

NTNU

Avdeling for teknologi, økonomi og ledelse
Ingeniørfag – bygg, konstruksjonsteknikk

Bacheloroppgave

Friksjon tre mot tre

En eksperimentell studie av hvordan friksjon mellom lameller i tverrspente brudekker påvirker størrelsen på nødvendig spennkraft.

Forfattere: Audun Bekk, Lasse Hangaard og Henning Ravnås

Dato: 16.05.2016

Forord

Dette studiet er gjennomført som avsluttende del av vår bachelorgrad ved NTNU i Gjøvik, ingeniørfag bygg, konstruksjonsteknikk.

I de siste årene har det vært økt fokus på bruk av tre som byggemateriale i bruer og det trengs derfor mer kunnskap på området. På bakgrunn av dette finner oppgaveforfatterne denne studien både interessant og samfunnsnyttig.

Vi vil gjerne få rette en takk til oppdragsgiver Statens vegvesen, Vegdirektoratet ved Tormod Dyken, som har gitt gode innspill og vært til hjelp ved fagrelaterte utfordringer knyttet til oppgaven. Videre vil vi takke Norsk Treteknisk Institutt for at vi fikk benytte deres laboratorium, samt Preben Aanensen (NTI), som har bistått med planlegging og gjennomføring av forsøkene. Moelven Limtre AS takkes også for deres bidrag i form av nødvendige materialer slik at forsøkene kunne gjennomføres. Til slutt rettes en takk til vår veileder ved NTNU i Gjøvik, Marthin Landgraff, for gode råd gjennom dette studiet.

Det bekreftes herved at alle gruppe-medlemmene har vært likestilte underveis i arbeidet med denne oppgaven, og bidratt likeverdig i forhold til planlegging, gjennomføring, analyse og tolkning av resultater.

Gjøvik, 16. mai 2016


Audun Bekk


Lasse Hangaard


Henning Ravnås

Sammendrag

| | | |
|--|--|--------------------------------|
| Tittel: | Friksjon tre mot tre | Dato: 16.05.2016 |
| | <i>En eksperimentell studie av hvordan friksjon mellom lameller i tverrspente brudekker påvirker størrelsen på nødvendig spennkraft.</i> | |
| Deltakere: | Audun Bekk Lasse Hangaard Henning Ravnås | |
| Veileder: | Marthin Landgraff | |
| Oppdragsgiver: | Statens vegvesen, Vegdirektoratet | |
| Stikkord: | Friksjon, oppspenningskraft, tverrspente brudekker, forsøk | |
| Antall sider: 38 | Antall sider vedlegg: 5 | Publiseringsavtale inngått: Ja |
| <p>Denne studien har som hensikt å undersøke friksjonskoeffisienten for limtre ved varierende kraftvinkel. I rapporten evalueres også gjeldende formelverk for nødvendig spennkraft i tverrspente brudekker.</p> <p>Et tverrspent brudekke i limtre er sammensatt av lameller spent sammen på tvers med gjennomgående stenger av høyfast stål. For at brudekket skal opprettholde sin funksjon og styrke, er det viktig at det fungerer som en massiv plate. Når brudekket utsettes for laster i flere retninger, vil resultantkraften danne en vinkel i forhold til brudekket. På grunn av dette vil lamellene prøve å gli på skrå i forhold til hverandre. Spennkraften skaper friksjon mellom lamellene slik at glidning forhindres. For å beregne nødvendig spennkraft i et brudekke er friksjonen mellom lamellene en viktig parameter. Friksjonskoeffisienten for limtre på langs med, og på tvers av fiberretningen er godt dokumentert ved tidligere forsøk, men mellomliggende verdier er ikke undersøkt.</p> <p>På vegne av oppdragsgiver Statens vegvesen, Vegdirektoratet, har forfatterne evaluert gjeldende formelverk for nødvendig spennkraft i et tverrspent brudekke. Formelverket baserer seg på en lineær sammenheng for friksjonskoeffisienter mellom 0 og 90 grader. For å undersøke om dette stemmer, har forfatterne gjennomført friksjonsforsøk i laboratorium.</p> <p>På bakgrunn av resultatene fra våre forsøk, konkluderes det med at gjeldende formelverk ikke er tilfredsstillende. Friksjonskoeffisienten for limtre opptrer ikke lineært mellom kraftvinkel 0 og 90 grader.</p> | | |

Abstract

| | | |
|--|---|--------------------|
| Title: | Friction timber against timber | Date: 16.05.2016 |
| | <i>An experimental study of how friction between laminations in stress-laminated bridge decks affects the size of the required prestress.</i> | |
| Participants: | Audun Bekk Lasse Hangaard Henning Ravnås | |
| Supervisor: | Marthin Landgraff | |
| Employer: | Norwegian Public Roads Administration, Directorate of Public Roads | |
| Keywords: | Friction, prestress, stress-laminated bridge decks, experiments | |
| Number of pages: 38 | Number of pages appendices: 5 | Availability: Open |
| <p>The intention of this study is to examine the coefficient of friction of glue-laminated timber (glulam) when the force angle varies. In addition to this, the current formula defining required prestress in stress-laminated bridge decks will be evaluated.</p> <p>A stress-laminated bridge deck of glulam consists of laminations stressed in tension transversely with high-strength steel rods. To maintain the bridge deck's strength and function, it is important that all laminations work as a massive plate. When the bridge deck is exposed to heavy loads in several directions, the resultant will create an angle relative to the bridge deck. Because of this, the laminations will try to slide oblique in relation to each other. The prestress creates friction between the laminations, which prevents them from sliding. To calculate the required prestress in a bridge deck, friction between laminations is an important parameter. The coefficient of friction for glulam in the grain and across the grain direction is well known, but values in between have not been examined yet.</p> <p>On behalf of the Norwegian Public Roads Administration, Directorate of Public Roads, the authors have evaluated the current formula for required prestress in stress laminated bridge decks. The formula is based on a linear relation of friction coefficients between 0 and 90 degrees. To examine whether this is true or not, the authors have conducted friction experiments in a laboratory.</p> <p>Based on the results of our experiments, we have concluded that the current formula is not entirely correct. The coefficient of friction for glulam does not act linearly between force angle 0 and 90 degrees.</p> | | |

Innhold

| | |
|---|-----------|
| Forord..... | i |
| Sammendrag | ii |
| Abstract | iii |
| Figurliste | vi |
| Tabelliste | vii |
| 1 Innledning..... | 1 |
| 1.1 Bakgrunn..... | 1 |
| 1.2 Problemstilling..... | 1 |
| 1.3 Presisering av oppgaven | 2 |
| 1.4 Andre studier | 2 |
| 1.5 Disposisjon..... | 3 |
| 2 Teori..... | 4 |
| 2.1 Tverrspent brudekke | 4 |
| 2.1.1 Tre som konstruksjonsmateriale i bru | 6 |
| 2.1.2 Laster og dimensjonering | 6 |
| 2.2 Friksjon..... | 7 |
| 2.2.1 Friksjon i tverrspente brudekker | 7 |
| 2.2.2 Friksjon ved kombinert plateskjær og skiveskjær | 8 |
| 3 Metode..... | 9 |
| 3.1 Valg av variabler | 9 |
| 3.2 Laboratorieforsøk | 10 |
| 3.2.1 Laboratoriet..... | 11 |
| 3.2.2 Prøvestykkene | 11 |
| 3.2.3 Forsøksmetode..... | 12 |
| 3.2.4 Fuktighetsmåling | 14 |
| 3.3 Etterbehandling | 15 |
| 3.3.1 Friksjonsberegning | 15 |
| 3.3.2 Statistiske beregninger..... | 16 |
| 3.4 Mulige feilkilder | 18 |
| 4 Resultater og analyse | 19 |
| 4.1 0 grader..... | 20 |
| 4.2 30 grader..... | 21 |
| 4.3 45 grader..... | 22 |
| 4.4 60 grader..... | 23 |
| 4.5 90 grader..... | 24 |
| 4.6 Oppsummering av resultater..... | 25 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 5 | Diskusjon | 26 |
| 5.1 | Diskusjon av metode og utførelse | 26 |
| 5.2 | Diskusjon av resultater med konklusjon | 27 |
| 5.2.1 | Konklusjon | 28 |
| 5.3 | Forslag til videre arbeid | 28 |
| 6 | Referanser | 29 |
| Vedlegg A - Data fra friksjonsforsøk | | |
| | Friksjonsforsøk kraftvinkel 0 grader | I |
| | Friksjonsforsøk kraftvinkel 30 grader | II |
| | Friksjonsforsøk kraftvinkel 45 grader | III |
| | Friksjonsforsøk kraftvinkel 60 grader | IV |
| | Friksjonsforsøk kraftvinkel 90 grader | V |

Figurliste

| | |
|---|----|
| Figur 2.1 - Plan (øverst) og oppriss (nederst) av tverrspent brudekke | 4 |
| Figur 2.2 - Illustrasjon av tverrspent brudekke, gjengitt med tillatelse fra Martinsons | 4 |
| Figur 2.3 - Prinsipptegning, friksjon | 7 |
| Figur 3.1 - Variabler som påvirker friksjonskoeffisienten til limtre | 9 |
| Figur 3.2 - Våre valg av variabler | 9 |
| Figur 3.3 - Illustrasjon av antatt lineær sammenheng | 10 |
| Figur 3.4 - Hovedtrinnene i laboratorieforskene | 10 |
| Figur 3.5 - Forsøksoppsett | 11 |
| Figur 3.6 - Prøvestykke | 11 |
| Figur 3.7 - Plantegning og oppriss av prøvestykke, $\alpha = 45^\circ$ | 12 |
| Figur 3.8 - Plantegning av prøvestykker, $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ og 90° | 12 |
| Figur 3.9 - Oppriss av forsøksoppsett | 13 |
| Figur 3.10 - Forsøksoppsett, snitt A-A | 13 |
| Figur 3.11 - Fuktighetsinnhold for alle forsøk | 14 |
| Figur 3.12 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 30 grader, test nr. 6 | 15 |
| Figur 3.13 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 30 grader, test nr. 9 | 16 |
| Figur 4.1 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 0 grader, alle tester | 20 |
| Figur 4.2 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 30 grader, alle tester | 21 |
| Figur 4.3 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 45 grader, alle tester | 22 |
| Figur 4.4 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 60 grader, alle tester | 23 |
| Figur 4.5 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 90 grader, alle tester | 24 |
| Figur 4.6 - Friksjonskoeffisienter for alle forsøk med regresjonslinje | 25 |
| Figur 4.7 - Tilnærmet linje for målte friksjonskoeffisienter | 25 |

Tabelliste

| | |
|--|----|
| Tabell 4.1 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 0 grader | 20 |
| Tabell 4.2 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 30 grader | 21 |
| Tabell 4.3 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 45 grader | 22 |
| Tabell 4.4 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 60 grader | 23 |
| Tabell 4.5 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 90 grader | 24 |

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I Nasjonal Transportplan 2014 – 2023 (Samferdselsdepartementet 2013) er det planlagt å oppgradere og bygge til sammen 4544 kilometer høyhastighetsveger i Norge. De nye vegene skal bygges med høyere kvalitet enn det som tidligere har vært standardisert. Vegene skal ha høyere fartsgrenser, noe som stiller strengere krav til kvaliteten på konstruksjonene som er tilknyttet. I forbindelse med disse nye, bedre vegene er det behov for en rekke nye bruere, som også tilfredsstillende samme standard.

I Nasjonal Transportplan trekkes det også frem at klimagassutslippene knyttet til bygging, drift og vedlikehold av infrastruktur skal ned. Utslippene knyttet til bygging skal kuttes med 50 % innen år 2030 (Samferdselsdepartementet 2013). Som et av tiltakene for å nå dette målet foreslås det å velge mer klimavennlige materialer i konstruksjonene. I klimaregnskap kommer tre som byggemateriale ofte bedre ut enn materialer som stål og betong. Tre vil derfor være et naturlig valg med hensyn på miljøbelastning, og vi kan se for oss at tre i fremtiden vil være et foretrukket materialvalg der det er mulig.

I moderne trebrubygging er bruene ofte konstruert med et tverrspent brudekke. Brudekket er bygget opp av lameller og spent sammen på tvers med gjennomgående spennstenger. Friksjonskraften mellom lamellene, i kombinasjon med spennkraften, skal forhindre glidning i brudekket.

I Statens vegvesens Håndbok N400 - Bruprosjektering (2015a), er det beskrevet hvordan glidningen mellom lamellene i et tverrspent brudekke skal behandles. Vertikale og horisontale laster virker på brudekket samtidig, og danner en kraftresultant med varierende vinkel. Det brukes et formelverk for beregning av nødvendig spennkraft basert på en hypotese om at friksjonskoeffisienten opptrer lineært når kraftvinkelen på brudekket varierer. Etter samtaler med blant annet Tormod Dyken, som er en av de ansvarlige for utarbeidelse og ajourføring av håndbøkene, fremkommer det at Statens vegvesen er usikre på hvor godt denne hypotesen stemmer med virkeligheten. Statens vegvesen etterspør derfor mer kunnskap på området, noe denne rapporten rettes mot.

1.2 Problemstilling

Hensikten med rapporten er å undersøke hvordan varierende kraftvinkel påvirker friksjonskoeffisienten til limtre, og på bakgrunn av dette evaluere gjeldende formelverk for dimensjonering av nødvendig spennkraft i tverrspente brudekker.

