

Friksjon mellom trelameller i spenningslaminerte tredekker

Anette Karlsen Paulsrud

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Kjell A Malo, KT

Medveileder: Francesco Mirko Massaro, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



Institutt for konstruksjonsteknikk

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

NTNU- Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet

TILGJENGELIGHET

LUKKET

MASTEROPPGAVE 2018

FAGOMRÅDE: Trekonstruksjoner	DATO: 10. juni 2018	ANTALL SIDER: 158 + 22 sider vedlegg
---------------------------------	------------------------	---

TITTEL:

Friksjon mellom trelameller i spenningslaminerte tredekker

Friction between laminations in stress- laminated timber bridge decks

UTFØRT AV:

Anette Karlsen Paulsrud



SAMMENDRAG:

Hensikten med oppgaven var å få mer kunnskaper rundt friksjonskoeffisienten i tverrspente dekker, spesielt med fokus på oppspenningens påvirkning. Det ble derfor gjennomført 120 friksjonsforsøk, hvor størrelsen og varigheten av oppspenningene, samt størrelsen på de testede prøvestykkene ble variert. Oppspenningene prøvene ble utsatt for var enten 0,3MPa, 0,6MPa eller 1,0MPa. Videre var prøvestykkene enten testet rett etter oppspenningene var påført, eller de ble lagret som oppspente prøvestykker i ei uke før friksjonstestene ble utført. De to forskjellige størrelsene på klossene var enten 166 x 166 x 90 mm eller 400 x 166 x 90 mm.

Undersøkelsene viste at den statiske friksjonsparameteren generelt ble større ved glidninger på tvers av fiberretningen i forhold til når glidningene foregikk langs med fiberretningen. Videre viste det seg å være en sammenheng i at når oppspenningene ble redusert, økte verdiene for den statiske friksjonskoeffisienten. Denne sammenhengen var tydeligst for seriene med utglidninger på tvers av fiberretningen, men kunne antydes også fra seriene med glidninger langs fiberretningen. De kinematiske friksjonskoeffisientene virket ellers til å være mer uavhengige av hvilke forspenninger dekket var utsatt for. De var også i mindre grad avhengige av om forsøkene ble gjort langs med eller på tvers av fiberretningen. Resultatene viste at prøvene med ei ukes oppspenning fikk større friksjonskoeffisienter enn prøvene som ble testet umiddelbart etter at oppspenningene var påført. Dette var gjeldende uavhengig av størrelsene på oppspenningene og om forsøkene var gjort langs med eller på tvers av fiberretningen.

FAGLÆRER: Kjell Arne Malo

VEILEDER(E): Kjell Arne Malo, Francesco Mirko Massaro

UTFØRT VED: Institutt for Konstruksjonsteknikk, NTNU Trondheim

Forord

Denne masteroppgaven er resultatet av det avsluttende arbeidet på det 5-årige studiet bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Arbeidet er i sin helhet gjennomført ved instituttet for konstruksjonsteknikk og ligger innen fagretningen trekonstruksjoner. Oppgaven er utført i det 10. semesteret i studiet og omfatter en tidsbruk på 20 uker. Omfanget av masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng.

Det er flere personer som fortjener en takk i forbindelse med arbeidet de har lagt ned for at denne oppgaven har blitt til. Første takken går til hovedveileder Kjell Arne Malo for gode tilbakemeldinger og oppfølging underveis i arbeidet. En stor takk går også til Francesco Mirko Massaro. All hjelp ved gjennomføringen av laboratoriearbeidet, samt gode tips og triks som er gitt i forbindelse med oppgaven settes stor pris på. I forbindelse med laboratoriearbeidet fortjener også til Terje Petersen og de andre ansatte i laboratoriet en stor takk for god hjelp og oppmuntrende ord underveis. Til slutt vil jeg takke familie og venner for all støtte gjennom studieårene.

Trondheim, Juni 2018

Anette Karlsen Paulsrud

Sammendrag

Hensikten med oppgaven var å gjøre undersøkelser på friksjonen i tverrspente dekker. Spesielt var det ønskelig å øke kunnskapene rundt hvordan oppspenningene virker inn på friksjonskoeffisienten. De tverrspente dekkene er laget ved at bjelker er plassert ved siden av hverandre med fiberretningen i bruas lengderetning. Bjelkene holdes så sammen ved påføring av trykkrefter gjennom stålstag plassert på tvers av bruas lengderetning. Friksjonen mellom bjelkene fører til lastoverføring og gir en plateoppførsel i dekket. I Eurokode 5 er størrelser for friksjonsfaktoren oppgitt. Denne tror man likevel er noe konservativ. En mer nøyaktig verdi for friksjonskoeffisienten kan derfor bidra til å gi en sikrere verdi for hvor lave oppspenningene i dekket kan være før det glipper. Er det store forskjeller mellom denne oppgavens undersøkelser og verdiene som allerede finnes for friksjonsparameterne, kan dette ha betydning for dekkene blant annet ved at det er mindre behov for reoppspenning av spennstengene.

Hoveddelen av arbeidet er utført i laboratoriet hvor 120 friksjonsforsøk fordelt over 10 serier er gjennomført. Siden det var spesielt ønskelig å undersøke oppspenningenes påvirkning på friksjonsparameteren, er det gjennomført forsøk på serier med 0,3 MPa, 0,6 MPa og 1,0 MPa oppspenning. Seriene med disse oppspenningene er utført med forskyvninger både langs med og på tvers av fiberretningen i prøvestykkene. I 8 av de 10 gjennomførte seriene ble prøvene lagret med den påførte oppspenningen i ei uke før friksjonen ble testet. De to siste seriene ble testet umiddelbart etter at oppspenningene var påført. Slik var det mulig å få et inntrykk av hvordan friksjonskoeffisienten ble påvirket av at oppspenningene hadde virket i prøvestykket over lenger tid. Alle klossene hadde enten dimensjonene 166 x 166 x 90 mm eller 166 x 400 x 90 mm. I seriene med større klosser var det ønskelig å se om glideflatenes areal og størrelsen på stålplatene i forhold til størrelsen på treklossene spilte noen rolle for friksjonen.

For hver test ble påførte laster og oppspenningskrefter registrert og friksjonskoeffisienten beregnet. De oppnådde friksjonskoeffisientene har så blitt sammenlignet, både mot

resultatene fra de ulike seriene og mot resultatene fra de tidligere gjennomførte undersøkelsene.

Undersøkelsene viste at den statiske friksjonsparameteren generelt ble større ved glidninger på tvers av fiberretningen i forhold til når glidningene foregikk langs med fiberretningen. Videre viste det seg å være en sammenheng i at når oppspenningene ble redusert, økte verdiene for den statiske friksjonskoeffisienten. Denne sammenhengen var tydeligst for seriene med utglidninger på tvers av fiberretningen, men kunne antydes også fra seriene med glidninger langs fiberretningen. De kinematiske friksjonskoeffisientene virket til å være mer uavhengige av hvilke forspenninger dekket var utsatt for. De var også i mindre grad avhengige av om forsøkene ble gjort langs med eller på tvers av fiberretningen. Resultatene viste at prøvene med ei ukes oppspenning fikk større friksjonskoeffisienter enn prøvene som ble testet umiddelbart etter at oppspenningene var påført. Dette var gjeldende uavhengig av størrelsene på oppspenningene og om forsøkene var gjort langs med eller på tvers av fiberretningen.

Abstract

The purpose of this thesis is to investigate the behaviour of the friction in stress- laminated timber decks. In particular, the motivation was to increase the knowledge about how the prestress affects the friction coefficient. The stress- laminated decks are made of beams placed side by side with the fibre direction in the same direction as the longitudinal direction of the bridge. In the transverse direction of the bridge, there are placed steel bars that hold the beams together. Because of the friction between the beams, the loads are transferred on the deck. This results in a plate behaviour of the deck. In Eurocode 5, values are given for the coefficient of friction, but it is thought that these values are a bit conservative. Investigations on the friction parameter can therefore help to provide a more accurate value for the friction coefficient and give safer values for how low the prestress can be in the decks before slip will occur. If there are big differences between the values found by the investigations and the values given by the Eurocode, it may affect the decks and among other things there could be less need for re- tightening the tension rods.

Most of the work was carried out in the laboratory, where 120 tests spread over 10 series were completed. Three values of prestress have been applied: 0,3 MPa, 0,6 MPa and 1,0 MPa. The tests have been carried out with displacements both transverse and longitudinal to the fibre direction. In 8 out of 10 series, the samples were prestressed for a week before the frictional behaviour was tested. The last two series were tested immediately after the prestress was applied. In that way it was possible to get an impression of how the friction was influenced by the prestress that had been acting on the timber blocks for a longer period. The dimensions of the blocks were either 166 x 166 x 90 mm or 166 x 400 x 90 mm. In the series tested with larger blocks, it was desirable to investigate if the dimensions of the sliding surfaces and the size of the anchor plates compared to the size of the wooden blocks were affecting the friction.

From all of the tests that were carried out, the applied force and prestress were sampled and used to calculate the friction coefficients. These coefficients were later compared to each other and to the coefficients of friction that were found through earlier studies.

The investigations showed that the static coefficient of friction achieved greater values when the sliding happened transversally to the fibres compared to when the sliding was done along the fibres. Furthermore, there was a correlation between the reduction of the stresses and the increase of the values of the static friction coefficient. These observations were most common in the series with sliding across the fibre direction, but they could also be seen in the series with sliding along the fibre direction. The kinematic friction coefficients seemed to be less affected by the value of the prestress. They were also less dependent on whether the tests were carried out along or across the fibre direction. The results showed that the test pieces that were prestressed for a week reached higher values of the friction coefficients than the samples that were tested immediately after the prestress was applied. Neither did the different values of the prestress nor the different sliding directions affect the value of the kinematic friction coefficient.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
Innhold	ix
1 Innledning	1
1.1 Problemstilling	3
1.2 Metode	3
2 Teori	5
2.1 Tre som materiale.....	5
2.1.1 Oppbygning	5
2.1.2 Tre brukt som byggemateriale i bruer	8
2.1.3 Tre i et miljøperspektiv	9
2.2 Tverrspente lamelledekker	11
2.2.1 Oppbygning	11
2.2.2 Bruddmekanismer	12
2.2.3 Utviklingen av tverrspente dekker	15
2.2.4 Ulike tverrsnitt.....	15
2.3 Friksjon.....	19
2.3.1 Statisk og kinematisk friksjon	19
2.3.2 Verdier for friksjonskoeffisienten fra litteraturen	21
2.4 Friksjon i tverrspente brudekker	23
2.5 Kryp i tre	27
2.5.1 Kryp på grunn av endringer i fuktighetsinnhold	27
2.5.2 Kryp på grunn av langtidslaster	29

2.6	Beregning av karakteristiske verdier	33
3	Tidligere undersøkelser.....	35
3.1	Forsøk på friksjon mellom lameller– Tim Kalbitzer, Masteroppgave fra TU München, 1999 [21].....	35
3.2	Friksjonsprøvinger, 2010 og 2012 [32] [33].....	39
3.3	Friksjon tre mot tre - Bacheloroppgave av Audun Bekk, Lasse Hangaard og Henning Ravnås våren 2016 [14]	41
3.4	Prosjektoppgave av Anette Paulsrud, høsten 2017 [8]	44
3.5	Erfaringer fra det som er gjennomført tidligere.....	45
4	Friksjonsmålingene	47
4.1	Gjennomførte forsøk	47
4.1.1	Forsøksseriene.....	47
4.1.2	Navngivning av seriene	49
4.2	Utstyr	51
4.2.1	Treklossene.....	51
4.2.2	Stålplatene.....	54
4.2.3	Festemidlene	55
4.2.4	Lastcelle og skyvelær.....	56
4.2.5	Testmaskinen	58
4.2.6	Aramis.....	59
4.3	Oppsett og gjennomføring av testene.....	63
4.3.1	Oppspenningen	63
4.3.2	Friksjonstesting	66
4.4	Resultater fra de testede seriene	69
4.4.1	T03.....	71
4.4.2	L03	74

4.4.3	T06.....	77
4.4.4	L06.....	80
4.4.5	T10.....	83
4.4.6	L10.....	88
4.4.7	T10U.....	93
4.4.8	L10U.....	96
4.4.9	T06H.....	99
4.4.10	L06B.....	102
4.4.11	Oppsummering.....	105
4.5	Observasjoner og diskusjon av resultatene.....	107
4.5.1	Observasjoner og kommentarer til de enkelte seriene.....	110
4.5.2	Lastcellen og vurderinger av plottene fra denne.....	133
4.5.3	Forsøk med av- og pålasting undervegs i testene.....	137
4.5.4	Klossenes densiteter.....	141
4.6	Diskusjon av resultatene fra de ulike seriene.....	143
4.7	Diskusjon av resultatene mot tidligere gjennomførte undersøkelser.....	147
4.8	Konkluderende punkter fra friksjonsforsøkene.....	151
5	Avslutningsvis.....	153
6	Videre arbeid.....	155
	Referanser.....	157
	Vedlegg.....	159
	Vedlegg A – Densitet av klossene.....	159
	T03.....	159
	L03.....	159
	T06.....	160
	L06.....	160

T10.....	161
L10.....	162
T10U.....	163
L10U.....	163
T06H.....	164
L06B.....	164
Vedlegg B – Last-forskyvningskurver for utglidningen av midtklossen.....	165
T03.....	165
L03.....	166
T06.....	167
L06.....	168
T10.....	170
L10.....	172
T10U.....	175
L10U.....	176
T06H.....	177
L06B.....	178
Ekstra.....	180

1 Innledning

Å bygge med tre er ikke et nytt fenomen. Dette bevises blant annet av de mange vakre stavkirkene her til lands som kan dateres helt tilbake til middelalderen. Benyttelse av tre til store byggverk hvor ingeniører var nødvendig ble likevel omtrent helt borte med den industrielle revolusjonen, hvor stål og betong i stedet tok over som byggematerialer [1]. Fra midten av 1900- tallet har bruken av tre som byggematerialer i større konstruksjoner igjen tatt seg opp. Dette i stor grad som et resultat av utviklingen av limtre og plateprodukter.

I Norge begynte utviklingen med bruk av tre som byggematerialer på slutten av 80- tallet, etter at Norge ble tildelt OL. I søknaden hadde de norske myndighetene lovet at OL- anleggene skulle være laget av tre. Problemet var at det på den tiden ikke fantes kunnskaper for hvordan slike store konstruksjoner kunne bygges av dette materialet [2]. Det ble derfor satt i gang et omfattende arbeid for å komme fram til gode løsninger blant annet for de store spennene som krevdes. Arbeidet resulterte i at en rekke teorier og metoder for bruk av tre som byggematerialer ble utviklet. De synlige bevisene av arbeidet kan eksempelvis ses gjennom Vikingskipet på Hamar og Håkons Hall på Lillehammer. I etterkant av OL og utviklingen av disse nye teoriene og metodene konkluderte man med at de utviklede teoriene også kunne benyttes til bygging av større trebruer. Dette har ført til at også trebruene og mulighetene som finnes for disse, har gått gjennom en voldsom utvikling de siste 20 til 30 årene.

I perioden 1994 – 2001 ble det i tillegg arrangert et samarbeid mellom de nordiske landene. Samarbeidet ble kalt Nordic Timber Bridge Project og hadde som formål å øke kunnskapen rundt det å bygge bruer i tre. På sikt var målet at en større andel av bruene som ble reist skulle ha tre som bærende materialer [3]. Dette økte fokuset på bruken av tre må kunne sies å ha hatt et positivt utfall. Fra 1990 og fram til i dag er det i Norge bygd omtrent 250 bruer hvor tre er benyttet som bærende materialer [4]. Grylla bru vist i figur 1 er et eksempel på en av disse bruene.

En del av samarbeidet i Nordic Timber Bridge Project tok for seg bruken av tre som dekker i bruer. Spesielt ble det gjennomført mye forskning på tverrspente dekker, deres virkemåte og utfordringer med blant annet kryp [5]. Resultatet av forskningen førte til at denne typen dekker i dag benyttes i et stort antall nye trebruer, ofte som et godt alternativ til betong. Den økte bruken av tre som byggemateriale har samtidig vært et godt tiltak for å nå regjeringens mål om reduserte klimagassutslipp gjennom bruk av mer miljøvennlige materialer [6].

De første tverrspente dekkene ble utviklet på 1970- tallet i Nord- Amerika. Grunnet dette er det derfor lite erfaringer på hvordan holdbarheten av disse dekkene er. I Norge er kravet fra prosjekteringsstandarden for bruer at bruene skal kunne forventes å ha en levetid på 100 år, med mulighet til å bytte ut deler som man vet ikke vil holde så lenge [7]. Siden ingen av dekkene er så gamle enda, ligger det en usikkerhet i om brudekkene vil oppfylle kravet.



Figur 1 - Grylla bru er et eksempel på ei bru med tverrspent dekke [4]. Det tverrspente dekket kjennes igjen ved de jevnt plasserte stålstagene og forankringsplatene i bruas lengderetning.

1.1 Problemstilling

Tverrspente dekker er laget ved at bjelker er plassert ved siden av hverandre med bjelkenes fiberretning i bruas lengderetning. Bjelkene holdes sammen av stålkabler som er spent opp på tvers av brudekket. Friksjonen som opptrer mellom bjelkene fører til lastoverføring, og gir en plateoppførsel i dekket. I eurokoden for trebruer er størrelser for friksjonsfaktoren oppgitt. Denne tror man likevel er noe konservativ. En mer nøyaktig verdi for friksjonskoeffisienten vil kunne bidra til å gi en sikrere verdi for hvor lave oppspenningene i dekket kan være før det glipper.

Med bakgrunn i dette er hensikten med oppgaven er å gjøre undersøkelser på friksjonen mellom bjelkene i tverrspente dekker, for å skaffe mer erfaringer på hvordan denne opptrer. Det er spesielt ønskelig å øke kunnskapene rundt hvordan oppspenningene virker inn på friksjonskoeffisienten. Er det for eksempel store forskjeller mellom resultatene fra forsøkene og verdiene som allerede finnes for friksjonsparameterne kan dette ha betydning for dekkene ved at det blant annet er mindre behov for reoppspenning av spennstengene.

1.2 Metode

Opgaven har vært en fortsettelse av prosjektoppgaven [8] som ble gjennomført av undertegnede høsten 2017. Prosjektoppgaven ble utført som et forprosjekt der tidligere gjennomførte forsøk på friksjonen ble undersøkt. Fra disse erfaringene ble et forslag til gjennomføring av flere forsøk satt opp. Enkelte testgjennomføringer ble også utført for å få erfaringer på om de foreslåtte prosedyrene faktisk var gjennomførbare i praksis.

I masteroppgaven er det bygd videre på arbeidet fra prosjektoppgaven. Med dette menes det at erfaringene fra prosjektoppgaven, spesielt med tanke på oppsett og metoder for utførelse, er tatt med videre når mer omfattende undersøkelser av friksjonen er gjennomført. I arbeidet med masteroppgaven har derfor ikke planleggingen av hvordan

forsøkene skulle gjennomføres krevd mye tid. Dette har ført til at det i stedet har vært tid til å gjennomføre et større antall forsøk.

Gjennom masteroppgaven skal oppspenningenes innvirkning undersøkes ved gjennomføring av laboratorietester på oppspente treklosser. For å undersøke hvilke innvirkninger oppspenningene har for friksjonskoeffisienten skal både varigheten og størrelsen på disse varieres. Størrelsene på oppspenningene er bestemt å være 0,3 MPa, 0,6 MPa og 1,0 MPa. For å få til variasjonen med varigheten av oppspenningene skal prøvene lagres oppspente i ei uke før friksjonstestene gjennomføres. Fra prøvene spennes opp til de testes er det viktig at det ikke er glidninger eller bevegelse mellom klossene. For å ha et sammenligningsgrunnlag skal det også gjennomført to serier hvor friksjonstestene er utført umiddelbart etter at oppspenningene er påført.

Resultatene fra laboratorieforsøkene skal gi erfaringer rundt hvordan friksjonskoeffisienten endrer seg i forhold til de påsatte oppspenningene. Samtidig skal variasjonen med hvor lenge prøvestykkene er oppspente være med og gi kunnskaper om hvordan varigheten av oppspenningene innvirker på friksjonsparameteren. Trolig vil laboratorieforsøkene også gi mer resultater enn det som hovedsakelig var ønskelig å få ut av testene ved denne gjennomføringen. Disse observasjonene kan benyttes til videre arbeid, eller de kan gi inspirasjon til nye fenomener som det kan være av interessant å undersøke videre.

2 Teori

Siden prosjektoppgaven [8] var et forprosjekt i direkte tilknytning til masteroppgaven, er en stor del av den presenterte teorien i denne brukt som utgangspunkt for masteroppgavens teorikapittel.

2.1 Tre som materiale

Tre er et levende materiale, noe som resulterer i en komplisert oppbygning av dets struktur. Dette gir videre et bredt spekter av egenskaper, samtidig som det gir store variasjoner innen disse egenskapene. Egenskapene vil avhenge av hvilken art det enkelte individet tilhører, men det vil også kunne være store variasjoner for de ulike individene innen en art. Dette blant annet ettersom hvilket klima de ulike individene er utsatt for og hvilke forhold treet ellers har vokst opp under. Et resultat av dette kan være at hvert enkelt tre, til tross for like vekstforhold, vil ha noe variasjon i sine egenskaper [9].

