dette frigjorde teststykkene som videre ble lagt i oppbevaringsposer med referanse til kartleggingssystemet.



Figur 11: Utskjæring av prøvestykker med hullbor

Underveis i utskjæringen ble det observert at de ytterste lamellene i hver bjelke hadde en tettere årringsavstand. I en artikkel utgitt av Trefokus (Trefokus AS, 2022) kommer det frem at det er vanlig praksis for standard limtrebjelker å bruke to ulike fasthetsklasser i de ytterste og indre lamellene. De ytterste lamellene skal ha en høyere fasthetsklasse enn de resterende, spesielt med tanke på strekkapasitet. Senere i oppgaven vil det være interessant å undersøke om dette stemmer overens med resultatet fra laboratoriet.

Ved bruk av metoden for utskjæring som vist på Figur 9 produseres kun to «identiske» prøvestykker. Dette er nok for de statiske testene som innebærer bjelke 1 til 8. For trykktesting i tre ulike tøyningshastigheter holder dette derimot ikke. Prøvestykkene blir på disse testene sagt i to, noe som også er nødvendig for at prøvestykket skal få plass i Split-Hopkinson Pressure Bar. På bakgrunn av dette skal det undersøkes om størrelsen på prøvestykket utgjør noe på styrkeegenskapene. Dette gjøres ved å teste prøvestykker i to ulike lengder og se om det eksisterer en korrelasjon med blant annet styrke.

### 3.2. Prøvestykkets geometri

Det neste steget er å kartlegge prøvestykkenes geometri, vekt og antall årringer. Disse dataene er viktige for å gjøre beregninger hvert enkelt prøvestykke. Målingene ble gjort ved hjelp av elektronisk vekt og digital skyvelære.

Prøvestykkene fra bjelke 1. til 8. skal senere bli brukt til beregninger for korrelasjoner mellom materialets egenskaper og antall årringer. Geometrien til bjelke 1. til 8. er vist i Tabell 3. Som man kan observere er forskjellene i geometrien relativt liten. Dette verifiserer at metoden for utskjæringen av prøvestykkene ble gjort på en konsis måte. Videre varierer vekten i større grad. Differansen er på opp mot 1.56 gram, noe som er veldig mye når gjennomsnittsvekten på et prøvestykke er på 2.96 gram. Dette betyr at vi har en stor varians i trekvalitet og densitet i materialet.



Figur 12: Elektronisk vekt



Figur 13: Digital skyvelære

Tabell 3 viser oversikten over geometridataen fra bjelke 1 til 8. Røde felter er prøvestykker med visuelle avvik som sprekker eller kvist. Disse blir neglisjert fra videre testing.

		Geometri	1. Bjelke	2. Bjelke	3. Bjelke	4. Bjelke	5. Bjelke	6. Bjelke	7. Bjelke	8. Bjelke
1. Lamell	a	diameter [mm]	15.09	15		14.97		14.94	15.06	14.9
		vekt [g]	2.88	2.7		3.28		2.76	2.88	2.78
		Høyde [mm]	35.58	35.47		35.88		35.25	35.84	35.72
	b	diameter [mm]	15	15.04	15.17	15.19	14.98	15.06	15.05	15.2
		vekt [g]	2.82	2.76	2.98	3.18	2.88	2.96	2.88	2.88
		Høyde [mm]	35.63	35.83	35.53	35.76	35.76	35.82	36.32	35.86
2. Lamell	a	diameter [mm]	15.02	14.97	15.14	15.12	14.95	15.09	15.03	
		vekt [g]	2.44	2.52	2.40	2.72	2.52	2.66	2.48	
		Høyde [mm]	35.32	35.68	35.64	36.01	35.60	35.43	36.03	
	b	diameter [mm]	15.06		14.91	14.99	14.92	15.13	14.99	
		vekt [g]	2.32		2.32	2.78	2.38	2.88	2.60	
		Høyde [mm]	35.6		35.96	35.85	35.71	35.89	36.27	
3. Lamell	a	diameter [mm]	15.02	15.15	15.07	15.04	15.16	14.93	15.10	14.98
		vekt [g]	2.48	2.78	2.64	2.52	2.54	2.90	3.38	2.88
		Høyde [mm]	35.42	35.46	35.5	36.01	35.69	35.5	35.79	36.06
	b	diameter [mm]		14.95	14.93	14.92	15.22	15.00	15.12	14.98
		vekt [g]		2.46	2.6	2.58	2.48	2.56	3.24	3.02
		Høyde [mm]		35.88	35.55	35.85	35.66	35.78	36.03	35.61
4. Lamell	a	diameter [mm]				15.05	15.08		14.92	
		Vekt [g]				2.32	3.44		2.46	
		Høyde [mm]				36.09	36.13		35.6	
	b	diameter [mm]	15.03	15.05	14.89	14.86	14.91	14.99	14.94	
		vekt [g]	2.76	2.74	2.26	2.04	3.34	2.86	2.54	
		Høyde [mm]	35.65	35.97	35.93	35.68	35.79	35.91	36.02	
5. Lamell	a	diameter [mm]	15.06	15.03	15.05	15.22	14.96	15.15	15.04	15.13
		vekt [g]	3.10	3.02	3.00	2.84	3.30	3.06	3.54	3.70
		Høyde [mm]	35.76	35.43	35.78	36.03	36.12	35.65	35.9	34.64
	b	diameter [mm]	15.09	14.99	14.93	14.92	14.95	15.05	15.09	15.14
		vekt [g]	3.06	3.12	2.84	2.72	3.36	3.04	3.24	3.60
		Høyde [mm]	35.78	35.9	35.68	35.76	36.23	36.11	36.02	34.62

Tabell 3: Geometridata for 1. til 8. Bjelke. Røde felt representerer defekte prøvestykker.

Bjelke 9 og 10 vil bli brukt til å undersøke størrelsesfaktor og tøyningshastighetens påvirkning på treverkets egenskaper. Geometrien til disse er vist i Tabell 4.

Variasjonen i geometrien til bjelke 9 og 10 er i likhet med de andre bjelkene liten. I bjelke 9 er det skåret ut prøvestykker i ulike lengder, for å undersøke om størrelsen på prøvestykket har en innvirkning på materialets målte egenskaper. Forskjellen i vekt er fortsatt stor, noe som betyr at vi har en stor varians i materialets densitet.

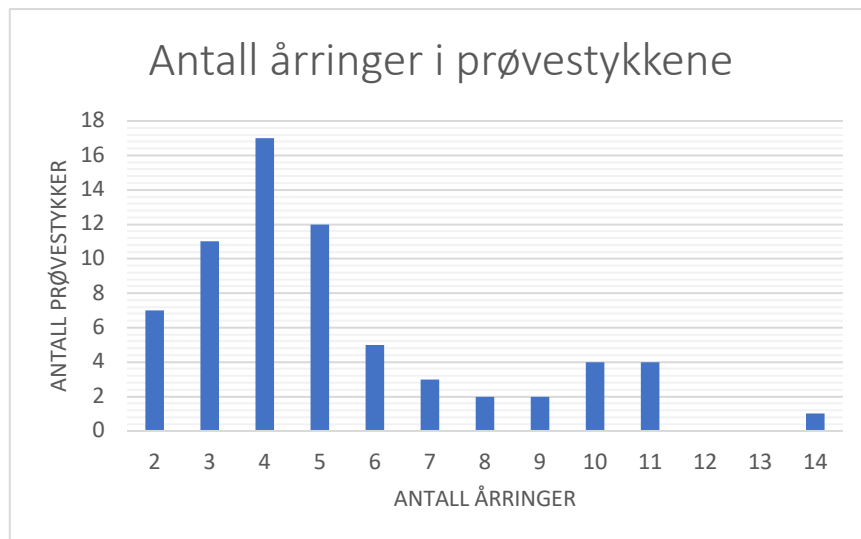
Geometri			Bjelke 9.		Bjelke 10.		
			LANG (L)	KORT (K)	Kvasistatisk_1 (Q)	Kvasistatisk_2 (S)	SHPB (D)
1. Lamell	a	Diameter [mm]			14.94	15.09	15.06
		Vekt [g]			1.22	1.3	1.24
		Høyde [mm]			15.38	15.3	15.27
	b	diameter [mm]	15.12	15.01	14.94	15	15.14
		Vekt [g]	2.88	1.24	1.22	1.18	1.28
		Høyde [mm]	35.81	15.59	15.15	15.4	15.14
2. Lamell	a	Diameter [mm]	14.99	14.92			
		Vekt [g]	2.36	0.98			
		Høyde [mm]	35.98	15.21			
	b	Diameter [mm]	15.09	15.10	14.98	15	15.06
		Vekt [g]	2.36	1.00	1	1.06	0.98
		Høyde [mm]	35.72	15.61	15.25	15.27	15.52
3. Lamell	a	Diameter [mm]	15.18	15.03			
		Vekt [g]	3.44	1.44			
		Høyde [mm]	35.98	15.35			
	b	Diameter [mm]	15.04	14.99	14.84	14.97	15.09
		Vekt [g]	3.36	1.4	1.02	1.08	1.12
		Høyde [mm]	35.78	15.71	15.57	15.22	15.32
4. Lamell	a	Diameter [mm]	14.98	15.00	14.94	15.06	14.92
		Vekt [g]	2.72	1.14	0.98	0.98	0.92
		Høyde [mm]	35.88	15.25	15.25	15.44	15.16
	b	Diameter [mm]			14.95	14.98	15.01
		Vekt [g]			0.9	0.9	1
		Høyde [mm]			15.29	15.58	15.29
5. Lamell	a	Diameter [mm]	15.07	14.96	15.01	15.03	15.03
		Vekt [g]	3.84	1.58	1.42	1.32	1.26
		Høyde [mm]	35.94	15.03	15.57	15.46	15.31
	b	Diameter [mm]	15.06	14.93	14.9	15.06	15.08
		Vekt [g]	3.82	1.54	1.16	1.2	1.22
		Høyde [mm]	35.81	15.62	15.66	15.32	15.66

Tabell 4: Geometridata for Bjelke 9 og 10. Røde felter representerer defekte prøvestykker

### 3.2.1. Årringer

Trær er bygget opp av hule fibre/celler i svært varierende form. Treet produserer celler med ulike egenskaper i ulike årstider. Man deler gjerne cellene inn i sommerved og vårved, der produksjonen av sommer- og vårved varierer med årstidene. Sommerved har tykkere cellevegger og har avstivning som hovedfunksjon, mens vårved står for væsketransport, og har derfor tynnere cellevegger. Dette resulterer i at sommerved har større densitet enn vårved [16]. Totalt sett kan man derfor si at densiteten til treverk i stor grad er styrt av forholdet mellom sommer- og vårved, der større andel sommerved vil gi en større styrke og densitet. Produksjonen av sommerved er tilnærmet konstant mens det er vekstforholdene som styrer hvor mye vårved som dannes. Ved dårlige vekstforhold vil treet produsere mindre vårved for væsketransport, noe som resulterer i en tettere årringsbredde. Dette gjør at den prosentvise andelen sommerved øker, og dermed øker densiteten.

Årringer kan observeres som ringer i tverrsnittet til en trestamme. Man kan også se dette i limtrebjelken, vist på Figur 11. Som nevnt tidligere er det stor varians i vekten og dermed densiteten til prøvestykkene. Figur 14 gir et bilde på variansen i antall årringer i prøvestykkene.



Figur 14: Varians i antall årringer i prøvestykkene i bjelke 1 til 8

Videre vil årringsbredden bli brukt for å beskrive årringstettheten i treverket. Dette beregnes ved å ta antall årringer observert, delt på diameteren til hvert enkelt prøvestykke.

### 3.3. Trykktesting

Senere i studien skal jeg se på hvordan treverk oppfører seg under trykktesting. En del av oppgaven går ut på å undersøke lastpåføringshastighetens innvirkning på trykkapasiteten til trevirke. Det er derfor valgt å teste prøvestykker i tre forskjellige tøyningshastigheter som vist i Tabell 5. Det ble totalt gjennomført 108 tester.

Type test:	Lastpåføringshastighet	Tøyningshastighet
Kvasistatisk 1	1 mm/min	0.065 s <sup>-1</sup>
Kvasistatisk 2	100 mm/min	6.6 s <sup>-1</sup>
Dynamisk	–	2720.1 s <sup>-1</sup>

Tabell 5: Oversikt over lastpåføringshastighet og tøyningshastighet

For de to kvasistatiske testene brukes en INSTRON for å utføre trykktester. Denne måler kraft, forskyvning og tid. Det benyttes også kamera under testing for å gi en alternativ måling på tøyningen til prøvestykket. For den dynamiske testingen brukes en Split-Hopkinson Pressure Bar. Disse testene vil gi oss sammenligningsgrunnlaget for oppgaven.