1.3 Presisering av oppgaven

Dimensjonering av trebruer er et omfattende arbeid. Vi har ikke sett på dimensjonering av buer eller dekker i sin helhet, men begrenser oss til glidning mellom lameller, og formelverk knyttet til dette.

Et tverrspent brudekke kan bygges opp av lameller av limtre eller konstruksjonsvirke. Konstruksjonsvirke er ikke undersøkt i denne rapporten, og kan ha andre resultater enn limtre.

Denne rapporten omhandler ikke andre elementer i en trebru enn tverrspent brudekke. Bæresystemet kan eksempelvis bygges opp av fagverk, buer, bjelker eller hengeverk. Elementer av stål og betong blir benyttet der det er hensiktsmessig, som for eksempel betongfundamenter i grunnen, og stål som tverrbærere og i forbindelser.

Miljøaspektet ved denne rapporten begrenser seg til fordeler med tre som konstruksjonsmateriale, og er ikke betraktet noe nærmere. Forsøkene og resultatene er ikke vurdert i et miljøperspektiv. Økonomi er ikke noe denne rapporten tar hensyn til, da dette ikke er relevant for problemstillingen.

1.4 Andre studier

Stress-laminated Timber Bridge Decks

Tim Kalbitzer (1999) utarbeidet rapporten Stress-laminated Timber Bridge Decks ved Technische Universität München. Rapporten omhandler ulike variablers innflytelse på friksjon mellom lameller i tverrspenne brudekker. Her ble tresort, behandling av overflate, treets fuktighet, varierende spennkraft og kraftretning parallelt og på tvers av fiberretning undersøkt. Kalbitzer fant ut at trevirkets fuktighet er den variabelen som alene i størst grad har innflytelse på den statiske friksjonskoeffisienten. Videre fant han at ved lav fuktighet (10 – 14 %) påvirker ruheten og kraftvinkelen friksjonskoeffisienten i stor grad, derimot er det spennkraften som har størst påvirkning ved høy fuktighet (over 18 %).

Nordisk trebru-prosjekt

Nordisk trebru-prosjekt var et samarbeid mellom fagmiljøer i de nordiske landene. Målet med prosjektet var å øke kompetansen rundt bruk av tre i buer, da dette var et ønske fra både myndighetene og treindustrien. Statens vegvesen, Jernbaneverket, Mocon AS og Vestlandske Limtreindustri AS var involvert i prosjektet for Norge, og tilsvarende etater og bedrifter deltok på vegne av de andre landene. Resultatet av dette prosjektet er en serie rapporter, hvor de tok for seg blant annet dimensjonering av de forskjellige konstruksjonsdelene, mekaniske forbindelser og klimatiske påkjenninger. Tverrspenne brudekker (Pousette mfl. 2002) er en stor del av rapportserien, med informasjon om nødvendig spennkraft, dimensjonering av laster og fuktisolering.

Felles for begge de overnevnte studiene er at de konkluderer med at retningen på belastningen i forhold til fiberretningen har mye å si for friksjonskoeffisienten. De sier imidlertid ikke noe om hvordan friksjonen opptrer når belastningen ligger *mellom* 0 og 90 grader. Begge rapportene er aktuelle for vår studie, og er med på å danne det faglige grunnlaget til denne rapporten.

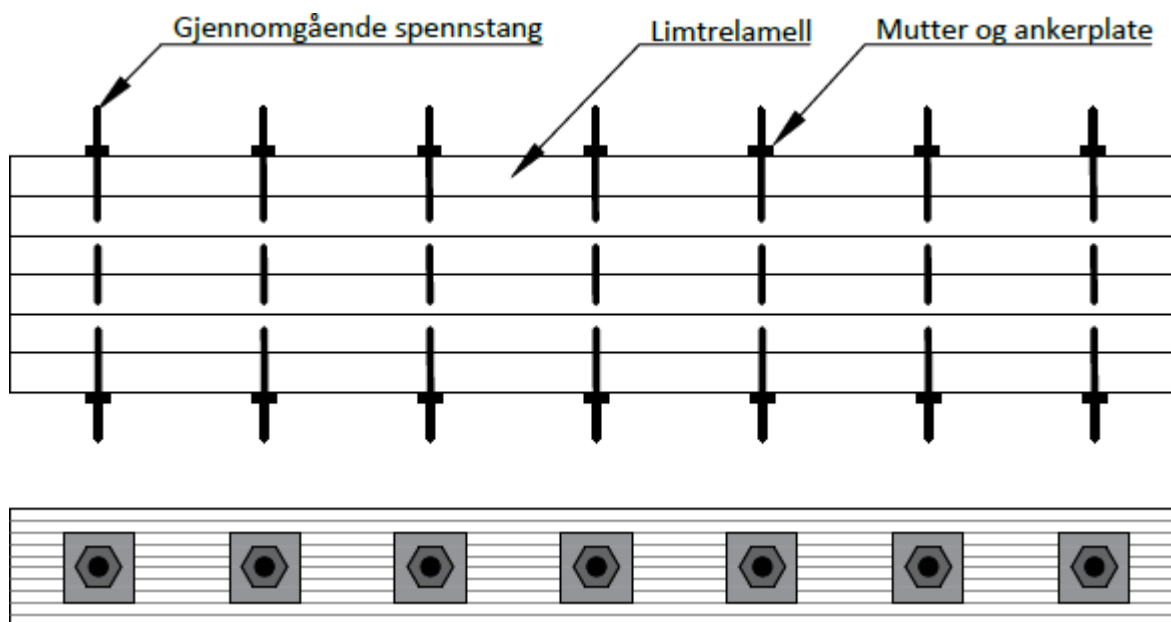
1.5 Disposisjon

- Kapittel 2 Presentasjon av nødvendig forhåndskunnskaper og teori knyttet til problemstillingen. Teori rundt tverrspente brudekker og friksjonens innvirkning på nødvendig spennkraft forklares.
- Kapittel 3 Beskrivelse av fremgangsmåten for å løse problemstillingen. Her begrunnes valg av variabler, presentasjon av forsøksoppsett og undersøkelser gjort i laboratorium, samt beregningsformler for evaluering av resultater.
- Kapittel 4 Her presenteres resultatene systematisk fra hver forsøksserie med grafiske fremstillinger, og et sammendrag som analyserer resultatene i forhold til problemstillingen.
- Kapittel 5 Diskusjon av metodevalg, fremgangsmåte og resultater fra forsøk. Diskusjonen avsluttes med en konklusjon. Til slutt presenteres forslag til videre arbeid.

2 Teori

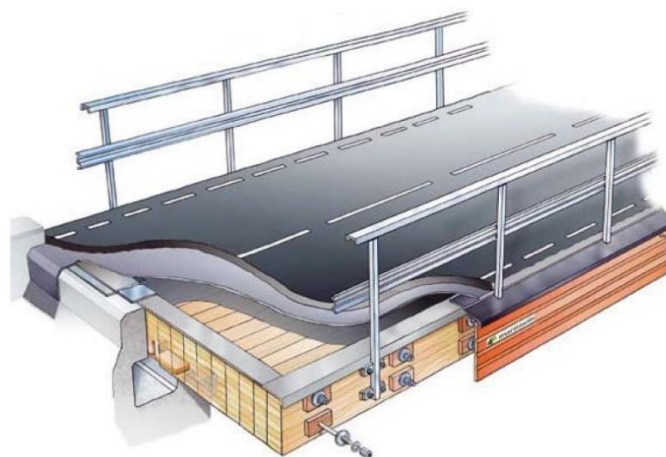
2.1 Tverrspent brudekke

Et tverrspent brudekke består av lameller i limtre eller konstruksjonsvirke som går i brubanens lengderetning, som spennes sammen på tvers med gjennomgående stenger av høyfast stål, som illustrert i figur 2.1. Dette skaper et massivt dekke som tar opp krefter i både horisontal og vertikal retning.



Figur 2.1 - Plan (øverst) og oppriss (nederst) av tverrspent brudekke

Figur 2.2 (Martinsons 2012) viser et eksempel på hvordan et tverrspent brudekke kan bygges opp. Brudekket legges ofte direkte på tverrbærere av stål. Limtre lameller spennes sammen med én eller to spennstenger i høyden, og med en senteravstand slik at kravet til spennkraft per løpemeter tilfredstilles. Trykket fra spennstengene fordeles ved hjelp av ankerplater. På oversiden av brudekket legges et slitelag av plank, før membranen legges ut. Slitelaget skal beskytte limtre lamellene mot påkjenninger fra trafikken, og membranen beskytter mot fukt.



Figur 2.2 - Illustrasjon av tverrspent brudekke, gjengitt med tillatelse fra Martinsons

Tverrspente brudekker blir ofte benyttet i moderne trebruer i Norge på bakgrunn av noen klare fordeler:

Avstivende element

Et tverrspent brudekke fungerer som en avstivende skive, og konstruksjonen trenger ofte ingen annen form for global avstivning sideveis (Carlberg og Toyib 2012). Den avstivende effekten oppnås når limtrelamellene er spent sammen slik at bevegelse mellom lamellene er forhindret. Oppspenningen kan svekkes med tiden, derfor er det viktig at spennkraften er stor nok gjennom hele konstruksjonens levetid.

Lav vekt

Totalvekten til et tverrspent dekke av limtre er betydelig mindre enn et dekke av betong, da egenvekten til limtre (GL30c) er 430 kg/m^3 , mot betongs egenvekt på 2500 kg/m^3 . Ved dårlige grunnforhold vil vekten av brua ha stor betydning for fundamenteringen. Stål har en egenvekt på 7850 kg/m^3 men forholdet mellom egenvekt og fasthet i forhold til tre er relativt likt. Likevel vil limtrekonstruksjoner ofte ha en lavere vekt enn stålkonstruksjoner, fordi slanke stålkonstruksjoner er mer utsatt for knekking og nedbøyning. Dette begrenser den utnyttbare kapasiteten til stål. Med tanke på grunnforhold kan det være fordelaktig å velge tre, men samtidig er ikke lav vekt alltid en fordel, da stabilitet og krefter sideveis kan kreve en tyngre konstruksjon.

Liten temperaturutvidelse

Trebruer har rundt halvparten av temperaturutvidelsen til stål og betong. Dette kan forenkle oppleggsbetingelsene i hver ende, spesielt i bruer med lange spenn vil dette være fordelaktig.

Miljøhensyn

I klimaregnskap kommer trebruer godt ut. Johanne Hammervold (2012) utførte i forbindelse med sitt doktorgradsarbeid to analyser om bruers miljøpåvirkning. Én detaljert livssyklusanalyse av to alternativer for Nybergsund bru, og én forenklet analyse av 24 bruer av forskjellig type og materiale. Den detaljerte analysen undersøker forskjellen på stål og tre som byggemateriale og omfatter seks forskjellige miljøindikatorer. Tre kom best ut i alle de seks kategoriene, som blant annet ser på nedbryting av ozonlaget, global oppvarming og luftforurensning. Den forenklete analyse ser kun på utslipp av drivhusgasser, og konkluderer med at tre er et godt miljømessig valg i forhold til stål og betong.

Estetiske hensyn

Avhengig av geografisk plassering og bruas omgivelser, kan det hevdes at trebruer ofte får oppmerksomhet i positiv forstand når det kommer til estetikk.

2.1.1 Tre som konstruksjonsmateriale i bru

I Norge tillates kun bruk av nordisk furu som konstruksjonsmateriale i trebruer. Dette kommer av at furu lett lar seg impregnere, samt at fasthetsegenskapene anses som godt dokumentert og utprøvd i bruer. Limtre og konstruksjonsvirke har forholdsvis like fasthetsegenskaper. En av fordelene med limtre er at spredningen og variasjonen i materialegenskapene er mindre enn for konstruksjonsvirke. Styrken bestemmes for konstruksjonsvirke ved en svakhet i en komponent. Slike svakheter i limtre opptrer sjeldent på samme sted, og man oppnår en jevnere styrke.

Trefuktighet er den viktigste parameteren for trevirkets bestandighet, da fuktighet er en forutsetning for utvikling av råte. Skal kravet om 100 års brukstid på bruer tilfredsstilles, er det viktig at trevirket beskyttes mot fukt for å unngå nedbryting. Dette kan gjøres ved å benytte kjemisk beskyttelse, konstruktiv beskyttelse, eller en kombinasjon av disse. Som kjemisk beskyttelse benyttes i stor grad impregnering som Cu- eller kreosotimpregnering. Konstruktiv beskyttelse kan være beslag eller kledning, samtidig som et tett brudekke kan være konstruktiv beskyttelse mot underliggende konstruksjonsdeler. Statens vegvesens måleprogram for fuktighet i trebruer (Evans 2010) har vist at trevirket i forholdsvis massive trekonstruksjoner, som er beskyttet mot direkte påvirkning av vann, tørker ned til en trefuktighet på 10 - 15 % uavhengig av stedets klima.

2.1.2 Laster og dimensjonering

Grunnlaget for dimensjonering av trebruer er gitt i Statens vegvesens Håndbok N400 - Bruprosjektering (Statens vegvesen 2015a). I tillegg benyttes Eurokode 5-1 (Norsk Standard 2004a) og Eurokode 5-2 (Norsk Standard 2004b) for brudimensjonering, og Eurokode 1-2 (Norsk Standard 2003) til bestemmelse av trafikklaster.