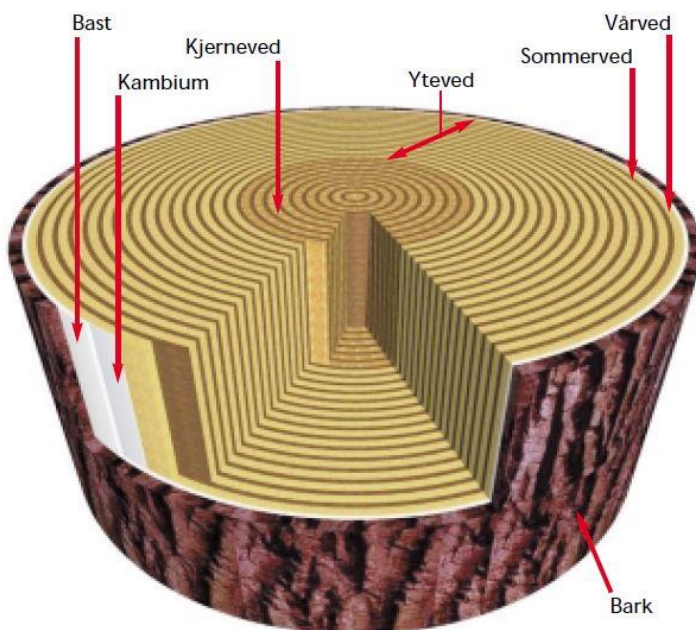
Materialeegenskapene gjenspeiler i stor grad hvilke krefter treet, som et naturlig materiale, har måttet tåle mens det vokste opp. De gode egenskapene treet har mot utmatting er et eksempel på dette, og kommer av at treet har måttet ha disse egenskapene for å holde seg oppe når det har blitt utsatt for mye vær og vind.

2.1.1 Oppbygning

Til tross for at det kan være store variasjoner mellom hvert tre, er det likevel noen hovedtrekk som går igjen. Ytterst finner man barken bestående av et beskyttende lag av døde celler [9]. Videre innover i treet kommet et lag av levende celler, basten, hvor byggestoffene transporteres. I de innerste delene av stammen er selve veden. Denne kan deles inn i yteved og kjerneved. Yteveden består av levende celler som bidrar til transport av vann og næring fra røttene og ut i treet. Kjerneveden utgjør den innerste delen av stammen og har som oppgave å mekanisk holde treet oppe. Margen, som kjerneveden utgjør, er laget av døde celler. Porene som forbinder disse cellene er i stor grad tettet igjen, noe som gjør denne veden lite permeabel. Den er derfor sein å tørke og vanskelig å impregnere. Samtidig

fører denne tette oppbygningen til at trevirket er hardere og mer varig slik at impregnering ikke er like nødvendig.

Deling og avsetting av nye celler skjer i kambiet, et lag mellom yteveden og basten, og er den prosessen som gjør at treet vokser [9]. Tykkelsen på celleveggene i cellene som avsettes, og dermed også tykkelsen på årringene, avhenger av klimaet. Årringene består av vårved og sommerved og viser treet vekst gjennom året. Bredden av årringene er med på å avgjøre trevirkets kvalitet.



Figur 2 - De ulike lagene i treet [9]

Veden er bygd opp av celler. Disse er igjen bygd opp av mikrofibriller som er lange kjeder av cellulose. Cellulosekjedene i form av mikrofibrillene ligger i hovedsak i primær- og sekundærveggen. I primærveggen er det lite system i hvordan fibrillene ligger, mens i sekundærveggen er det en tendens til ordning ved at mikrofibrillene er orientert på tvers av cellens lengderetning. Når cellene ligger ved siden av hverandre, vil fibrillene virke som langstrakte fiber og med det skape treet fiberretning. Mikrofibrillenes orientering vil ha innvirkning på krypegenskapene i trevirket.

Cellene i trevirket består av et innvendig hulrom. Celleveggen er omtrent like tung for alle typer tre i tørket tilstand. Forholdet mellom celleveggen og hulrommet er derfor det som avgjør trevirkets densitet. Denne vil ha en stor variasjon avhengig av arten.

De vanligste artene til benyttelse som konstruksjonsvirke er bartrærne gran og furu, klassifisert som soft wood (eller mjukved [1]). Gran (*Picea abies*) har en densitet på omkring $0,47 \text{ g/cm}^3$ ved en fuktighet på 15% [10], mens densiteten til furu (*Pinus sylvestris*) ved 15% fuktighet er $0,52 \text{ g/cm}^3$ [11]. Gran og furu ansees som likeverdige materialer, men siden furu har en mer åpen struktur er den lettere å impregnere. Dette gjør at det i hovedsak er furu som brukes til store utendørs byggverk. Løvtrærne er typisk hard wood eller hardved og har en noe høyere densitet.

En fordel med å benytte tre som byggemateriale er at det har stor styrke i forhold til vekten. Dette kan eksempelvis sees gjennom sammenligning av forholdet mellom styrke og densitet hos tre, stål og betong. En vanlig fasthetsklasse på konstruksjonsvirke er C30. Dette har en bruddstyrke ved bøyning på 30 N/mm^2 og fra NS-EN 338 [12] er det oppgitt at denne fasthetsklassen har en karakteristisk densitet på 380 kg/m^3 . Forholdet mellom densiteten og bruddstyrken til konstruksjonsvirke blir dermed 0,079. For betong i fasthetsklasse B30, og dermed bruddstyrke på 30 N/mm^2 og en densitet på rundt 2400 kg/m^3 [13] blir forholdet 0,0125. Bruddstyrken for stål S355 er på 355 N/mm^2 og densiteten ligger rundt 7850 kg/m^3 [14]. Forholdet for stål blir dermed 0,045. Fra dette kan det ses at forholdet mellom styrke og densitet er noe bedre for tre enn stål, og vesentlig bedre enn for betong.

2.1.2 Tre brukt som byggemateriale i bruer

Tre er et materiale som er benyttet over hele landet gjennom historien. Stavkirkene beviser at tre i tidligere tider ikke bare har blitt benyttet til eneboliger og mindre konstruksjoner, hvor ingeniørene ikke har en like stor rolle i planleggingen, men også til større konstruksjoner. Likevel ble tre som byggemateriale omtrent helt borte når stål og betong ble innført som byggematerialer under den industrielle revolusjonen.

Mot slutten av 1900- tallet fikk trevirket som materiale igjen en ny oppblomstring. Dette begynte med innføringen til limtre- og plateproduksjon. Utviklingen av disse produktene gjorde det blant annet mulig å lage bjelker med større tverrsnitt enn hva som var mulig av rent konstruksjonsvirke. Samtidig har limtre noe bedre styrkeegenskaper, samt mindre variasjon i disse [15]. Dette skyldes at feil i trevirket, eksempelvis som kvister, ikke vil virke over hele tverrsnittet på grunn av de ulike lamellene som limtreet er bygd opp av. Resultatet er et sikrere materiale. Fingerskjøting gjorde det i tillegg mulig å lage så lange bjelker man måtte ønske. Kombinasjonen av disse faktorene gjorde det dermed mulig å lage konstruksjoner med lenger spenn.

Til de større spennene krevdes likevel kunnskaper om hvordan disse store delene kunne settes sammen på en god måte, blant annet for å unngå knekking. Til OL på Lillehammer og konstrueringen av de store idrettshallene ble derfor knutepunktsteorier utviklet [16]. Etter at OL var ferdig innså man at disse samme teoriene også kunne benyttes til konstruksjon av større vegbruer. Med bakgrunn i denne teoriutviklingen ble det gjort store fremskritt innenfor fagfeltet trekonstruksjoner, og et resultat av dette er at de siste 20 årene er bygget et betydelig antall bruer av tre.

En av grunnene til den store bruken er den gode tilgangen til materialet gjennom alle tider. I gamle bygninger, hvor det er gjort undersøkelser på det benyttede tømmeret, viser resultatene at materialene i stor grad har lokal opprinnelse.

I tillegg har materialet den fordel at det er lite tidkrevende på byggeplass. Elementene som skal benyttes i de større konstruksjonene er i stor grad tilvirket og satt sammen på fabrikk. Deretter leveres elementene som større deler til byggeplassen hvor de kan heises direkte på plass. Sammenføyingene har som regel enkle utforminger slik at delene er lette å sette sammen under monteringen, samtidig som det gir god oversikt på hvordan kreftene oppfører seg i konstruksjonen. Denne raske metoden å bygge på er mulig grunnet treets lave densitet i forhold til styrken, og er en betydelig fordel for trevirket som materiale. Disse faktorene var samtidig avgjørende for at tverrspente dekker, og dermed tre som byggemateriale i bruer, ble økonomisk konkurransedyktig i forhold til bruk av andre materialer [1].

Siden tre igjen ble tatt i bruk som materiale i bruer fra midten av 1990- tallet har det blitt bygd mange forskjellige typer trebruer. Det er i all hovedsak plasseringen av bæresystemet som gjør bruene forskjellige, samt hvorvidt brubanen og bæresystemet er sammenfallende eller ikke [4]. I Norge i dag er praksisen at bruenes bæresystem skal være utformet enklest mulig og helst med så få knutepunkter som mulig. Grunnen til dette er at det er knutepunktene som er de dyreste delene av brua, samtidig som de utgjør en risiko med tanke på oppsamling av smuss og vann, noe som på sikt vil kunne føre til fuktskader og råte. Samtidig skal en enkel utforming av bæresystemet gjøre det enklere å se hvordan kreftene beveger seg gjennom konstruksjonen.

2.1.3 Tre i et miljøperspektiv

Tre som materiale er en fornybar ressurs og et miljøvennlig materiale. Med dette siktes det blant annet til treets evne til å benytte karbondioksid (CO_2) som næring gjennom fotosyntesen [17]. Til denne prosessen bindes dermed karbondioksidet, som anses som en klimagass, i treet. Denne vil ikke bli frigjort igjen før treet brytes ned, enten gjennom råtning eller ved at trevirket brennes. Hele den tiden trevirket benyttes som byggemateriale vil derfor CO_2 være lagret i materialet. Hvis man da samtidig passer på å opprettholde et aktivt

skogbruk ved å plante nye trær vil det totale karbonet som lagres kunne økes. Samtidig vil ung skog kunne absorbere mer karbondioksid enn eldre skog [17], noe som forsterker karbonlagringen ytterligere.

Ved riktig behandling og bruk vil treet som materiale samtidig ha svært god holdbarhet. I tillegg vil materialene kunne brukes opp igjen, enten som råmateriale i nye produkter som eksempelvis plater eller papir, eller til produksjon av energi.

Tilvirkning av trevirket er heller ikke en spesielt energikrevende prosess. Den delen som krever mest energi er tørkeprosessen [17]. Til denne prosessen vil likevel treet egne biprodukter kunne benyttes som brensel til energiproduksjonen. Produksjonen av denne energien vil derfor kunne betraktes som CO₂- nøytral, siden karbondioksidet som dannes ved forbrenningen uansett ville gått tilbake til gassform som en del av karbonsyklusen.

At tre er et lett tilgjengelig materiale her til lands, og at det i tillegg er lett å forme og transportere, er en annen miljømessig fordel med materialet.

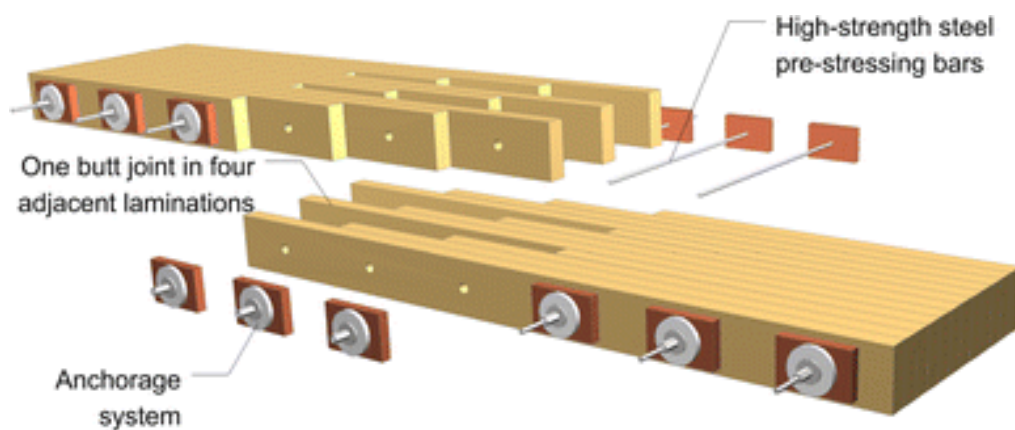
2.2 Tverrspente lamelledekker

En type trebru som har blitt vanlig å benytte for kortere spenn er platebruene. I disse bruene er bæresystemet i form av det tverrspente dekket sammenfallende med vegbanen. Dette gir lav byggehøyde, noe som samtidig gjør at disse brutypene egner seg best for kortere spenn [4]. Dekkene i platebruene kan også være laget av limte, dette gir mulighet for noe lenger spenn siden dette gir mulighet for benyttelse av større tverrsnittshøyder i brudekket. Ønskes det ytterligere lenger spenn kan de tverrspente dekkene kombineres til bjelkebruer eller kassebruer.

2.2.1 Oppbygning

Tverrspente lamelledekker består av bjelker plassert ved siden av hverandre, som regel på høykant, og som er holdt sammen ved benyttelse av stålstag [7]. Bjelkene som benyttes er hovedsakelig av limtre da disse vil kunne tillate større dimensjoner og med det gi mulighet for lenger spennvidder. Likevel kan også rent konstruksjonsvirke benyttes [1]. Hvorvidt de motstående bjelkesidene skal være høvlede eller kun saget er det ikke noe krav om i Eurokode 5 del 2 om bruer. Det som derimot er avgjørende for at dekket skal kunne defineres som et tverrspent dekke i forhold til punkt 1.5.2.3 i standarden, er at bjelkene skal holdes sammen ved forspenning. Forspenningen, i form av en permanent trykkraft [18], er påført lamellene ved jevnt plasserte stålkabler som er ført gjennom limtrebjelkene og som spennes opp med muttere. For å få overført kreftene best mulig fra mutterne til treet benyttes stål- eller aluminiumsplater til forankring, se figur 3. Friksjonen som skapes mellom lamellene på grunn av sammenpressingen bidrar til at lastoverføring skjer mellom bjelkene. Dekket vil dermed oppføre seg som en ortotrop plate [7].

For å hindre vann og annet smuss å komme ned i dekkeplaten og føre til fuktskader i trevirket eller korrosjon i stålet, legges det en tett membran over trevirket før slitelaget av asfalt legges på toppen.

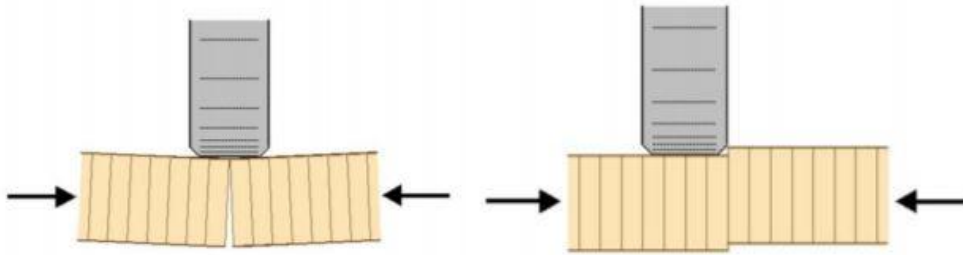


Figur 3 - Illustrasjon på et tverrspent dekkeelement [19].

2.2.2 Bruddmekanismer

I de tverrspente dekkene er det friksjonen som oppstår mellom lamellene i dekket på grunn av påsatte spenninger som skaper samvirke og dermed gir en dekkeoppførsel. Friksjonens størrelse er bestemt av oppspenningen. For liten friksjon vil kunne resultere i at bjelkene i dekket beveger seg i forhold til hverandre og med det skaper glipper. Dette kan føre til at asfaltlaget på dekket sprekker opp og at den vanntette membranen mellom asfalten og dekket ødelegges. Videre vil dette kunne gjøre det mulig å få direkte kontakt mellom tredekket og vann, noe som skaper en fare for at trevirket blir fuktig og råtner. Vann i dekket vil likevel ikke bare være ødeleggende for trevirket. Stålet i dekket vil også kunne skades da vannet vil gi et bedre miljø for korrosjon.

Med bakgrunn i dette kreves det fra Eurokode 5 – del 2 at forspenningene er slik at de forhindrer at glipp eller glidninger mellom lamellene oppstår. De to vanligste bruddmekanismene, og som det derfor er størst bekymringer for, er vist i figur 4.



Figur 4 – Brudd i dekkeplaten på grunn av for lite oppspenning. På illustrasjonen til venstre oppstår glipper i underkant av dekket, mens i høyre illustrasjon oppstår glidning mellom lamellene på grunn av for liten friksjon [1].

Den første bruddmekanismen viser hva som forventes at skjer om dekket utsettes for store momenter i brudekkets tverretning. Store belastninger på oversiden av brudekket, eksempelvis fra biler som kjører over brua, vil kunne gi store momentkrefter slik at bjelkene i dekket vil gli fra hverandre i underkant [20].

For å forhindre dette, vil den nødvendige forspenningen kunne settes opp som:

$$F_{PS} > \frac{6 \cdot M_T}{h} \quad (2.1)$$

M_T er her det største momentet som opptrer på tvers av dekkets lengderetning i det mest påkjente tverrsnittet, og oppgis som momentpåkkjenning per lengdeenhet i bruas kjøreretning. Momentpåkkjenningen divideres på brudekkets tverrsnittshøyde, h . Resultatet F_{PS} betegner dermed den nødvendige spenningen mellom lamellene for at slipp i underkant av dekket ikke skal oppstå.

En annen mulig bruddmekanisme, vist gjennom illustrasjonen til høyre i figur 4 ovenfor, vil være at det oppstår glidninger mellom lamellene [1]. Ved for liten oppspenning vil friksjonen mellom lamellene i dekket kunne bli så liten at trykkreftene fra bilene på bjelkelamellene blir større enn friksjonskreftene som skal holde bjelkene sammen til en plate. Et resultat av dette vil da være at bjelkene glir i forhold til hverandre og fører til deformasjoner i brudekket. For å hindre disse deformasjonene er en minimumsgrense for oppspenningen gitt i standarden.

Kravet for at bruddgrensetilstanden med hensyn på glidning mellom lamellene skal være oppfylt er gitt av ligning 6.5 i NS-EN 1995-2 [18].

$$F_{V,Ed} \leq \mu_d \cdot \sigma_{p,min} \cdot h \quad (2.2)$$

Her er $F_{V,Ed}$ skjærkraften som virker på dekket på grunn av de påsatte lastene. Dette kan eksempelvis være en bil som kjører over brua. Videre er μ_d den dimensjonerende friksjonskoeffisienten og $\sigma_{p,min}$ er forspenningstrykket som er igjen etter lang tid. Verdien for h er gitt av lamellenes høyde, altså platetykkelsen.

Alternativt kan den nødvendige forspenningen bestemmes ved:

$$F_{PS} > \frac{V_T}{\mu} \quad (2.3)$$

Som for bestemmelsen av forspenningen på grunn av momentpåkjenninger, betegner F_{PS} her den nødvendige forspenningen for at utglidninger ikke skal inntreffe. V_T er skjærkreftene som virker på tvers av brudekkets lengderetning ved det mest påkjente tverrsnittet i dekket. Kraftene er gitt som kraft per lengde av brudekket. Den siste parameteren, μ , er friksjonskoeffisienten. Denne har en fast verdi og er med på å bestemme hvor stor motstanden mot glidning mellom flatene er. Størrelsen på friksjonskoeffisienten er gitt av en egen tabell i eurokoden.

Forspenningene fra disse beregningene må til slutt kontrolleres mot minimumsgrensen for oppspenningen gitt av Eurokode 5 – del 2 [18]. Denne sier nemlig at forspenningskraften i dekket, σ_p , uansett må være større enn 0,35 MPa.

Plassering av skjøter vil også være et viktig moment for å unngå store svekkelser i brudekket. Fra Eurokode 5 – del 2: bruer 6.1.2 (10) er det oppgitt at det ikke kan være mer enn en buttskjøt for hver fjerde lamell innenfor en gitt lengde [18]. Den gitte lengden avhenger av avstanden mellom forspenningsstagene og tykkelsen av lamellene som forspennes og settes til maksimalt 1,2 meter. Grunnen til denne begrensningen er at det ikke vil være mulig å overføre krefter og momenter i skjøtene. Skjøtene vil derfor kunne ansees som svake punkter og mange slike svakheter over et tverrsnitt vil være uheldig.

2.2.3 Utviklingen av tverrspente dekker

Det første tilfellet av oppspente trelaminatbruer ble prøvd ut på midten av 1970- tallet i Canada [21]. Oppspenningen ble gjennomført som et forsøk på Hebert Creek Bridge, som egentlig var tenkt erstattet på grunn av store deformasjoner i det spikrede tredekket og medfølgende ødeleggelser i asfalten. Gjennomføringen gikk ut på at det ble satt opp stålkabler på oversiden og undersiden av brudekket. Deretter ble kablene strammet opp slik at bjelkelamellene i dekket ble klemt sammen. Resultatet var så effektivt at erstatning av brua ikke lenger var nødvendig.

Etter dette forsøket ble det drevet videre forskning på oppspenningen og hvordan denne mekanismen kunne benyttes videre i andre, både nye og gamle, bruer [21]. Et resultat av dette fikk man se i løpet av 1980- tallet da de første nye bruene med tverrspente lamelledekker ble bygget både i Canada og USA. Samtidig begynte også Europa, med Sveits i spissen, å benytte denne metoden til restaurering av gamle bruer og bygging av nye bruer.