#### 3.3.1. Kvasistatisk trykktesting

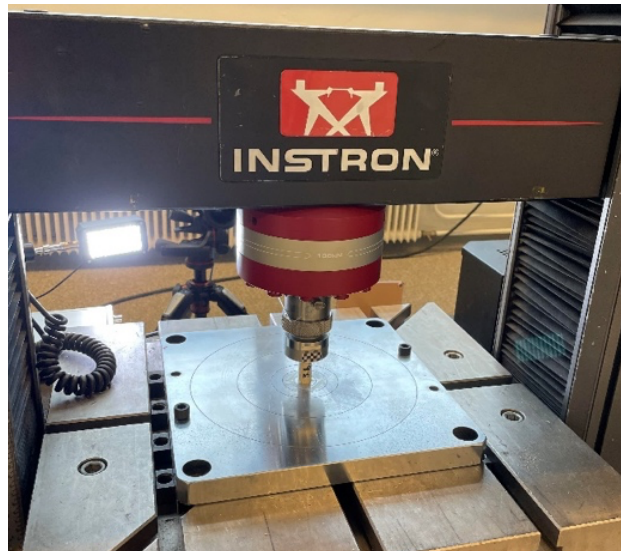
Ved kvasistatisk trykktesting brukes utstyr levert av INSTRON. Denne maskinen ble benyttet for kvasistatisk testing av prøvestykker i to ulike hastigheter. Maskinen ble forhåndsinnstilt til å utføre testen med en total deformasjon på 3 mm.

Testen ble utført ved å plassere teststykket mellom kontaktflatene til maskinen. Deretter finjusterte man avstanden mellom disse, noe som satt prøvestykket under svakt trykk for å forsikre at fibre i treverket var «aktive». Videre startet man kameramålingene og trykket start på trykkmaskinen. Ved deformasjon på 3 mm avsluttes testen automatisk, og man starter samme syklus med neste prøvestykke.

Den første hastigheten som ble testet er på 1mm per minutt. Denne hastigheten kan defineres som en kvasistatisk test. Dette betyr at på ethvert tidspunkt underveis i testen kan man definere situasjonen som statisk. Den andre lastpåføringshastigheten var 100 mm per minutt, altså en faktor på 100 sammenlignet med den kvasistatiske testen. For å skille mellom de kvasistatiske testene refererer jeg til navnene i Tabell 5.

## Feilkilder

Etter at testene var utført og dataene ble analyserte ble det raskt observert at alle prøvestykkene med høy trykkspenning hadde et distinkt flatt parti på toppunktet i spenning-tøyningsdiagrammer, som vist i spenning tøyningsdiagrammene i kapittel 5. Det ble senere funnet ut at testutstyret var stilt inn for å måle en maks kraft på ca. 10 kN. Dette må derfor tas høyde for i senere vurdering av resultatene i oppgaven.

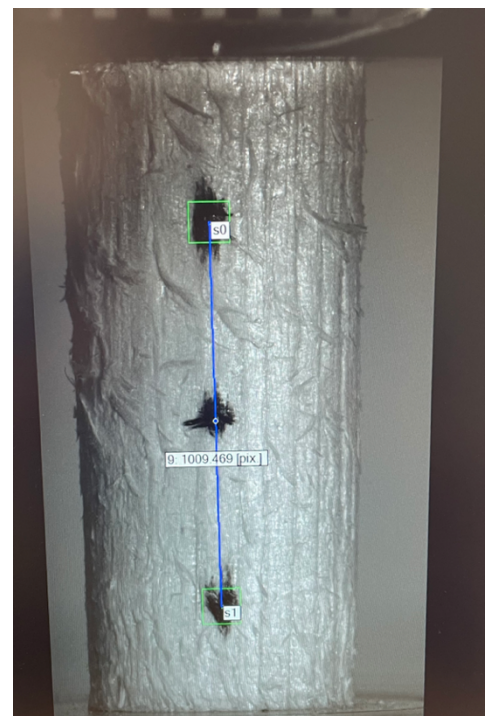


Figur 15: INSTRON - trykkmaskin

### 3.3.1.1. Kameramålinger

Det ble brukt to metoder for å måle tøyningen ved de kvasistatiske testene. Den ene metoden var tøyningen forhåndsinnstilt med en konstant hastighet på testmaskinen. Den andre var et eksternt kamera som målte den prosentvise forskyvningen mellom to punkter på prøvestykket, som vist på Figur 16.

Årsaken for at to målinger av tøyningen blir brukt kan refereres til kapittel 2.3. Her kommer det frem at man kan forvente en lavere E-modul når man utfører tester av små prøvestykker i trykk. Forholdet mellom  $E_{\text{trykk}}$  og  $E_{\text{strek}}$  lavere

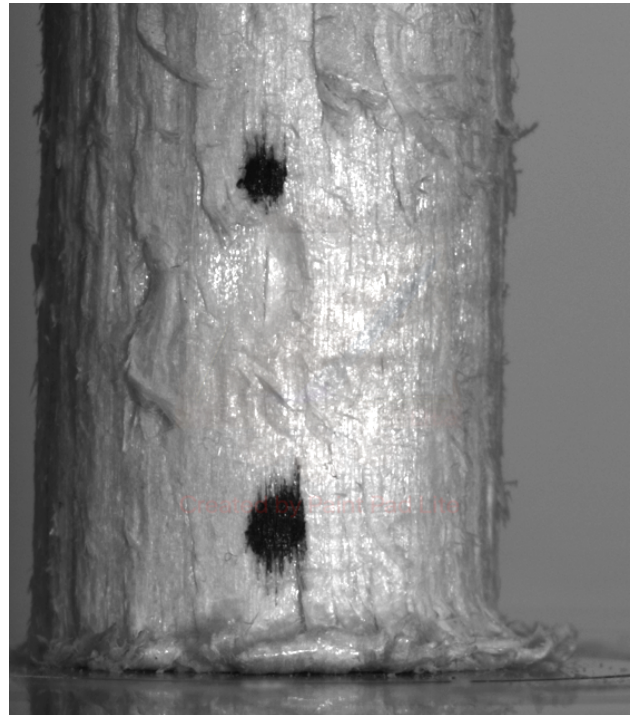


Figur 16: Oppsett av kamera for prøvestykke 5.b.2



jo mindre prøvestykkene er. Med to målinger av tøyningen kan man derfor vurdere hvilken som gir det beste og mest nøyaktige resultatet.

Trykk-maskinens målinger har noen feilkilder. Oppsettet til hver av de individuelle testene innebærer å sette prøvestykket mellom kontaktflatene til maskinen. Videre finjusterer man trykket mellom kontaktflatene og prøvestykket ved å sette prøvestykket under et svakt press før man starter testing. Dette gjør at de forskjellige prøvestykkene starter med forskjellig intern spenning. En annen feilkilde vil være lokal knekking av fibre i kontaktflaten mellom maskin og prøvestykket. Dette er illustrert på Figur 17.



Figur 17: Lokal knekking av fibre mellom de nedre kontaktflatene, prøvestykke 1.b.2

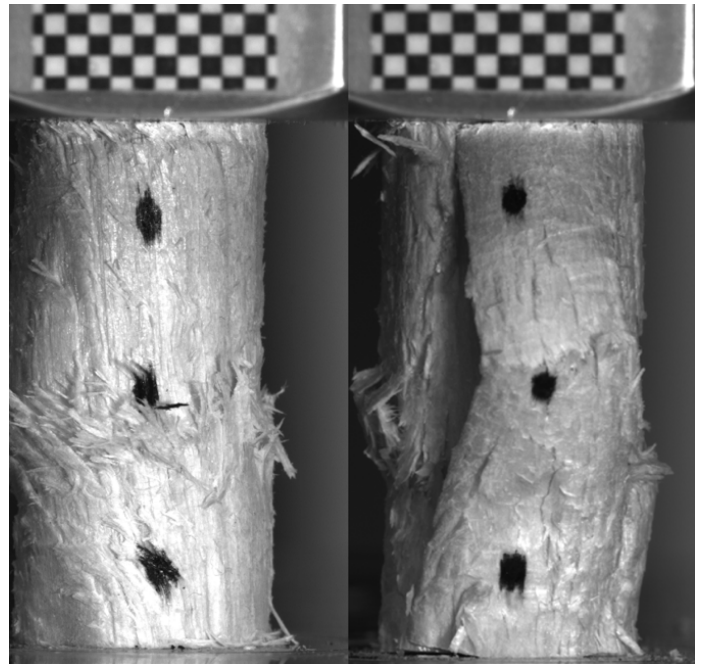
Det blir vurdert av kameramålingene av tøyningen gir en mer nøyaktig måling enn det trykk-maskinen gir. Som vist på Figur 16 måler man forskyvningen mellom to punkter på prøvestykket. Disse punktene er plassert en liten avstand inn fra prøvestykkets ender. Dette gjør at man unngår feilkilder som lokal knekking av fibre i kontaktpunktet mellom maskin og prøvestykke.

Kameramålingene blir eksportert i samme fil som trykkmaskinen. Denne dataen blir oppgitt i prosentvis endring av tøyningen (vector elongation), som vist i formel 2 under.

$$\varepsilon_{(\%)} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (2)$$

### 3.3.1.2. Ulike bruddformer

Treverk er et ikke-homogent materiale og det vil alltid være en viss grad av uregelmessigheter i et prøvestykke. Dette kan føre til at enkelte prøvestykker vil oppleve bruddmekanismer som knekking og splitting. I noen av tilfellene dette skjedde ble det erfart at kamera hadde problemer med å følge markeringene for å måle forskyvningen. En konsekvens av dette var at tøyingsmålingene viste store og åpenbare feil. Disse testene ble neglisjert fra videre vurdering.



Figur 18: Knekkning i 3.a.6 og splitting parallelt med fiber i 4.b.7

Figur 18 viser eksempler på de ulike bruddformene som er observert under testing. Her vises knekking i prøvestykke 3.a.6 og splitting parallelt med fiber i 4.a.7.

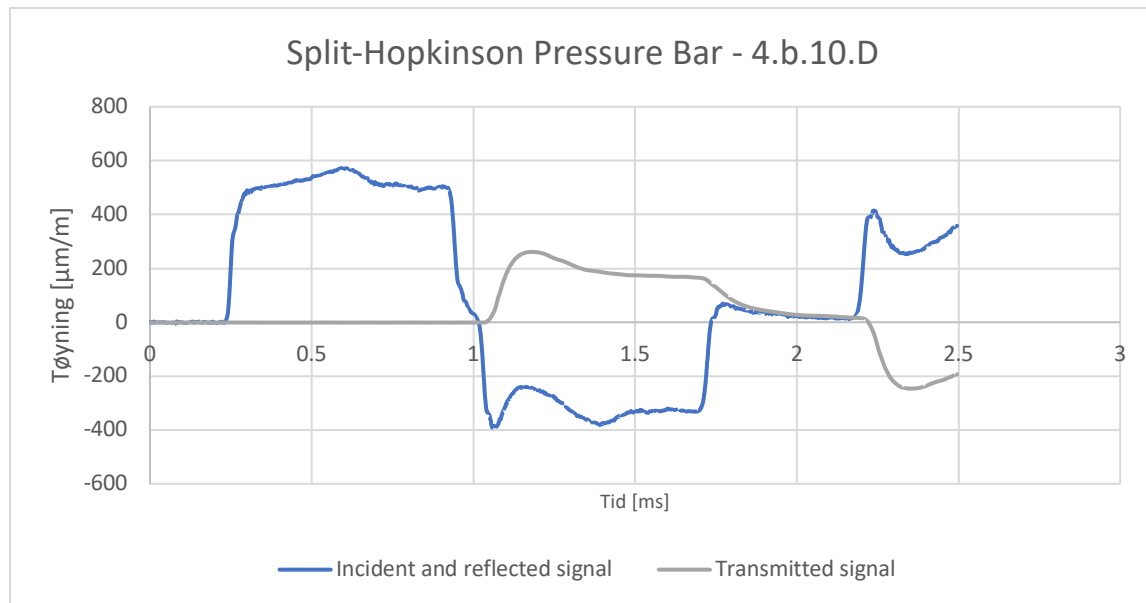
### 3.3.2. Dynamisk trykktesting

Split-Hopkinson Pressure Bar er en test som baserer seg på endimensjonal spennings-bølge teori. Dette er den vanligste testen for testing av materialer i dynamisk spenning i ordenen  $10^2$  til  $10^4$  s<sup>-1</sup> [6]. Spenninger i dette sjiktet kan relateres til aktuelle situasjoner som krasj og kollisjoner. I kapittel 2.4 ble det undersøkt om Split-Hopkinson Pressure bar ville være et gunstig verktøy å bruke for å eksperimentere med høye tøyingshastigheter på små prøvestykker i treverk. Dette ble bekreftet som en gunstig metode i en studie utført av Gilbertson og Bulleit i 2013 [4].



Figur 19: SHPB på laboratoriet på NTNU [14].

Det finnes mange varianter av SHPB, men alle fungerer på samme underliggende prinsipp. Teststykket blir plassert mellom to rette stenger, som forholdsvis heter *Incident Bar* og *Transmitted Bar*. På enden av *Incident Bar* skapes en spenningsbølge som beveger seg mot prøvestykket. Bølgen som går gjennom *incident bar* blir målt som *incident signal*. Når bølgen treffer prøvestykket, blir bølgen delvis reflektert og delvis absorbert av teststykket. Det som blir reflektert blir igjen fanget opp som *reflected signal*. Bølgene som blir absorbert i prøvestykket videreføres til *transmitted bar* og målt som *transmitted signal*. Samme måler blir brukt for å måle *incident-* og *reflected signal*. Det vil si at man får to signaler som utdata fra testutstyret, som vist på Figur 20. Her kan man observere at *incident signal* oppstår først, før trykkbølgen treffer prøvestykket etter ca. 1 ms. Den blå linjen viser *reflected signal* og den grå linjen viser *transmitted signal*.