Et brudekke blir utsatt for krefter i vertikal retning fra kjøretøy og egenlast, og i horisontal retning fra vindlast, bremselast, påkjørsel og støttekrefter fra utknekking av tilhørende konstruksjonsdeler. Ved dimensjonering for de horisontale kreftene virker et tverrspent dekke som en horisontal skive, der kreftene må føres til opplegg ved hjelp av tverrspenningen. Den avstivende effekten oppnås når dekket er helt stivt i alle retninger. For at brudekket skal opprettholde sin funksjon som avstivende skive gjennom hele konstruksjonens levetid, er det viktig at spennkraften er stor nok til å unngå bevegelse mellom lamellene. Det er friksjonen mellom lamellene, sammen med spennkraften som forhindrer bevegelse.

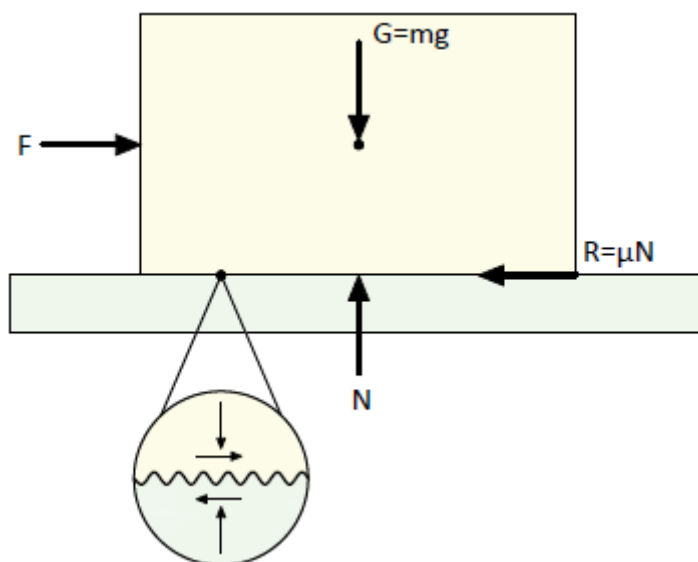
Trebruer regnes stort sett i pålitelighetsklasse 3, og beskriver hvilken risiko som ligger til grunn for dimensjoneringen, altså konsekvensen for en eventuell kollaps. Klimaklassen beskriver hvilke klimatiske påkjenninger konstruksjonen vil få på byggestedet, noe som er en avgjørende faktor for hvilken sikkerhet man legger til grunn. I Norge benyttes klimaklasse 2, da bruene alltid er behandlet med fuktisolering.

2.2 Friksjon

Friksjon oppstår hvis to legemer glir eller forsøker å gli langs hverandre som vist i figur 2.3. Kontaktkreftene som oppstår mellom legemene prøver å bremse bevegelsen, og det er dette vi kaller friksjon. Det vi vet om friksjon i dag er i stor grad basert på forsøk, der formler er empiriske (Bell 2014). Forsøk viser at friksjonskraften R er tilnærmet direkte proporsjonal med normalkraften N mellom legemene multiplisert med en materialavhengig koeffisient μ , jamfør formel 2.1.

$$R = \mu N \quad (2.1)$$

Det er legemenes overflateruhet som i stor grad bestemmer friksjonskoeffisienten μ . Verdier for friksjonskoeffisienter varierer fra materiale til materiale, og må bestemmes ved hjelp av laboratorieforsøk. Verdiene oppgis ofte med et variasjonsområde, og koeffisienten bør velges til sikker side ut fra om friksjonen utnyttes for å oppnå en bestemt virkning eller om den er uønsket.



Figur 2.3 - Prinsipptegning, friksjon

Det finnes to typer friksjon: Statisk friksjon, R_s (hvilefriksjon) og kinetisk friksjon, R_k (glidefriksjon). Friksjonskraften øker proporsjonalt med den påførte kraften F inntil maksimalverdien for den statiske friksjonskraften R_s nås. Hvis kraften F økes ytterligere vil legemet begynne å gli, og den kinetiske friksjonen bremser bevegelsen. Den kinetiske friksjonskoeffisienten μ_k er ofte noe lavere enn den statiske friksjonskoeffisienten μ_s .

2.2.1 Friksjon i tverrspente brudekker

Ved hjelp av spennstenger på tvers av limtrelamellene i et tverrspent brudekke, skapes en friksjonskraft som forhindrer at lamellene kan gli i forhold til hverandre. Friksjon er nødvendig for å overføre skjærkrefter på tvers av lamellretningen (Statens vegvesen 2015b). Kraften p som må til for å spenne opp stålstengene mellom limtrelamellene, og forhindre

bevegelse, bestemmes derfor av den aktuelle skjærkraften V og friksjonskoeffisienten μ , etter formel 2.2.

$$p > \frac{V}{\mu} \quad (2.2)$$

Det er vanlig å oppgi skjærkraften V som kraft per lengdeenhet [kN/m]. Den nødvendige spennkraften p vil derfor også bli uttrykt som kraft per lengdeenhet, som videre bestemmer senteravstand og dimensjon på spennstengene. Spennstengene forankres ved hjelp av ankerplater som overfører krefter til de ytterste lamellene ved trykk på tvers av fiberretningen.

Det er betydelige avvik mellom friksjonskoeffisienter for limtre og konstruksjonsvirke angitt i Eurokode 5-2 og retningslinjer fra USA. I det nordiske trebruprojektet (Pousette mfl. 2002) ble dette undersøkt nærmere, og man fant betydelig høyere friksjonsverdier enn angitt i eurokoden. Statens vegvesen har på bakgrunn av disse forsøksresultatene tillatt bruk av høyere friksjonsverdier i sin håndbok for bruprojektering, N400.

Det er flere parameter som påvirker friksjonskoeffisienten til tre, og det er viktig at den dimensjonerende verdien som angis i håndbøker er konservativ. For et tverrspent brudekke vil en konservativ friksjonskoeffisient være en lav verdi, siden friksjonen utnyttes for å unngå glidning mellom lamellene.

2.2.2 Friksjon ved kombinert plateskjær og skiveskjær

Trematerialets mekaniske egenskaper er forskjellige i fiberretningen og på tvers av fiberretningen. Siden disse retningene står vinkelrett på hverandre, brukes betegnelsen ortotrop (ortogonal anisotrop).

Det må forutsettes at de horisontale og vertikale kreftene opptrer samtidig, slik at brudekket blir utsatt for en kombinasjon av skiveskjær og plateskjær. Det må derfor kontrolleres for kombinert friksjon i de to retningene, noe Eurokode 5-2 ikke sier noe om. Det er i dag vanlig å kontrollere den horisontale friksjonskapasiteten ($p \cdot \mu_{0,d}$) mot den opptredende horisontale skjærkraften, og den vertikale friksjonskapasiteten ($p \cdot \mu_{90,d}$) mot den opptredende vertikale skjærkraften. Dette gjøres ved å finne en spennkraft slik at formel 2.3 tilfredsstilles.

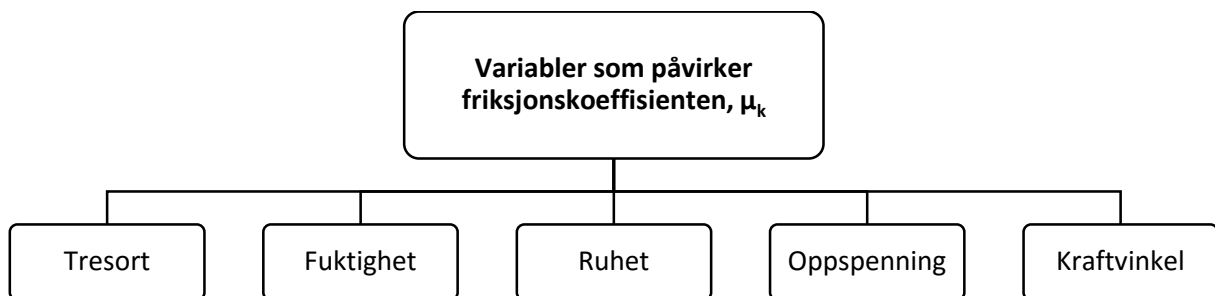
$$\sqrt{\left(\frac{V_V}{p \cdot \mu_{90,d}}\right)^2 + \left(\frac{V_H}{p \cdot \mu_{0,d}}\right)^2} \leq 1 \quad (2.3)$$

Formel 2.3 baserer seg på en hypotese om at friksjonskoeffisienten er lineær mellom kraftvinkel 0 og 90 grader. Formelen er tatt inn i Statens vegvesens prosjekteringsregler, Håndbok N400, men er ikke undersøkt med forsøk. Ved å undersøke friksjonskoeffisienten for varierende kraftvinkel skal vi evaluere denne formelen.

3 Metode

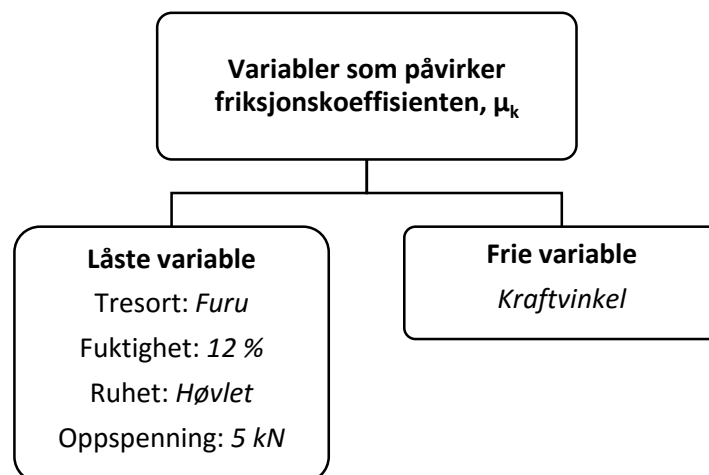
3.1 Valg av variabler

Vi har sett på hva slags variabler som påvirker friksjonskoeffisienten til limtre, og vet fra tidligere studier at det er minst fem variabler som i ulik grad påvirker den statiske friksjonskoeffisienten til limtre, vist i figur 3.1. I hvilken grad de fire første nevnte variablene påvirker friksjonskoeffisienten anses som bra utprøvd og godt dokumentert. Derimot er kraftvinkelens innflytelse på friksjonskoeffisienten kun undersøkt langs og på tvers av fiberretningen.



Figur 3.1 - Variabler som påvirker friksjonskoeffisienten til limtre

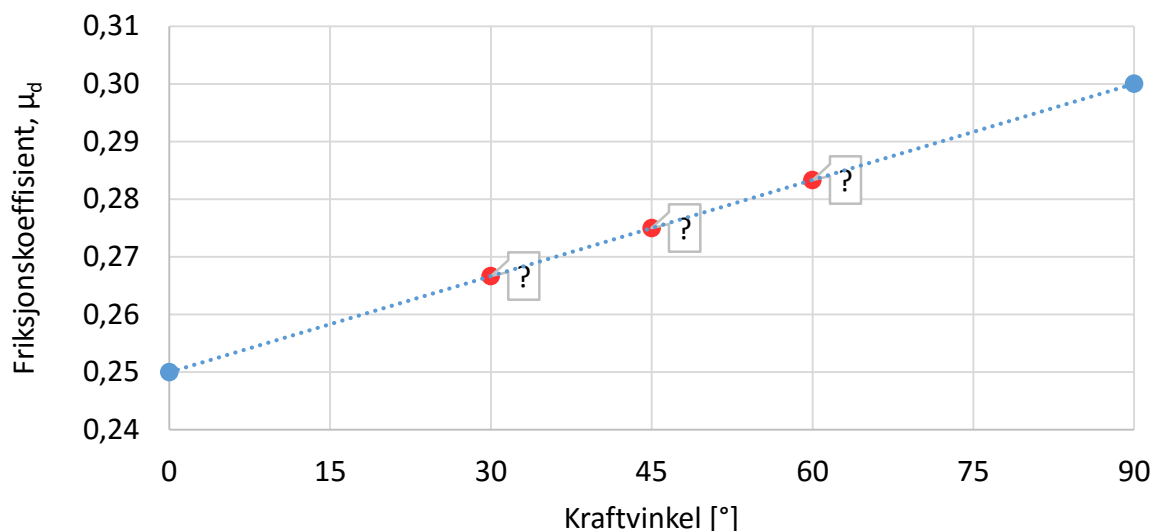
Figur 3.2 viser at vi har valgt å kun variere kraftvinkelen i forsøkene. De andre variablene holdes konstant for å i størst mulig grad unngå påvirkning fra disse. Til prøvestykkene har vi valgt impregnert furu, som leveres med en fuktighet på 12 %. Ruhet er noe vi ikke har et målbart tall på, men alle prøvestykkene er fra samme bjelke og har vært gjennom lik tilvirkningsprosess, slik at vi kan si at de har tilnærmet lik overflate. 5 kN er valgt som oppspenningkraft, da dette gir en passende trykkspenning i forhold til prøvestykkenes størrelse.



Figur 3.2 - Våre valg av variabler

3.2 Laboratorieforsøk

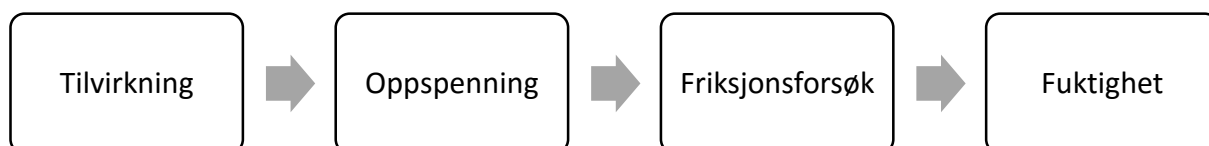
For å kontrollere Statens vegvesens hypotese om at spennkraften kan bestemmes ved formel 2.3, har vi i februar 2016 utført friksjonsforsøk i laboratorium. Vi ønsker på denne måten å fremskaffe karakteristiske verdier for friksjonskoeffisienten ved varierende kraftvinkel. Vi har valgt å utføre forsøk for vinklene 30, 45 og 60 grader. Vi undersøker om den lineære sammenhengen som formel 2.3 forutsetter, stemmer overens med faktiske friksjonskoeffisienter. Figur 3.3 fremstiller den antatte lineære sammenhengen.