De siste årene har bruken av oppspente dekker økt også i de nordiske landene. I Norge ble det første tverrspente dekket bygget for omtrent 20 år siden. Hittil utgjør dette bare en femdel av bruers forventede levetid. Det er derfor fortsatt lite erfaringer med hvordan disse vil oppføre seg etter lenger tid og hvordan holdbarheten av disse dekkene egentlig er. Likevel skal det presiseres at det gjøres kontinuerlige målinger i noen av de allerede bygde dekkene og at erfaringene fra disse målingene hittil er gode [4].

2.2.4 Ulike tverrsnitt

Lamellenes høyde og lengde er selvfølgelig de avgjørende parameterne for spennene av det spenningslaminerte dekket [5]. Det lengste mulige spennet for dekkene når de er laget av limtre eller vanlig konstruksjonsvirke og med maksimal nedbøyning på $L/400$, er gitt av ligningen:

$$L = (t - 120) \cdot 30 \quad (2.4)$$

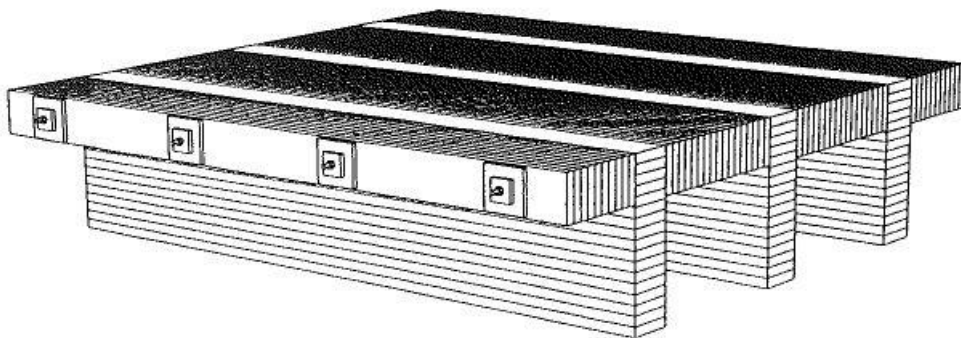
hvor t er platetykkelsen.

Det er vanlig å benytte limtrebjelker med opptil 600 mm høyde, og med det en dekkehøyde på 600 mm. Dette resulterer i at de tverrspente dekkene kan ha en spennlengde på mellom 15 og 20 meter. Ønskes det lenger spenn kan dette gjøres gjennom mer avanserte tverrsnitt. Det som derimot er en ulempe ved disse mer avanserte tverrsnittene er at de er mer kompliserte å tilvirke.

T- tverrsnitt

En naturlig overgang for brubanen ettersom spennviddene blir større vil være å gå fra å være en ren platebru til å være en bjelkebru. Med dette menes at det legges inn høyere bjelker i brubanens kjøreretning og det deretter legges et dekke på disse bjelkene.

Alternativt kan det fortsatt benyttes tverrspente dekker. Dette gjøres da ved at dekket legges ovenpå tverrbærere som igjen ligger på bjelker i bruas lengderetning. Ulempen med denne løsningen er at byggehøyden for brua blir nokså stor [4]. En bedre løsning for benyttelsen av tverrspente dekker i bjelkebruer er derfor å bygge opp dekket til å ha et T-tverrsnitt, illustrert i figur 5.



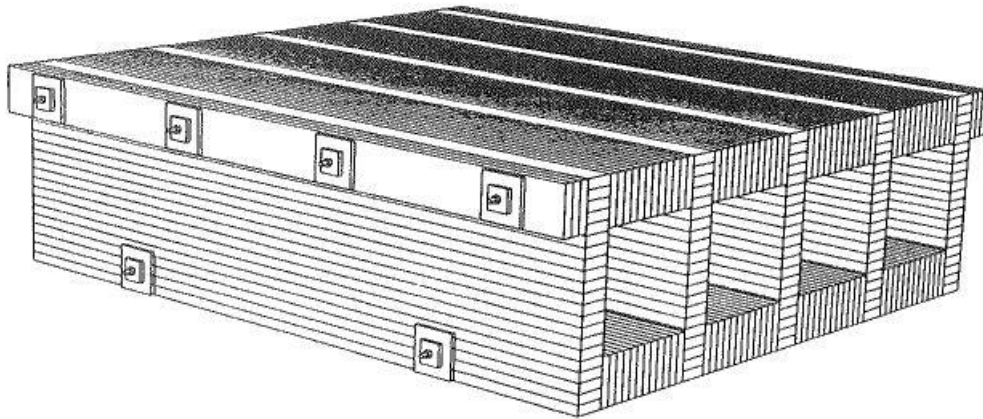
Figur 5 - Eksempel på bjelkebru med T- tverrsnitt

T- tverrsnittene lages ved å regelmessig putte inn noen høyere bjelker mellom bjelkene med «normal høyde» i dekket. De høyere bjelkene plasseres slik at de flukter med de mindre bjelkene i dekkets overkant, og spennes så sammen med stålstenger til et tverrspent dekke. Gjennom dette oppnås et større tverrsnitt som spenningene kan fordeles utover. Dette blant annet gjennom at dekket i tillegg til å være kjørebane vil virke som overflenser i bjelkene. Samtidig blir ikke dekket like massivt og materialkrevende, slik at det fortsatt kan opprettholde det gode forholdet mellom masse og styrke. For vegbruer kan man benytte spenn opp mot 10 meter med disse tverrsnittene, mens i fotgjengerbruer kan spenn på opptil 15 meter konstrueres [5].

Kassetverrsnitt

Kassetverrsnittene eller kassebruer er en annen type av de tverrspenne dekkene. Disse har som for T- tverrsnittet jevnlig høyere bjelker plassert i dekkets tverretning. I tillegg er det i disse dekkene også tverspenne plater mellom bjelkene i underkant av dekket, vist i figur 6. Dette gjør dekket stivere mot torsjon, siden bruplaten dermed blir bestående av lukkede rom [4].

Samtidig vil dette ekstra arealet i bunnen av brutverrsnittet være med å gi et ytterligere større arealmoment grunnet det ekstra arealet. Dette vil videre resultere i økt stivhet og bøyekapasitet. En betydning av dette vil være at dersom det er gitt at et dekke skal tåle en bestemt last, vil et dekke med T- tverrsnitt måtte ha en større høyde enn dekket med kassetverrsnittet. Alternativt kan spennet være lenger for kassebrua enn for bjelkebrua dersom høyden er satt til å skulle være den samme for begge brutypene.



Figur 6 - Eksempel på kassebru

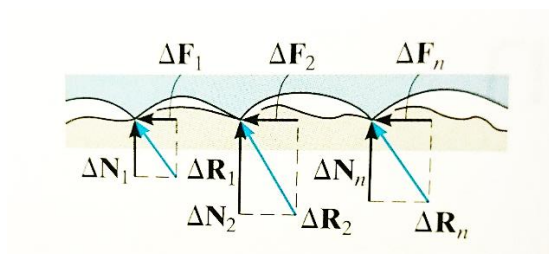
Det gode forholdet mellom dekkeshøyde og bruspen gjør at disse dekkene kan brukes til spenn mellom 9 og 25 meter for trafikkerte bruer uten at tverrsnittshøyden blir alt for stor [5]. For fotgjengerbruer kan spennet være opp mot 30 meter.

Bruken av kassebruer er lite utprøvd i Norge. I enkelte delstater i USA er bruken av denne brutypen derimot mer utbredt. Feltmålinger gjort på to av disse typen bruer i West Virginia ga gode resultater og viste utmerkede bruksegenskaper [4].

2.3 Friksjon

Friksjon er en motstand som oppstår når to flater glir eller forsøker å gli i forhold til hverandre [22]. Denne vil virke som en kraft i motsatt retning av bevegelsen, eller den forsøkte bevegelsen, til et legeme som flytter seg langs en flate. Friksjonskraften vil samtidig virke tangensialt på denne flaten. For de oppspente lamelledekkene vil friksjonskreftene opptre mellom bjelkene i dekket. Når en kraft settes på en av bjelkene i det oppspente dekket, vil denne bjelken oppleve at den forsøkes trykket ned. Bjelken forsøker dermed å gli i forhold til bjelkene ved siden av, og som en reaksjon på dette oppstår det en friksjonskraft langs bjelkens sideflater. Denne friksjonskraften forsøker å hindre denne utglidningen.

Selv om overflatene som glir mot hverandre med det blotte øye ser jevne og glatte ut, vil de på molekylærnivå være svært ujevne [23]. Disse ujevnheterne fører til at det skapes sterke molekylære krefter i hvert av punktene i flatene som er i kontakt med hverandre, se figur 7. Totalen av disse mange kreftene fra ujevnheterne danner friksjonskraften mellom disse overflatene [22].



Figur 7 - Friksjon skapes på grunn av små ujevnheter på flatene som glir mot hverandre [22]

2.3.1 Statisk og kinematisk friksjon

Det er flere typer av friksjon. Til å begynne med er det vanlig å skille mellom tørr friksjon og friksjon i fluider. Når det er snakk om friksjonen mellom to harde overflater, som for eksempel mellom to trebjelker, er det snakk om tørr friksjon [22]. Typisk for tørr friksjon er at vi kan dele den opp i statisk friksjon, også betegnet som hvilefriksjon, og kinematisk friksjon, ofte betegnet som glidefriksjon.

Statisk friksjon oppstår når man forsøker å dytte på en gjenstand som ligger på en flate, men denne ikke flytter seg [24]. For tilfeller hvor det forsøkes å dytte på noe, vil den motvirkende friksjonskraften alltid være like stor som kraften som benyttes for å dytte på legemet, så lenge det som dyttes på ligger i ro. Etter hvert vil man nå en maksimal kraft og gjenstanden begynner å bevege seg. Denne utløsende kraften kan bestemmes om man vet gjenstandens normalkraft, altså kraften gjenstanden virker på underlaget med. Dette fordi denne kraften vil utgjøre en andel av normalkraften hvor denne andelen er gitt ved friksjonskoeffisienten. Uttrykket for den største mulige statiske friksjonskraften, og med det også den utløsende kraften, kan settes opp som:

$$R_s = \mu_s \cdot N \quad (2.5)$$

Hvor R_s er friksjonskraften, N er normalkraften og μ_s er forholdstallet mellom disse kreftene, kalt friksjonsfaktoren eller friksjonskoeffisienten.

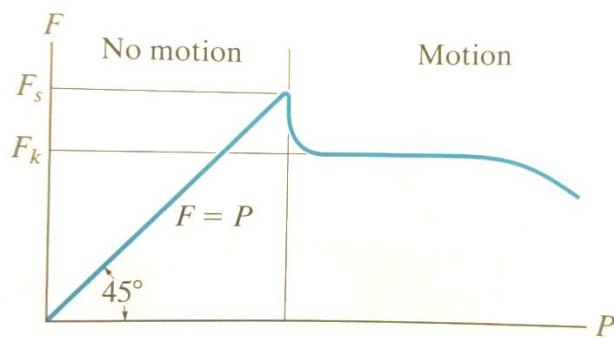
Glidfriksjonen bestemmes etter samme ligningen, altså som en andel av normalkraften. Det som imidlertid har forandret seg for den kinematiske friksjonen er at friksjonskoeffisienten har blitt noe mindre. Dette skyldes at det nå er bevegelse mellom de to overflatene, slik at det øvre planet i større grad «flyter» på underlaget. Et resultat av dette er at kraften som trengs for å få glidning mellom flatene, vil være mindre enn rett før flatene begynte å gli.

Den kinematiske friksjonen kan altså settes opp som:

$$R_k = \mu_k \cdot N \quad (2.6)$$

Hvor R_k er den kinematiske friksjonen, N er normalkraften som skapes av at legemet er i kontakt med overflaten og μ_k er den kinematiske friksjonskoeffisienten.

Hvordan friksjonen endrer seg ettersom hvilken kraft som dytter på gjenstanden er vist i figur 8. Fra denne kan det sees at friksjonen øker jevnt med at skyvekraften øker så lenge gjenstanden forblir i ro, men at så fort gjenstanden kommer i bevegelse blir friksjonen konstant ved videre økning av forskyvningskraften.



Figur 8 - Friksjonskraften som funksjon av forskyvningskraften [22]

2.3.2 Verdier for friksjonskoeffisienten fra litteraturen

Friksjonskoeffisienten mellom to flater av tre er i fysikkbøkene fra videregående oppgitt som 0,3 [25]. Gjennom emnet TFY4106 fikk vi av førsteamanuensis Jon Andreas Støvneng [26] presentert den statiske friksjonen for to treoverflater i kontakt med hverandre som en verdi mellom 0,25 og 0,50, mens den kinematiske friksjonskoeffisienten ble oppgitt til 0,2. I Hibbeler sin mekanikkbok presenteres den statiske friksjon for tre mot tre som en verdi mellom 0,30 og 0,70. Det viser seg altså at det er store variasjoner i hvilke friksjonsfaktorer som benyttes for friksjon mellom tre. En av de største grunnene til denne store variasjonen i verdi for friksjonskoeffisienten er at forsøkene for å finne disse parameterne har vært gjennomført under ulike forhold. For å få en bedre forståelse av hvilke parametere som spiller inn på bestemmelsen av friksjonsparameteren til tre, gjennomførte studenten Kalbitzer omfattende undersøkelser på dette gjennom sin masteroppgave. Resultatet av dette viste blant annet at friksjonskoeffisienten mellom to treoverflater i stor grad påvirkes av treets vanninnhold[21].

I Eurokode 5 del 2: bruer (NS-EN 1995-2) er friksjonskoeffisientene som benyttes for spennlaminerte dekkeplater gitt av tabell 1. Friksjonsparameteren kan bestemmes ved benyttelse av tabellen hvis man vet lamineringsoverflatens ruhet, hvilken retning forskyvningen går og fuktighetsinnholdet i trevirket. For fuktigheter mellom de to grensene benyttes interpolasjon.

Tabell 1- Friksjonsparametre for lameller i tverrspente dekker gitt i Eurokode 5, del 2: bruer [18]

Ruhet på lamineringsoverflaten	Vinkelrett på fiberretningen		I fiberretningen	
	Fuktighetsinnhold	Fuktighetsinnhold	Fuktighetsinnhold	Fuktighetsinnhold
	≤ 12 %	≥ 16 %	≤ 12 %	≥ 16 %
Skurlast mot skurlast	0,30	0,45	0,23	0,35
Høvellast mot høvellast	0,20	0,40	0,17	0,30
Skurlast mot høvellast	0,30	0,45	0,23	0,35
Trevirke mot betong	0,40	0,40	0,40	0,40

2.4 Friksjon i tverrspente brudekker

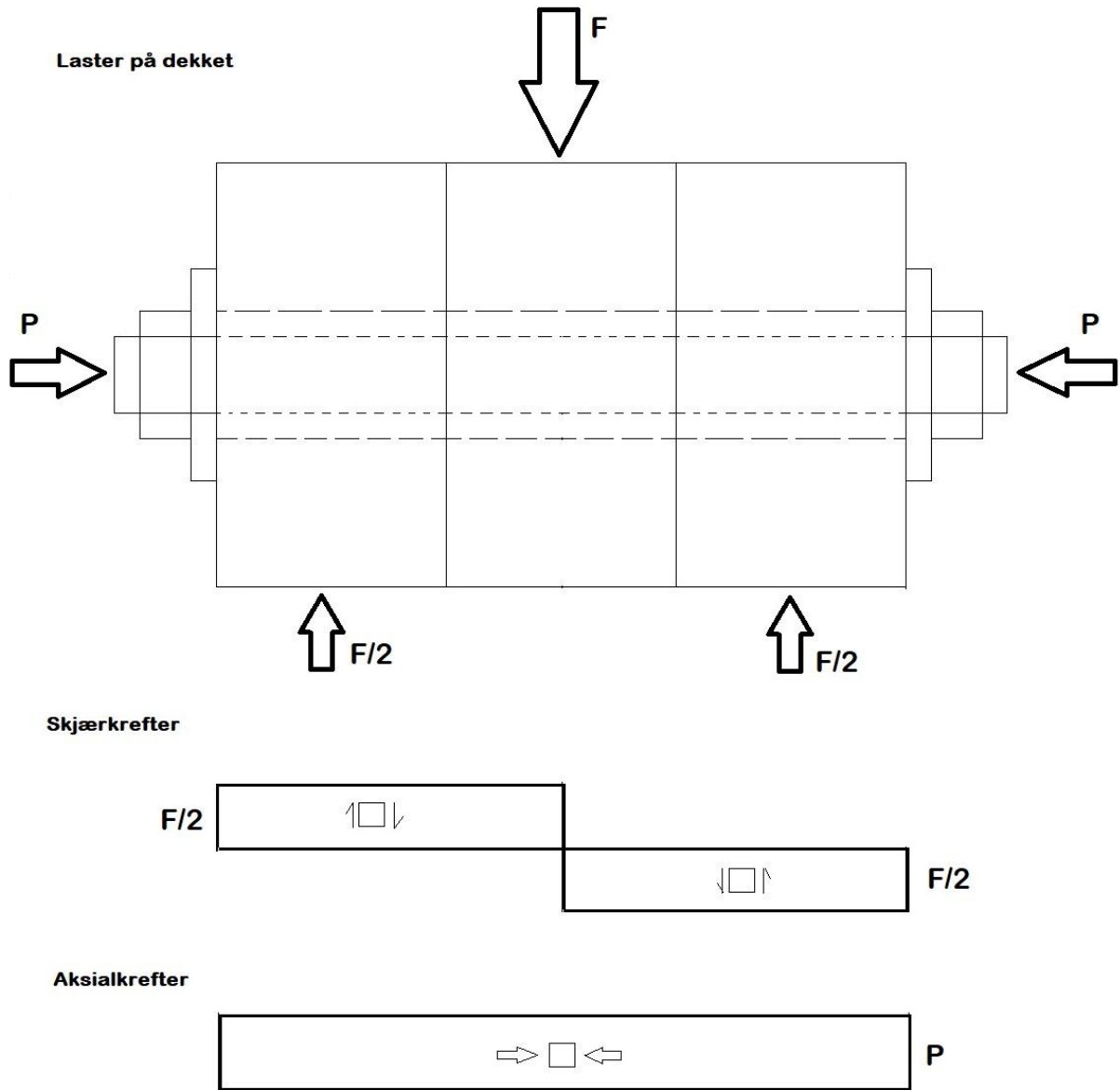
Det tverrspente dekket er spent opp av stålkabler, noe som fører til at det oppstår et trykk i trebjelkene i horisontalretningen. Videre vil ferdsel på brudekket, eksempelvis ved biler som kjører over det, føre til at bjelkene utsettes for vertikale krefter. Disse lastene vil resultere i skjær- og momentpåkjenninger. For at bjelkene skal virke sammen som en plate må friksjonskreftene som virker mellom dem derfor være større enn skjærkreftene som opptrer i plata på grunn av lastene på brudekket.

I figur 9 på neste side er det tatt utgangspunkt i oppsettet som skal benyttes i forsøkene med testing av friksjonen. Her er oppspenningskreftene påført ved en stålbolt som er ført gjennom tre klosser av tre. Videre er det påført en vertikal kraft sentrisk på den midterste av klossene. Denne kraften har som formål å få midtklossen til å gli i forhold til de to ytre klossene. De tre oppspente klossene utgjør prøvestykket og er opplagt på de ytre klossene. Lastvirkningene for aksial- og skjærkreftene er illustrert under figuren for oppsettet.

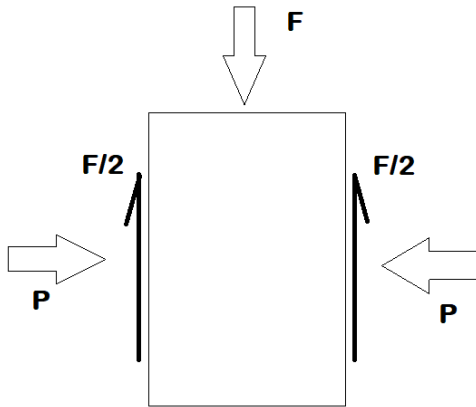
Kreftene som virker på den midterste av klossene er illustrert i figur 10. Av denne kan det ses at skjærkreftene virker jevnt på hver sin side av klossen grunnet den sentriske lasten. For å bestemme den statiske friksjonskoeffisienten for glidning mellom treflatene, settes friksjonskraften lik skjærkraften som virker på den ene av klossens flater.

$$R = \frac{F}{2} \quad (2.7)$$

Her betegner R friksjonskraften som opptrer som en motstandskraft på grunn av forsøkt forskyvning av klossen. Forskyvningskraften er $F/2$ siden kraften F som virker sentrisk på klossens topp fordeles jevnt som skjærkrefter over de to friksjonsflatene i klossen. Denne kraften samsvarer samtidig med kreftene som virker i hvert av de to oppleggene.



Figur 9 - Kraftene som virker i et tverrspent dekke, med lastvirkningsdiagrammer for skjær- og aksialkrefter



Figur 10 - Kreftene på midtklossen

Fra tidligere har vi at den statiske friksjonskraften er gitt som en andel av normalkraften som virker på flaten. I dette tilfellet vil normalkraften på flaten være gitt som oppspenningen, P , til dekket. Den statiske friksjonskraften fås derfor som:

$$R = \mu_s \cdot P \quad (2.8)$$

Her er R fortsatt friksjonskraften mellom flatene som glir og μ_s er den statiske friksjonskoeffisienten. Siden friksjonskraften allerede er bestemt som halvparten av vertikallasten kan friksjonskoeffisienten bestemmes ved omforming av ligningen.

$$\mu_s = \frac{R}{P} = \frac{F/2}{P} = \frac{F}{2 \cdot P} \quad (2.9)$$

Hvor R er friksjonskraften som utgjorde halvparten av den sentrisk plasserte vertikallasten på midtklossen, F , og P er oppspenningskraften.