Figur 20: Utdata for 4.b.10.D fra Split-Hopkinson Pressure Bar

Som nevnt tidligere setter SHPB begrensninger på prøvestykkenes geometri. Stagene som overfører trykkbølgene til prøvestykkene har en diameter på 16mm. Det var viktig for gjennomføringen av testen at diameteren og tverrsnittsarealet på staget var større enn prøvestykket. Hvis ikke ville man ikke oppnådd belastning over hele tverrsnittet til prøvestykket. Videre var det nødvendig med tre prøvestykker som kommer fra samme treverk for å teste i tre ulike tøyningshastigheter. Ettersom alle prøvestykkene var kuttet i par måtte disse halveres for å få tre stykker, noe som resulterte i prøvestykker med en lengde på ca. 15 mm.

Ved gjennomføringen av testing med SHPB fikk jeg veiledning og oppfølging av en ansvarlig ved laboratoriet. Det ble satt opp høyhastighetskamera for å filme prøvestykket. Kamera hadde ingen annen funksjon enn å filme prøvestykket under testen for å senere gjøre visuelle vurderinger av for eksempel bruddformer og maksimal tøyning.

## 4. Beregning av nøkkeltall

I dette kapittelet skal jeg gå gjennom hvordan jeg har gjennomført beregningene som ligger til grunn for resultatet. Beregningene er gjort i Excel.

### 4.1. Densitet

Densiteten til prøvestykkene ble beregnet ved å delen masse på volum som vist i formel 3 nedenfor. Både vekt og volum ble målt tidligere ved bruk av elektronisk vekt og digital skyvelære.

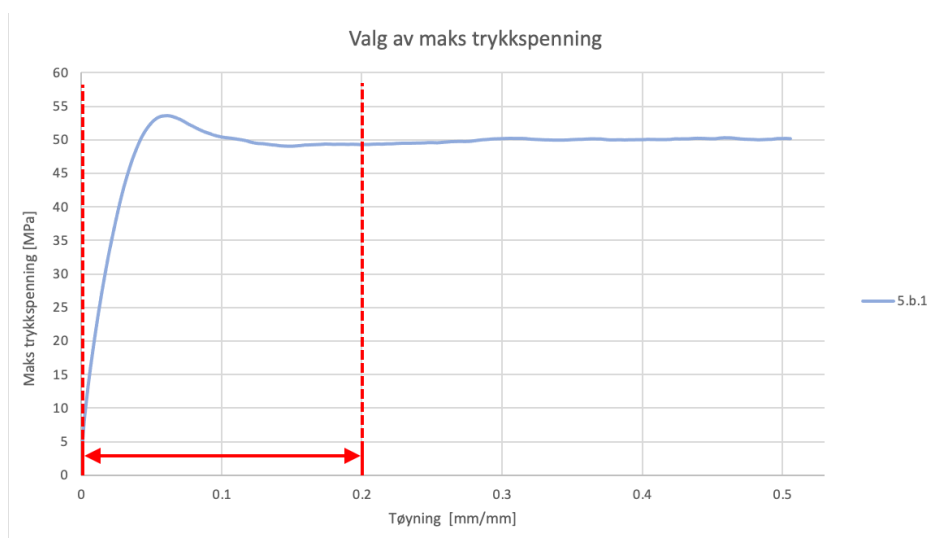
$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (3)$$

### 4.2. Spenning

INSTRON oppgir målinger i kraft (N). Dette ble regnet om til spenning, basert på blant annet geometriske målinger gjort av hvert prøvestykke sitt tverrsnitts areal ved hjelp av formel 4 under.

$$\sigma = \frac{Force}{Area} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (4)$$

Senere i studien blir maksimal trykkspenning i prøvestykkene brukt i resultatet og drøftingen. Jeg har valgt å definere maksimal trykkspenning innenfor tøyingsintervallet 0 til 0.2 mm/mm, som vist på Figur 21. Dette er for å registrere den maksimale trykkspenningen som oppstår før store deformasjoner og brudd, og blir vurdert som bedre data.



Figur 21: Illustrert tøyingsinterval for maks trykkspenning

### 4.3. Tøyning

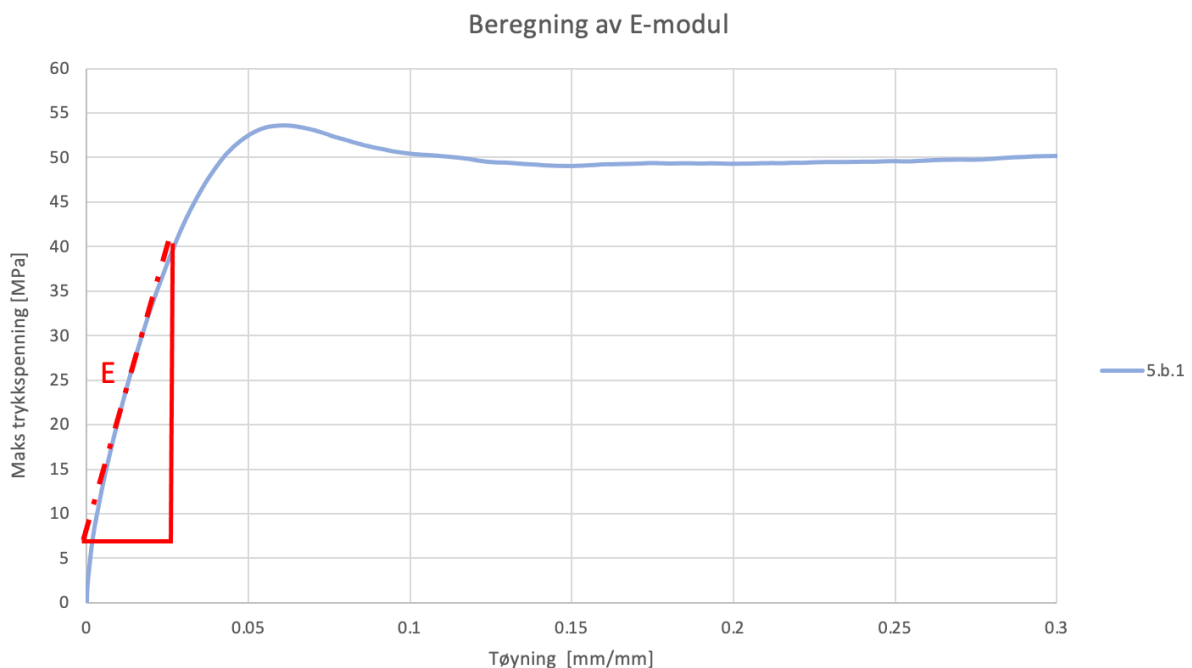
For de statiske testene blir tøyningen målt av kamera der de oppgir tøyningen i [mm/mm] etter formel 2. En viktig del av studien er sammenligning av kvasistatiske og dynamiske tester. Vi må derfor beregne tøyningshastigheten for disse.

Beregningene for dynamisk tøyningshastighet blir gjennomgått i kapittel 4.5. For de kvasistatiske testene, må tøyningshastigheten beregnes etter formel 5 under. Lastpåføringshastigheten er definert som  $v$  og  $L_0$  som prøvestykkets opprinnelige lengde.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{L_0} \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (5)$$

### 4.4. E-modul

E-modulen beskriver stivheten til materialet, og er et viktig nøkkeltall å vurdere. Denne beregnes ved å se på stigningstallet i den elastiske delen av materialet i et spenning-tøyning diagram. Dette er illustrert på Figur 22. Til referanse er E-modulen for klasse C14 i Norsk standard på 7000 MPa [17].



Figur 22: Prikket rød linje illustrerer stigningstallet som definerer E-modulen

Det er benyttet to metoder for å måle tøyningen til prøvestykkene under kvasistatisk testing. Den ene målingen blir gjort av maskinen mens den presser teststykket. Denne målingen har sine svakheter som diskutert tidligere. Dette innebærer blant annet lokal knekking av fibrene

i treverket i kontaktflatene mellom treverk og stål. Dette bidrar til en større deformasjon enn den reelle.

Den andre metoden måler forskyvningen ved hjelp av et kamera. Ved å sette tre prikker på prøvestykket kan kameraet følge disse punktene mens testen utføres. Merkene er plassert litt inn fra endene av prøvestykket. Dette gjør at man unngår feilkilden som kommer av lokal deformasjon av fibrene i endene av prøvestykket. Deformasjonen vil da i prinsippet foregå over en kortere avstand og ikke hele prøvestykket sin høyde. Dette blir derimot ikke noe problem ettersom utdataen fra kameramålingene er oppgitt som prosentvis tøyningensendring, også kalt *vector elongation*, som vist i formelen under.

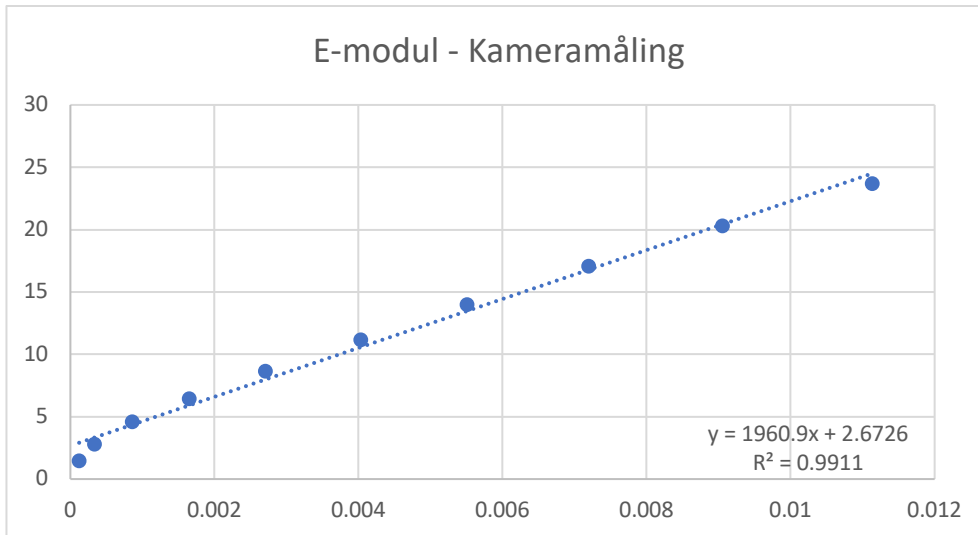
$$\varepsilon_{(\%) } = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (6)$$

En feilkilde oppstår når bruddformer som splitting eller lokal deformasjon oppstår ved kamerapunktene til enkelte prøvestykker. Dette gjør at punktene forflytter seg på en uønsket måte og gir falske tøyningmålinger. Disse testene blir neglisjert fra videre beregninger.

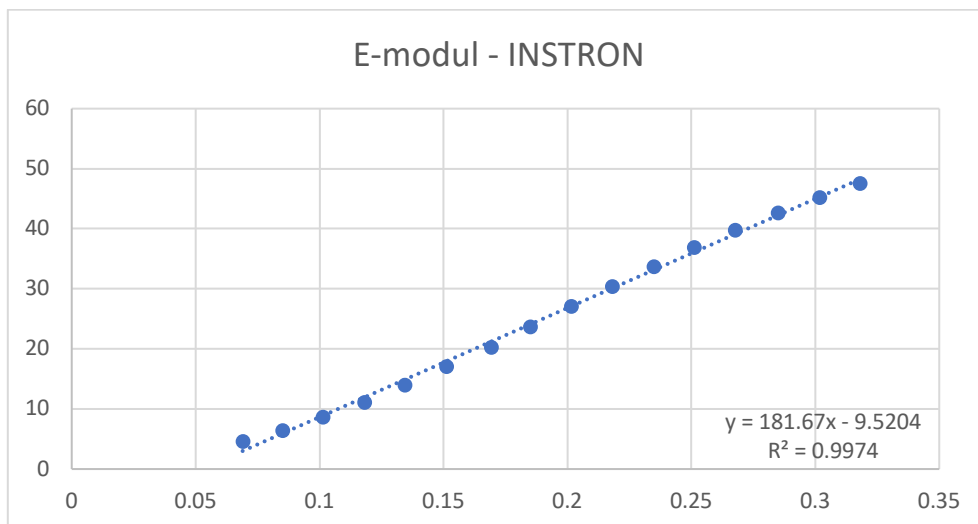
Figur 23 og Figur 24 viser beregning av E-modul basert på de to ulike metodene for å måle tøyningen i prøvestykket 4.a.5. Som sagt er E-modulen stigningstallet i den elastiske delen av materialet. Dette partiet karakteriseres med å være en rett linje. Jeg har derfor valgt å bruke en trendlinje for å finne den beste lineære fremstillingen av punktene fra datasettet. Formelen for trendlinjen er uttrykt med «y» på Figur 23 og Figur 24. R kvadrert ( $R^2$ ) blir brukt for å forsikre samsvar mellom de beregnede verdiene for trendlinjen og de faktiske verdiene i datasettet. Her har jeg satt et krav på at R kvadrert minimum skal ha en verdi på 0.9.

Som illustrert på Figur 23 og Figur 24 er stigningstallene veldig forskjellige, selv om målingene kommer fra samme prøvestykke. Begge verdiene er lavere enn det man kan forvente er den reelle verdien. Beregning av E-modulen basert på kameramålingene er 1960.9 MPa, mens fra INSTRON er verdien på kun 181.67 MPa. Dette er en stor differanse, og man kan se at INSTRON gir en veldig lav verdi. Dette går igjen i målingene til de andre prøvestykkene, og jeg velger derfor å konkludere med at kameramålingene gir en mer riktig verdi.