Figur 3.3 - Illustrasjon av antatt lineær sammenheng

Vi har bestemt at vi skal utføre ti tester for hver av de tre forskjellige vinklene 30, 45 og 60 grader. I tillegg skal vi utføre sju tester for vinklene 0 og 90 grader for å sammenlikne resultatene med tidligere utførte forsøk for disse vinklene. Dette antallet er valgt på bakgrunn av antatt spredning i resultater, samt materialusikkerheten som ligger til grunn. I tillegg må akseptkriteriet i NS-EN 14358 (Norsk Standard 2006) være oppfylt. Dette kriteriet tar hensyn til spredning i resultater i forhold til antall utførte tester.

Hovedtrinnene i forsøket er beskrevet i figur 3.4. Først ble prøvestykkene tilvirket i snekkerverkstedet ved Norsk Treteknisk Institutt. Videre ble tre prøvestykker spent sammen, merket og registrert. Selve friksjonsforsøket ble utført og tilslutt ble densitet og fuktighet målt.



Figur 3.4 - Hovedtrinnene i laboratorieforsøkene

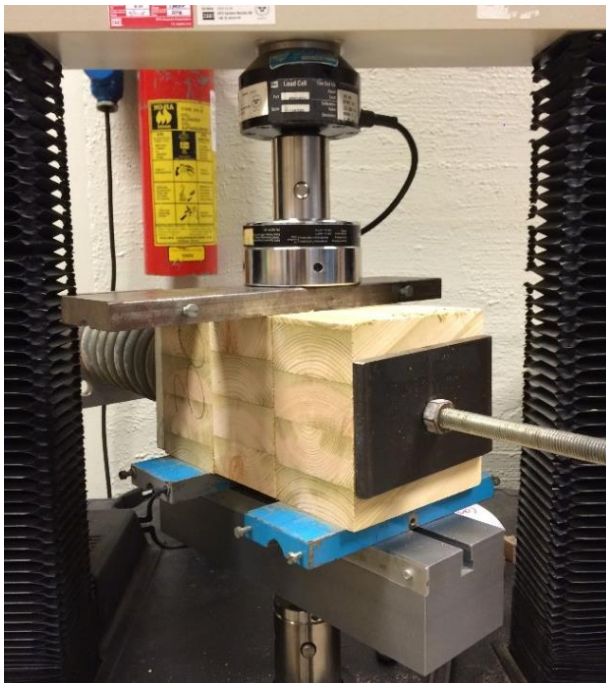
3.2.1 Laboratoriet

Laboratoriet der forsøkene ble utført tilhører Norsk Treteknisk Institutt. Dette er et mekanisk prøvingslaboratorium som er godkjent av Norsk Akkreditering for mekanisk prøving etter NS-EN ISO/IEC 17065.

Laboratoriet har konstant klima på 20 °C og 65 % relativ fuktighet. Dette samsvarer med internasjonale normer for prøving av treprodukter, gitt i NS-EN 408 (Norsk Standard 2010b).

Prøvemaskinen som er benyttet til forsøkene er en «MTS Alliance RT/30», en elektrisk universalprøvemaskin, som egner seg godt for små prøver i tre da den har lastceller som gjør den svært følsom. Figur 3.5 viser prøvemaskinen med et av forsøksoppsettene.

Prøvemaskinen trykker med en konstant hastighet, og registrerer forskyvning i forhold til påført kraft.



Figur 3.5 - Forsøksoppsett



Figur 3.6 - Prøvestykke

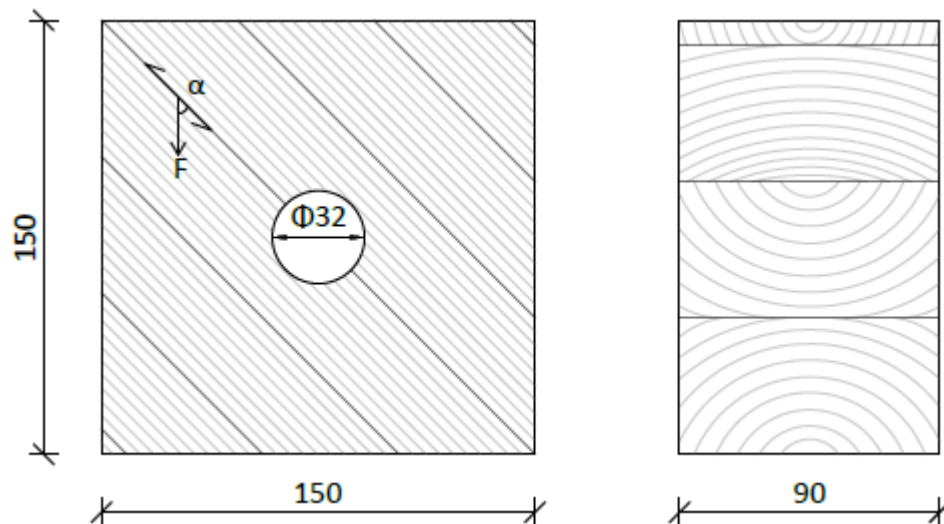
3.2.2 Prøvestykkene

Trykkipregnet furu er benyttet i forsøkene, da dette materialet ofte brukes i trebruer. Det er Moelven Limtre AS som har produsert og impregnert limtrebjelkene, som leveres med en fuktighet på 12 % fra fabrikk. Materialene er impregnert med Cu-impregnering (kobberimpregnering).

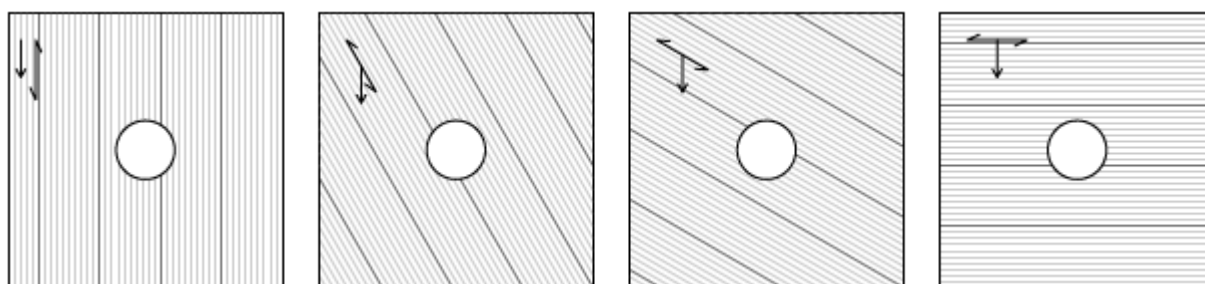
Prøvestykkene er skjært ut som kvadratiske biter fra bjelker med dimensjonen 90 mm x 223 mm, og det ble boret hull i hver kloss for senere oppspenning. Figur 3.6 viser et eksempel på et prøvestykke brukt i forsøk. Materialet har kvalitetsbetegnelsen GL30C, noe som betyr at den karakteristiske bøyefastheten $f_{m,k}$ er 30 N/mm². Overflaten til prøvestykkene er høvlet.

De ferdig tilvirkede prøvestykkene har dimensjonen 90 mm x 150 mm, med en lengde på 150 mm. For å simulere hvordan virkningen av varierende størrelse på horisontal- og

vertikalkraft i et brudekke påvirker friksjonskoeffisienten, er bitene skjært ut med forskjellig vinkel i forhold til fiberretningen. Figur 3.7 viser prøvestykket for kraftvinkel 45 grader med målsetting av tverrsnitt og hull for spennstang. Prøvemaskinen kan kun trykke i vertikal retning, så for å variere kraftvinkelen må prøvestykkene forandres. Figur 3.8 viser hvordan prøvestykkene for de fire resterende kraftvinkelene er skjært ut fra en limtrebjelke for å oppnå ønsket virkning.



Figur 3.7 - Plantegning og oppriss av prøvestykke, $\alpha = 45^\circ$

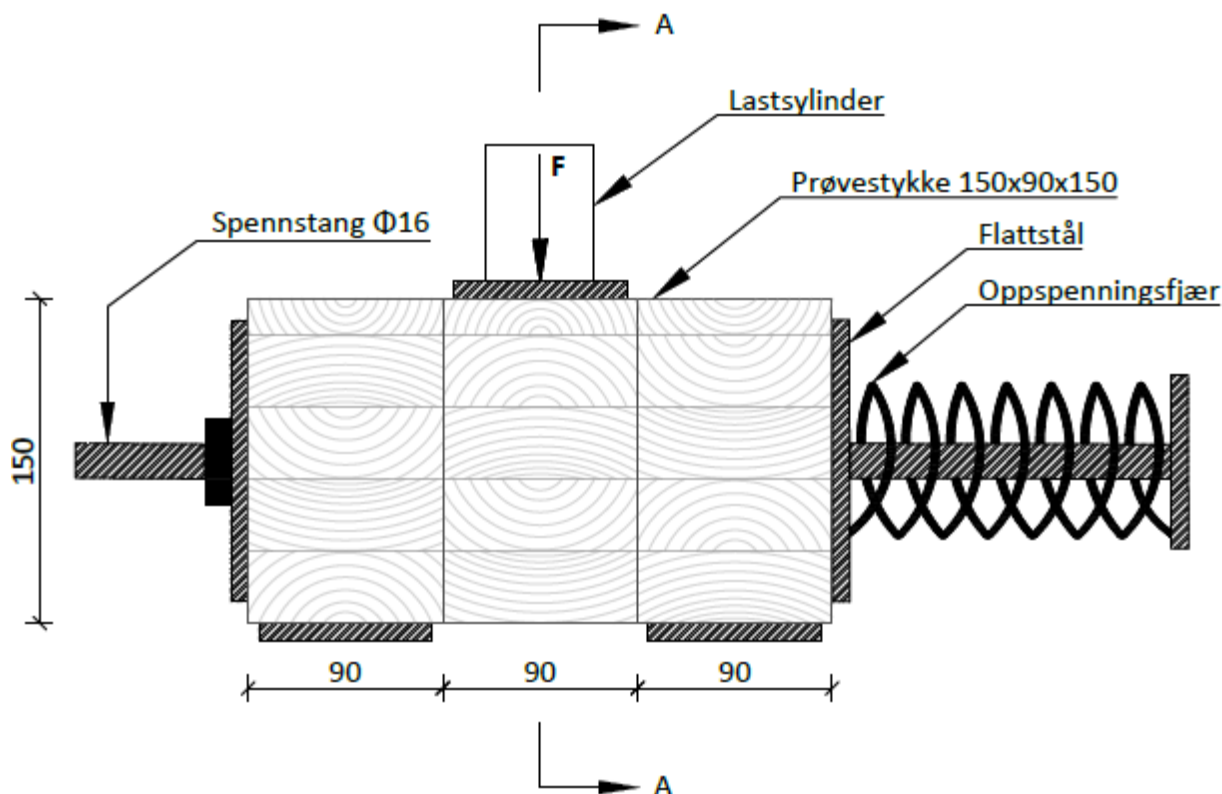


Figur 3.8 - Plantegning av prøvestykker, $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ og 90°

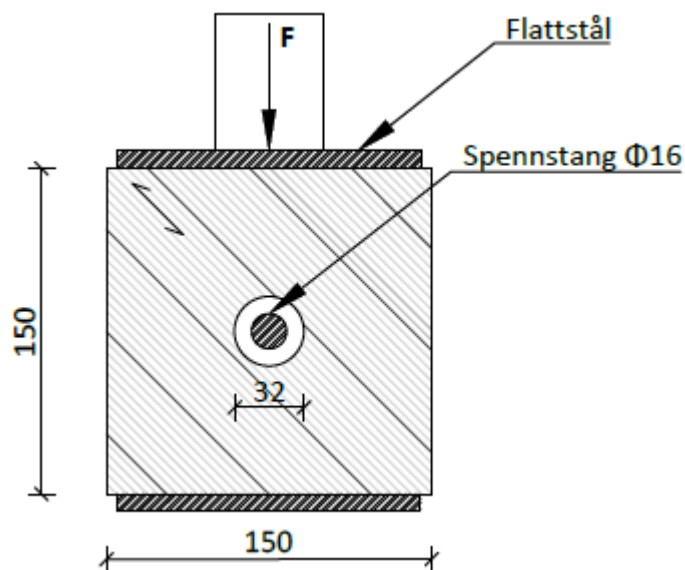
3.2.3 Forsøksmetode

Hvert forsøk består av tre prøvestykker med lik vinkel i forhold til fiberretningen. En spennstang tres gjennom de tre stykkene og spennes sammen med en oppspenningsfjær til 5 kN, noe som for våre prøvestykker utgjør en trykkspenning på $0,22 \text{ N/mm}^2$. Det midtre stykket har et større hull enn de to andre, slik at bevegelsen den får på grunn av trykk fra prøvemaskinen ikke skal stoppes av spennstangen.

Figur 3.9 og figur 3.10 viser oppriss og snitt av prøveoppsettet.