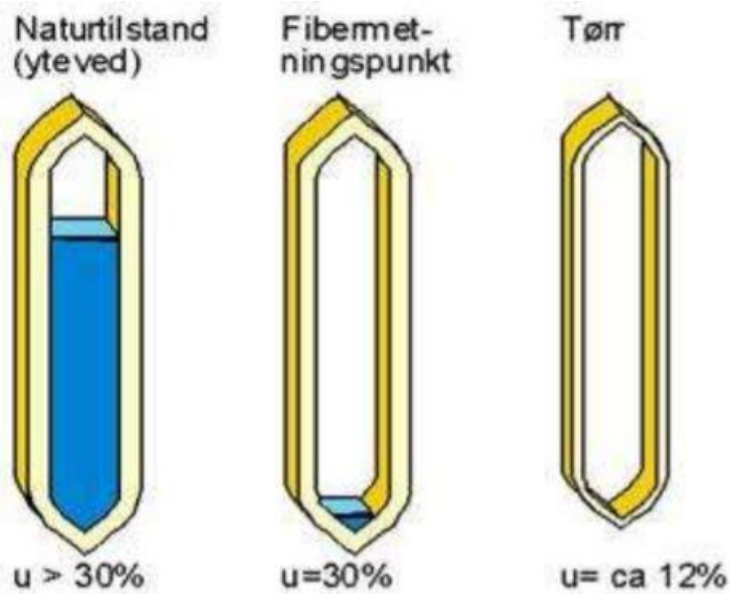
2.5 Kryp i tre

Kryp er et komplekst fenomen som etter en lenger periode vil resultere i endrede dimensjoner på det som er bygget. I trevirke vil endringene i dimensjoner i hovedsak oppstå grunnet endringer i fuktighet eller som et resultat av laster som virker på konstruksjonen over lengre tid [27]. Kryp på grunn av langtidslaster er særlig typisk i komposittmaterialer, som tre og betong. Kryp og svelling på grunn av endringer i temperatur kan også forekomme. Dette er imidlertid mer gjeldende for metaller, som eksempel stål, siden disse har en større varmeutvidelseskoeffisient.

I tverrspente dekker vil spenningene påvirkes av kryp på spesielt tre måter [4]. Trevirket vil krype og svulle ettersom hvordan fuktigheten i lufta endres. Samtidig vil trevirket krype ytterligere på grunn av den konstante trykkraften som virker på dekket i form av oppspenningen. I tillegg vil stålet som gir oppspenningene påvirkes av dekketemperaturen, og med det krype eller utvide seg blant annet ettersom hvilken årstid det er.

2.5.1 Kryp på grunn av endringer i fuktighetsinnhold

Når treet betegnes som et levende materiale, siktes det blant annet til trevirkets kryp- og svelleegenskaper ved endret fuktighet. Treet er, som tidligere beskrevet, bygd opp av hule celler. Disse har i stor grad fibrillene orientert i samme retning som treet's lengderetning, og gir med det treet's fiberretning [9]. Det er fibrillenes orientering i forhold til treet's lengderetning som avgjør hvor store dimensjonsendringer som oppstår. Er eksempelvis cellene orientert slik at vinkelen mellom fibrillene og lengderetningen er stor, så vil dimensjonene i lengderetning endres mer ved tørking av trevirket enn om disse to retningene var samsvarende. Ved samsvarende retninger vil derimot dimensjonsendringene i radial- og tangensialretningen bli større. Dette kommer av at vannet i trevirket lagres mellom fibrillene. Ved mye vann i treet vil derfor fibrillene være skjøvet langt fra hverandre. Ettersom treet tørker vil avstanden mellom fibrillene bli mindre og treet krype. Avstanden mellom fibrillene på grunn av vannet, vil igjen påvirke tykkelsen av veggene i cellene, og være det som resulterer i økte bjelke dimensjoner.



Figur 11 - Vann i celler ved forskjellig fuktighetsinnhold[28]

Mens treet står i skogen vil hulrommene i cellene være fylt med vann som skal transporteres ut til bladene. I denne tilstanden er vanninnholdet i treet på over 30% [1]. Når trærne så kappes ned for å kunne benyttes til materialer blir de først lagt til tørking. Ved fuktighet på 30% er fibermetningspunktet til cellene nådd, se figur 11. Det betyr at det ikke lenger er noe fritt vann i cellene, men at det resterende vannet er bundet i celleveggene. Ved dette punktet vil celleveggene være på sitt tykkeste. Etersom tørkeprosessen fortsetter vil celleveggene og med det også trevirkets dimensjoner krype. Når trevirket har en fuktighet på omtrent 12 % er likevektsfuktighet oppnådd og trevirket regnes som tørt. En likevektsfuktighet på 12% betyr at materialet oppfyller likevektsbetingelsene med en temperatur på 20°C og relativ fuktighet på 65% for de omkringliggende omgivelsene.

Krypet og svellingen i trevirket på grunn av endring i fuktighetsinnhold vil være størst i tangentiell retning, altså tangentielt på årringene[1]. I denne retningen kan endringen være helt oppe i 8% fra fibermetningspunktet til trevirket er tørt. Den radielle endringen er omtrent halvparten, med 4%. Endringen i lengderetningen er betydelig mindre med 0,3% endring mellom fibermettet og tørt trevirke.

Siden dimensjonene av trevirket avhenger av fuktigheten, betyr det at om det er endringer i klimaet brudekket utsettes for, så vil dette virke inn på hvor stor spenning som opptrer i stålkablene. Forspenningen er mye mer sensitiv for endring i vanninnhold enn ved endring i temperatur. En økning på 1-2 % i vanninnholdet vil kunne resultere i at flytegrensen til stålkablene nås [5]. På grunn av dette er det viktig at bjelkene som skal benyttes i dekket har omtrent riktig fuktinnhold når de spennes opp. Dette fuktighetsnivået bør være litt under det gjennomsnittlige fuktighetsinnholdet i utendørsklimaet der konstruksjonen skal stå.

Mulige utfall ved for stor oppstramming kan være følgende. Dersom dekket er strammet opp litt for stramt ved tørre forhold og brua deretter utsettes for høyere fuktighet, vil dette være uheldig. Dette fordi lamellene i brudekket vil utvide seg og føre til ytterligere spenninger i stålkabelen. Resultatet vil da kunne bli at stållplatene presses inn i de ytterste lamellene av dekket og gir lokale deformasjoner og ødeleggelser i trevirket[5]. Et annet utfall kan være at stålkablene utsettes for så store spenninger at det oppstår flyt i dem. Når det igjen blir tørrere i lufta vil kablene da beholde sin nye lengde, siden flyt fører til permanente deformasjoner, samtidig som lamellene i brudekket vil krype. Dette vil igjen føre til lavere oppspenning og resultatet kan være at plateoppførselen i dekket opphører. Med bakgrunn i dette er det derfor viktig å passe på at oppspenningen ikke er for stor.

2.5.2 Kryp på grunn av langtidslaster

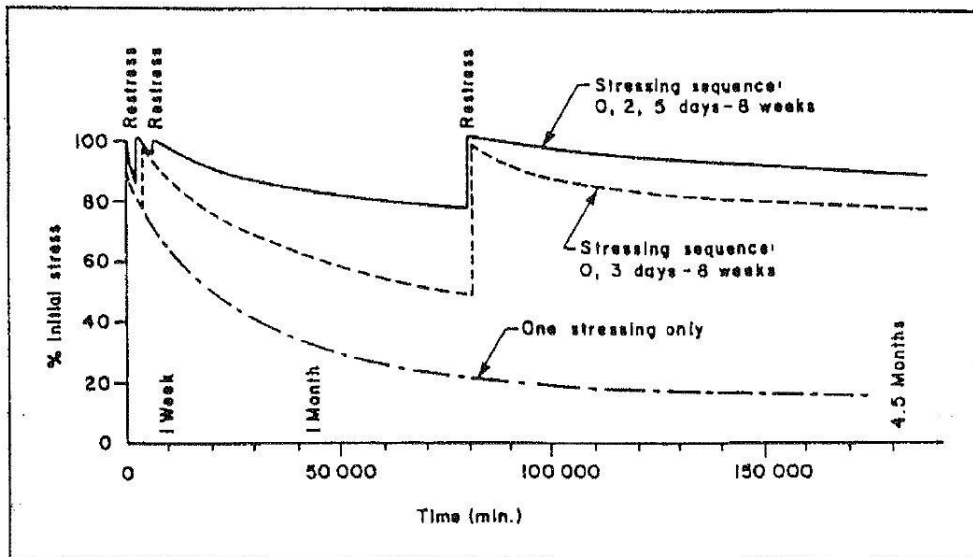
I tillegg til dimensjonsendringene som forekommer på grunn av endring i fuktigheten i tredekket, vil også lastpåføring føre til en reduksjon i dimensjonene. Dette kryptet kan deles inn i tre deler. Med en gang lasten påføres skjer de elastiske deformasjonene. Når lastpåføringen så stopper og spenningene holdes konstante vil likevel trevirket fortsette å krype [1]. Dette betegnes som de forsinket elastiske deformasjonene, samtidig som disse deformasjonene også består av viskøse deformasjoner. De viskøse deformasjonene vil være permanente. Med det menes det at ved senere avlastning vil både de umiddelbare og de forsinkede elastiske deformasjonene reverseres, mens det viskøse kryptet fortsatt vil forbli i treverket. Reduksjonen i dimensjoner på grunn av den påførte lasten vil altså være evig. På

grunn av dette viskøse kryptet tas det hensyn til lastenes varighet på konstruksjonen når det prosjekteres i tre.

Ved stabilt klima og en lastpåkjenning som ikke er alt for stor i forhold til fastheten i trevirket, vil kryptdeformasjonene etter lang tid gå mot en grenseverdi. Etter forskning gjennomført på dette tapet er det funnet ut at tapet kan begrenses til å være omtrent 60% av oppspenningskraften, hvis oppspenningen av dekket gjøres etter en bestemt prosedyre. Denne prosedyren er gitt av Ritter [29], og er som følger:

1. Dekket settes sammen og strammes opp til nødvendig spenning.
2. Etter omtrent ei uke gjøres det en ny oppstramming av dekket. I løpet av denne uka skal det ha oppstått en del tap i spenning på grunn av krypt i dekket. Etter oppstrammingen skal spenningen i dekket være like stor som etter den første oppstrammingen.
3. En siste oppstramming gjøres omtrent 4 til 6 uker etter at den andre oppstrammingen ble gjennomført. Også denne gangen strammes dekket opp til samme spenning oppnås i dekket.

Til tross for at tapet av spenningene i dekkene skal være nokså godt kontrollert etter at den regelmessige oppstrammingen gitt av Ritter er gjennomført, vil det være nødvendig å foreta regelmessige kontroller av spenningene i dekket. Dette som en forsikring om at alt er som det skal være.



Figur 12 - Reduksjon i spenninger når tredekke utsettes for konstant spenning over tid. Det kan også ses at reduksjonen i spenning minker for hver gang det foretas en oppstramming[5].

Figur 12 viser hvordan spenningene i trevirket reduseres over lang tid, og hvordan denne reduksjonen blir mindre og mindre jo flere ganger det foretas en oppstramming. Ved gjennomføring av disse regelmessige oppstrammingene vil det samtidig være mulig å redusere spenningstapet som oppstår grunnet kryp som følge av langtidslast [29].

Vegvesenet antyder gjennom sin rapport om trebruer at spenningstapet i de tverrspente dekkene likevel kan være noe mindre for de tverrspente dekkene i Norge [4]. Begrunnelsen for denne antagelsen ligger blant annet i at dekkene i Norge er beskyttet med en vanntett membran før asfalten legges på dekket.

For å få ytterligere kunnskap om disse krepene er det også blitt gjennomført kontinuerlig måling av spenningene i enkelte av spennstengene samt dekketemperaturen på Evenstad bru. Disse målingene har holdt på siden 2000. Gjennom plotting av gjennomsnittlig spennkraft i stengene for hvert av de påfølgende årene er det laget en trendlinje som viser en asymptotisk utvikling i reduksjonen av spennkraft. Resultatet fra denne kurven antyder at spenningstapet kan ligge på omtrent 50% av oppspenningskraftene. Gjennom vegvesenets rapport presiseres det samtidig at disse målingene gjelder for rent konstruksjonsvirke, og de antar at spenningstapet for limtrelameller kan være enda noe mindre. Grunnlaget for denne

antagelsen er at limtreet vil ha jevnere og mer homogene overflater samt at disse ofte er satt sammen med en lavere trefuktighet.

Trevirkets kryp bestemmes altså i stor grad av fuktighetsendring og lastvarighet. Likevel spiller også temperatur, spenningsnivå, stivhet, lastvarighet og plassering samt andel av kvister inn i beregningen av kryptet.

2.6 Beregning av karakteristiske verdier

Metodene for beregning av karakteristiske verdier og standardavvik for trekonstruksjoner er gitt i NS-EN 14358:2016 [30].

Av standarden er det i kapittel 3.2 gitt beregningsmetoder for bestemmelse av 5% verdien fra eksperimentelle tester. Som utgangspunkt for beregningsmetoden må det ha vært gjennomført n tester. Disse må være tilfeldig valgt fra en utvalgt gruppe.

Videre er det gitt av standarden at styrkeparametere kan antas å ha en logaritmisk normalfordeling, så lenge resultatene fra forsøkene ikke passer bedre til en annen fordeling. Friksjonsparameteren antas å være en styrkeparameter, derfor er beregningsmetodene for den logaritmisk normalfordelte fordelingen benyttet til beregning av karakteristiske verdier i denne oppgaven.

For at fordelingen skal være log-normal fordelt kreves det at fordelingen får formen til en normalfordeling når forsøksresultatene transformeres med den naturlige logaritmen [31]. Verdiene for friksjonsparameterne følger altså en log-normalfordeling dersom den naturlige logaritmen av disse verdiene gir en normalfordeling.

Gjennomsnittsverdien er dermed gitt som:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (2.10)$$

Hvor m_i er verdiene for friksjonskoeffisientene som er funnet fra de ulike forsøkene innen en serie.

Standardavviket er videre gitt ved:

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2}, 0,05 \right\} \quad (2.11)$$

Ved bruk av disse verdiene er det da mulig å beregne den karakteristiske verdien, også omtalt som 5% verdien, av de gjennomførte testene. Denne verdien betyr at det er 95% sjanse for at en tilfeldig valgt prøve vil ha denne kapasiteten eller større kapasitet.

Beregningen av verdien gjøres etter følgende formel:

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad (2.12)$$

Verdien for k_s kan enten beregnes fra uttrykket gitt av ligning 10 i NS-EN 14358:2016:

$$k_s(n) = \frac{6,5n+6}{3,7n-3} \quad (2.13)$$

Eventuelt kan verdien for k_s finnes ved interpolasjon av verdiene gitt i tabell 1 i NS-EN 14358:2016.

3 Tidligere undersøkelser

Friksjonstestene som er utført tidligere, er i stor grad utført som avsluttende skoleoppgaver. De mest omfattende undersøkelsene ble gjort av Tim Kalbitzer i 1999. Ved Träteck i Sverige gjorde han undersøkelser på hvilke parametere som spiller inn ved bestemmelsen av friksjonen mellom treflater. I 2011 og 2012 ble det gjennomført flere lignende tester ved Träteck i Sverige, men disse undersøkelsene var ikke like omfattende. Det siste bidraget til forskningen på området ble gjennomført av Audun Bekk, Lasse Hangaard og Henning Ravnås som en bacheloroppgave på Gjøvik i 2016. Disse så på hvordan friksjonen i tre opptrer når påføringen av kraft, og dermed også glidningen mellom treflatene, skjer med en vinkel i forhold til fiberretningen.

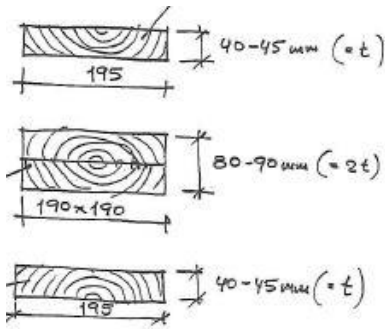
3.1 Forsøk på friksjon mellom lameller– Tim Kalbitzer, Masteroppgave fra TU München, 1999 [21]

Våren 1999 fullførte Tim Kalbitzer sin masteroppgave ved universitet i München. Denne tok for seg friksjonen mellom lameller og hadde som formål å finne ut hvilke faktorer som spilte inn ved bestemmelse av friksjonskoeffisienten. Arbeidet ble utført ved det svenske instituttet for forskning på tre (Träteck) i Skellefteå.

Gjennom arbeidet Kalbitzer la ned, ble det gjennomført til sammen 480 forsøk hvor fem ulike variabler ble undersøkt. Dette for å se om de hadde innvirkning på friksjonen. De fem variablene som ble testet ut var påvirkning av tresort, fuktighet i trevirket, bevegelse i forhold til fiberretningen, ruhet på overflatene som glir mot hverandre og størrelsen på oppspenningen. Hver av disse variablene ble testet ved at en og en variabel ble endret for hver serie. Hver serie innebar 5 forsøk.

Prøvestykkene, vist i figur 13, bestod av fire biter av limtre i styrkeklasse L40 (etter svensk gradering), hver med en tykkelse på omtrent 42 mm. De ytre delene av prøven var 195 mm

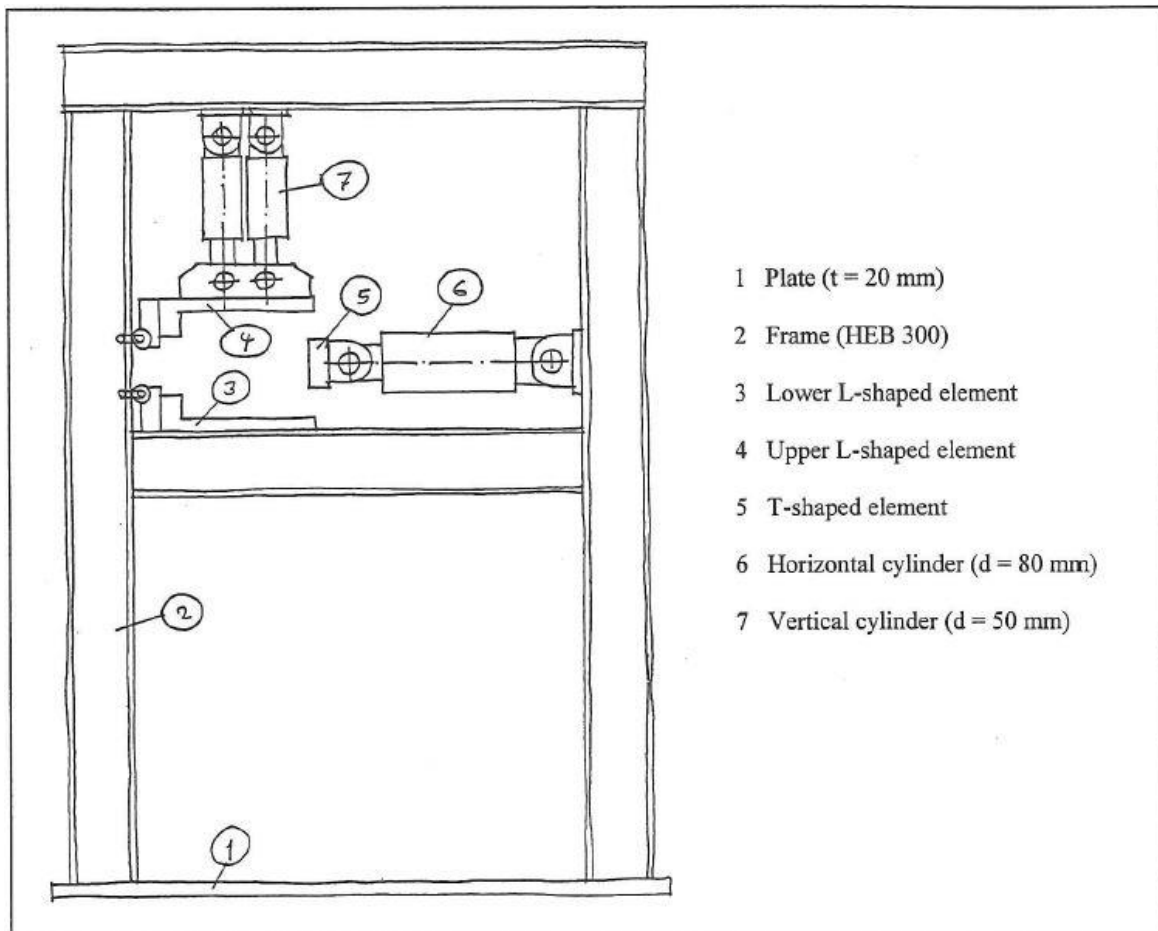
lange, mens de indre delene var 5 mm kortere, altså 190 mm. Bakgrunnen til dette var å forsikre seg om at det var kontakt over hele glideflaten som oppstod mellom de indre og ytre klossene.