Tøyningmålinger ved hjelp av kamera vil derfor bli benyttet videre i studien.



Figur 23: Beregning av E-modul basert på tøyingsdata fra kameramålinger – 4.a.5

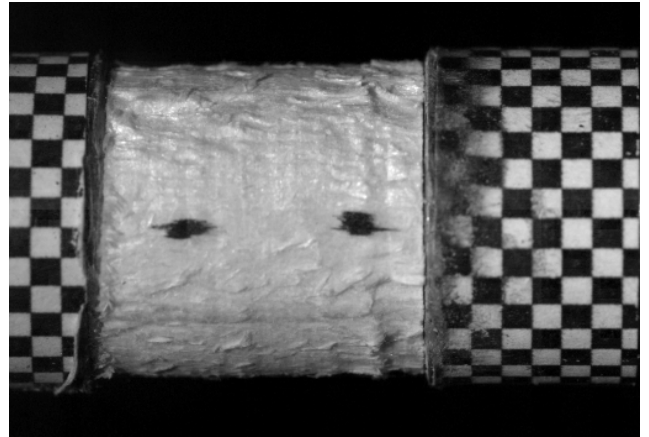


Figur 24: Beregning av E-modul basert på tøyingsdata fra INSTRON – 4.a.5



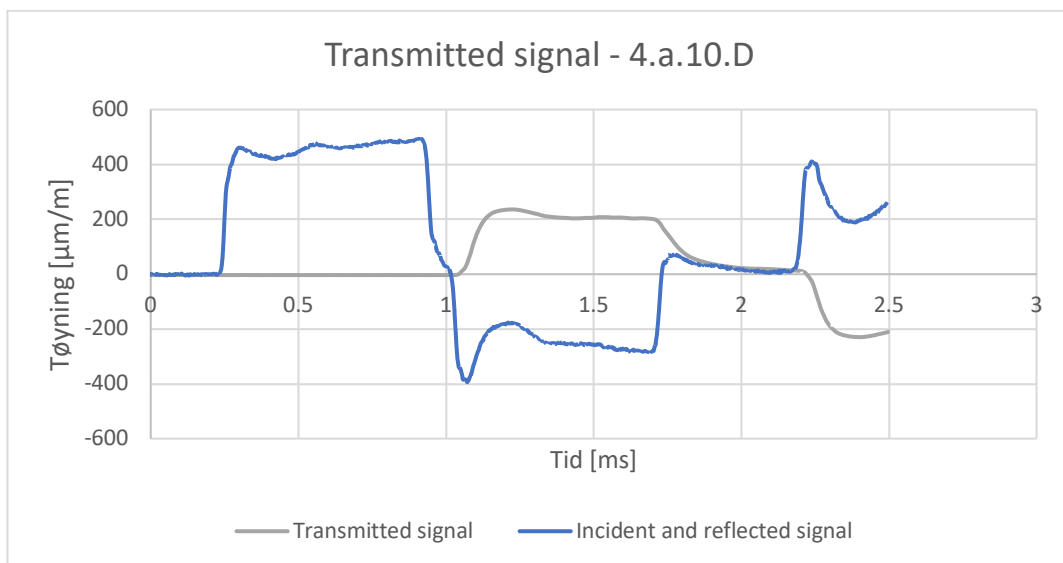
#### 4.5. Split-Hopkinson Pressure Bar

Split-Hopkinson Pressure Bar ble brukt for dynamisk trykktesting av prøvestykkene. Hensikten med testen er i hovedsak å se hvor stor maks spenning prøvestykkene tåler under ekstreme tøyningshastigheter. Dette skal senere sammenlignes med de kvasistatiske testene.



Figur 25: Prøvestykke 4.a.10.D før testing

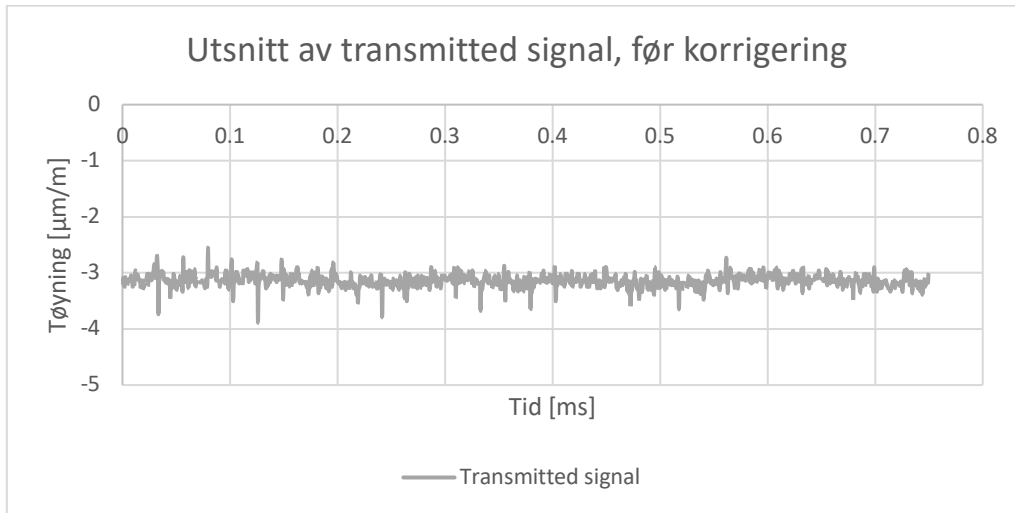
Etter testing fikk man data fra to målere fra hver side av prøvestykket. Den første måleren måler spenningsbølgene før kollisjon, samt de bølgene som blir reflektert av prøvestykket. Disse signalene kalles *incident og reflected signal*. Videre registrerer måleren på andre siden av prøvestykket de spenningsbølgene som blir absorbert og har beveget seg gjennom prøvestykket. Denne blir betegnet som *transmitted signal*. Se Figur 26.



Figur 26: Incident and reflected og Transmitted signal - prøvestykke 4.a.10.D

For å beregne maks spenning i testen, bruker man *transmitted signal*. Transmitted signal for prøvestykke 4.a.10.D er vist på Figur 26. Det første man må gjøre er å korrigere signalet før kollisjonen inntreffer mot null. Som illustrert på Figur 26 starter testen i realiteten først etter ca. et millisekund. Som vist på Figur 27 gir måleren små utslag på tøyningen før dette.

Korrigeringen blir gjort gjennom en visuell vurdering. Eksempelvis er korrigerings-tallet for prøvestykke 4.a.10.D blitt vurdert til en verdi på 3.1.



Figur 27: utsnitt av transmitted signal før korrigering mot null. Prøvestykke 4.a.10.D

Videre må man finne tøyningshastigheten prøvestykket blir utsatt for ved testing. Dette er viktig for å kunne sammenligne de ulike tøyningshastigheten opp mot blant annet maks spenning. Først blir spenningsbølgehastigheten gjennom staget i SHPB beregnet ved hjelp av formel 7. [3]

$$c = \sqrt{\frac{E_b}{\rho_b}} = \sqrt{\frac{210\,000\text{ Mpa}}{7760\text{ kg/m}^3}} = 5202.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7)$$

$E_b$  er E-modulen til stagen i Split-Hopkinson Pressure Bar og er lik 210 000 MPa, mens  $\rho_b$  er densiteten og er 7760 kg/m<sup>3</sup>. Dette gir en beregnet spenningsbølgehastighet på 5202.1 m/s.

For å beregne tøyningshastigheten til prøvestykkene bruker man formel 8, som vist under. Her er  $L_0$  prøvestykkets opprinnelige lengde, mens man beregner  $c$  etter formel 7. Videre benyttes gjennomsnittet av *reflected signal* uttrykt som  $\epsilon_R$ . *Reflected signal* er illustrert på Figur 26 og er definert innenfor intervallet 1 og 1.75 for prøvestykke 4.a.10.D.

$$\dot{\epsilon}_s = -2 \frac{c}{L_0} \epsilon_R \quad (8)$$

Det neste steget vil være å beregne spenningen i prøvestykket, ved å bruke formel 9. [6]

$$\sigma_s = \frac{E_0 A_0}{A_s} \varepsilon_T \quad (9)$$

I denne formelen er  $\sigma_s$  og  $A_s$  spenningen og tverrsnittsarealet til prøvestykket.  $E_0$  og  $A_0$  er E-modulen og tverrsnittsarealet til stagene i SHPB. Videre er  $\varepsilon_T$  *transmitted signal* fra testen, som kommer i form av et datasett med om lag 5000 verdier. Ved å bruke denne formelen, for så å og finne maks verdi i datasettet, vil man finne maks spenning i prøvestykkene.

#### 4.6. Beregning av karakteristisk styrke

Karakteristisk styrke er en verdi som blir brukt av sikkerhetsgrunner. Dette er en beregnet styrke som sikrer at kun 5% av de individuelle testene er forventet å ha lavere styrke. Denne tar høyde for usikkerhet i materialet og sikrer at materialet tåler det den er dokumentert for å tåle.

For å kunne vurdere hvilken innvirkning lastpåføringshastigheten har på prøvestykkets styrke, vil det være naturlig å se på den karakteristiske styrkeverdien til treverket. Denne kan beregnes ved å følge standarden NS-EN 14358:2016 «Beregning og verifisering av karakteristiske verdier» [13]. Prøvestykkene er skåret ut av ti forskjellige bjelker med en stor varians av årringstetthet, densitet og generell kvalitet av treverket. Videre er det gjort et relativt stort antall tester, noe som gir et godt datagrunnlag for beregning av karakteristisk styrke. Disse beregningene vil senere i oppgaven bli brukt til å vurdere hvilken innvirkning lastpåføringshastigheten har å si.

Kapittel 3.2 i NS-EN 14358:2016 tar for seg beregning av karakteristisk styrkeverdi. Videre forteller kapittel 3.2.2 c) at man skal anta logaritmisk normalfordeling ved beregning av styrke. Først må man beregne gjennomsnittsverdien  $\bar{y}$  og standardavviket  $S_y$  av maksimalspenningen ved hjelp av formel 10. Standardavviket er et mål på det gjennomsnittlige avviket fra gjennomsnittet og sier noe om spredningen av datasettet. Antall prøvestykker er oppgitt som  $n$  og  $m_i$  står for maks spenning i de individuelle prøvestykkene.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (10)$$

$$S_y = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \\ 0.05 \end{array} \right. \quad (11)$$

Standardavviket skal ikke være lavere enn 0.05 eller 5%. Videre kan den karakteristiske styrken  $f_{c,0,k}$  bli beregnet. For å kunne beregne denne må man ta høyde for antall tester som er gjennomført, ved å beregne  $K_s$ .

$$K_s = \frac{6.5n + 6}{3.7n - 3} \quad (12)$$

$$f_{c,0,k} = (\bar{y} - k_s(n) \cdot S_y) \quad (13)$$

Videre må man vurdere nøyaktigheten og usikkerheten til beregningene. Dette kan gjøres ved å se på standardavviket, gjennomsnittet og variasjonskoeffisienten i datasettet. Variasjonskoeffisienten er definert som standardavviket delt på gjennomsnittsverdien, og er et mål på spredningen til datasettet. Jo høyere koeffisienten er jo større spredning. Fordelen med dette tallet er at det er dimensjonsløst, som vil si at den er uavhengig av enheten målingene den ble gjort med. Dette gjør det lettere å sammenligne ulike datasett.

## 5. Resultat og diskusjon

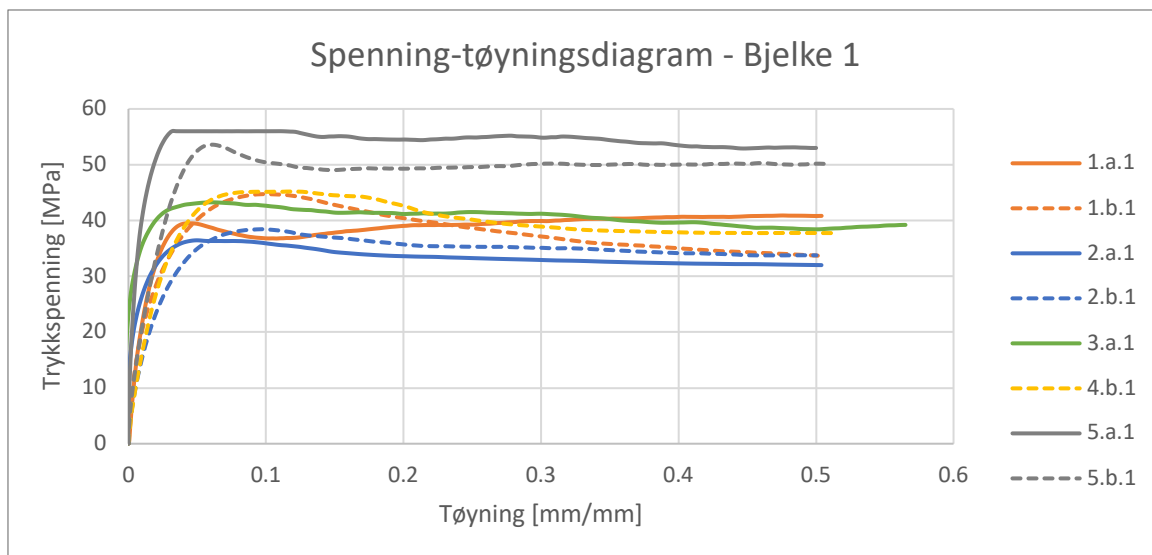
### 5.1. Spenning-tøyningsdiagrammer for kvasistatisk trykktesting

Det ble gjennomført kvasistatisk testing med en lastpåføringshastighet på 1mm/min på bjelke 1 til 8. Disse testene legger grunnlaget for en stor andel av beregningene som er gjort i studien. Figur 28 og Figur 35 viser spenning-tøynings diagrammene for hvert prøvestykke i disse bjelkene. All materialdata for prøvestykker i bjelke 1 til 8 er vedlagt i vedlegg B.