Figur 3.9 - Oppriss av forsøksoppsett



Figur 3.10 - Forsøksoppsett, snitt A-A

I trykkmaskinen ble oppspente prøvestykker plassert med et 10 mm tykt flattstål under de to ytterste prøvestykkene, og et tilsvarende på toppen av det midterste. Dette sikrer jevnt trykk fra lastsylanderens på stykkenes overflate. Det ble påført konstant last med en hastighet satt til 0,8 mm/min, noe som gir maksimal last innen 150 sekunder, anbefalt i NS-EN 408. Lasten ble påført helt til man fikk et «brudd», det vil si at friksjonen og spennkraften ikke lenger holdt prøvestykkene i ro. Den påførte kraften på dette tidspunktet er grunnlaget for bestemmelse av den statiske friksjonskoeffisienten for den aktuelle kraftvinkelen.

For hver test ble alle prøvestykkene byttet ut, slik at eventuelle sår eller sammentrykninger av fiber ikke påvirket neste test.

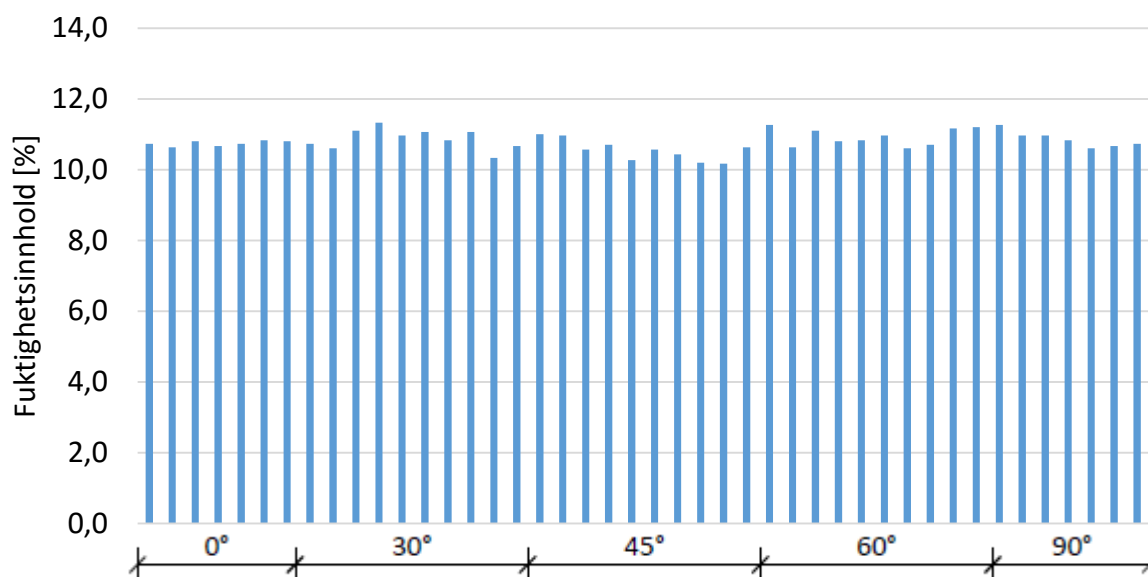
3.2.4 Fuktighetsmåling

Fra tidligere studier vet vi at trevirkets fuktighet er den variabelen som i størst grad påvirker den statiske friksjonskoeffisienten. For å ha full kontroll på denne parameteren har vi målt fuktighetsinnholdet til alle prøvestykkene. Fuktighetsinnholdet ble bestemt ved en densitetsmåling med tørke/veie metoden, umiddelbart etter at friksjonsforsøket ble gjennomført. En tre centimeter lang bit av hvert prøvestykke ble skjært ut, veid og målt, og lagt i tørkeskap. Etter et døgn er bitene helt tørre, slik at de kan veies på nytt, og fuktighetsinnholdet på forsøktidspunktet bestemmes. Densitetsprøven skal være en uskadd del av prøvestykket, fortrinnsvis kvistfri og alle lamellene skal være representert (Norsk Standard 2010a). Prøvestykkets densitet ρ_w er forholdet mellom prøvens masse på forsøktidspunktet m_w dividert på prøvens volum v_w , som vist i formel 3.1.

$$\rho_w = \frac{m_w}{v_w} \quad (3.1)$$

Fuktinnholdet i et prøvestykke er differansen mellom prøvens masse ved forsøktidspunktet m_w og massen etter fullstendig tørking m_0 , dividert med massen etter tørking. Fuktinnholdet oppgis i prosent og beregnes etter formel 3.2.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$



Figur 3.11 - Fuktighetsinnhold for alle forsøk

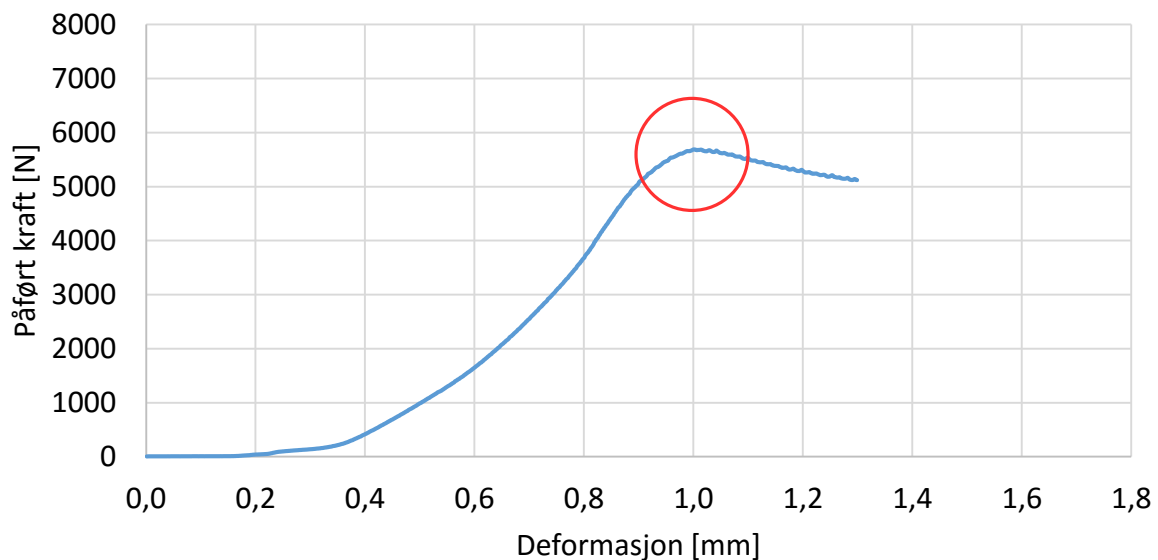
Beregningene gjort etter formel 3.2 viser at fuktighetsinnholdet i våre prøvestykker ligger stabilt mellom 10,1 % og 11,3 %. Figur 3.11 viser det gjennomsnittlige fuktighetsinnholdet for de tre prøvestykkene i hver test, fremstilt med en søyle for hvert forsøk.

3.3 Etterbehandling

3.3.1 Friksjonsberegning

Fra hvert forsøk er det utarbeidet et arbeidsdiagram som viser påført kraft i forhold til deformasjonen som oppstår. Ut fra arbeidsdiagrammet kan en finne maksimal kraft før brudd, som danner grunnlag for beregning av den statiske friksjonskoeffisienten. Bruddet er en brå utvikling i deformasjon uten å tilføre kraft.

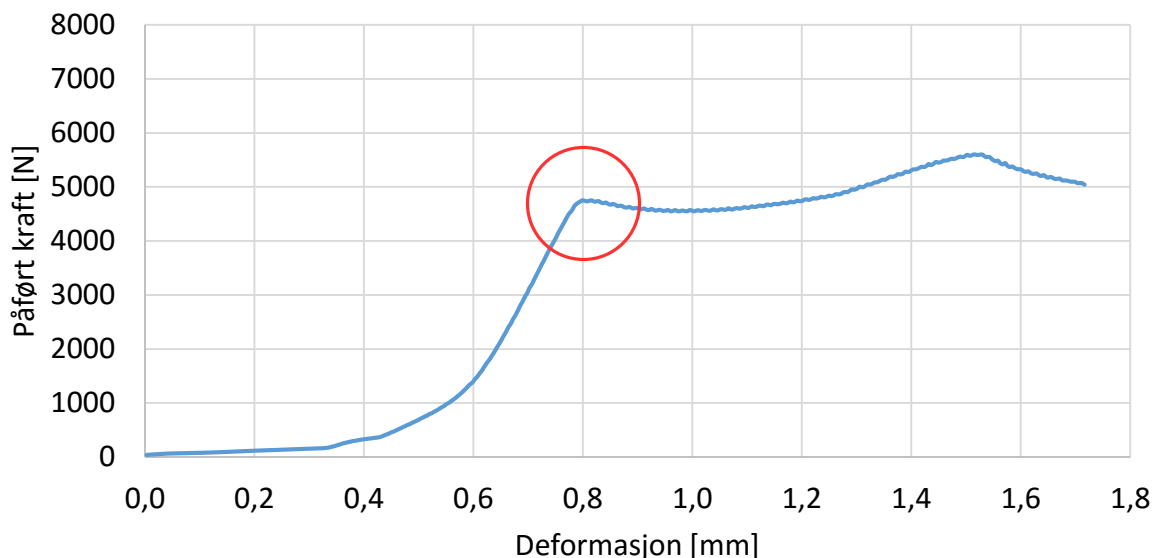
Figur 3.12 viser et normalt arbeidsdiagram for et forsøk. Når den påførte kraften i dette tilfellet er cirka 5700 N klarer ikke spennkraften og friksjonen å holde prøvestykkene i ro, og det oppstår en brå bevegelse mellom lamellene.



Figur 3.12 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 30 grader, test nr. 6

Graden av deformasjon i forhold til påført kraft varierer noe fra test til test.

Arbeidsdiagrammet i figur 3.13 viser at det kan påføres mer kraft etter bruddet fordi prøvestykkenes overflate har funnet et nytt punkt der friksjonskraften er stor nok for en større påkjenning. I slike tilfeller er det kraften ved første brudd vi benytter til beregning av den statiske friksjonskoeffisienten, siden vi ikke tillater noen form for bevegelse mellom lamellene.



Figur 3.13 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 30 grader, test nr. 9

Den maksimale kraften F , påført før det oppstår et brudd mellom prøvestykkene, danner sammen med spennkraften p grunnlaget for å beregne friksjonskoeffisienten. Den karakteristiske statistiske friksjonskoeffisienten μ_k for et prøvestykke beregnes etter formel 3.3. Siden det er tre prøvestykker som er spent sammen må den påførte kraften divideres på to, da det oppstår friksjon i to snitt.

$$\mu_k = \frac{F}{2 \cdot p} \quad (3.3)$$

3.3.2 Statistiske beregninger

For å kunne forstå sammenhengen og styrken i målingene gjort i laboratorium, samt ha et kritisk forhold til resultatene, er det gjort statistiske beregninger av de utregnede friksjonskoeffisientene. Statistikken som er utarbeidet, er gjort i henhold til gjeldende standarder og velkjente metoder. For prøveserier av materialer i tre, skal karakteristiske verdier bestemmes etter den svakeste 5 %-fraktilen for en prøveserie, regulert i NS-EN 14358.

Vi har n antall testverdier tilgjengelig fra en tilfeldig populasjon prøvestykker. Testverdiene, som antas å være uavhengige og logaritmisk normalfordelt, betegnes som m_1, m_2, \dots, m_n . Gjennomsnittsverdien og standardavviket for den stokastiske variabelen $y = \ln m$ skal beregnes etter henholdsvis formel 3.4 og 3.5.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (3.4)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \quad (3.5)$$

Deretter skal den karakteristiske 5 %-fraktilen μ_k bestemmes etter formel 3.6, der k_s er en faktor avhengig av antall tester.

$$\mu_k = \exp(\bar{y} - k_s s_y) \quad (3.6)$$

For at en prøveserie kan godkjennes i henhold til NS-EN 14358, med tanke på spredning i resultatene i forhold til antall utførte tester, må kriteriet i formel 3.7 være oppfylt. $k(n)$ er en faktor avhengig av antall tester.

$$\exp(\bar{y} - k(n)s_y) > \mu_k \quad (3.7)$$

Regresjonsanalyse

For å vise sammenhengen mellom varierende kraftvinkel og dens tilhørende friksjonskoeffisient, har vi beregnet en lineær regresjonslikning for alle resultatene. Dette er en funksjon som statistisk beskriver sammenhengen mellom all innsamlet data på en tilnærmet måte (Løvås 2013). Regresjonslikningen er beregnet ved hjelp av formel 3.8.

$$y = bx + a \quad (3.8)$$

Der stigningstallet b og konstantleddet a beregnes som:

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3.9)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3.10)$$

Ved hjelp av følgende hjelpestørrelser:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.11)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.13)$$

Korrelasjonsanalyse

For å kunne påvise om det er en sammenheng mellom to variabler, og eventuelt hvor sterk denne sammenhengen er, er korrelasjon et ofte brukt statistisk mål. Korrelasjon er et tall mellom -1 og 1, der høy eller lav korrelasjon indikerer at de to variable størrelsene varierer i takt. Om korrelasjonen ligger nær null, forteller det at sammenhengen mellom variablene er svak. Korrelasjon r beregnes etter formel 3.14.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \sqrt{S_{yy}}} \quad (3.14)$$

3.4 Mulige feilkilder

Mulige feilkilder må vurderes i forbindelse med laboratorieforsøk. Kvaliteten på limtre av samme sortering kan variere, og vi har forkastet prøvestykker der synlig sår, kvist eller ruhet har vært svært forskjellig fra andre prøvestykker. Det kan allikevel være mulig at en skadet overflate på et prøvestykke har påvirket forsøket. Alle prøvestykkene kommer originalt fra en 22 meter lang limtrebjelke, og prøvestykkene til de forskjellige forsøksseriene er tilfeldig valgt fra denne bjelken. Prøvestykkene har derfor mindre kvalitetsmessig variasjon. I tillegg er det gjort målinger av fuktighetsinnholdet i alle prøvestykkene, slik at vi har oversikt over variasjonen i denne parameteren.