Figur 13 - Prøvestykkene benyttet av Kalbitzer

For å redusere materialkostnadene ble de samme treklossene benyttet til flere tester. Dette skjedde etter følgende prosedyre:

- 1) Testene med lave forspenninger og ru overflate ble gjennomført
- 2) Bitene i prøven ble snudd slik at sidene som ikke hadde glidd mot hverandre kom mot hverandre. På denne måten kunne det fortsatt gjøres forsøk med ru overflater. Nye tester ble så gjennomført, denne gangen med litt høyere oppspenninger.
- 3) Siden det nå var gjennomført friksjonstestinger på alle bitenes overflater ble sidene høvlet. På den måten ble det oppnådd nye, uprøvde overflater. De høvlede sidene hadde en glattere overflate enn glideflatene det var testet med tidligere. To nye testgjennomføringer kunne så utføres etter samme metode som i punkt 1) og 2).



Figur 14- Kalbitzers oppsett for testing av friksjon mellom lameller

Forsøkene ble gjennomført i en forsøksrigg lik den illustrert i figur 14. Denne består av to L-formede plater som holder prøvestykket på plass. De vertikale sylindrene i overkant føres ned på prøven og skaper den ønskede oppspenningen i prøven. Denne holdes deretter konstant resten av forsøks tiden. For å kontrollere at denne forblir konstant, gjøres det jevnlig overvåkning av denne spenningen under hele forsøkets gjennomføring. Kraften som skal føre til bevegelse av de mellomliggende testdelene påføres av den horisontale sylindren.

I Kalbitzers forsøk ble horisontallasten påført fram til forskyvningen var 2 cm. Lastpåføringen måtte gjøres med passende fart, og etter noen prøver under fant Kalbitzer ut at en påføringshastighet på 1 mm/s var passende. Rommet testene ble gjennomført i holdt en temperatur på 20 – 23 °C og luftfuktigheten lå på 30 – 35 % RF.

En av observasjonene Kalbitzer gjorde seg var forskjellen på kraft- forskyvningsgrafene når ru overflater ble testet for glidning mot hverandre kontra høvlede overflater. Glidningene med de ru overflatene ga en jevn glidning, og en jevn graf. For de høvlede testgjennomføringene var grafen betydelig mer varierende med tydelige små svingninger. Under disse gjennomføringene kunne det samtidig høres en høy lyd.

Resultatene fra Kalbitzers friksjonstestinger ble som følger:

Tabell 2 - Resultatene fra Kalbitzers friksjonsprøvinger, gjennomført våren 1999

Bevegelsesretning i forhold til fiberretning	Ruheten til overflaten	Statisk friksjonskoeffisient
Fuktighet: 10,1%		
Vinkelrett	Grovskåret	0,420
Vinkelrett	Høvlet	0,280
Parallell	Grovskåret	0,303
Parallell	Høvlet	0,240
Fuktighet: 14,0%		
Vinkelrett	Grovskåret	0,478
Vinkelrett	Høvlet	0,413
Parallell	Grovskåret	0,337
Parallell	Høvlet	0,299

Fuktighet: 18,8%	
Forspenning [MPa]	Statisk friksjonskoeffisient
0,2	0,737
0,5	0,707
1,0	0,598
1,5	0,505

Fra arbeidet sitt kunne Kalbitzer konkludere med at trevirkets fuktighet var det som spilte størst rolle for bestemmelsen av friksjonskoeffisienten. Videre separerte han derfor forsøkene etter fuktinnhold og så på forsøksresultatene fra disse hver for seg. Fra dette kunne han videre konkludere med at det for trevirke med lav fuktighet var bevegelsesretning i forhold til fiberretningen i treet som hadde størst påvirkning på friksjonskoeffisienten. Dette samtidig som også overflatenes ruhet, altså hvorvidt overflatene var høvlede eller ikke, spilte en betydelig rolle. For klossene med høyere vanninnhold (18,8%) viste det seg derimot at friksjonskoeffisienten i all hovedsak ble bestemt av forspenningen.

3.2 Friksjonsprøvinger, 2010 og 2012 [32] [33]

I 2010 og 2012 ble det gjort nye tester på friksjonen mellom treklosser ved Träteknik i Sverige etter oppdrag fra Chalmers tekniske høyskole. Gjennomføringene tok utgangspunkt i Kalbitzers prosedyrer for testing. Samme testmaskin ble benyttet, og forholdene i rommet var omtrent tilsvarende som for Kalbitzers gjennomføringer med en romtemperatur på 20 – 22 °C. Luftfuktigheten var på 35 – 50 % RF.

En forskjell ved disse forsøkene i forhold til Kalbitzers gjennomføringer var teststykkene og deres utforming. Mens Kalbitzer benyttet seg av fire like tykke biter til sin gjennomføring, ble det ved testingene i 2010 og 2012 kun benyttet tre biter. Den midtre biten i prøven var derimot omtrent dobbelt så tykk som de ytre bitene. Dimensjonene av delene som ble benyttet til friksjonstestene i 2010 var altså 180 x 180 x 38 mm for de ytre klossene og 180 x 180 x 78 mm for den indre klossen. Klossene benyttet i 2012 hadde dimensjonene 173 x 173 x 41 mm for ytterklossene og 173 x 173 x 89 mm for midtklossen. Alle klossene det ble testet med var tatt fra gamle brubjelker og var laget av limtre fra gran. Samtidig hadde samtlige klosser benyttet til testingen høvlede overflater. Limtreklossene benyttet i 2012 var oppgitt å være i styrkeklasse CEL40C. Fra testingen i 2010 var ikke trekvaliteten oppgitt.

Oppspenningen ble påført prøvestykkene på samme måte som ved Kalbitzers forsøk, gjennom to vertikale sylindere. Deretter ble forskyvningskraften påført den midtre av de tre klossene gjennom en vertikal sylinder. Spenningene som ble påført som oppspenning var i 2010 0,3 MPa, 0,6 MPa og 0,9 MPa. I 2012 ble spenninger på 0,1 MPa, 0,3 MPa og 0,6 MPa benyttet. Begge årene ble friksjonstestene med disse oppspenningene forsøkt både med forskyvning parallelt med fiberretningen og på tvers av fiberretningen.

Friksjonstestingene som ble gjennomført ved Trätec i 2010 og 2012 har betydelige likheter. De er gjennomført ved benyttelse av samme testmaskin og dermed utført etter samme oppsett og etter samme prosedyre. Forholdene i rommet når testene ble gjennomført var nokså like og oppspenningene var i stor grad de samme. På bakgrunn av de mange likhetene i testene, er det gjort et forsøk med å legge sammen alle resultatene fra samme forspenning. Verdien for friksjonskoeffisientene som da fremkommer vil kunne betraktes å være sikrere, siden utvalget verdiene er beregnet fra er større.

Tabell 3 - Verdier for friksjonskoeffisientene når verdiene fra testgjennomføringen i 2010 og 2012 er lagt sammen

Forspenning [MPa]	Bevegelsesretning i forhold til fiberretningen	Forsøk 2010		Forsøk 2012		Total statistisk friksjonskoeffisient
		Antall forsøk	Statisk friksjonskoeffisient	Antall forsøk	Statisk friksjonskoeffisient	
0,1	Parallell			3	0,349	0,349
0,1	Vinkelrett			3	0,438	0,438
0,3	Parallell	5	0,288	10	0,406	0,367
0,3	Vinkelrett	5	0,404	10	0,487	0,460
0,6	Parallell	14	0,287	3	0,331	0,295
0,6	Vinkelrett	14	0,340	3	0,411	0,353
0,9	Parallell	5	0,296			0,296
0,9	Vinkelrett	5	0,438			0,438

Av tabell 3 kan det ses at det til tross for at samme verdier er benyttet for forspenningen, forholdene i rommet var nokså like ved de to gjennomføringene og glideretningen er satt til å være lik ved de to prøvingene, er det for enkelte prøveserier store forskjeller i verdien for friksjonskoeffisienten. Noe av grunnen til disse store forskjellene kan ligge i at det for mange av tilfellene kun er gjennomført et lite antall forsøk. Tre er et svært varierende materiale og det kan derfor tenkes at det kanskje skulle vært gjort flere forsøk, for å få en mer nøyaktig verdi.

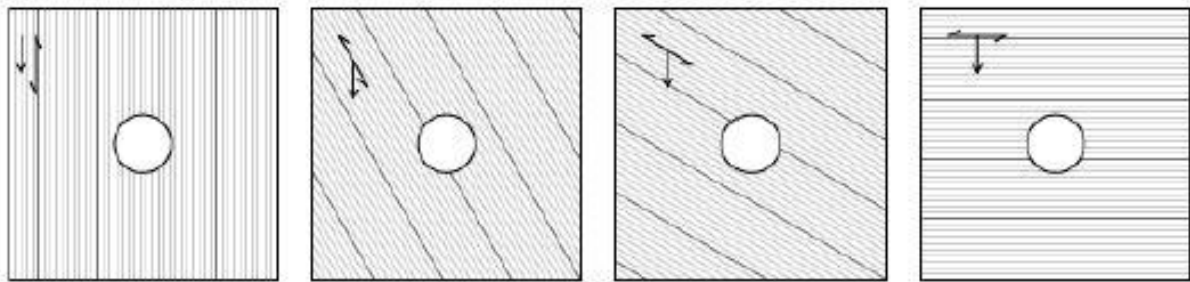
Eksempler på andre faktorer som kan ha spilt inn på den store variasjonen i friksjonskoeffisient er densiteten av klossene og hvordan de forskjellige klossenes overflate var. Selv om overflatene ved begge gjennomføringene er sagt å være høvlede kan det likevel ha forekommet små avvik og ulikheter i overflatens mikrostruktur.

3.3 Friksjon tre mot tre - Bacheloroppgave av Audun Bekk, Lasse Hangaard og Henning Ravnås våren 2016 [14]

Audun Bekk, Lasse Hangaard og Henning Ravnås fullførte våren 2016 sin bachelorgrad ved NTNU avdeling Gjøvik med arbeidet de utførte rundt testing av friksjonen mellom klosser av tre. Oppgaven var gitt av statens vegvesen og gjennom arbeidet testet de ut hvordan friksjonen mellom klossene ville påvirkes dersom forskyvningskraften ble påført ved en vinkel i forhold til fiberretningen.

Fra tidligere var det gjort friksjonsforsøk med forskyvning parallelt med fiberretningen og vinkelrett på fiberretningen, men hvordan ville det være om kraftvinkelen var en annen? Brudekket vil ikke kun være utsatt for vertikale krefter som egenlasten og tyngden av biler som kjører over brua, men også horisontale krefter som blant annet vindlast og bremsekrefter. Hvordan en kombinasjon av horisontale og vertikale krefter spiller inn på friksjonen var derfor av interesse med bakgrunn i belastningen brudekket vil utsettes for.

Gjennom testingen ble klosser med fiberretning på 0, 30, 45, 60 og 90 grader i forhold til bevegelsesretning testet. Dette er illustrert i figur 15. Siden forsøk på vinklene 30, 45 og 60 grader ikke var prøvd ut tidligere innebar disse seriene ti tester. Forskyvning langs med og på tvers av fiberretningen i treet er i større grad testet ut tidligere, derfor ble det ansett som tilstrekkelig å gjennomføre syv tester i disse seriene.



Figur 15 - Plantegning av prøvestykkene Bekk, Hangaard og Ravnås benyttet under sine friksjonsundersøkelser. De illustrerte prøvestykkene har fiberretningen 0, 30, 60 og 90 grader i forhold til kraftpåføringen. Det ble også forsøkt med kraftpåføring 45 grader på fiberretningen.

Selve friksjonstesting ble gjennomført ved laboratoriet tilhørende Norsk Treteknisk Institutt. Rommet testene ble gjennomført i holdt en temperatur på 20 °C og den relative fuktigheten var 65%, noe som tilsvarer standardbetingelsene. Prøvestykkene hadde dimensjonene 150 x 150 x 90 mm. Disse var kappet ut fra bjelker av trykkimpregnert furu med tverrsnittsdimensjoner 90 x 223 mm. Begrunnelsen for at det ble benyttet større bjelke dimensjoner enn prøvestykkens dimensjoner skulle være, var at klossene måtte kappes ut slik at fiberretningens vinkel i klossene ble riktig. Det ble benyttet nye prøvestykker til hver gjennomføring, slik at en senere test ikke skulle kunne være påvirket av sår eller sammentrykninger fra en tidligere testgjennomføring.

Til forskjell fra friksjonstestene som er gjennomført tidligere, ble prøvene denne gangen spent opp ved å tre en stålkabel gjennom sentriske hull gjennom tre og tre av klossene. Selve testingen ble gjort ved at prøven ble lagt opp på de ytre klossene ved å bygge opp under disse med flattstål. Flattstålene skulle samtidig bidra til å sikre et jevnt trykk over disse klossenes underside. Deretter ble en horisontal kraft påført på oversiden av den midterste

klossen med en hastighet på 0,8 mm/min. Når kraften ble stor nok førte dette til at den midtre klossen begynte å gli ut, og etter klossen hadde glidd litt ble testen stoppet. Siden det var kjent fra Kalbitzers forsøk at fuktigheten i trevirket hadde stor påvirkning på friksjonen, ble det rett etter friksjonstesting var ferdig utført måling av densiteten til prøvestykkene.

Tabell 4 - Resultater av forsøkene gjennomført av Bekk, Hangaard og Ravnås.

Vinkel	Antall prøver	Antall forkastede prøver	Fuktighetsinnhold	Friksjonskoeffisient	Standardavvik
0	7	0	10,7 %	0,52	0,04
30	10	0	10,9 %	0,60	0,07
45	10	1	10,6 %	0,48	0,04
60	10	1	10,9 %	0,61	0,05
90	7	2	10,9 %	0,66	0,06

Statens vegvesen hadde gjennom sitt formelverk en hypotese om at friksjonskoeffisienten hadde en lineær oppførsel ettersom vinkelen utskryningslasten ble påført med. Guttene fant gjennom sine tester på friksjonen ut at dette stemte godt for resultatene fra forsøkene ved 0, 30, 60 og 90 graders vinkel. Fra forsøksserien med utglidning på 45 grader i forhold til fiberretningen viste det seg derimot å være avvik, uten at de kunne finne noen grunn til dette unntaket. Samtidig kunne de heller ikke finne noen god forklaring til hvorfor dette avviket skulle være riktig.

For forsøkene som ble utført med forskyvninger parallelt eller på tvers av fiberretningen fantes det resultater fra de tilsvarende gjennomføringene som Kalbitzer benyttet. Bekk, Hangaard og Ravnås kunne derfor gjøre sammenligninger mot disse resultatene. Disse viste at deres verdier for friksjonskoeffisientene var noe høyere enn hva Kalbitzer hadde funnet. Dette gjaldt både for testene hvor forskyvningen var parallelt med fiberretningen og på tvers

av fiberretningen. Forholdet mellom friksjonskoeffisientene ved 0 og 90 graders kraftvinkel viste seg imidlertid å være omtrent likt for de to testomgangene. En mulig årsak til den ulike størrelsen på friksjonskoeffisienten antydtes av Bekk, Hangaard og Ravnås at kunne komme av at de hadde gjort tester på impregnert trevirke.

3.4 Prosjektoppgave av Anette Paulsrud, høsten 2017 [8]

Høsten 2017 gjennomførte undertegnede et forprosjekt i forbindelse med denne masteroppgaven. Gjennom arbeidet ble tidligere gjennomførte undersøkelser på friksjon mellom lameller i tverrspente dekker benyttet som inspirasjon til å planlegge utførelsen av egne forsøk. Videre ble det satt opp et forslag til gjennomføring av friksjonstester. For å sjekke om dette også lot seg gjennomføre i praksis ble det gjort noen forsøk i laboratoriet.

Forsøket ble gjennomført ved at tre klosser av limtre ble spent opp ved benyttelse av en stålbolt og spesiallagde stålplater. Treklossene som ble benyttet hadde dimensjonene 166 x 166 x 90 mm. Sentrisk på klossenes overflate var det boret et hull med diameter 50 mm. Stålbolten, som hadde en diameter på 30 mm, ble trukket gjennom klossene og spent opp ved benyttelse av stålplatene og muttere. Denne metoden for utførelse tilsvarte metoden Bekk, Hangaard og Ravnås benyttet for å spenne opp sine friksjonsprøver.

De benyttede stålplatene hadde dimensjonene 220 x 300 mm og hadde også et sentrisk hull på 50 mm. I tillegg hadde disse platene to mindre hull, med diameter 25 mm. Disse hullene er tenkt benyttet for å kunne holde prøvestykkene oppspent den tiden de skal lagres. På den måten trengs det ikke like mange lastceller, da den samme kan benyttes til å spenne opp alle prøvene.

Gjennom prosjektoppgaven ble det ikke kommet fram til noen faktiske verdier for friksjonskoeffisienten. I stedet gikk arbeidet ut på å komme fram til en god løsning for hvordan testene kunne gjennomføres på en effektiv og god måte.

3.5 Erfaringer fra det som er gjennomført tidligere

Gjennom de tidligere gjennomførte undersøkelsene er det mulig å tilegne seg kunnskaper om hva som har fungert bra og hva som burde ha vært gjort på en annen måte. Samtidig kan disse opplysningene belyse hva som skulle vært undersøkt nærmere. Videre kan disse kunnskapene benyttes til å gjøre vurderinger på om dette er metoder som også kan benyttes til gjennomføringen av senere forsøk, eller om nye undersøkelser krever andre typer oppsett og prosedyrer. Resultatene fra de allerede gjennomførte forsøkene vil i tillegg kunne være med og gi en pekepinn på hvilke utfall som kan forventes ved gjennomføring av lignende forsøk.

Et eksempel på erfaringer som kan tas med videre er metodene rundt oppsettet av forsøket. Slik Kalbitzers tidligere tester er gjennomført er forspenningen påsatt rett før forsøket skal gjennomføres ved benyttelse av testmaskinen. En fordel med bruk av testmaskinen til påføring av oppspenningskreftene er at denne trolig vil føre til at oppspenningskreftene holdes konstante gjennom hele testen. Metoden er derimot ugunstig når oppspenningene skal virke i prøvestykkene over en lenger periode før testen skal gjennomføres.

Skulle Kalbitzers metode vært benyttet i denne oppgavens friksjonstester betyr dette at prøvestykkene hadde måttet stå i testmaskinen i ei uke med den påsatte oppspenningen før testen kunne gjennomføres. Med det antallet forsøk som er tenkt gjennomført ville dette tatt alt for lang tid. Samtidig ville det ikke vært mulig å benytte testmaskinen til andre undersøkelser i løpet av denne ventetiden. Dette er derfor av hovedgrunnene til at vi ikke benytter dette testoppsettet for testingene i denne masteroppgaven.

Bekk, Hangaard og Ravnås gjennomførte forsøkene etter en annen metode. De spente opp prøvene med en stålbolt, muttere og forankringsplater for så å påføre forskyvningskraften som en vertikallast. I tillegg til at dette gjenspeiler hvordan brudekkene spennes opp i virkeligheten, gjør denne metoden det mulig å tilvirke prøvene på forhånd. Metoden gjør det samtidig mulig å spenne opp flere prøver på samme tid og gir også muligheten for at disse

kan lagres over en lenger periode uten at testmaskinen vil være opptatt. Gjennom erfaringene fra prosjektoppgaven ble det bevist at overføringen av oppspenningene til de mindre stagen gikk greit, og at frigjøring av lastcellen ikke var noe problem. Det var derfor mulig å tilvirke flere prøver samtidig. Med bakgrunn i dette ble derfor denne metoden for tilvirking av prøvestykker valgt å benytte til ved gjennomføringen av friksjonstestene i denne masteroppgaven.

Kalbitzer benyttet i sine forsøk fire like store klosser i sine prøver. På denne måten kunne han bruke opp igjen de samme bitene til flere forsøk, noe som reduserte materialkostnadene. I de senere testgjennomføringene sees det at det kun er benyttet tre biter for hvert forsøk. For forsøkene som ble gjennomført i 2010 og 2012 hadde derimot den midterste biten omtrent dobbel tykkelse av de ytre delene. Benyttelse av tre biter i stedet for fire kan antas å gi mindre feilkilder i forhold til at det ikke kan oppstå uheldige glidninger mellom de midtre klossene ved disse oppsettene.

Noe som går igjen i resultatene fra alle friksjonsprøvingene er forskjellen i størrelsen for friksjonskoeffisienten ettersom om det er testet for glidninger parallelt eller på tvers av fiberretningen. Det er gjennomgående for alle de ulike størrelsene for oppspenning at friksjonsparameteren er større ved glidninger på tvers av fiberretningen i forhold til hva de er ved glidninger parallelt med fiberretningen. Størrelsen på oppspenningen virker ikke til å ha noen vesentlig innvirkning på friksjonskoeffisientens størrelse.

Av resultatene som er fremkommet fra friksjonstestingene gjennomført i 2010 og 2012 kommer det frem at selv om testene gjennomføres etter lignende prosedyrer, vil resultatene kunne ha store avvik fra hverandre. På grunn av dette vil det være nødvendig å gjennomføre et tilstrekkelig antall gjennomføringer, slik at man har et stort nok utvalg å konkludere ut fra når friksjonskoeffisientens verdi skal bestemmes.

4 Friksjonsmålingene

Utgangspunktet for denne masteroppgaven var å ta en grundigere sjekk på friksjonen mellom bjelkene i tverrspente dekker. Det var spesielt ønskelig å få kunnskap om friksjonen mellom limtre som hadde vært sammenpresset over en tid. En hensikt med oppgaven var dermed å få et innblikk i om oppspenning over tid, og med ulike størrelser, har noen innvirkning på friksjonskoeffisienten til tre. Ved å finne ut dette ville det samtidig være mulig å komme fram til hvor store spenninger som er nødvendig i tverrspente dekker for å unngå at de glipper.