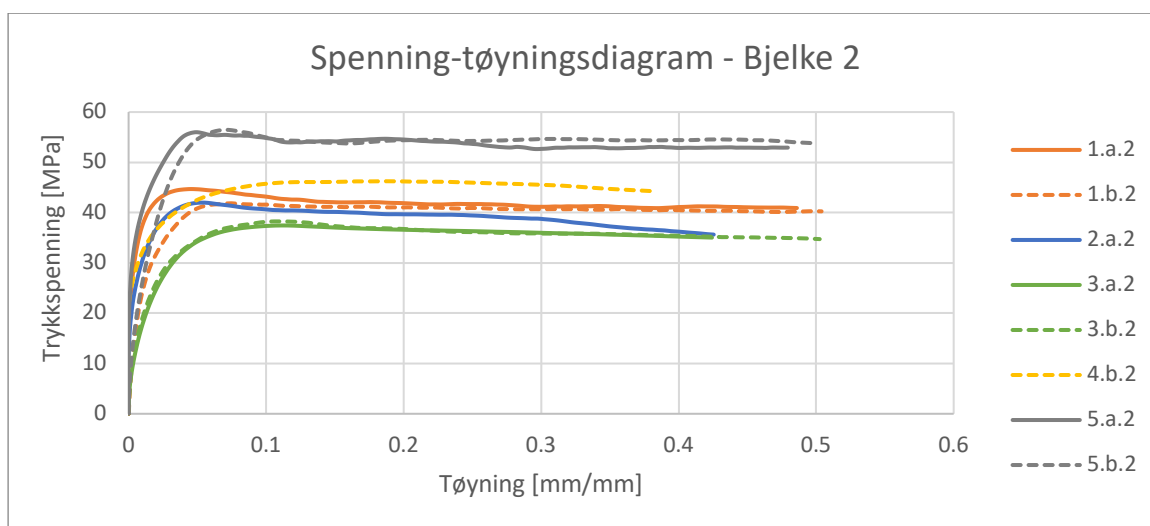
Som tidligere nevnt ble det observert en tettere årringsbredde i de ytterste lamellene i bjelkene, som diskutert i kapittel 3.1.2. Dette ble også bekreftet av Trefokus som vanlig praksis i produksjon av limtrebjelker [19]. Ved å se på spenning-tøynings diagrammene kan vi observere at lamell 1 og 5 ofte måler høy maks trykkspenning. Dette gir indikasjoner på at tettere årringsbredde gir en høyere maks trykkspenning. Senere i resultatet skal jeg se nærmere på hvilken betydning årringer har for materialets egenskaper.

Spenning tøyningsdiagrammene har noen felles karaktertrekk. Maks spenning oppnås relativt raskt før prøvestykkene går til brudd, gjerne et sted mellom 0 og 0.1 tøyning. Etter at brudd oppstår i prøvestykket går trykkspenningen generelt sakte nedover før testen avsluttes.

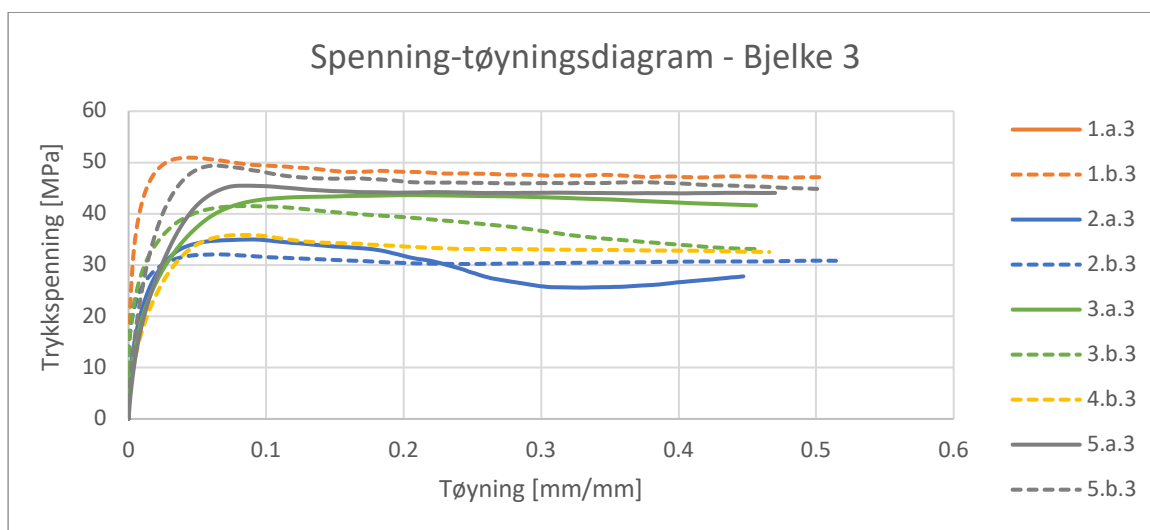
Som nevnt tidligere ble det i kapittel 3.3.1 observert at flere av prøvestykkene med høy maks trykkspenning hadde et distinkt flatt parti når trykkspenning ble stor nok. Dette kan bli observert ved flere av testene, men er spesielt lett å se på bjelke 8 på Figur 35. Dette viste seg å være testutstyret som var satt opp for å måle en maks kraft på 10 kN. Det kan derfor antas at disse kurvene ville opprettholdt den samme karakteristikken som definert tidligere. Dette er derfor feilkilde som må tas i betraktning, spesielt når styrken til prøvestykkene skal vurderes.



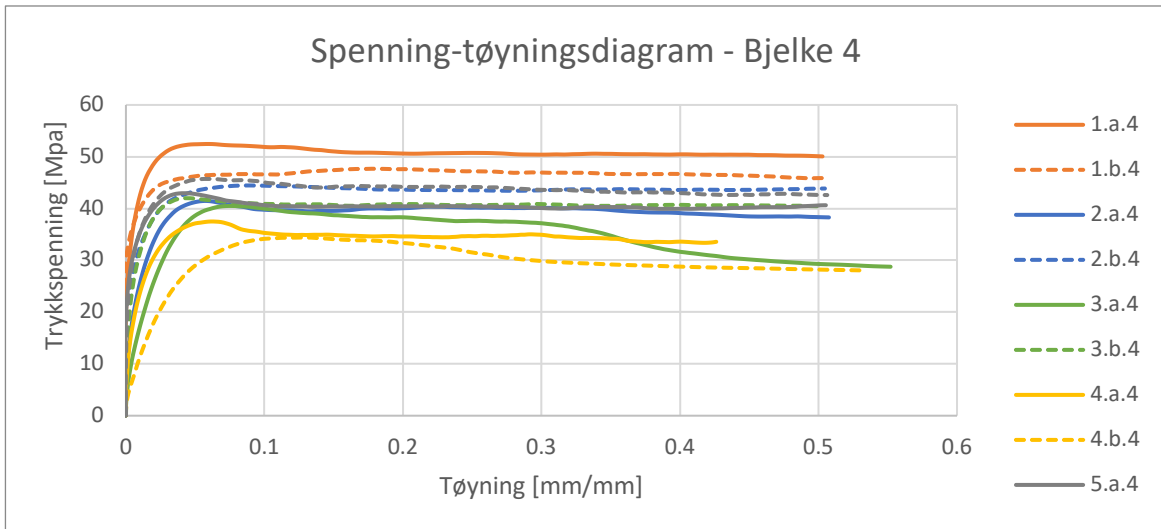
Figur 28: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 1



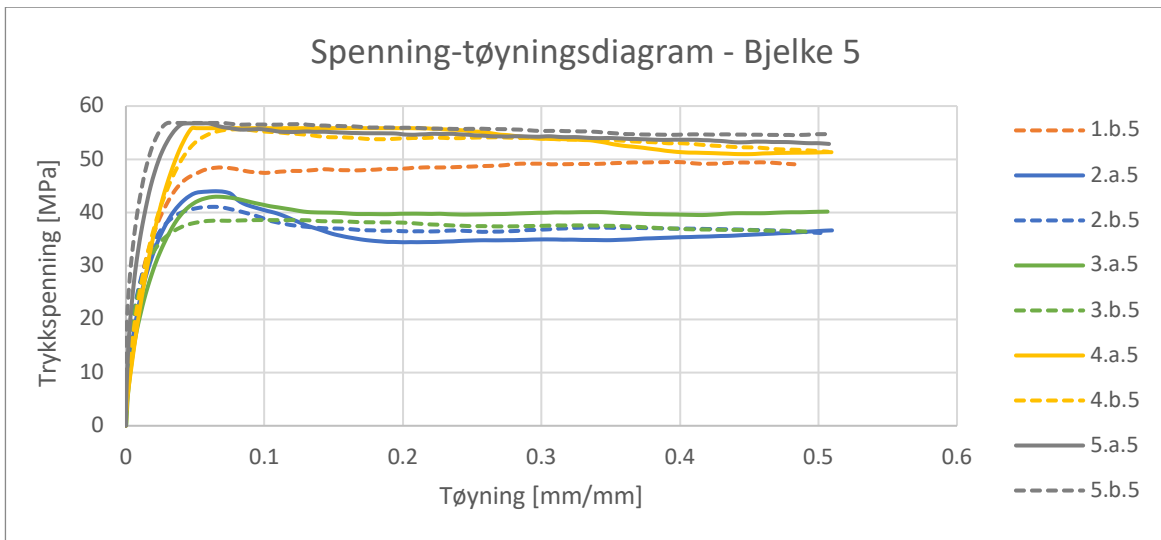
Figur 29: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 2



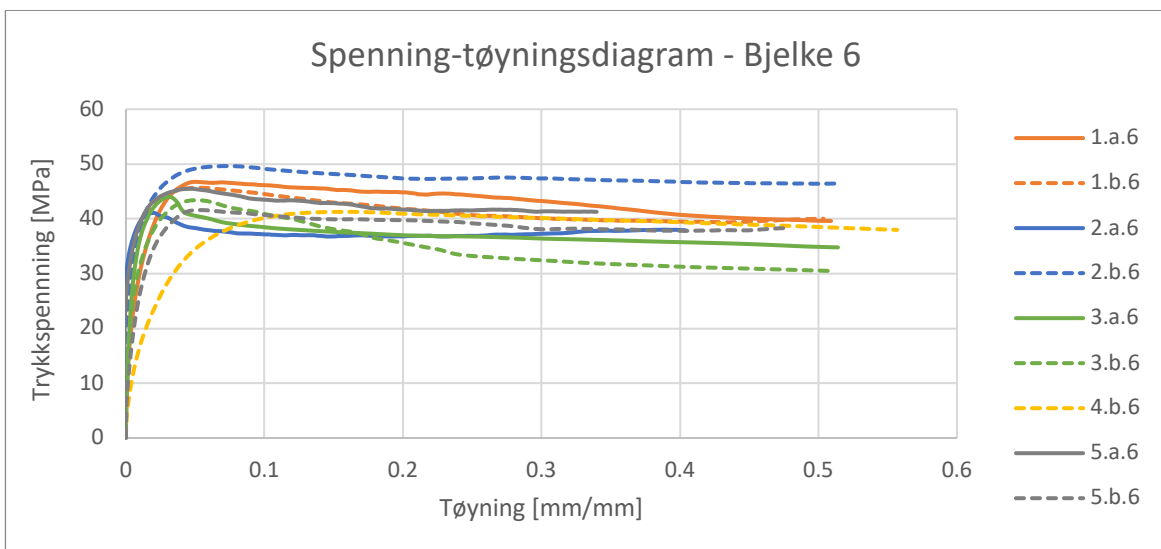
Figur 30: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 3



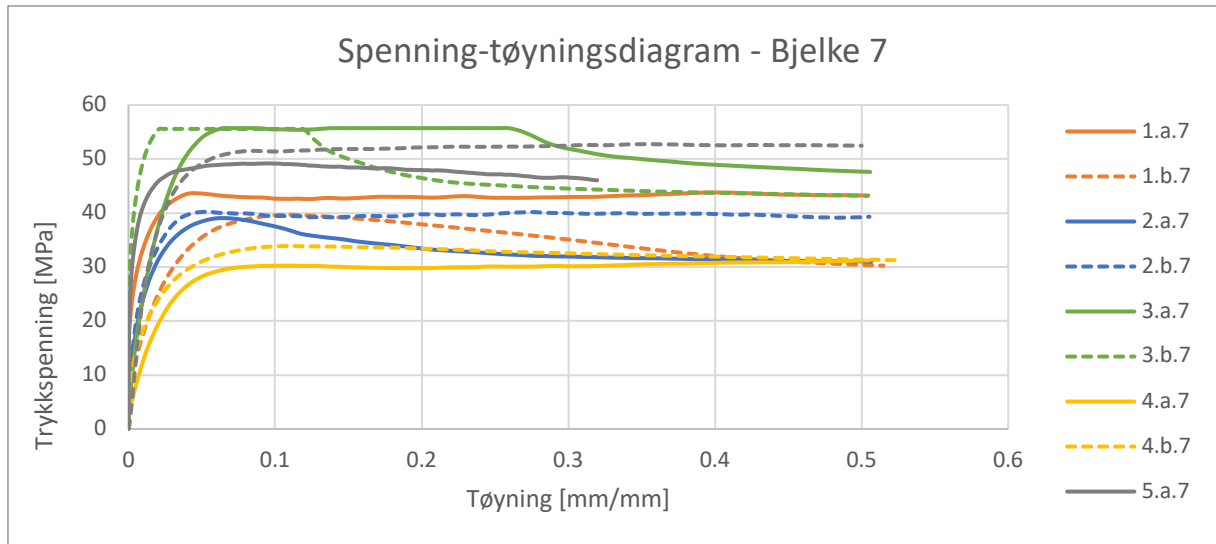
Figur 31: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 4