I laboratoriet kan det gjøres feil, og det er vanskelig å utføre alle tester på en identisk måte. Vi har hatt fokus på at merking og registrering skal gjøres riktig, og følger et fast system. Oppspenning og prøving gjøres kontrollert etter en fastsatt forsøksplan. Samtidig kan menneskelige feil inntreffe, og det er viktig å være kritisk til eget og andres arbeid i evalueringen av resultater. Maskiner og utstyr ved laboratoriet blir kontrollert og kalibrert etter faste normer, og anses derfor som en lite sannsynlig feilkilde.

4 Resultater og analyse

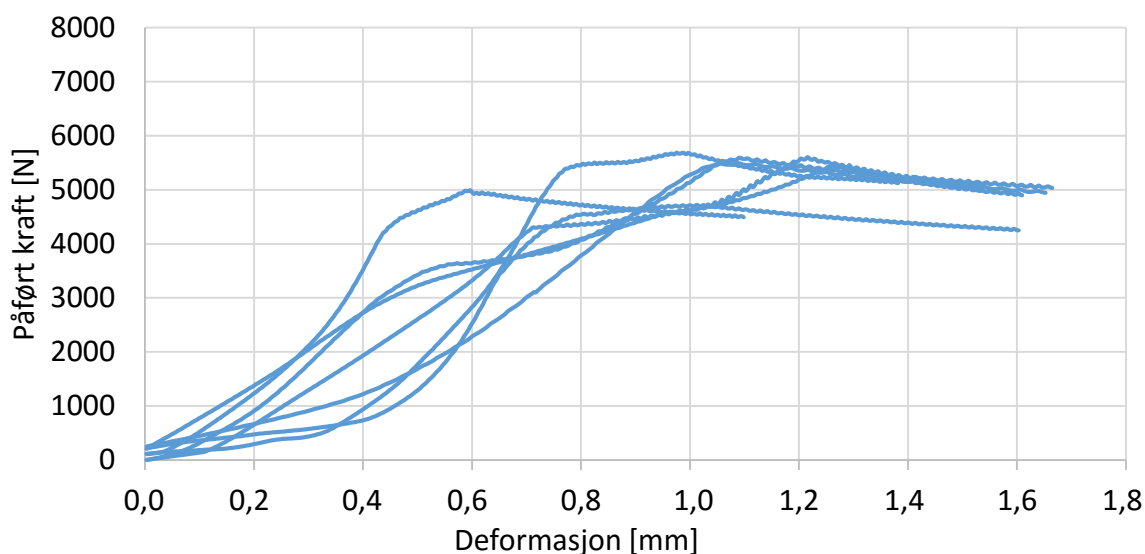
I dette kapitlet presenteres de viktigste resultatene fra forsøkene i laboratorium. For kraftvinkel 0 og 90 grader vises våre resultater sammenliknet med funnene fra Kalbitzers rapport (1999). For kraftvinkel 30, 45 og 60 grader foreligger det ikke noe sammenlikningsgrunnlag. Antall tester i forhold til standardavvik tilfredsstillende for samtlige forsøksserier akseptkriteriet i henhold til NS 14358. Resultatene fra hver forsøksserie danner grunnlag for beregning av karakteristisk 5 % fraktil $\mu_{k,5\%}$. I kapittel 4.6 presenteres et sammendrag av alle forsøkene, som danner grunnlag for diskusjon i kapittel 5. Alle data fra friksjonsforsøkene er gitt i Vedlegg A - Data fra friksjonsforsøk.

4.1 0 grader

Vi har utført 7 forsøk for å danne grunnlag for beregning av friksjonskoeffisient for kraftvinkel 0 grader. Den karakteristiske 5 % fraktilen $\mu_{k,5\%}$ ble 0,44. Forsøksresultatene er oppsummert i tabell 4.1, med en sammenlikning av Kalbitzers funn. Arbeidsdiagrammet fra laboratoriet som dannet grunnlaget for beregningene er gjengitt i figur 4.1.

Tabell 4.1 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 0 grader

| | | Våre resultater | Kalbitzer |
|------------------------------------|---------------|-----------------|-----------|
| Antall forsøk | n | 7 | 10 |
| Antall forkastet | n | 0 | 0 |
| Fuktighetsinnhold | ρ_w | 10,7 % | 11,0 % |
| Friksjonskoeffisient | μ_k | 0,52 | 0,28 |
| Standardavvik | S_y | 0,04 | 0,05 |
| Friksjonskoeffisient (5 %-fraktil) | $\mu_{k,5\%}$ | 0,44 | 0,19 |



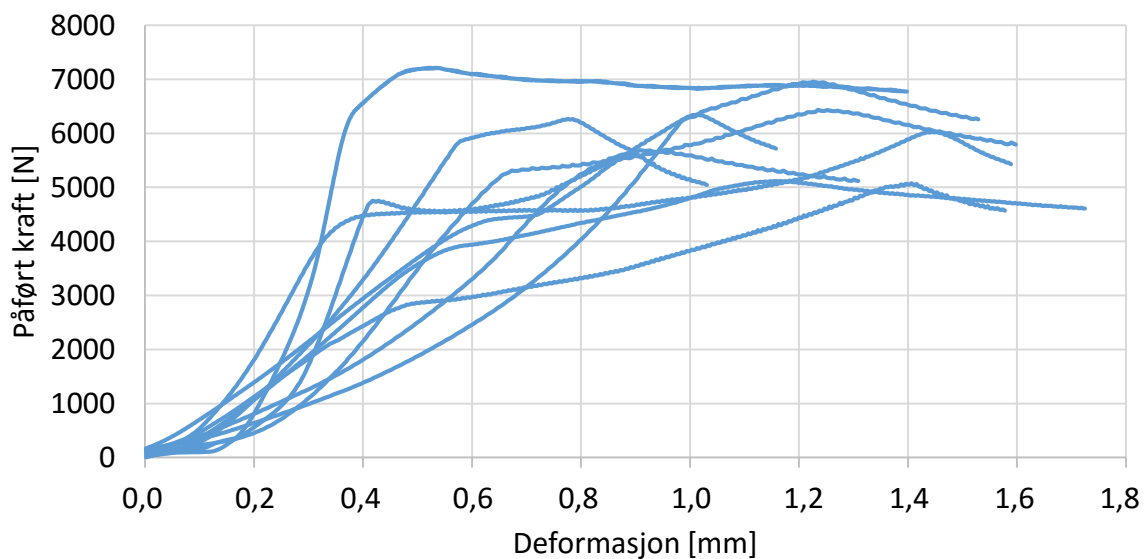
Figur 4.1 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 0 grader, alle tester

4.2 30 grader

Vi har utført 10 forsøk for å danne grunnlag for beregning av friksjonskoeffisient for kraftvinkel 30 grader. Den karakteristiske 5 % fraktilen $\mu_{k,5\%}$ ble 0,47. Forsøksresultatene er oppsummert i tabell 4.2, og arbeidsdiagrammet fra laboratoriet, som danner grunnlaget for beregningene, er gjengitt i figur 4.2.

Tabell 4.2 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 30 grader

| | | Våre resultater |
|------------------------------------|---------------|-----------------|
| Antall forsøk | n | 10 |
| Antall forkastet | n | 0 |
| Fuktighetsinnhold | ρ_w | 10,9 % |
| Friksjonskoeffisient | μ_k | 0,60 |
| Standardavvik | S_y | 0,07 |
| Friksjonskoeffisient (5 %-fraktil) | $\mu_{k,5\%}$ | 0,47 |



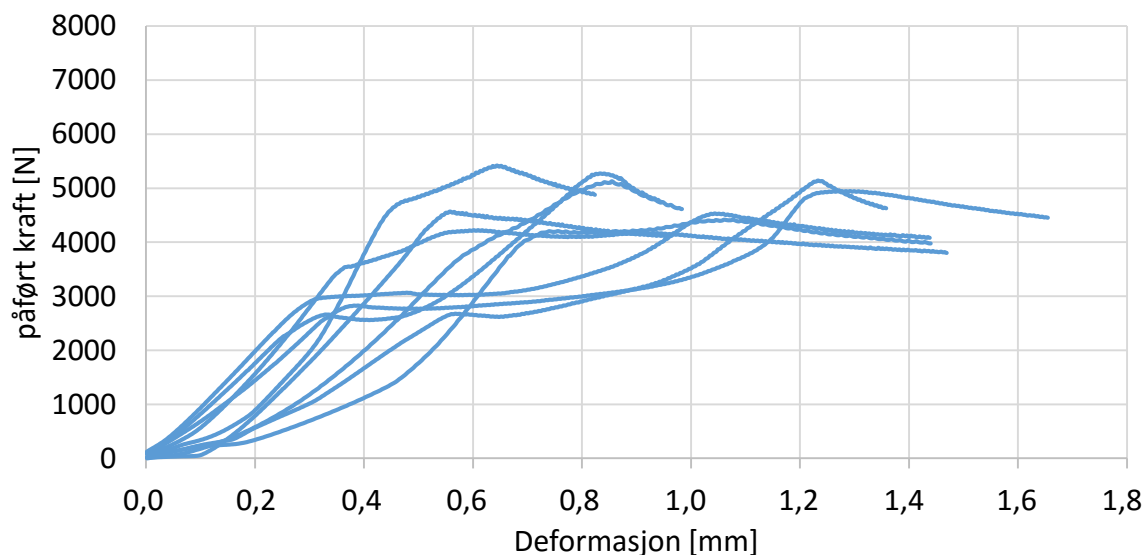
Figur 4.2 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 30 grader, alle tester

4.3 45 grader

Vi har utført 10 forsøk for å danne grunnlag for beregning av friksjonskoeffisient for kraftvinkel 45 grader. Én ble forkastet, da friksjonskoeffisienten ble betydelig lavere, og skilte seg ut med veldig glatt overflate i forhold til de resterende prøvestykkene. Den karakteristiske 5 % fraktilen $\mu_{k,5\%}$ ble 0,39, noe som ikke samsvarer med hypotesen om at en større kraftvinkel gir høyere friksjonskoeffisient. Forsøksresultatene er oppsummert i tabell 4.3, og arbeidsdiagrammet fra laboratoriet, som dannet grunnlaget for beregningene, er gjengitt i figur 4.3.

Tabell 4.3 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 45 grader

| | | Våre resultater |
|------------------------------------|---------------|-----------------|
| Antall forsøk | n | 10 |
| Antall forkastet | n | 1 |
| Fuktighetsinnhold | ρ_w | 10,6 % |
| Friksjonskoeffisient | μ_k | 0,48 |
| Standardavvik | S_y | 0,04 |
| Friksjonskoeffisient (5 %-fraktil) | $\mu_{k,5\%}$ | 0,39 |



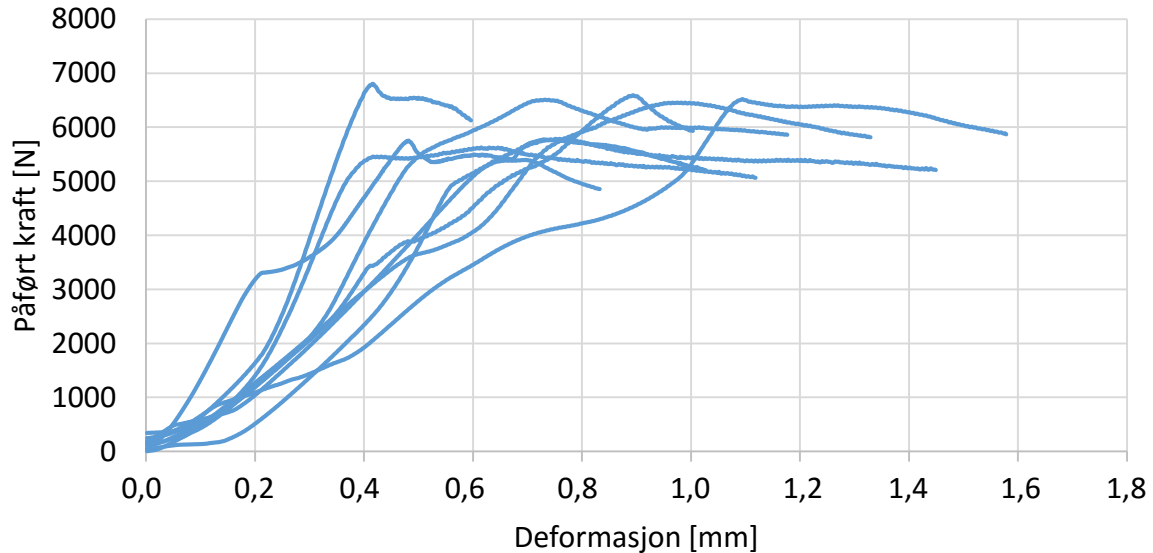
Figur 4.3 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 45 grader, alle tester

4.4 60 grader

Vi har utført 10 forsøk for å danne grunnlag for beregning av friksjonskoeffisienten for kraftvinkel 60 grader. Én ble forkastet, da friksjonskoeffisienten ble betydelig høyere, og skilte seg ut med veldig ru overflate i forhold til de resterende prøvestykkene. Den karakteristiske 5 % fraktilen $\mu_{k,5\%}$ ble 0,51. Forsøksresultatene er oppsummert i tabell 4.4, og arbeidsdiagrammet fra laboratoriet, som dannet grunnlaget for beregningene, er gjengitt i figur 4.4.