4.1 Gjennomførte forsøk

Arbeidet som er utført har bestått av gjennomføring av 120 tester. Disse er fordelt over 10 forskjellige serier hvor ulike parametere har blitt variert. Variasjonene har vært ulik størrelse på oppspenningene, forskyvninger både langs med og på tvers av fiberretningen og ulik størrelse på klossene. I de senere gjennomførte testene ble det også forsøkt å påføre kraften i to runder, altså at påført kraft ble ført tilbake til null før last igjen ble satt på det samme prøvestykket. Dette ble gjort etter at klossen hadde sklidd ut i overkant av 10 mm første gangen. På grunn av overraskende reaksjoner ved denne sykliske lastpåføringen ble det gjort 5 ekstra forsøk. I disse forsøkene ble allerede testede prøvestykker satt sammen og testet på nytt.

4.1.1 Forsøksseriene

Som utgangspunkt var det gitt at det skulle gjennomføres 20 forsøk både langs med fiberretningen og på tvers av fiberretningen på klosser som hadde ligget oppspente med 1,0 MPa i ei uke. Disse friksjonstestene utgjorde derfor to serier som hver bestod av 20 forsøk. Videre var det også ønskelig med to serier der prøvestykkene ikke var utsatt for noen langtidsvirkende forhåndsbelastninger. Dette for å kunne gjøre sammenligninger på hvordan langtidsforspenningene virket inn på de oppnådde friksjonskoeffisienten. Dermed ble det

gjennomført en serie med utglidning langs fiberretningen og en serie med utglidning på tvers av fiberretningen hvor forspenningen ble påført til å være 1 MPa og klossene ble testet rett etter at denne lasten var påført. Hver av disse to seriene bestod av 10 tester.

Videre ble det gjennomført serier der størrelsen på forspenningene ble redusert, men prøvene fortsatt måtte ligge oppspente ei uke før friksjonstestene kunne utføres. Også for disse spenningene ble forsøkene gjennomført med utglidninger både langs med og på tvers av fiberretningen. Hver av disse seriene bestod av 10 forsøk. Oppspenningene som ble benyttet for disse seriene var 0,3 MPa og 0,6 MPa. Størrelsene ble valgt fordi de tilsvarte spenninger som det tidligere var gjort friksjonstester på, noe som ga et sammenligningsgrunnlag.

Til slutt ble det gjennomført forsøk på klosser med større tverrsnitt. En hensikt med dette var å få et inntrykk av om størrelsen på tverrsnittene som gled mot hverandre hadde noen innvirkning på friksjonen. Samtidig hadde stålplatene i de tidligere seriene hatt større flater enn glideflatene i treklossene. Dette for å få en jevn fordeling av oppspenningskreftene på treoverflatene. Likevel er det faktiske tilfellet i de tverrspente dekkene slik at dimensjonene av tredekket, både i høyde og bredde, er større enn stålplatene som er med på å spenne opp dekket. Testingene med treklosser som var større enn stålplatene ville derfor kunne gi et mer realistisk bilde på hvordan friksjonen faktisk opptrer i de tverrspente dekkene.

De gjennomførte prøveseriene med dimensjonene på klossene som er benyttet og hvilke spenninger som er testet er gjengitt i tabell 5.

Tabell 5 - Oversikt over gjennomførte prøveserier.

Forsøksserie	Navn på serie	Antall forsøk	Forspenning [MPa]	Forskyvning i forhold til fiberretning	Dimensjoner		
					Høyde [mm]	Bredde [mm]	Tykkelse [mm]
1	T03	10	0,3	Tvers	166	166	90
2	L03	10	0,3	Langs	166	166	90
3	T06	10	0,6	Tvers	166	166	90
4	L06	10	0,6	Langs	166	166	90
5	T10	20	1	Tvers	166	166	90
6	L10	20	1	Langs	166	166	90
7	T10U	10	1	Tvers	166	166	90
8	L10U	10	1	Langs	166	166	90
9	T06H	10	0,6	Tvers	400	166	90
10	L06B	10	0,6	Langs	166	400	90

4.1.2 Navngivning av seriene

Hver av seriene er gitt navn etter hva som er testet i serien. Den første bokstaven i serienavnet er enten L eller T. Disse bokstavene indikerer om forsøkene er gjennomført med utglidninger langs med fiberretningen (L) eller på tvers av fiberretningen (T). De påfølgende tallene i serienavnet indikerer hvilken spenning klossene ble spent opp til. Med 03 menes det for eksempel at oppspenningen i klossene var 0,3 MPa, mens 10 betyr at oppspenningen var 1,0 MPa.

I de åtte første seriene hadde alle de testede klossene dimensjoner 166 x 166 x 90 mm. Da det var ønskelig også å undersøke om størrelsen på glideflatene hadde noen påvirkning på friksjonen, ble det i de to siste seriene gjort forsøk på klosser med enten større høyde eller større bredde. Det nye arealet på glideflatene var 400 x 166 mm. Den siste bokstaven i disse

serienavnene, H eller B, forteller derfor om det er bredden (B) eller høyden (H) som er valgt til å ha en større dimensjon.

Et resultat av det økte arealet av glideflatene er at det er vanskeligere å vite hvilken kraft som skal påføres for å ha 0,6 MPa. Samtidig ble det vist under teorikapitlet at friksjonskoeffisientene ble bestemt av kreftene, ikke spenningene. Til oppspenningen av de større klossene ble det derfor i stedet benyttet samme krefter som når de mindre klossene ble strammet opp til en spenning på 0,6 MPa. Dette tilsvarer en kraft på omtrent 15 kN. Selv om dette trolig utgjør en annen spenning i disse klossene er likevel notasjonen 06 valgt å benytte i navnene for disse seriene.

Treklossene som ble spent opp en andre gang utgjør ikke noen egen serie. For de retestede prøvestykkene er i stedet navnene fra de opprinnelige seriene benyttet på nytt, men det er lagt til en E på slutten av prøvenavnet for å indikere at dette var en ekstra test. Siden disse testene ikke utgjorde noen egen serie, er resultatene fra disse testene ikke tatt inn og regnet på under resultatdelen. Behandling og vurdering av resultatene fra disse testene er i stedet omtalt i diskusjonskapitlet.

4.2 Utstyr

4.2.1 Treklossene

Treklossene er laget av limtre av uimpregnert furu i styrkeklasse GL30h. Limtre av furu er bygd opp av lameller med 33,3 mm høyde. For å få et helt antall lameller i prøvestykkene ble en høyde på 166 mm, tilsvarende 5 lameller, benyttet. Alle benyttede materialer ble levert av Moelven Limtre AS som limtrebjelker med tverrsnittsdimensjoner 90 x 400 mm. Etter levering ble bjelkene bearbeidet til klosser med ønskede dimensjoner.



Figur 16 - Eksempel på treklossene som er benyttet i prøvestykkene

Tilvirkningen av klossene ble gjort ved at alle bjelkene først ble kappet opp til biter med en lengde på 166 mm. Undervegs i oppkappingen ble klossene nummerert fortløpende. Resultatet av den første omgangen med kapping var 212 klosser med dimensjoner på 400 x 166 x 90 mm. De 60 første klossene ble plassert på paller og skulle utgjøre prøvestykkene til seriene med testing på større klosser. Resten av klossene ble bearbeidet videre til to klosser med tverrsnittsdimensjoner 166 x 166 x 90 mm. I den andre runden med kapping ble klossene merket som en A- bit og en B- bit av nummeret de hadde fått fra den første kappinga. Til slutt ble det boret et sentrisk hull med en diameter på 50 mm gjennom alle de oppkappede klossene. Eksempler på ferdig tilvirkede klosser er vist i figur 16.

Grunnen til at klossene ble nummerert fortløpende ettersom de ble kappet opp var for å ha oversikt over hvilke klosser som kom fra samme bjelke og senere kunne vite hvilke klosser som var benyttet i hver av prøvene. Ved sammensetting av prøvestykkene ble tre og tre klosser plukket tilfeldig fra de oppkappede klossene og numrene til de tre klossene som utgjorde prøven notert. Grunnen til at klossene ble satt sammen tilfeldig og ikke som tre og tre påfølgende oppkappede klosser var at hver av de benyttede bjelkene kunne ha litt forskjellig mikrostruktur på overflatene. Dette til tross for at de i utgangspunktet skulle være like. Om tre og tre påfølgende klosser hadde blitt satt sammen kunne dette derfor ledet til systematiske feil. Dette blir trolig unngått ved sammensetting av tre tilfeldige klosser.

Trevirket var bestilt å ha en fuktighet omtrent tilsvarende likevektsfuktigheten, altså 12%. For å være sikker på at materialene holdt denne fuktigheten, og for å bevare denne, ble materialene oppbevart i klimarom fram til friksjonstesten skulle gjennomføres.

Klimarommet holdt en temperatur på 20 °C og hadde en luftfuktighet på 65%. Disse forholdene er ansett som standard forhold ved testing av fysiske og mekaniske egenskaper for trekonstruksjoner og treprodukter, og er gitt av den norske standarden NS-EN 408 [34]. For å ytterligere redusere tiden materialene behøver for å akklimatiseres, ble de kort tid etter ankomst kappet opp til de ønskede størrelsene og det sentriske hullet boret ut. Deretter ble de lagret videre i klimarommet som mindre stykker.

Testingen kunne ikke begynne før det var sikkert at treet hadde oppnådd likevekt med omgivelsene i klimarommet. Hvorvidt dette var tilfredsstillt kunne kontrolleres ved veiing av klossene. Når massen til en kloss var lik ved to påfølgende veiinger gjort med mer enn 6 timers mellomrom, betød det at likevektsbetingelsene var oppfylt [34]. Som en ekstra kontroll ble det også gjennomført testing av materialenes fuktighet med en fuktighetsmåler, vist i figur 17. Dersom denne viste en trefuktighet på omtrent 12%, var likevektighetsfuktighet oppnådd. For å kontrollere at måleren var riktig kalibrert, ble det gjennomført kontrollmålinger mot andre materialer i klimarommet. Siden disse hadde vært

vært oppbevart i klimarommet over lang tid hadde disse oppnådd likevektsfuktighet. Om måleren også viste dette var den riktig og klossene var klare til å undersøkes.



Figur 17 - Fuktighetsmåler benyttet til å undersøke fuktigheten i trevirket

For seriene hvor oppspenningen skulle påføres kort tid før testingen fant sted, ble oppspenningen påført i samme rom som friksjonstestene ble utført. Operasjonen med å påføre forspenningen og utføre testen tok maksimalt en halvtime. På denne korte stunden kunne det antas at fuktigheten og temperaturen i trevirket forble som ved likevekstforhold.

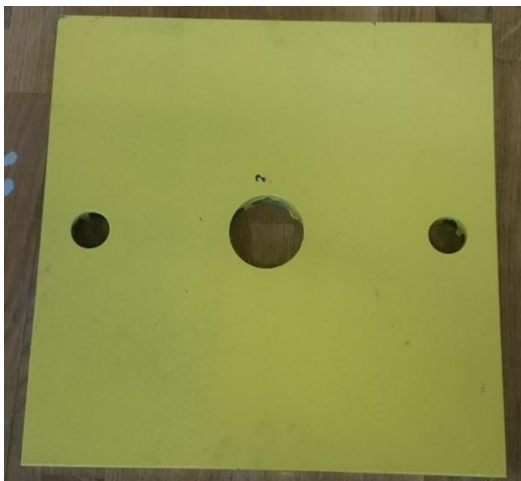
Oppspenningsprosedyren for prøveseriene som skulle ligge med de påføre oppspenningene ei uke før testing, ble gjennomført i klimarommet. Etter oppspenningen var påført ble prøvene lagret videre i klimarommet fram til testingen skulle gjennomføres. Testdagen ble fire og fire prøvestykker tatt med til rommet der testmaskinen var plassert og testene gjennomført før fire nye prøvestykker ble tatt ut av klimarommet og testet. På denne måten ble likevektsfuktigheten bevart best mulig i prøvestykkene fram til testingen, samtidig som det ikke gikk med for mye tid til transport av prøvestykkene.

4.2.2 Stålplatene

Stålplatene som ble benyttet til oppspenningen av prøvene var spesielt tilvirket til friksjonsforsøkene. Størrelsen på platene var 220 x 300 mm, med en tykkelse på 20 mm. Stålplatene har et sentrisk utskåret hull med diameter 50 mm, tilsvarende de sentriske hullene i treklossene. Figur 18 viser et bilde av en av de tilvirkede stålplatene.

På hver sin side av det store sentriske hullet var det laget to mindre hull. Disse lå med en avstand 21 mm fra kanten av platen og hadde en diameter på 25 mm. Hullene var laget så prøvene kunne ligge oppspente med spenningene i to eksentriske stålstag i stedet for i den sentriske bolten.

Til hver oppspente prøve trengtes det to stålplater. Disse ble plassert på yttersiden av de tre treklossene og hadde som oppgave å spre kreftene fra boltene jevnt utover klossenes overflater. Det var tilvirket 40 slike plater slik at det skulle være mulig å spenne opp 20 prøvestykker om gangen. På den måten var det mulig å spenne opp og gjennomføre forsøk for en serie per uke for seriene med 20 forsøk, og to serier per uke for de resterende seriene hvor det ble gjort 10 forsøk.



Figur 18 - Stålplatene benyttet under friksjonstesting

4.2.3 Festemidlene

For å få til oppspenningen av klossene var det nødvendig med et stålstag og noe å feste dette staget med. Staget som ble benyttet var en stor stålbolt, som vist i figur 19. Denne hadde en diameter på omtrent 30 mm og var lang nok til å kunne tres gjennom de tre sammensatte treklossene samt de to stålplatene. Samtidig var staget kort nok til at prøven kunne plasseres i testmaskinen med en slik vinkel at treklossenes overflater var tilgjengelige for målinger med Aramis (Aramis er nærmere beskrevet i kapittel 4.2.6).

Siden prøvestykkene måtte ligge oppspente ei uke før friksjonstestene kunne gjennomføres, var det ønskelig å kunne opp flere prøver per uke. For å få spent opp nye prøver måtte boltene med en påmontert lastcelle frigjøres. Dette ble løst ved å overføre oppspenningskreftene fra det store stålstaget til to mindre stålstag. Disse ble strammet opp ved benyttelse av de små hullene på stålplatene. Dimensjonen av de små stagene var 20 mm.

For å få festet stålstagene ble det benyttet muttere og skiver med passende dimensjoner.



Figur 19 - Det store stålstaget som ble benyttet under oppstramming og testing av prøvestykkene

4.2.4 Lastcelle og skyvelær

Under montering av prøvestykkene ble oppspenningen kontrollert ved hjelp av en lastcelle. Lastcellen er en ring som tres på stålstaget mellom stålplaten og mutteren. Figur 20 under viser hvordan dette er gjort. Lastcellen ble videre koblet opp mot en PC, hvor trykkraften ringen ble utsatt for kunne leses av.



Figur 20 - Lastcella benyttet til registrering av oppspenninger

Siden tilgangen på lastceller var begrenset til en, men det likevel var ønskelig å kunne spenne opp flere prøver per uke, ble det under oppspenningen gjennomført en overføring av oppspenningskreftene. Dette ble gjort ved at kreftene fra det store stålstaget ble overført til to mindre, eksentrisk plasserte stag. Denne overføringen av kreftene ble gjort ved at klossene først ble spent opp til ønsket spenning ved bruk av det store staget påmontert lastcellen. Når oppspenningene i prøvestykkene var riktige ble de to eksentriske stagene påført prøvestykket. Videre ble disse strammet fram til det ikke lenger var igjen noen krefter i det sentriske staget. At oppspenningskreftene ikke lenger virket i det sentriske stålstaget, men var overført til de to eksentriske stagene kunne observeres ved at kreftene i lastcellen ble gradvis mindre fram til det ikke lenger var noen krefter i bolten. Bolten med den påmonterte lastcellen kunne dermed fjernes og benyttes til oppspenning av en ny prøve.



Figur 21 - Skyvelær benyttet til måling av avstanden mellom stålplatene ettersom prøven ble strammet opp

For å ha kontroll på endringen i avstanden mellom stålplatene ettersom oppspenningskraften ble påført prøvestykkene, ble det gjort målinger undervegs i oppspenningsprosessen. Avstandsmålingene ble gjort ved benyttelse av et skyvelær, vist i figur 21, og ble gjort tre ganger i løpet av oppspenningen ved oppspenninger på 0,6 MPa og 1,0 MPa og to ganger i løpet av oppspenningen ved 0,3 MPa. Etter at oppspenningskreftene var fullstendig påført ble det gjort nye målinger, dette både før og etter oppspenningskreftene var overført til de to mindre stålstengene.

Når friksjonstestene skulle utføres, var en tilsvarende prosess for å sette på igjen det sentriske stålstaget gjennomført. Det store staget, med lastcellen, ble påført det oppspente prøvestykket samtidig som de små stagenes gradvis ble løsnet og fjernet. For å finne riktig kraft for oppspenningen av klossene, ble skyvelæret benyttet. Klossene ble ved andre påføring av den store boltene, strammet opp slik at avstanden mellom stålplatene ble lik avstanden som var målt mellom stålplatene før lagringen. Siden det kan ha oppstått skjevheter i plateavstanden når oppspenningskreftene ble overført til de små stagenes, eksempelvis ved at de to stagenes ikke ble strammet opp jevnt, var det avstanden før oppspenningskreftene ble overført til de små stagenes som ble benyttet som referanseavstand. Når riktig avstand var oppnådd ble oppspenningskraften lest av og friksjonstestingen kunne gjennomføres.

4.2.5 Testmaskinen

Maskinen som ble benyttet til gjennomføringen av forsøkene var av merket Instron og kunne utføre tester med krefter opp til 100 kN. Dette lå innenfor bruksområdet for de utførte friksjonskreftene, hvor de største registrerte kreftene var rundt 50 kN. Figur 22 viser testmaskinen og hvordan et av prøvestykkene er plassert i denne maskinen.

Testmaskinen var koblet opp mot en datamaskin med programmet Bluehill 3. I dette programmet ble fila med innstillingene fra de gjennomførte testene i prosjektoppgava funnet igjen. Disse innstillingene innebar at friksjonsprøvingen skulle foregå ved påføring av en trykkraft. Påføringshastigheten av denne kraften, ble som for testene i prosjektoppgava, satt til å være 5 mm/min. Dette oppsettet ble så lagret som en forsøksmetode. For hver av testene som ble gjennomført ble dermed denne metoden valgt. Deretter ble navnet på forsøket som skulle gjennomføres skrevet inn før maskinen ble nullstilt både med tanke på påførte laster og forskyvninger. Etter dette var alt klart til at forsøket kunne startes.



Figur 22 - Oppsett av utstyret. Klossene ble plassert i testmaskinen med passende avstand til kameraene som var tilkoblet Aramis. Vertikallasten ble så satt på den midterste av treklossene og testingen startet.

4.2.6 Aramis

Aramis er et målesystem hvor målingene gjennomføres ved fotografering, såkalt Digital Image Correlation (DIC). Dette betyr at målinger av blant annet forskyvning og tøyninger, kan gjøres uten at målesystemet må være i kontakt med prøvestykkene [35]. Målingene gjøres ved fotografering av prøvestykket etter en fast frekvens undervegs som testen gjennomføres. Figur 23 viser utstyret som kreves til målingene og er et stativ med to påmonterte kameraer som er koblet opp mot en datamaskin. Prøvestykkene må være merket enten med referansepunkter i form av klistrelapper som kan påføres prøven, eller med et tilfeldig mønster av svarte prikker på hvit bakgrunn for at målingene skal kunne gjøres. Forflytningen av punktene fra bilde til bilde blir dermed logget av Aramis. Fra disse forflytningene av punktene kan så forskyvninger i de ulike retningene, tøyninger og andre parametre som ønskes undersøkt utledes.



Figur 23 - Målesystemet Aramis. Systemet består av et stativ med påmonterte kameraer. Disse er så tilkoblet en datamaskin [35].

Gjennom fotografering med de to kameraene plassert ved siden av hverandre etter gitte mål og vinkler, er det mulig for kameraene å oppfatte 3D, tilsvarende slik vi mennesker har dybdesyn når vi ser med begge øynene. På grunn av det tilfeldige prikke- mønsteret som er påført prøvestykket er alle prikkene litt forskjellige, både i grånyanse og form. Dette gjør at Aramis kan gjenkjenne hvert enkelt punkt ettersom testingen foregår.

Til forsøkene i denne oppgaven er Aramis 4M benyttet med 50 mm linser. Til kalibreringen av målesystemet ble en plate av typen CP 20 175x140 benyttet. Målinger på et objekt med en overflate med dimensjoner 175 x 140 mm kan dermed utføres. Dette betyr at området som de tre klossenes overflate utgjør er større enn området som dekkes av dette kalibreringsobjektet. Det går likevel fint å få gjort målinger av prøvestykket ved bruk av dette kalibreringsobjektet. Dette fordi det ikke trengs å gjøres målinger på mer enn deler av prøvestykkens overflater. Det nødvendige området for målinger tilsvarer hele midtklossens bredde og halvparten av de ytre klossenes bredde og nederste halvdel av klossenes høyde.

Ved benyttelse av dette kalibreringsobjektet gjelder følgende oppsett for Aramis:

Avstand mellom kameraene og prøvestykket: 725 mm

Avstand mellom de to kameraene: 286 mm

Kameravinkel: 25°

Aperature: 8 mm eller større.