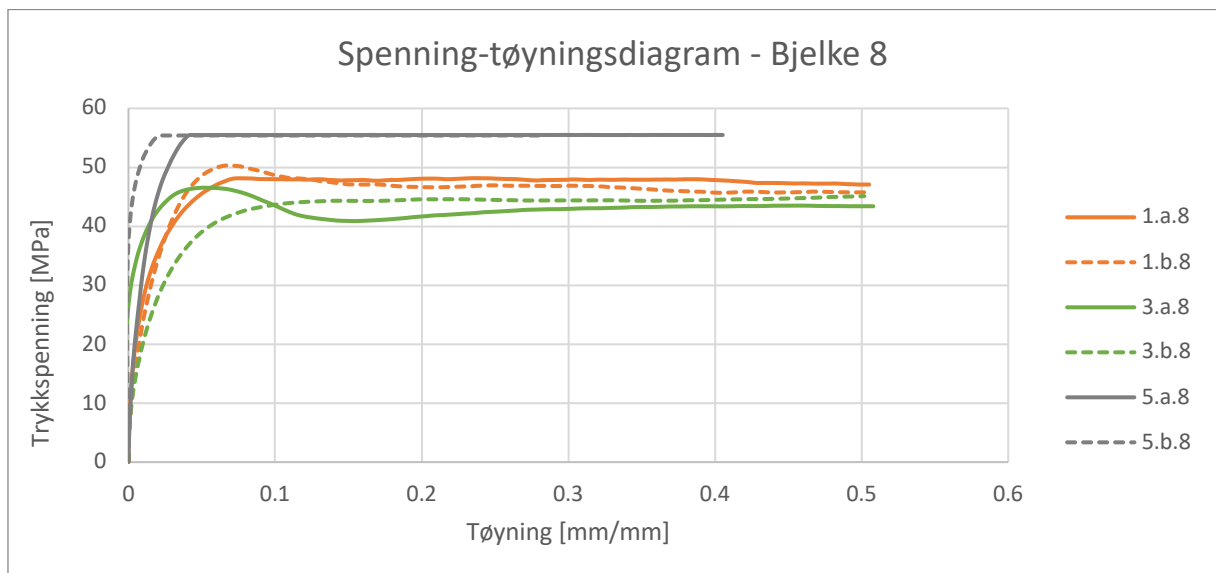
Figur 32: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 5



Figur 33: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 6



Figur 34: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 7



Figur 35: Spenning-tøyningsdiagram for bjelke 8



## 5.2. E-modul

Basert på resultatet fra de kvasistatistiske testene har elastitetsmodulen blitt beregnet for hvert prøvestykke. Metoden for dette er beskrevet i kapittel 4.4.

Beregnete nøkkeltall for E-modulen i prøvestykkene er vist i Tabell 6. Videre er alle individuelle prøvestykkers beregnede E-modul vedlagt i vedlegg B.

E-modul	
Gjennomsnitt	2670.81
Standardavvik	1783.81
Variasjonskoeffisienten	0.668

Tabell 6: Nøkkeltall for E-modul

Beregningen av elastitetsmodulen til prøvestykkene viser en stor varians. Gjennomsnittet ble beregnet til 2670.8 MPa. I litteraturstudien i kapittel 3 undersøkes det om den beregnede E-modulen basert på trykktesting av små prøvestykker blir riktig og representativt for større treverk. Philips konkluderer med at jo mindre prøvestykket er, jo lavere vil den målte/beregnete E-modulen være. Philips observerer også at E-modul beregnet på resultater fra trykktesting, vil være lavere enn beregninger basert på strekktesting [15]. Dette tilsier at vi kan forvente en lavere E-modul fra våre eksperimenter.

Sammenligner man den gjennomsnittlige beregnede E-modulen på 2670 MPa med tall fra Norsk Standard [18], ser man at den er betydelig lavere. Eksempelvis er den laveste E-modulen i Norsk Standard for klasse C14 på 7000 MPa. Basert på litteraturstudien, er ikke dette resultatet overraskende.

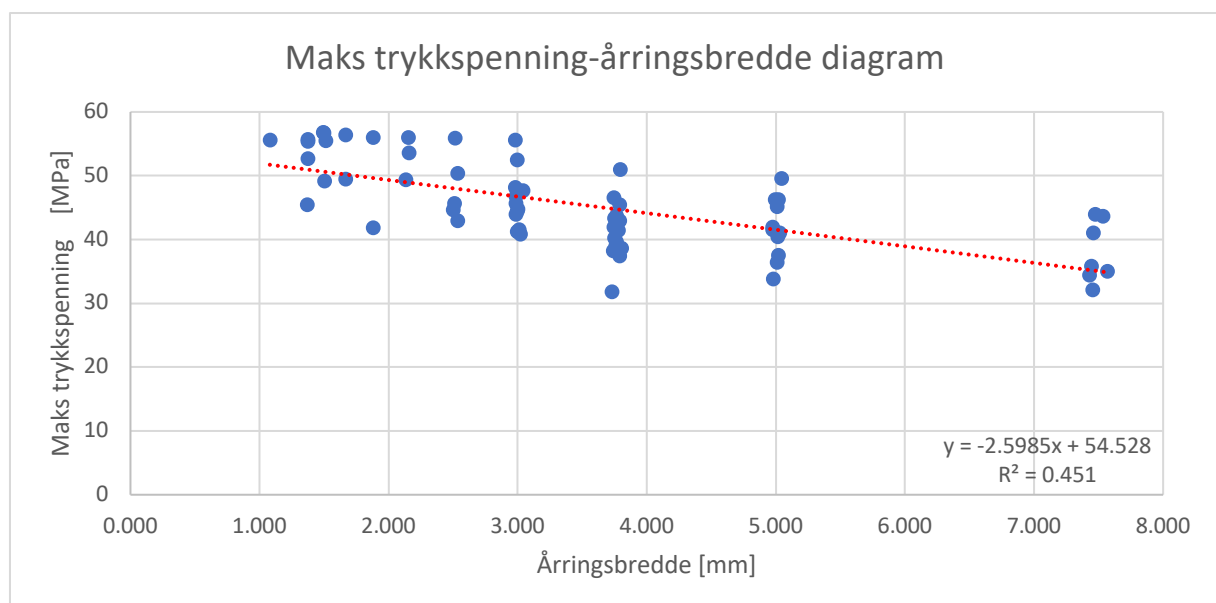
Videre kan man se at standardavviket er på 1783.8 MPa. Standardavviket gir datasettets gjennomsnittlige avvik fra gjennomsnittet. Med dette kan man vurdere at det er stor spredning i datasettet. Treverk er et ikke-homogent materiale og det vil naturlig være variasjoner. På bakgrunn av dette kan vi at standardavviket har gitt et representativt utvalg for trebjelkene, noe som bidrar til gode resultater. Variasjonskoeffisienten gir oss et mål på den relative spredningen i datasettet. Denne er beregnet til 0.668.

### 5.3. Årringenes påvirkning på materialeegenskaper

Kapittel 2.2 i litteraturstudien tar for seg ulike parametere som kan korrelere med styrken til treverket. I dette kapitlet skal jeg presentere ulike korrelasjoner mellom årringsbredde og materialeegenskaper.

Diagrammet vist på Figur 36 viser korrelasjonen mellom årringsbredden og maks trykkspenning i prøvestykkene. Trendlinjen til diagrammet viser en klar korrelasjon der lavere årringsbredde gir en tydelig økt trykkapasitet. Her kan man observere at prøvestykkene med årringsbredde på ca. 1mm har en målt trykkapasitet i overkant av 50 MPa, mens de prøvestykkene med årringsbredde på ca. 7.5 mm har en gjennomsnittlig trykkapasitet på 35 MPa. Det betyr at det er en forskjell i maks målt trykkspenning på ca. 42% mellom laveste og høyeste målte årringsbredde.

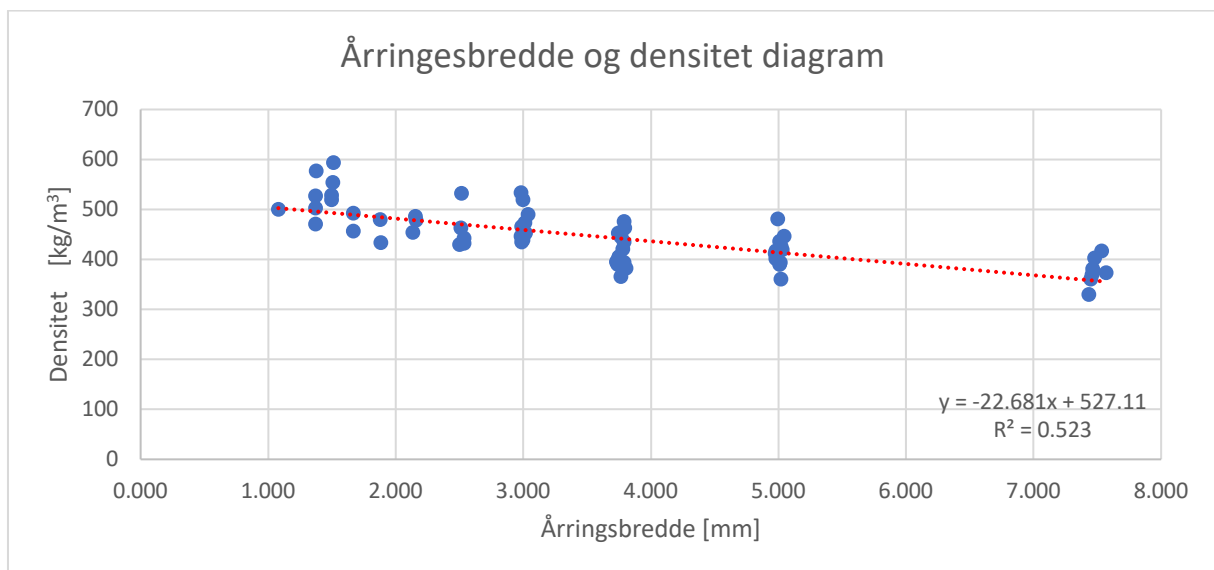
Denne korrelasjonen samsvarer med resultatene fra studien til «Bucan og Merhar» presentert i kapittel 2.2. Her presenteres korrelasjoner mellom årringsbredde og bøyestyrke. Basert på dette og egne beregninger kan man konkludere med en klar korrelasjon mellom maks trykkspenning og årringsbredden i treverk. Likevel må man ta høyde for at de kvasistatistiske målingene ble gjennomført med en maks målbar kraft på 10 kN. Basert på dette kan man anta at trendlinjen ville vært brattere, dersom denne feilkilden hadde blitt tatt høyde for.



Figur 36: Korrelasjon mellom årringstettheten og maks målt trykkspenning

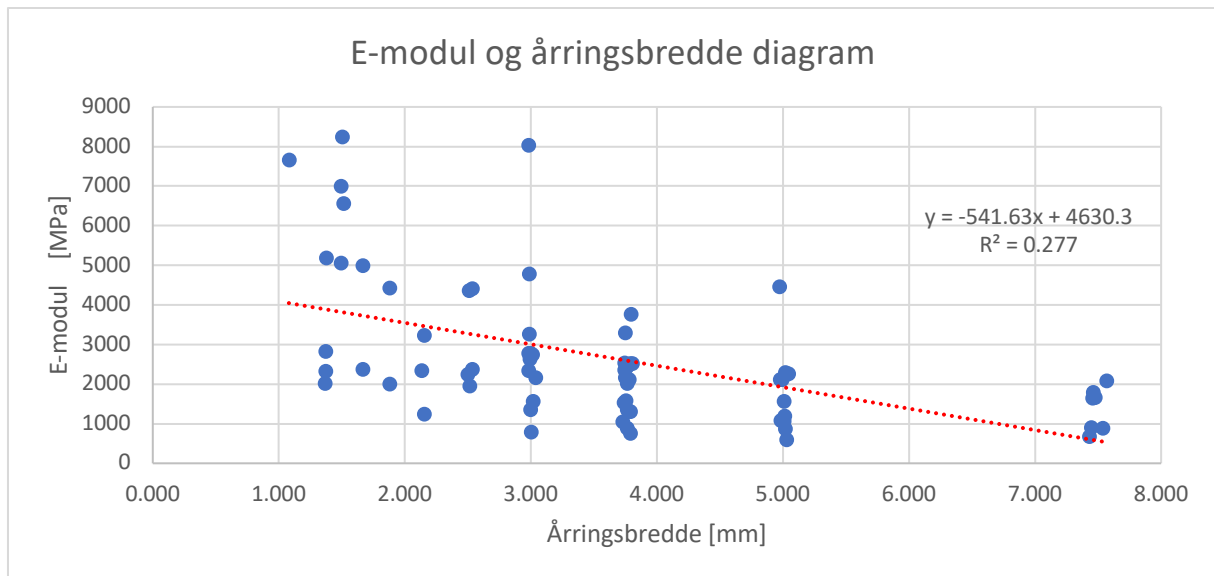
Videre er det interessant å undersøke om det finnes en korrelasjon mellom densitet og årringsbredde. Dette resultatet er presentert på Figur 37. Her viser trendlinjen en tydelig korrelasjon, der lav densitet samsvarer med høy årringsbredde og motsatt. Mellom høyeste og laveste årringsbredde er det økning i densitet på ca. 42%.