Tabell 4.4 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 60 grader

| | | Våre resultater |
|------------------------------------|---------------|-----------------|
| Antall forsøk | n | 10 |
| Antall forkastet | n | 1 |
| Fuktighetsinnhold | ρ_w | 10,9 % |
| Friksjonskoeffisient | μ_k | 0,61 |
| Standardavvik | S_y | 0,05 |
| Friksjonskoeffisient (5 %-fraktil) | $\mu_{k,5\%}$ | 0,51 |



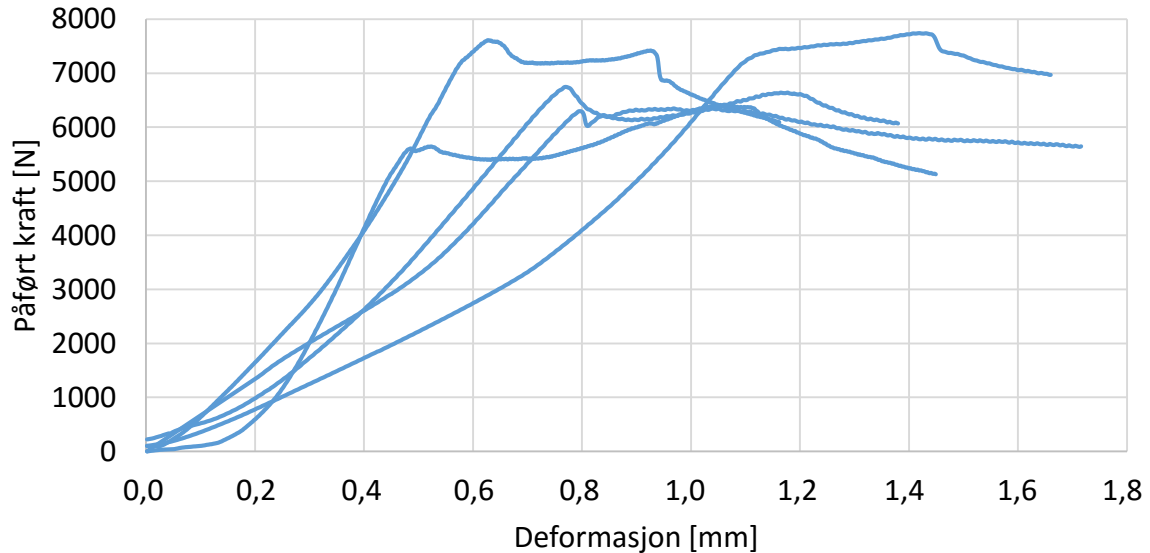
Figur 4.4 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 60 grader, alle tester

4.5 90 grader

Vi har utført 7 forsøk for å danne grunnlag for beregning av friksjonskoeffisient for kraftvinkel 90 grader. To ble forkastet, da de skilte seg ut med veldig glatte overflater i forhold til de resterende prøvestykkene. Den karakteristiske 5 % fraktilen $\mu_{k,5\%}$ ble 0,53. Forsøksresultatene er oppsummert i tabell 4.5, med en sammenlikning av Kalbitzers funn. Arbeidsdiagrammet fra laboratoriet, som dannet grunnlaget for beregningene, er gjengitt i figur 4.5.

Tabell 4.5 - Sammendrag av friksjonsforsøk for kraftvinkel 90 grader

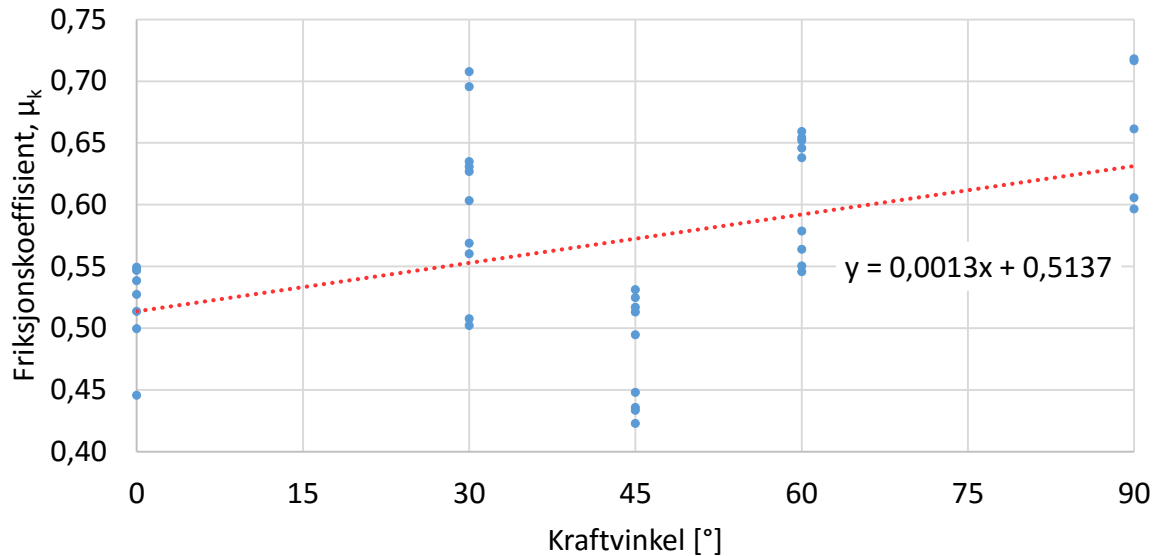
| | | Våre resultater | Kalbitzer |
|------------------------------------|---------------|-----------------|-----------|
| Antall forsøk | n | 7 | 10 |
| Antall forkastet | n | 2 | 0 |
| Fuktighetsinnhold | ρ_w | 10,9 % | 9,5 % |
| Friksjonskoeffisient | μ_k | 0,66 | 0,35 |
| Standardavvik | S_y | 0,06 | 0,07 |
| Friksjonskoeffisient (5 %-fraktil) | $\mu_{k,5\%}$ | 0,53 | 0,22 |



Figur 4.5 - Arbeidsdiagram for kraftvinkel 90 grader, alle tester

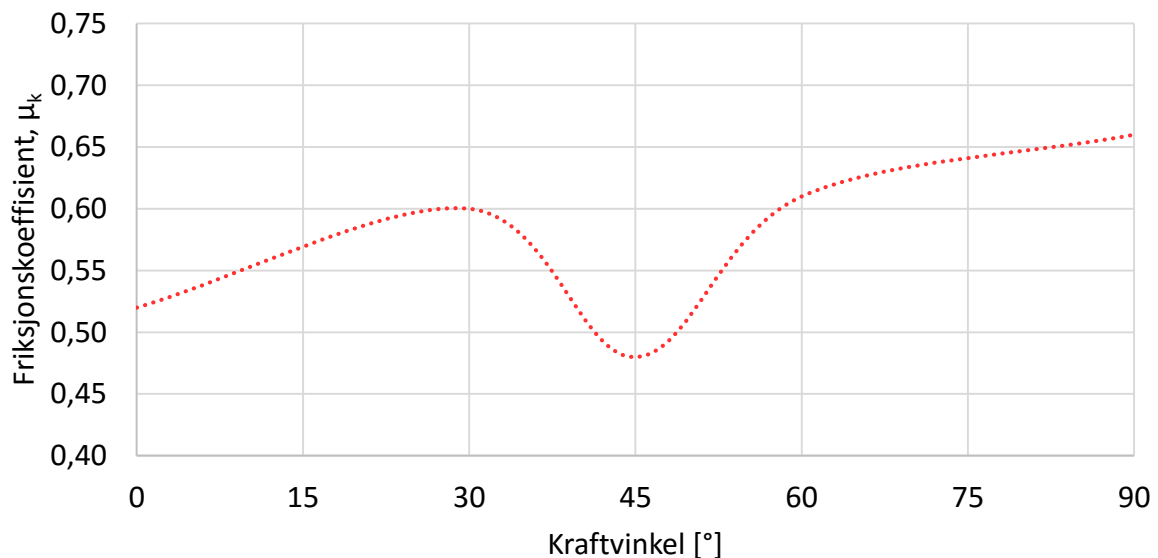
4.6 Oppsummering av resultater

Figur 4.6 viser et plott av den karakteristiske friksjonskoeffisienten for de 40 gjeldende forsøkene. Den lineære regresjonslinjen, beregnet etter formel 3.8, viser en tendens til økende friksjonskoeffisient når kraftvinkelen øker.



Figur 4.6 - Friksjonskoeffisienter for alle forsøk med regresjonslinje

Ved kraftvinkel 45 grader ser vi et unntak, da friksjonskoeffisientene for denne vinkelen ligger lavere enn ved alle andre kraftvinkler. Den lineære regresjonslinjen i figur 4.6 er en dårlig tilnærming til våre resultater. Figur 4.7 viser en bedre tilnærming til resultatene, men er vanskeligere å uttrykke generelt for bruk i formelverk. Hva grunnen til dette uventede resultatet for kraftvinkel 45 grader kan være, diskuteres i kapittel 5.2.



Figur 4.7 - Tilnærmet linje for målte friksjonskoeffisienter

5 Diskusjon

5.1 Diskusjon av metode og utførelse

Eksperimentell studie som metode er valgt på bakgrunn av at vi ikke kjenner til tidligere forskning på hvordan friksjonskoeffisienten til limtre forandres ved varierende kraftvinkel. Ved å utføre laboratorieforsøk er det mulig å fremskaffe resultater for de objekter og variable vi selv ønsker. På denne måten tilegnes ny kunnskap på områder som tidligere ikke er undersøkt. En negativ konsekvens av metodevalget er at resultatene blir lite etterprøvbare. På en annen side kan de sammenliknes med tilsvarende forsøk, og det kan gjøres nye uavhengige forsøk for å etterprøve våre resultater. I tillegg foreligger godt dokumenterte data i form av arbeidsdiagram fra hvert forsøk. Arbeidsdiagrammene er grunnlaget for beregning av friksjonskoeffisienter, og har høy etterprøvbarhet.

Det ble utført totalt 44 tester ved fem ulike kraftvinkler. Basert på spredningen i resultatene for hver variabel kan det se ut til at antall forsøk er tilstrekkelig for å gi en pekepinn på friksjonskoeffisienten. Vi mener det er mulig å trekke slutninger på bakgrunn av resultatene, selv om det i et forskningsperspektiv kun vil anses som en god indikasjon.

For at studien skal være valid, velges variabler som i best mulig grad måler undersøkelsesobjektet. Friksjonskoeffisienten ble målt ved fem vinkler mellom 0 og 90 grader. Resultatene for kraftvinkel 45 grader støtter ikke hypotesen om økende friksjonskoeffisient for økende kraftvinkel. Samtidig er spredningen for denne prøveserien lav, og resultatene ansees derfor som reliable. Det kunne likevel vært interessant og utført flere forsøk i området rundt denne vinkelen, for å underbygge resultatene ytterligere.

Sett i ettertid kunne det vært interessant å måle kraftvinkelens påvirkning på friksjonskoeffisienten ved en annen fuktighet. Fuktighetsinnholdet i prøvestykkene ble holdt konstante, dette for å ha full kontroll på den variabelen som faktisk måles. Det norske klimaet har store forskjeller gjennom året, og trebruer må tåle et varierende fuktighetsnivå. På en annen side vil høy fuktighet gi en større friksjonskoeffisient. Målingene er gjort ved et lavt fuktighetsnivå, og vil være konservative verdier å bruke i dimensjonering.

Med data fra forsøkene er det utført en rekke beregninger for fastsettelse av karakteristiske friksjonskoeffisienter. Beregningene tar utgangspunkt i allment kjente formler for statisk friksjon. Eventuelle beregningsfeil burde vært oppdaget ved intern kontroll av gruppemedlemmer, men kan være kilde til feil i resultater. De statistiske beregningsformlene som er benyttet i evalueringen av resultatene er hentet fra europeiske standarder for mekanisk prøving av trekonstruksjoner. Feiltolkning av standarder kan ha stor innvirkning på resultatet, og kan være vanskelig å oppdage. Etterprøvbarheten til alle beregningene anses som høy siden de tar utgangspunkt i velkjente formler og et godt etablert standardverk.

5.2 Diskusjon av resultater med konklusjon

For friksjonskoeffisienter med kraftvinkel langs og på tvers av fiberretningen kan resultatene sammenliknes med tidligere utførte forsøk. Resultatene ligger noe høyere enn hva Tim Kalbitzer (1999) målte i sin forsøksserie. I rapporten fremkommer ikke alle detaljene i Kalbitzers forsøk, og vi kan derfor ikke nøyaktig forklare grunnen til forskjell i resultatene. En mulig årsak kan imidlertid være at Kalbitzer i sine forsøk ikke benyttet impregnerte prøvestykker. På en annen side er forholdet mellom resultatene for de to kraftvinklene relativt like. Kalbitzer målte 24 % høyere friksjonskoeffisient for kraftvinkel 90 grader enn for 0 grader, samtidig som vi målte 27 % høyere i samme situasjon.