Kamerautstyret ble satt opp i passende høyde slik at området på prøvestykket som kameraene skulle fotografere var mest mulig vinkelrett på kameraenes synsretning. Jo mer nøyaktig dette ble gjort, jo bedre ble resultatene av målingene. Kalibreringen kunne så gjennomføres ved å følge anvisningene som gitt i programmet.

Prikkemønsteret er laget ved at den siden av klossene som skal stå mot kameraene under testing er blitt malt. Områdene på klossene som det skal gjøres målinger på ved bruk av Aramis ble derfor først malt med hvit spraymaling. Etter at denne malingen hadde tørket ble det det videre benyttet svart spraymaling til å påføre prikkemønsteret. Det beste resultatet for påføring av prikkemønsteret var å legge prøvestykkene på et bord med området som skulle males pekende opp. Ved påføringen av svartmalingen ble så sprayboksen holdt et lite stykke fra klossene pekende rett ut i rommet over prøvestykkene. Malingen ble så sprutet

rett ut i rommet, noe som resulterte i et regn av svartmaling på den hvitmalte overflaten. Et eksempel på det påførte prikkemønsteret kan ses i figur 24.



Figur 24 - Prikkemønster påført et av prøvestykkene

Før forsøkene ble satt i gang ble det kontrollert at Aramis greide å registrere prikkemønsteret tilstrekkelig, slik at programmet skulle kunne gjøre gode målinger.. Dette ble gjort ved å ta ett bilde av den plasserte prøven og deretter sjekke om programmet greide å lese av dette mønsteret godt nok. Om dette punktet likevel hadde blitt glemt ville det ikke vært kritisk, da innstillingene for hvordan og hvor nøye programmet skal lese av mønsteret kan endres som en del av etterarbeidet med Aramis-filene. Likevel oppnås best resultater om det også gjøres kontroller før testene gjennomføres.

Den påførte kraften og forskyvningene fra testmaskinen kunne registreres rett i Aramis gjennom tilkobling av kabler. På den måten var det mulig å få de påførte kreftene og forskyvningene direkte inn i datafilene til Aramis. I etterbehandlingene av Aramisfilene var det dermed lettere å få et innblikk i forskyvningene til klossene i forhold til hvordan lasten var påført.

Verdiene fra testmaskinen ble gitt som volt fra testmaskinen. For at verdiene fra testmaskinen skulle registreres riktig i Aramis var det derfor nødvendig å stille inn riktige omgjøringsfaktorer. Dette slik at måleverdiene som ble registrert i Aramis samsvarte best mulig med verdiene som ble registrert av testmaskinen. Omgjøringsfaktorene kunne finnes gjennom innstillingene for instron- maskinen og var som gitt i tabell 6.

Tabell 6 - Omgjøringsfaktorer benyttet i Aramis

	Omgjøringsfaktor	Offset
Kraft	1 V = 10 000 N	-100 N
Forskyvning	1 V = 10 mm	-0,1 mm

Den siste innstillingen som ble gjort i Aramis før testingen kunne begynne var hvor ofte programmet skulle ta bilder av det som ble testet og hvordan denne fotograferingen skulle startes og stoppes. I de utførte friksjonsforsøkene ble bildefrekvensen satt til å være 1 Hz, altså ble programmet stilt inn til å ta ett bilde per sekund mens testingen foregikk. Selve bilderegistreringen ble stilt inn til å startes og stoppes manuelt.

I prosjektoppgaven ble det foreslått bruk av forskyvningsmålere under gjennomføringen av friksjonsforsøkene. Disse var tenkt benyttet til å kontrollere at målingene som ble gjort med Aramis var riktige. Siden det nå er investert i en nyere og raskere versjon av Aramis, samt at det ble gitt grundig opplæring i bruk av programmet, ble ikke benyttelsen av lastceller lenger ansett som nødvendig. Dette gjorde at prosessene rundt gjennomføring av friksjonsforsøkene gikk raskere og det var mulig å gjennomføre et større antall forsøk per dag.

4.3 Oppsett og gjennomføring av testene

Limtreet som ble benyttet til prøvene ble levert som lange bjelker. Kort tid etter at materialene hadde ankommet laboratoriet ble de kappet opp til klosser med ønskede dimensjoner og klossene nummerert fortløpende. Når tre og tre klosser senere ble satt sammen til prøvestykker, ble klossene plukket ut tilfeldig og numrene på de sammensatte prøvestykkene registrert.

Friksjonstestene skulle, med unntak av to prøveserier, gjøres på prøver som hadde ligget oppspent i minst ei uke. Gjennomføringen av disse forsøksseriene måtte derfor utføres i to omganger. Under første runden ble prøvestykkene satt sammen. Tidligst ei uke seinere kunne laboratoriarbeidet fortsette gjennom testing av friksjonen til de oppspente prøvene.

4.3.1 Oppspenningen

Før selve oppspenningen ble gjennomført ble klossene veid, og det nødvendige prikkemønsteret for at Aramis skulle kunne benyttes malt på prøvestykkene.

Etter dette var klossene klare til å spennes sammen. Dette ble gjort etter følgende prosedyre, og ble gjennomført i klimarommet:

1. De tre klossene som utgjorde en prøve ble plassert ved siden av hverandre slik at fiberretningen var lik for alle tre klossene. For å få de til å sitte sammen under monteringen ble det benyttet små treplater og tvinger for å holde dem sammen.
2. Stålplatene ble plassert utenfor de tre klossene.
3. Stålstaget ble ført gjennom de sentriske hullene i de to stålplatene og de tre klossene og festet med skiver og muttere.
4. Mellom ene stålplaten og mutteren ble lastcellen satt på. Denne skulle gi info om hvilke spenninger som var påsatt prøvestykket. Oppspenningene ble påført ved å stramme til mutteren, fram til ønsket oppspenning var oppnådd.
5. Det var ønskelig å ha kontroll på hvordan avstanden mellom stålplatene endret seg ettersom oppspenningen ble påført. Underveis i oppstrammingsprosessen ble det

derfor gjort målinger på avstanden mellom platene. Dette ble gjort ved omtrent 20% oppspenning og 50% oppspenning for prøvestykkene som ble strammet opp til 1,0 MPa. For prøvene strammet opp til 0,6 MPa ble målingene gjort ved omtrent 33% oppspenning og 67% oppspenning. Ved oppspenning på 0,3 MPa ble det ansett å være tilstrekkelig med en måling av avstanden undervegs i oppstrammingsprosessen. Denne ble gjort ved omtrent 50% oppspent prøve. For alle prøvene ble avstanden mellom stålplatene også målt når de var ferdig oppspente.

6. Når prøven var ferdig oppspent kunne de benyttede tvingene og treplatene fjernes. Prøvestykkene i seriene som ikke trengte lagring i oppspent tilstand var med det klare til å testes. For seriene hvor prøvestykkene skulle lagres oppspente ble det foretatt en videre prosess med å igjen få løsnet lastcellen.

Siden det kun var en lastcelle tilgjengelig, måtte denne tas av igjen så fort riktig oppspenning var oppnådd. Dette slik at flere prøver kunne spennes opp samtidig. Metoden som ble benyttet for å ta av igjen lastcellen, uten å miste oppspenningen, var som følger:

1. Målte avstanden mellom stålplatene.
2. De to mindre stålstagene ble ført gjennom de to eksentriske hullene i stålplatene og festet med muttere.
3. Etter hvert som de to små stagene ble strammet til ble kreftene i den sentriske bolten gradvis mindre. Dette kunne observeres gjennom at verdien for lasten i lastcellen gradvis ble redusert. Når det ikke lenger var krefter i den sentriske bolten betød det at de to små stagene var tilstrekkelig strammet og den store bolten med lastcellen kunne frigjøres til oppspenning av en ny prøve.
4. Til slutt ble avstanden mellom stålplatene målt på nytt for å kontrollere at det ikke var blitt et alt for stort avvik i avstanden mellom dem etter at boltene for oppspenningen ble skiftet ut.

5. De ferdige prøvene ble til slutt stablet på paller og lagret i klimarom fram til testingen på friksjonen ble gjennomført tidligst ei uke seinere. Lagringen av de oppspente prøvene er vist i figur 25.



Figur 25 - De oppspente prøvene ble lagret oppspente ved bruk av to mindre stålstag. Prøvene ble stablet på paller og oppbevart i klimarom fram til de skulle testes.

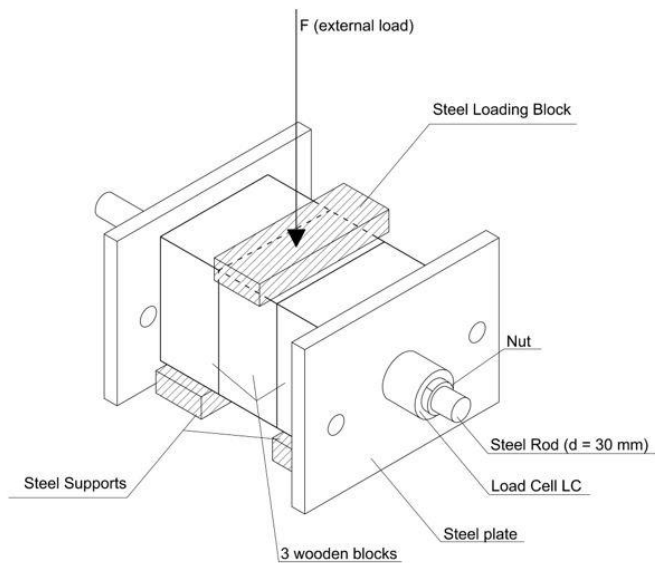
Før selve testingen av friksjonen kunne gjennomføres ble lastcellen påført igjen. Arbeidet ble gjort ved testmaskinen rett før testen skulle utføres. Prosedyren for utskiftningen av stagene og påføringen av lastcellen var lignende prosedyren for å få frigjort den.

1. Målte avstanden mellom stålplatene.
2. Staget med lastcellen ble ført gjennom det sentriske hullet i prøvestykket og festet.
3. Ettersom de to mindre stagene ble løsnet, økte oppspenningskreftene i det sentriske staget. Dette kunne observeres av kreftene i lastcellen. Til slutt kunne de to små stagene fjernes helt, og oppspenningene var i sin helhet overført til det sentriske stålstaget igjen.
4. Spenningen i det sentriske staget, som skulle benyttes under friksjonstestene, ble bestemt ved at avstanden mellom stålplatene skulle være like stor som før lagringen av prøvestykkene.

4.3.2 Friksjonstesting

Når oppspenningene var ført tilbake til det sentriske staget, ble prøven plassert i maskinen og det ble gjort klart til at selve friksjonstesten kunne gjennomføres. Oppsettet for testingen, gitt i figur 26, viser at prøven ble plassert på oppleggsklosser av stål. Disse klossene var så høye at platene som holdt prøvestykket sammen ikke nådde ned i underlaget på testmaskinen. Videre var det viktig å passe på at oppleggsklossene kun var plassert under de ytre treklossene slik at de ikke hindret den midtre klossen i å kunne skyves ut. Samtidig var det ønskelig å få stålkløssene til å dekke undersiden av de ytre klossene mest mulig slik at lokale deformasjoner på undersiden av de ytre treklossene kunne unngås.

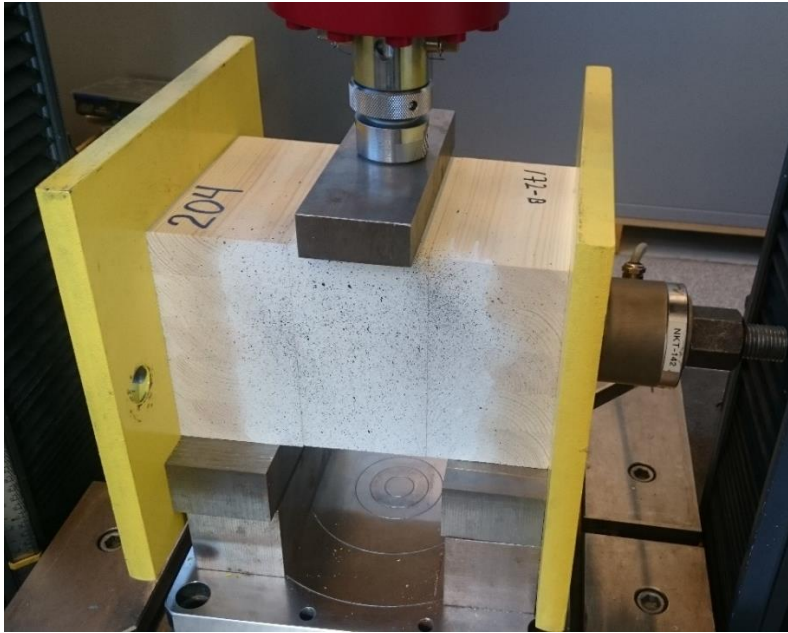
Av tilsvarende årsaker ble det også plassert en stålkløss på oversiden av den midtre klossen. Denne skulle hindre lokale deformasjoner der lasten ble påført, og samtidig sørge for å få spredt kreftene mest mulig jevnt utover kløssens overflate.



Figur 26 - Planlagt oppsett for gjennomføring av friksjonstestene

Videre ble følgende gjort:

1. Sjekket i Aramis om måleutstyret oppfattet det påmalte prikkemønsteret tilstrekkelig. Hvis ikke ble det gjennomført justeringer av lyset og eksponeringstiden. Siden det var mulig å koble testmaskinen opp mot Aramis, slik at kreftene og forskyvningene ettersom testen ble gjennomført også lot seg registrere i Aramis, var det nødvendig å stille inn omgjøringsfaktorene for hver ny test som skulle gjennomførtes. Dette så det skulle være samsvar mellom verdiene gitt av maskinen og verdiene i programmet.
2. Stilte inn programmene for testmaskinen. Testene av friksjonen ble gjennomført som en trepunkts- test. Belastningshastigheten ble satt til 5 mm/min.
3. Bommen som sørger for lastpåføringen ble ført ned til overflaten av den midterste klossen. Forskyvningen og påført kraft ble deretter nullstilt og testen kunne startes. Samtidig ble også registreringa i Aramis startet.
4. For seriene med pålasting i to sykler ble testen stoppet når forskyvningene av midtklossen var passert 12 mm. Bommen med lasten ble så heist et lite stykke før den igjen ble senket ned på prøvestykket og testen ble fortsatt. Når utglidningen var 20 mm ble testen stoppet. Prøvestykket ble da tatt ut av testmaskinen og demontert.



Figur 27 - Plassering av prøvestykke i testmaskinen. Av bildet kan man se hvordan stålklossene som skal virke som opplegg er plassert under de ytre trekklossene i prøvestykket.



Figur 28 - Prøvestykket plassert i testmaskinen klar for testing. I forkant vises plasseringen av kameraene benyttet i forbindelse med registrering av målingene i Aramis.

4.4 Resultater fra de testede seriene

I denne delen er resultatene som har framkommet av de gjennomførte seriene presentert. Videre er friksjonskoeffisientene beregnet fra verdiene som framkom gjennom friksjonstestene. Kraft- forskyvningskurvene for hver av testene innen en serie er satt sammen i et felles diagram. Dette gir en oversikt over spredningen av resultatene fra de forskjellige forsøkene. Samtidig gir det en oversikt over hvordan oppførselen av forsøkene er i forhold til hverandre. Hver enkelt kurve fra hver av seriene er i tillegg lagt ved som vedlegg til oppgaven.

Ved beregning av de statiske friksjonskoeffisientene trengtes verdiene for utskyvningskreftene samt oppspenningskreftene som opptrådte i prøvestykkene når utglidningen begynte. Verdiene benyttet for utskyvningskreftene ble funnet fra kraft- forskyvningsdiagrammene som framkom fra testingen. Siden det ikke er ønskelig med noen utglidninger, er det kreftene ved første svakhetstegnet på grafene som er brukt til beregningene av friksjonskoeffisientene. Den statiske friksjonskoeffisienten er derfor beregnet med verdier fra den første tydelige toppen på last- forskyvningskurvene. I mange av tilfellene har dette tilsvart makslasten som er oppnådd gjennom testingen. Det er likevel også tilfeller hvor det har oppstått en liten utglidning, og det er dannet et lite toppunkt, før det endelige bruddet skjedde. I disse tilfellene er det lasten fra det første lille toppunktet som er brukt videre.

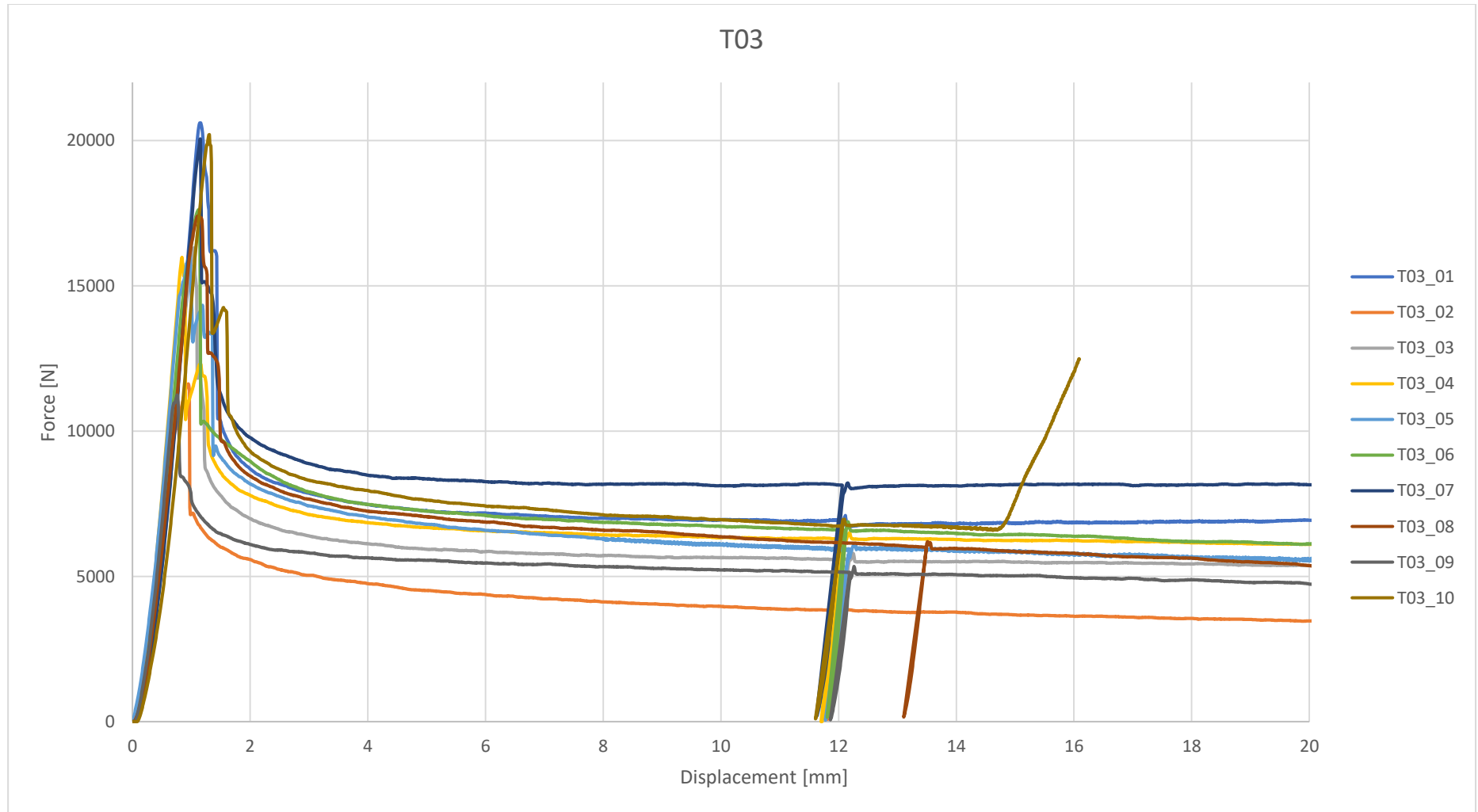
Mange av tilfellene med to lasttopper er undersøkt i Aramis, og for en god del viser det seg at det første toppunktet skyldes at prøven ikke har vært godt nok plassert på opplegget. Et resultat av dette er at utglidningene bare har skjedd langs den ene glideflaten i prøvestykket. Til tross for dette er det for tilfellene med to toppunkter, og hvor makslasten er gitt i det andre av de to punktene likevel den påførte lasten ved toppunkt nummer en som er benyttet. Dette nettopp fordi det ikke er ønskelig med noen utglidninger. Siden Aramis viser at det foregår glidninger mellom klossene allerede i det første toppunktet, er dette det første tydelige svakhetstegnet og verdiene på lastene i dette punktet er derfor benyttet til

friksjonsberegningene. Disse verdiene er i de påfølgende tabellene omtalt som bruddlastene i de ulike testene.

Lastcellen var satt til å gjøre målinger gjennom hele forsøket. Resultatet av disse målingene viser at kreftene i lastcellen som regel følger en omtrent samsvarende lastkurve som den påførte lasten på midtklossen. Med dette menes eksempelvis at ettersom kraften på den midtre klossen øker, øker også kreftene i stålstaget som holdt klossene sammen, noe som bevises gjennom plottene fra lastcellen. Det har likevel i noen tilfeller vært noe vanskelig å finne samsvarende kurver fra plottene for lastcellen og instron- maskinen. I disse tilfellene er det hovedsakelig plottene for lastcellen som har vært noe utydelige. For disse plottene er det i mange tilfeller valgt å benytte den høyeste verdien, gjerne hvor det rett etter denne opptrer kan observeres at kreftene som opptrer i lastcellen igjen begynner å reduseres. Begrunnelsen for dette er at benyttelse av den høyeste verdien som er registrert fra lastcellen, selv om dette ikke nødvendigvis tilsvarer det samsvarende punktet fra lastkurva fra testmaskinen, vil gi et konservativt resultat. Plottene fra lastcellen er ikke gjengitt i sin helhet i masteroppgaven, men er lagt ved oppgaven som elektroniske filer.