Basert på litteraturen i kapittel 2.2, kan man begrunne denne korrelasjonen med en direkte sammenheng mellom densitet og årringsbredde. Både densitet og årringsbredde styres av forholdet mellom sommer- og vårved, der forholdet er bestemt av blant annet vekstforholdene. Resultatet på Figur 37 samsvarer med litteraturstudien.



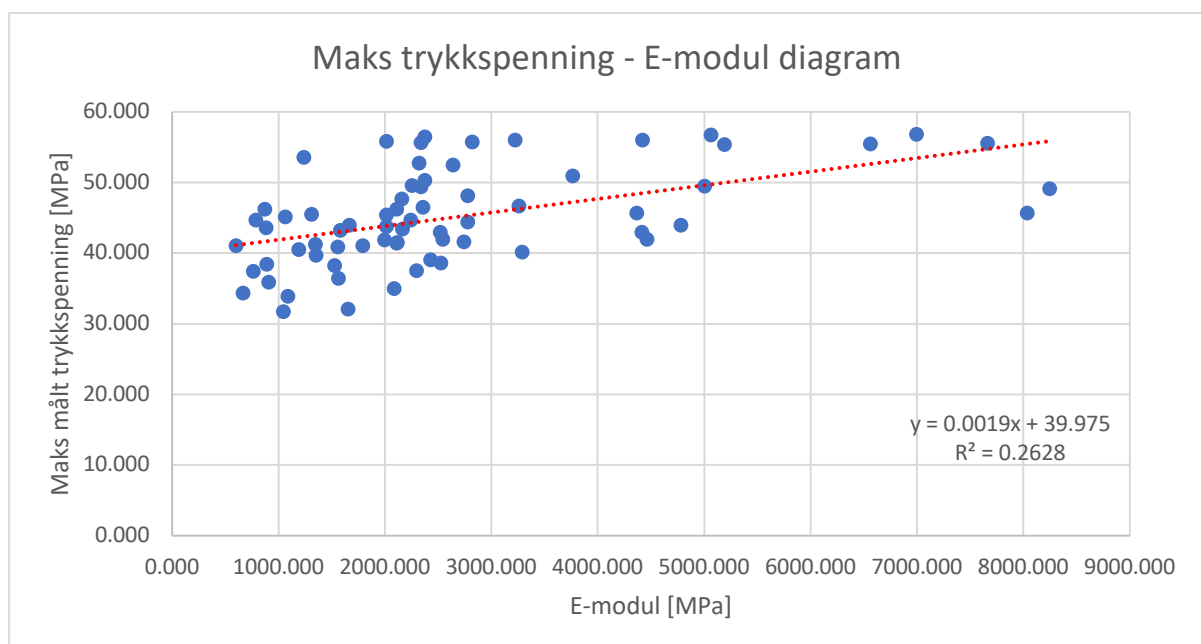
Figur 37: Korrelasjon mellom årringsbredde og densitet

Figur 38 viser et diagram som presenterer sammenhengen mellom E-modul og årringsbredde. Her kan man se sammenhengen mellom stivheten til materialet og årringsbredden, der lav årringsbredde bidrar til en høyere E-modul. Som diskutert i kapittel 3.2.1 har sommerved avstivning som en av hovedfunksjonene. Basert på dette kan man konkludere med at stivheten også i stor grad styres av forholdet mellom sommerved og vårved der større andel sommerved gir høyere stivhet, samt lavere årringsbredde.



Figur 38: Korrelasjon mellom E-modul og årringsbredde

Ettersom vi har undersøkt sammenhengen mellom årringer og maks trykkspenning, samt årringer og E-modul, vil det være interessant å se om det er en tydelig korrelasjon mellom E-modul og maks trykkspenning. Figur 39 viser at det er stor spredning i dette resultatet, indikert med  $R^2 = 0.26$ . Det er også viktig å påpeke at de høyeste målingene av trykkraft ble begrenset av testutstyret til 10 kN. På bakgrunn av det, kan man anta at trendlinjen ville vært brattere uten denne feilkilden. Likevel viser resultatet at økt E-modul bidrar til økt trykkapasitet.

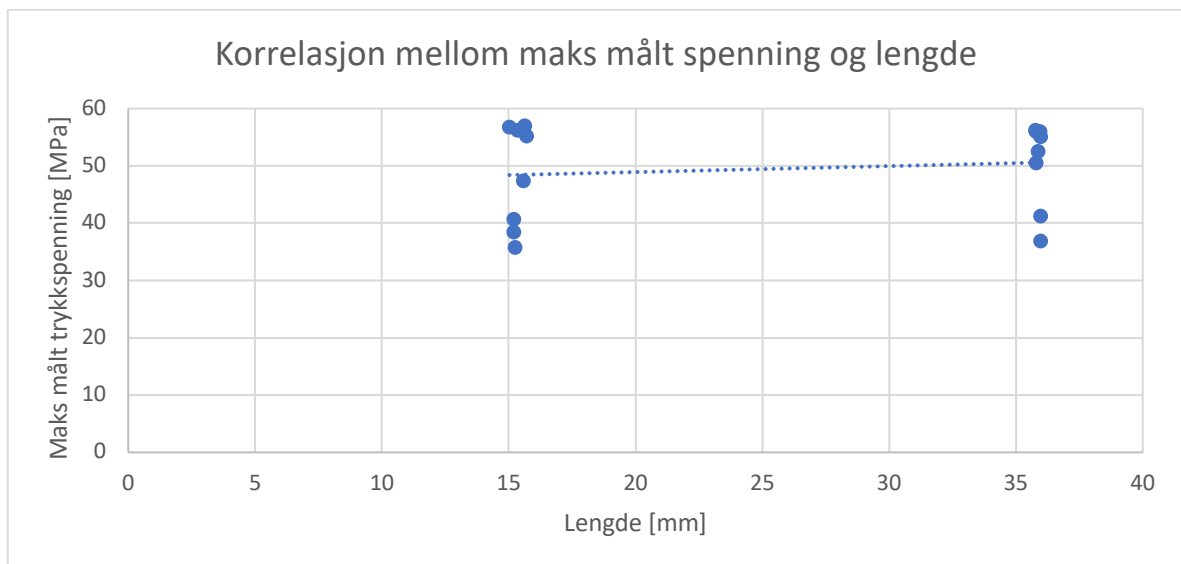


Figur 39: Korrelasjon mellom maks trykkspenning og E-modul

#### 5.4. Størrelsesfaktor

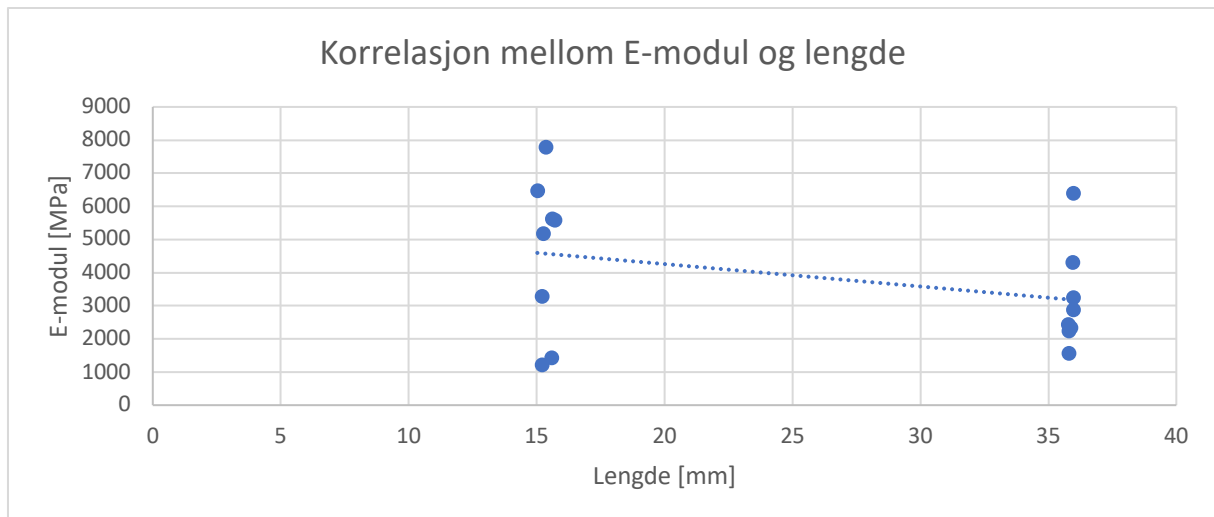
Det har blitt testet prøvestykker med forskjellig lengde i de kvasistatiske og dynamiske testene. Grunnet dette, ønsket jeg å undersøke om størrelsen på prøvestykkene hadde en innvirkning på de målte og beregnede materialegenskapene. Det ble totalt testet åtte prøvestykker på ca. 15 mm og åtte på ca. 35mm. All materialdata for prøvestykkene i bjelke 10 er vedlagt i vedlegg C.

Figur 40 viser resultatet av maks målt trykkspenning sammenlignet med lengde. Basert på diagrammet og datasettet har jeg ikke kunne trekke noe klar sammenheng mellom lengde og maks målt trykkspenning. En feilkilde i dette resultatet er at målingene ikke registrerte kraft over 10 kN, noe som kan observeres ved å se at datapunktene med de høyeste trykkspenningene «hoper» seg opp øverst i diagrammet.



Figur 40: Diagram som viser maks målt spenning og lengde av prøvestykke

Videre ble det undersøkt om det var en sammenheng mellom E-modul og lengde. Figur 41. viser en større spredning i E-modulen for prøvestykkene på 15mm. Trendlinjen viser en reduksjon i E-modul jo lengre prøvestykkene er. Likevel ser jeg ingen klar korrelasjon, noe som kan forklares med at denne undersøkelsen kun har åtte tester i hver lengde å basere seg på. Samtidig indikerer litteraturen i Kapittel 2.3 at man kan forvente en lavere E modul, jo mindre prøvestykkene er, noe som strider med resultatene vist på Figur 41.



Figur 41: Diagram som viser E-modul og lengde av prøvestykke

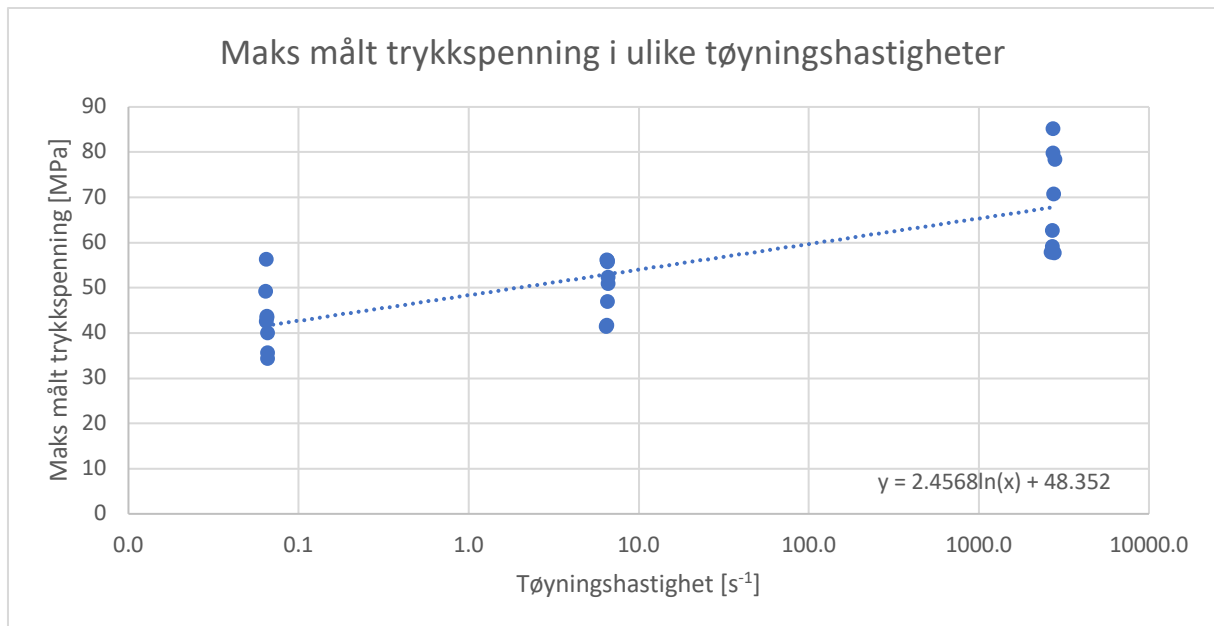
### 5.5. Tøyningshastighetens påvirkning på trykkapasitet

I dette kapittelet skal jeg se nærmere på hvilken påvirkning tøyningshastigheten har på trykkapasiteten til treverk. Som nevnt tidligere har prøvestykker fra samme treverk blitt testet i tre ulike like tøyningshastigheter, som vist i Tabell 7. Det ble benyttet Split-Hopkinson Pressure Bar for å utføre de dynamiske testene. I kapittel 2.4 konkluderes det med at SHPB er et tilfredsstillende verktøy å bruke for å teste treverk i høye tøyningshastigheter, basert på en studie utført av Gilbertson [4].