Det ukjente aspektet i vår studie er friksjonskoeffisienten for kraftvinkelene *mellom* 0 og 90 grader. Her finnes ingen tidligere forskning, og det foreligger derfor ikke noe sammenlikningsgrunnlag. Statens vegvesens formelverk er basert på en hypotese om at friksjonskoeffisienten utvikler seg lineært mellom 0 og 90 grader. Basert på våre forsøksresultater, stemmer hypotesen godt for kraftvinkel 30 og 60 grader. Korrelasjonen til friksjonskoeffisientene for kraftvinkel 0, 30, 60 og 90 grader er 0,61. Dette viser god lineær sammenheng, jamfør figur 4.6. På en annen side er ikke dette et godt resultat i seg selv, da hypotesen krever at friksjonskoeffisienten opptrer lineært for alle vinkler mellom 0 og 90 grader.

Resultatet fra kraftvinkel 45 grader stemmer ikke med Statens vegvesens hypotese. Vår målte friksjonskoeffisient er 0,12 lavere enn verdien på regresjonslinjen for de andre forsøkene. Vi kan ikke se at noe har gått galt i utførelsen av forsøksserien for kraftvinkel 45 grader, eller at materialene har avvik i kvalitet eller egenskaper i forhold til de andre forsøksseriene. Samtidig er det vanskelig å påstå at kraftvinkel 45 grader har lavere friksjonskapasitet uten en overbevisende forklaring. Spredningen i de ti testene for kraftvinkel 45 grader er lav, da standardavviket kun er 0,04, noe vi anser som reliabelt. Densitetsmålingen viser at fuktighetsinnholdet i denne forsøksserien ikke avviker fra andre serier. Det kan ikke utelukkes at menneskelig feil er årsak til disse lave friksjonskoeffisientene, selv om samme prosedyre er fulgt for alle forsøksserier. Korrelasjonen mellom økende kraftvinkel og tilhørende friksjonskoeffisient er betydelig lavere med verdier for forsøksserien for kraftvinkel 45 grader.

Gjeldende formelverk tar utgangspunkt i en lineær sammenheng for alle vinkler mellom 0 og 90 grader, noe våre forsøk motbeviser. Nyttelastene på brudekket vil alltid virke med varierende intensitet, slik at vinkelen på kraftresultanten vil være i konstant endring. Det er maksimal lastkombinasjon sammen med tilhørende friksjonskoeffisient som er dimensjonerende for nødvendig spennkraft. Den laveste friksjonskoeffisienten for materialet som benyttes bør derfor brukes slik at sikkerheten for alle lastsituasjoner er ivaretatt.

Generelt ligger resultatene fra våre forsøk høyere enn verdier som benyttes i dimensjonering i dag. Dette indikerer at formelverket er konservativt, og det er mulig å bruke mindre spennkraft, men også færre spennstenger totalt. Sett i et etisk perspektiv ønsker man alltid å

være på sikker side i dimensjonering av store konstruksjoner, da konsekvensene ved en kollaps kan være katastrofale. Ved for lav spennkraft er kollaps lite trolig, men dekkets funksjon som avstivende skive vil være redusert.

5.2.1 Konklusjon

Hensikten med denne rapporten har vært å undersøke friksjonskoeffisienten til limtre ved varierende kraftvinkel, og på bakgrunn av dette evaluere gjeldende formelverk for dimensjonering av nødvendig spennkraft i tverrspente brudekker. Med våre resultater lagt til grunn, har vi kommet frem til følgende konklusjon:

Friksjonskoeffisienten til limtre opptrer ikke lineært mellom kraftvinkel 0 og 90 grader. Laboratorieforsøk har vist at for kraftvinkel 45 grader er friksjonskoeffisienten lavere enn for alle andre undersøkte vinkler.

Gjeldende formelverk for dimensjonering av nødvendig spennkraft i tverspente brudekker er ikke tilfredsstillende slik det er i dag. Vi anbefaler å benytte den laveste friksjonskoeffisienten for limtre ved dimensjonering av nødvendig spennkraft, uavhengig av forholdet mellom horisontal og vertikal last.

5.3 Forslag til videre arbeid

Et tverrspent brudekke dimensjoneres for mange års brukstid, og det er derfor viktig at spennkraften er stor nok gjennom hele konstruksjonens levetid. En interessant oppgave vil derfor være å undersøke hvordan friksjonskoeffisienten påvirkes av varigheten på oppspenningen. Det vil si ulike forsøk der det varieres hvor lenge overflatene står under trykk før forsøket.

6 Referanser

- Bell, K. (2014) *Konstruksjonsmekanikk, del 1 Likevektslære*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Carlberg, J. og B. Toyib (2012) *Finite Element Modelling of Interlaminar Slip in Stress-Laminated Timber Decks*, Chalmers University of Technology.
- Evans, F. G. (2010) *Monitoring of Timber Bridges in Norway*. Report Project 310120. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Hammervold, J. (2012) *Environmental analysis of bridges in a life cycle perspective*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Kalbitzer, T. (1999) *Stress-laminated Timber Bridge Decks*, Technische Universität München.
- Løvås, G. G. (2013) *Statistikk for universiteter og høyskoler*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Martinsons (2012) *Träbroguide*. [online]. Bygdsiljum: Martinsons. URL: http://www.martinsons.se/Allm%C3%A4n/Filer/System/Nedladdning/Trabroguiden_webb.pdf (14.03.2016).
- Norsk Standard (2003) *NS-EN 1991-2. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 2: Trafikklast på bruer*. Oslo: Standard Norge.
- Norsk Standard (2004a) *NS-EN 1995-1-1. Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Oslo: Standard Norge.
- Norsk Standard (2004b) *NS-EN 1995-2. Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 2: Bruer*. Oslo: Standard Norge.
- Norsk Standard (2006) *NS-EN 14358. Trekonstruksjoner - Beregning av karakteristisk 5 %-fraktil og godkjenningskriterier for en prøveserie*. Oslo: Standard Norge.
- Norsk Standard (2010a) *NS-EN 384. Konstruksjonstrevirke - Bestemmelse av karakteristiske verdier for mekaniske egenskaper og densitet*. Oslo: Standard Norge.
- Norsk Standard (2010b) *NS-EN 408. Trekonstruksjoner - Konstruksjonstre og limtre - Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper*. Oslo: Standard Norge.
- Pousette, A. mfl. (2002) *Stress Laminated Bridge Decks, Part 2*. Nordic Timber Bridge Project. Stockholm: TRÅTEK, Swedish Institute for Wood Technology Research.
- Samferdselsdepartementet (2013) *Nasjonal transportplan 2014-2023*. Meld. St. 26 (2012-2013). Oslo: Samferdselsdepartementet.
- Statens vegvesen (2015a) *Håndbok N400 - Bruprosjektering*. Oslo: Statens vegvesen, Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2015b) *Veiledning V422 - Trebruhåndboken (under arbeid)*. Oslo: Statens vegvesen, Vegdirektoratet.

Vedlegg A - Data fra friksjonsforsøk

Friksjonsforsøk kraftvinkel 0 grader

| | |
|--|---------------------------|
| Laboratorium: Norsk Treteknisk Institutt | Forsøk utført: 03.02.2016 |
|--|---------------------------|

| | |
|-----------------|----------|
| Måleverdier inn | Beregnes |
|-----------------|----------|

| Prøve nr. | Oppspenning [N] | Kraft [N] | Fuktighet [%] | Friksjonskoeffisient μ_k |
|-----------|-----------------|-----------|---------------|------------------------------|
| 1 | 5300 | 5590 | 10,7 | 0,53 |
| 2 | 5100 | 5492 | 10,6 | 0,54 |
| 3 | 5000 | 4994 | 10,8 | 0,50 |
| 4 | 5200 | 5685 | 10,7 | 0,55 |
| 5 | 5100 | 5603 | 10,7 | 0,55 |
| 6 | 5300 | 4724 | 10,8 | 0,45 |
| 7 | 5300 | 5442 | 10,8 | 0,51 |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

Forkastet: Ingen

| | |
|--|------|
| Middelverdi | 0,52 |
| Standardavvik | 0,04 |
| Karakteristisk 5%-fraktil, $\mu_{k,5\%}$ | 0,44 |

Friksjonsforsøk kraftvinkel 30 grader

| | |
|--|---------------------------|
| Laboratorium: Norsk Treteknisk Institutt | Forsøk utført: 03.02.2016 |
|--|---------------------------|

| | |
|-----------------|----------|
| Måleverdier inn | Beregnes |
|-----------------|----------|

| Prøve nr. | Oppspenning [N] | Kraft [N] | Fuktighet [%] | Friksjonskoeffisient μ_k |
|-----------|-----------------|-----------|---------------|------------------------------|
| 1 | 5000 | 6954 | 10,7 | 0,70 |
| 2 | 5000 | 6349 | 10,6 | 0,63 |
| 3 | 5000 | 5076 | 11,1 | 0,51 |
| 4 | 5100 | 5120 | 11,3 | 0,50 |
| 5 | 5000 | 6031 | 11,0 | 0,60 |
| 6 | 5000 | 5686 | 11,1 | 0,57 |
| 7 | 5000 | 6269 | 10,8 | 0,63 |
| 8 | 5100 | 7218 | 11,1 | 0,71 |
| 9 | 5000 | 5602 | 10,3 | 0,56 |
| 10 | 5100 | 6434 | 10,7 | 0,63 |

Forkastet: Ingen

| | |
|--|------|
| Middelverdi | 0,60 |
| Standardavvik | 0,07 |
| Karakteristisk 5%-fraktil, $\mu_{k,5\%}$ | 0,47 |

Friksjonsforsøk kraftvinkel 45 grader

Laboratorium: Norsk Treteknisk Institutt Forsøk utført: 03.02.2016

Måleverdier inn **Beregnes**

| Prøve nr. | Oppspenning [N] | Kraft [N] | Fuktighet [%] | Friksjonskoeffisient μ_k |
|-----------|-----------------|-----------|---------------|------------------------------|
| 1 | 5000 | 4227 | 11,0 | 0,42 |
| 2 | 5000 | 4945 | 11,0 | 0,49 |
| 3 | 5200 | 4531 | 10,6 | 0,44 |
| 4 | 5100 | 4421 | 10,7 | 0,43 |
| 5 | 5100 | 5418 | 10,3 | 0,53 |
| 6 | 5100 | 4569 | 10,6 | 0,45 |
| 7 | 5100 | 5271 | 10,4 | 0,52 |
| 8 | 5000 | 5130 | 10,2 | 0,51 |
| 9 | 5200 | 3432 | 10,2 | 0,33 |
| 10 | 4900 | 5141 | 10,6 | 0,52 |

Forkast: Nr. 9

| | |
|--|-------------|
| Middelverdi | 0,48 |
| Standardavvik | 0,04 |
| Karakteristisk 5%-fraktil, $\mu_{k,5\%}$ | 0,39 |

Friksjonsforsøk kraftvinkel 60 grader

Laboratorium: Norsk Treteknisk Institutt Forsøk utført: 03.02.2016

Måleverdier inn **Beregnes**

| Prøve nr. | Oppspenning [N] | Kraft [N] | Fuktighet [%] | Friksjonskoeffisient μ_k |
|-----------|-----------------|-----------|---------------|------------------------------|
| 1 | 5200 | 6803 | 11,3 | 0,65 |
| 2 | 5100 | 5750 | 10,6 | 0,56 |
| 3 | 5000 | 6944 | 11,1 | 0,69 |
| 4 | 5000 | 6592 | 10,8 | 0,66 |
| 5 | 5100 | 6507 | 10,8 | 0,64 |
| 6 | 5000 | 6458 | 11,0 | 0,65 |
| 7 | 4900 | 5394 | 10,6 | 0,55 |
| 8 | 5000 | 6519 | 10,7 | 0,65 |
| 9 | 5000 | 5456 | 11,2 | 0,55 |
| 10 | 5000 | 5786 | 11,2 | 0,58 |

Forkastet: Nr. 3

| | |
|--|-------------|
| Middelverdi | 0,61 |
| Standardavvik | 0,05 |
| Karakteristisk 5%-fraktil, $\mu_{k,5\%}$ | 0,51 |

Friksjonsforsøk kraftvinkel 90 grader

| | |
|--|---------------------------|
| Laboratorium: Norsk Treteknisk Institutt | Forsøk utført: 03.02.2016 |
|--|---------------------------|

| | |
|------------------------|-----------------|
| Måleverdier inn | Beregnes |
|------------------------|-----------------|

| Prøve nr. | Oppspenning [N] | Kraft [N] | Fuktighet [%] | Friksjonskoeffisient μ_k |
|-----------|-----------------|-----------|---------------|------------------------------|
| 1 | 4700 | 5606 | 11,3 | 0,60 |
| 2 | 5300 | 7610 | 11,0 | 0,72 |
| 3 | 5200 | 6298 | 11,0 | 0,61 |
| 4 | 5100 | 5276 | 10,8 | 0,52 |
| 5 | 5100 | 6744 | 10,6 | 0,66 |
| 6 | 5400 | 7737 | 10,7 | 0,72 |
| 7 | 5200 | 4214 | 10,7 | 0,41 |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

Forkastet: Nr. 4 og 7

| | |
|--|-------------|
| Middelverdi | 0,66 |
| Standardavvik | 0,06 |
| Karakteristisk 5%-fraktil, $\mu_{k,5\%}$ | 0,53 |