	Tøyningshastighet [ $s^{-1}$ ]
Kvasistatisk_1	0.065
Kvasistatisk_2	6.5
Dynamisk	2720.1

Tabell 7: Oversikt over de ulike tøyningshastighetene

Resultatet av de kvasistatiske og dynamiske testene er illustrert på Figur 42. Her viser trendlinjen en klar korrelasjon mellom maks målt trykkspenning og tøyningshastighet, der høyere tøyningshastighet bidrar til en høyere trykkapasitet. Alle de individuelle målingene for prøvestykkene i bjelke 9 er vedlagt i Vedlegg A. Figur 42 fremstiller dataen logaritmisk, ettersom det er store forskjeller i tøyningshastighet mellom de kvasistatiske og dynamiske testene. Sammenligner man målingsdataen fra kvasistatisk\_1 med en tøyningshastighet på 0.065 med de dynamiske testene, viser resultatet at man får en 55% økning i maks trykkspenning.



Figur 42: Korrelasjon mellom maks målt trykkspenning og tøyningshastighet

Kapittel 2.1 i litteraturstudien dreier seg om tidligere studier som undersøker endring i styrkekapasiteten til treverk utsatt for statiske og dynamiske laster. Totalt ble fire studier undersøkt, der to av disse rapporterte en økning i kapasitet, mens to av de viste til en redusert kapasitet. Disse studiene undersøkte derimot bøyemoment, og benyttet ulike metoder som slagpendel for å påføre dynamiske laster. Resultatet på Figur 42 korrelerer likevel med resultatet i rapporten utført av Malo i 2004 [11].

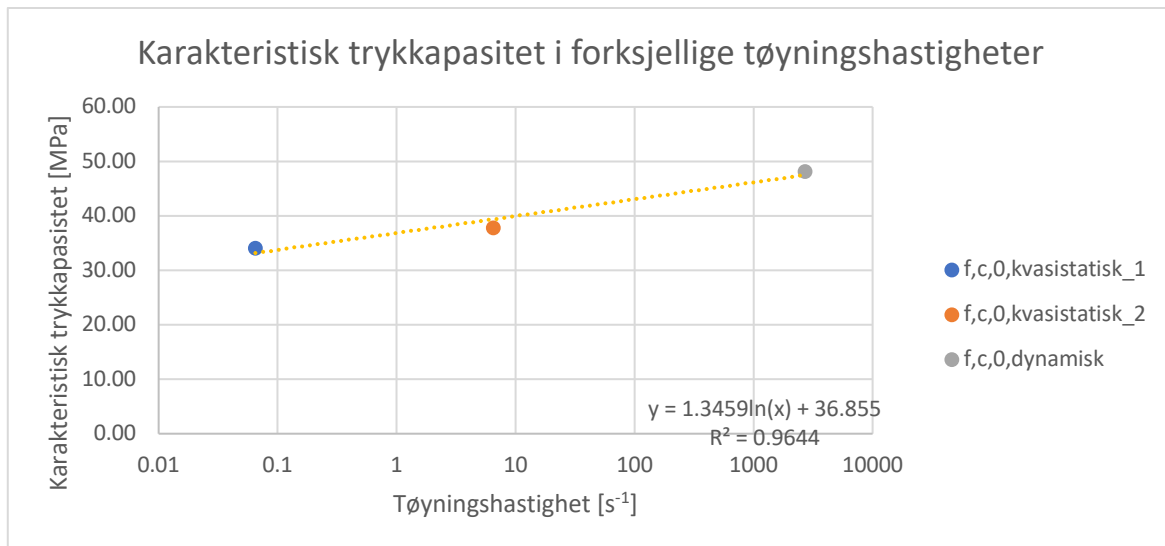
### 5.6. Karakteristisk styrke

Den karakteristiske styrken til prøvestykkene er beregnet etter NS-EN 14358:2016 [13], som beskrevet i kapittel 4.6. Tabell 8 viser den beregnede karakteristiske trykkspenningen for de ulike tøyningshastighetene. Denne viser at det er en klar økning i karakteristisk trykkspenning med økt tøyningshastighet. Mellom kvasistatisk\_1 og kvasistatisk\_2 skjer det en økning på ca. 10%. Mellom kvasistatisk\_1 og dynamisk er det derimot en 41% økning.

Test	$f_{c,0,k}$ [MPa]	Tøyningshastighet [s <sup>-1</sup> ]
Kvasistatisk_1	34.08	0.065
Kvasistatisk_2	37.79	6.536
Dynamisk	48.19	2720.062

Tabell 8: Karakteristisk last i ulike tøyningshastigheter

En grafisk fremstilling av tabell 8 er vist på figur 43. Basert på figuren kan man videre bestemme forventet karakteristisk trykkapasitet i andre tøyningshastigheter om ønsket.



Figur 43: Korrelasjon mellom karakteristisk trykkapasitet og tøyningshastigheter

Videre må man vurdere nøyaktigheten til beregningene av karakteristisk trykkapasitet. Dette kan gjøres ved å se på standardavviket, gjennomsnittet og variasjonskoeffisienten til trykkspenningen i datasettet. Tabell 9 gir en oversikt over de statistiske nøkkeltallene.

Sammenligner man gjennomsnittet med karakteristiske verdier, ser man at gjennomsnittet er vesentlig høyere. Dette er forventet, ettersom beregningene av karakteristisk styrke tar hensyn til uregelmessigheter i materialet, noe som gir en mer konservativ verdi for å tilfredsstille kravene til sikkerhet. Standardavviket er mellom 6 og 7 for de kvasistatiske datasettene, noe som viser spredningen i datasettet. Variasjonskoeffisienten er lav for alle datasettene. Dette forteller oss at datasettet har en lav relativ variasjon.

Datsett	f,c,o,k [Mpa]	Gjennomsnittlig spenning [MPa]	Standardavvik	Variasjonskoeffesienten
Kvasistatisk_1	34.08	45.12	6.71	0.15
Kvasistatisk_2	37.79	50.20	6.16	0.12
Dynamisk	48.19	68.98	11.10	0.16

Tabell 9: Statistiske nøkkeltall



## 6. Konklusjon

I dette studiet har det blitt undersøkt hvordan treverkets trykkapasitet påvirkes under dynamiske og statiske tøyningshastigheter. Videre har det blitt gjennomført en årringsstudie for å undersøke årringsbreddens betydning for materialegenskapene. For å danne et vurderingsgrunnlag har det blitt gjennomført en litteraturstudie som undersøker tidligere relevante studier.

Totalt har det blitt testet 108 små prøvestykker uten defekter. De kvasistatiske testene ble gjennomført med INSTRON testutstyr, mens de dynamiske ble testet med Split-Hopkinson Pressure Bar.

Resultatene fra årringsstudiet viser en klar korrelasjon med flere materialegenskaper. Lavere årringsbredde bidrar til en økt kapasitet for trykk, der en endring i årringsbredden fra 7.5 mm til 1 mm bidro til 42% økning i trykkapasitet. Samme korrelasjon ble observert ved sammenligning av E-modul og årringer. Basert på litteraturstudien kan dette begrunnes med forholdet mellom sommer- og vårved, der økt andel sommerved bidrar til tettere årringsbredde og økt stivhet. Videre ble det observert en lav beregnet E-modul. Dette ble begrunnet i litteraturstudien ved at små prøvestykker bidrar til en lavere E-modul, samtidig bidrar beregninger basert på testing i trykk til en lavere E-modul.

Videre ble prøvestykkene testet i tre ulike tøyningshastigheter. De to kvasistatiske testene ble gjennomført med en tøyningshastighet på 0.065 og 6.54 s<sup>-1</sup>, mens de dynamiske testene hadde en tøyningshastighet på ca. 2720 s<sup>-1</sup>. Resultatet viste en økning i trykkapasiteten på 55% mellom laveste og høyeste tøyningshastighet. Videre ble den karakteristiske verdien for trykkspenning beregnet for de ulike tøyningshastighetene. Resultatet av dette viser den samme trenden, med en 41% økt kapasitet i trykk mellom laveste og høyeste tøyningshastighet.

Studiet om trykkapasitet i ulike tøyningshastigheter og årringsstudiet ble testet med prøvestykker i ulik lengde, grunnet geometriske begrensninger satt av SHPB. På bakgrunn av dette ble det undersøkt om prøvestykkets lengde ville ha innvirkning på ulike materialegenskaper ved å variere denne mellom 15 og 35 mm. Resultatet viser ingen tydelig korrelasjon, og det blir derfor ikke trukket noen konklusjon angående størrelsesfaktor.

### 6.1. Forslag til videre arbeid

Dette har vært en omfattende og spennende studie å jobbe med. For videre arbeid kunne man undersøkt dynamiske egenskaper i strekk, moment eller trykk i ulike vinkler på fiberretningen.

Det ble forsøkt å finne ut om størrelsen på prøvestykket ville ha en innvirkning på materialegenskaper som E-modul og maks målt trykkspenning. Det ble kun testet 16 prøvestykker i ulike lengder, i tillegg til at målingene ble begrenset til en maks målt kraft på 10 kN. Dette bidro til for svakt datagrunnlag til å kunne trekke noen sammenhenger. Litteraturstudien antyder at det vil være forskjellige resultater avhengig av trykk, strekk og moment. Dette er derfor et tema det kan være interessant å undersøke videre.

## Kildehenvisning

- [1]: Bodig, J., & Jayne, B. J. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- [2]: Bucar, D. G., & Merhar, M. (2015). *Impact and Dynamic Bending Strength Determination of Norway Spruce by Impact Pendulum Deceleration*. University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology, Slovenia.
- [3]: Clausen, A. H. (2021, August 24). *Split-Hopkinson bar*. Powerpoint, NTNU, SIMLab, Dept. of Structural Engineering, Trondheim.
- [4]: Gilbertson, C. G., & Bulleit, W. (2013). *Load Duration Effects in Wood at High Strain Rates*. Michigan Technological University, Dept. of Civil and Environmental Engineering. Houghton, United States: American Society of Civil Engineers, Reston. Hentet 2022
- [5]: Jansson, B. (1992). *Impact loading of timber beams*. Lund institute of technology, Department of civil engineering. Faculty of Civil Engineering, University of British Columbia. Hentet Mai 2022
- [6]: Langseth, M., Clausen, A. H., & Børvik, T. (2017). *Impact Mechanics: Impact and Energy Absorption*. Lecture Notes, NTNU, SIMLab/Department of Structural Engineering, Trondheim.
- [7]: Leijten, A. (2001). *Impact crash and simulation of timber beams*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, The Netherlands.
- [8]: Leijten, A. (2004). *Heat treated wood and the influence on the impact bending strength*. Delft University of Technology, Technology, Policy and Management, Delft, The Netherlands. Hentet 23. Mai 2022
- [9]: Liska, J. A. (1955). *Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood*. University of Wisconsin, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin: Forest Service.
- [10]: Madsen, B., & Mindess, S. (1986). *The fracture of wood under impact loading, Material and structures. Vol.19*. University of British Columbia, Department of Civil Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada. .
- [11]: Malo, K. A. (2004). *Impact Behaviour of Roadside Round Wooden Posts*. Norwegian Univ. of Science and Tech. NTNU , Structural engineering, Trondheim.
- [12]: Niemz, P., & Mannes, D. (2012). *Non-destructive testing of wood and wood-based materials*. Journal of Cultural Heritage, ETH Zurich, Institute for Building Materials (Wood Physics), Switzerland. Hentet Mai 2022
- [13]: Norge, Standard. (2016). *NS-EN 14358:2016 Beregning og verifisering av karakteristiske verdier*. Standard, Norge. Standard Norge.
- [14]: Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet - NTNU. (2022, April 15). *SFI CASA Lab Equipment*. Hentet fra <https://www.ntnu.edu/casa/labs>
- [15]: Philip M. Davis, R. G. (2012). *Revisiting the neutral axis in wood beams*. Oregon State University,, Department of Wood Science and Engineering, Corvallis, Oregon , USA. Hentet Mai 2022
- [16]: Skaug, E. (2007). *Trevirkets oppbygging og egenskaper*. Trefokus, Norsk Treteknisk Institutt. Norge: Trefokus. Hentet Mars 2022 fra Trefokus: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygging-og-egenskaper.pdf>

- [17]: Standard Norge. (2010). *NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010*. Standard Norge. Standard Norge.
- [18]: Standard, Norge. (2016). *NS-EN 338: 2016 Konstruksjonstrevirke-Fasthetsklasser*. Norsk Standard. Norge: Standard Norge.
- [19]: Trefokus AS. (2022, April 20). *Limtre*. Hentet 2022 fra Trefokus: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/materialer/limtre>
- [20]: Yuan, F., Prakash, V., & Tullis, T. (2022, 15 April). *Researchgate*. Hentet fra [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-Split-Hopkinson-Pressure-Bar-used-in-conducting-the-recovery-experiments\\_fig1\\_251431052](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-Split-Hopkinson-Pressure-Bar-used-in-conducting-the-recovery-experiments_fig1_251431052)