Det er også ønskelig å finne en verdi for den kinematiske friksjonen, altså når klossen er i bevegelse. Av last- forskyvningskurvene kan det observeres at utglidningene er blitt nokså jevne ved 10 mm. Med bakgrunn i dette er derfor verdiene på kreftene ved 10 mm utglidning også plukket ut av plottene og bearbeidet videre for å finne treets glidefriksjon. Den samsvarende verdien for oppspenningen er funnet gjennom plottene fra lastcellen, og det har dermed vært mulig å beregne den kinematiske friksjonen.

4.4.1 T03



Figur 29 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie T03

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 7 - Bruddlast, oppspenningskraft og statistisk friksjonskoeffisient for serie T03

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
T03_01	20603,01	14190	0,73
T03_02	11620,78	8130	0,71
T03_03	16313,12	11040	0,74
T03_04	15983,64	12030	0,66
T03_05	16054,89	12090	0,66
T03_06	17616,72	14580	0,60
T03_07	20054,36	15450	0,65
T03_08	17406,14	13770	0,63
T03_09	11241,97	9000	0,62
T03_10	20205,38	15240	0,66
Gjennomsnitt			0,67

Snittverdi for den statistiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,409$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,070$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statistiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,57$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 8 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien T03

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
T03_01	6944,32	10320	0,34
T03_02	3963,89	6180	0,32
T03_03	5642,97	8490	0,33
T03_04	6335,38	9510	0,33
T03_05	6071,25	9120	0,33
T03_06	6723,95	10290	0,33
T03_07	8117,77	12150	0,33
T03_08	6360,03	9510	0,33
T03_09	5222,73	7380	0,35
T03_10	6951,30	10740	0,32
Gjennomsnitt			0,33

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,106$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,026$$

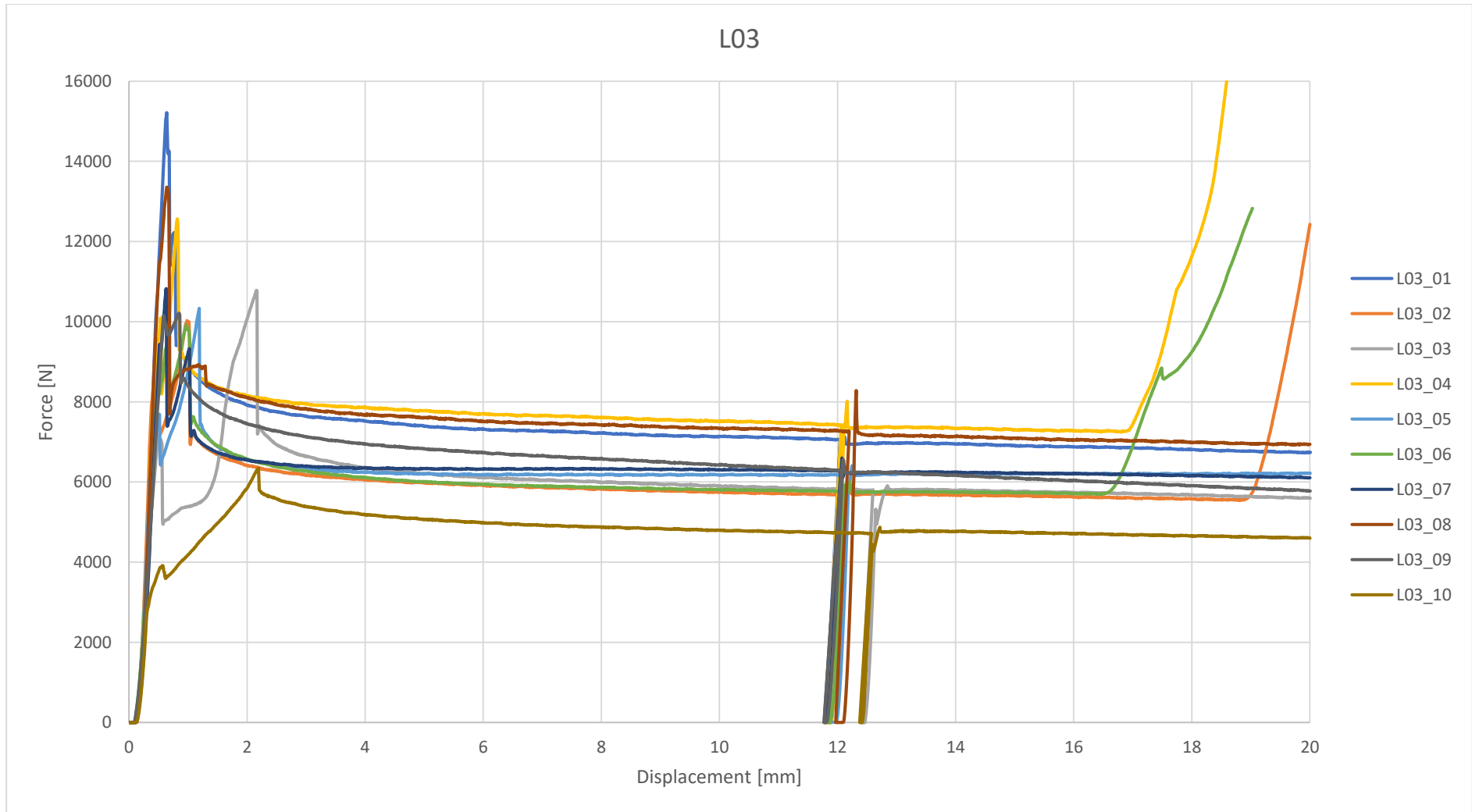
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,31$$

4.4.2 L03



Figur 30 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie L03

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 9 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie L03

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
L03_01	15215,67	11220	0,68
L03_02	9586,56	9990	0,48
L03_03	7143,54	9000	0,40
L03_04	10089,94	10950	0,46
L03_05	7686,79	9690	0,40
L03_06	9379,67	10080	0,47
L03_07	10823,74	10770	0,50
L03_08	13357,41	11550	0,58
L03_09	10157,34	11280	0,45
L03_10	3916,24	8220	0,24
Gjennomsnitt			0,47

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,795$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,247$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,25$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 10 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien L03

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
L03_01	7132,17	10710	0,33
L03_02	5753,05	8880	0,32
L03_03	5896,11	8700	0,34
L03_04	7521,25	10650	0,35
L03_05	6169,54	9630	0,32
L03_06	5796,12	9420	0,31
L03_07	6303,52	9900	0,32
L03_08	7327,88	11010	0,33
L03_09	6428,84	9960	0,32
L03_10	4795,20	7530	0,32
Gjennomsnitt			0,33

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,121$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,036$$

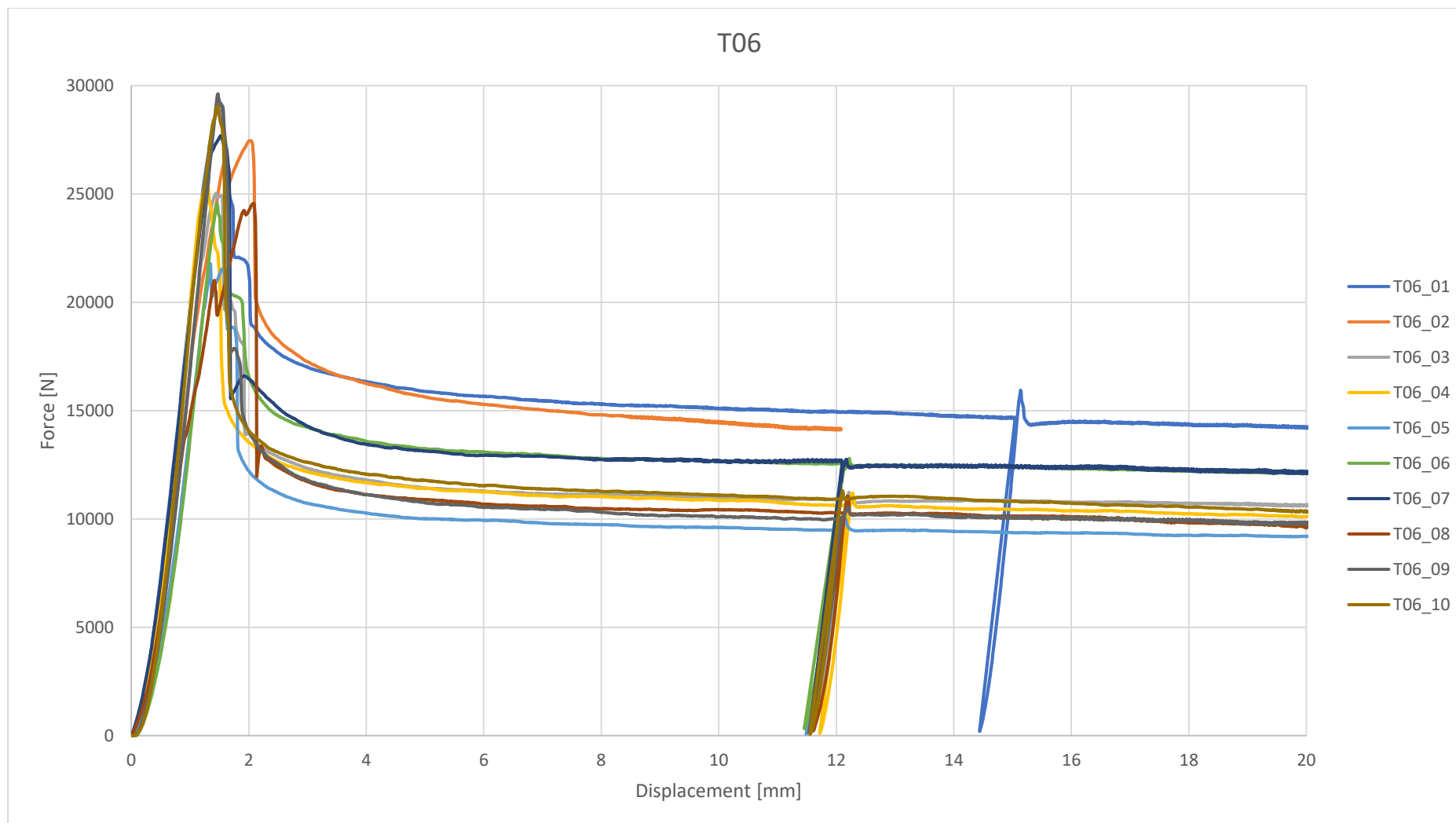
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,30$$

4.4.3 T06



Figur 31 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie T06

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 11 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie T06

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
T06_01	29180,17	25350	0,58
T06_02	27060,29	22620	0,60
T06_03	25037,59	19620	0,64
T06_04	25520,94	19020	0,67
T06_05	21782,34	17490	0,62
T06_06	24569,99	20730	0,59
T06_07	27691,65	22890	0,60
T06_08	21010,67	17550	0,60
T06_09	29617,52	23220	0,64
T06_10	29065,27	23280	0,62
Gjennomsnitt			0,62

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,485$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,044$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,56$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 12 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien T06

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
T06_01	15095,90	21510	0,35
T06_02	14427,98	18990	0,38
T06_03	10973,38	16650	0,33
T06_04	10852,09	14910	0,36
T06_05	9609,42	14280	0,34
T06_06	12668,43	17880	0,35
T06_07	12704,91	18510	0,34
T06_08	10428,66	14460	0,36
T06_09	10096,69	16860	0,30
T06_10	11095,37	16860	0,33
Gjennomsnitt			0,34

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,069$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,064$$

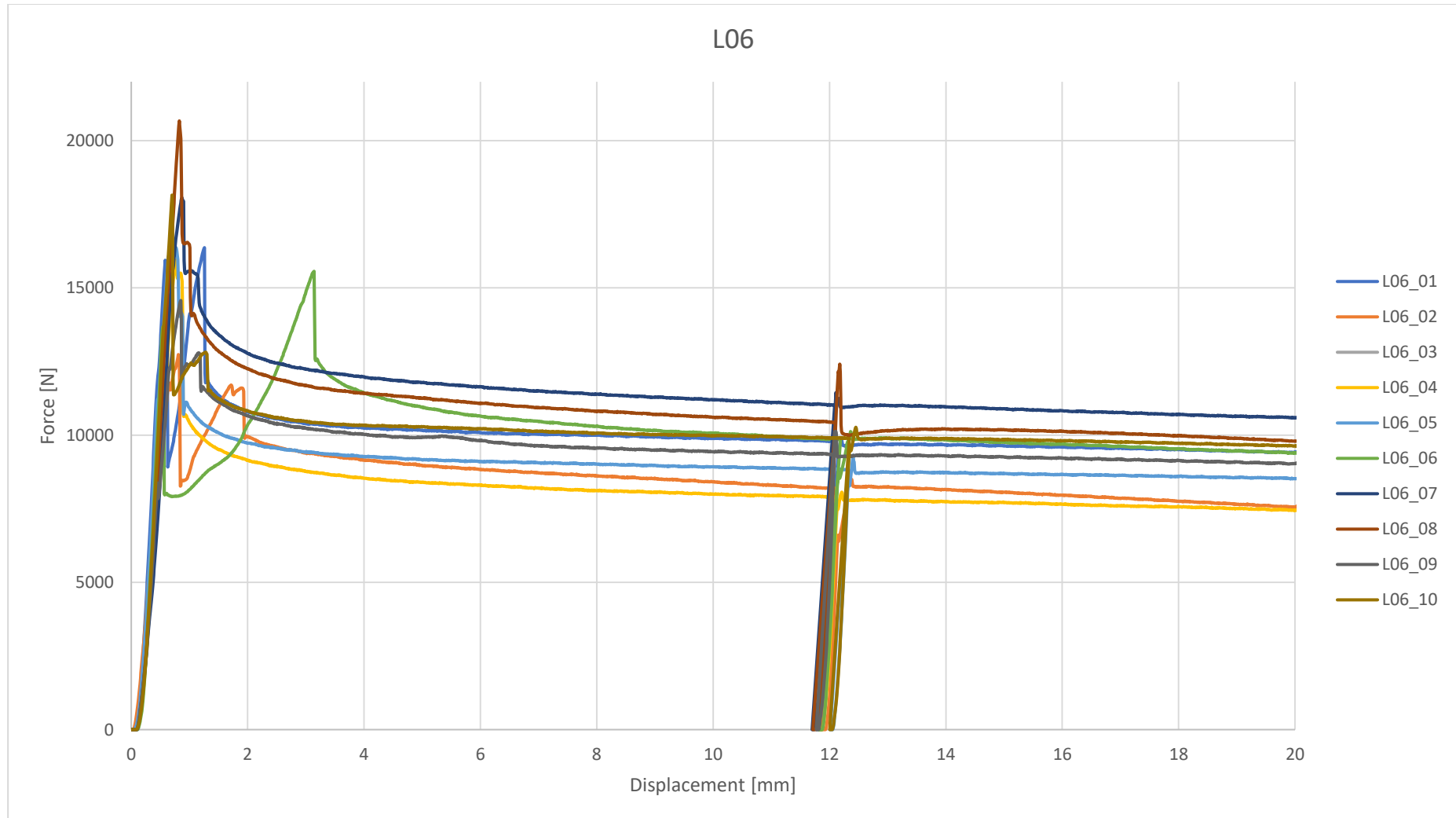
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,30$$

4.4.4 L06



Figur 32 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie L06

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 13 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie L06

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
L06_01	15936,01	16200	0,49
L06_02	12738,26	15270	0,42
L06_03	16125,17	15810	0,51
L06_04	15942,12	13260	0,60
L06_05	16374,55	14010	0,58
L06_06	13671,99	16770	0,41
L06_07	18056,08	18000	0,50
L06_08	20666,37	18750	0,55
L06_09	14567,66	15300	0,48
L06_10	18148,97	16380	0,55
Gjennomsnitt			0,51

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,682$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,127$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,39$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 14 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien L06

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
L06_01	9893,66	15780	0,31
L06_02	8415,09	13740	0,31
L06_03	10307,02	15870	0,32
L06_04	7995,44	12750	0,31
L06_05	8921,78	13590	0,33
L06_06	10058,59	15810	0,32
L06_07	11201,83	17190	0,33
L06_08	10610,06	17010	0,31
L06_09	9436,62	14580	0,32
L06_10	9975,20	15960	0,31
Gjennomsnitt			0,32

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,149$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,026$$

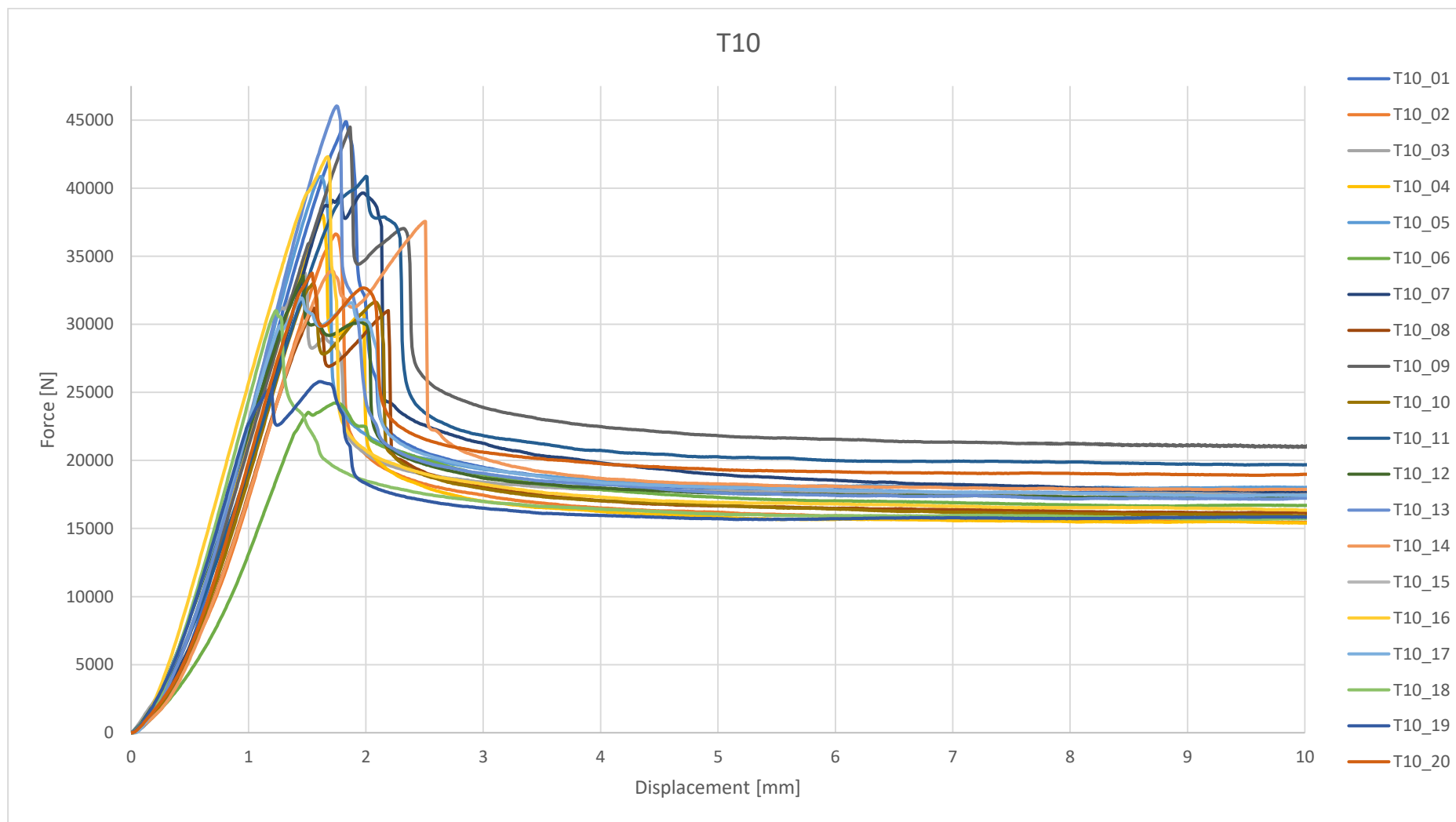
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,30$$

4.4.5 T10



Figur 33 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie T10

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 15 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie T10

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
T10_01	44868,58	35430	0,63
T10_02	36633,12	30570	0,60
T10_03	33760,49	31320	0,54
T10_04	38027,88	29580	0,64
T10_05	40845,69	32640	0,63
T10_06	23534,89	27780	0,42
T10_07	39656,05	37770	0,52
T10_08	31193,82	28950	0,54
T10_09	44492,88	40500	0,55
T10_10	33002,43	29790	0,55
T10_11	40867,54	38070	0,54
T10_12	33574,39	30300	0,55
T10_13	46036,45	32580	0,71
T10_14	33927,07	32550	0,52
T10_15	42423,32	32790	0,65
T10_16	42311,48	32220	0,66
T10_17	31929,67	32580	0,49
T10_18	31011,03	27120	0,57
T10_19	25451,25	26250	0,48
T10_20	33756,77	30900	0,55
Gjennomsnitt			0,57

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,575$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,125$$

Det er gjennomført 20 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 20$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 1,93$

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,44$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 16 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien T10

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
T10_01	17600,74	27000	0,33
T10_02	15451,69	24240	0,32
T10_03	17629,26	27030	0,33
T10_04	15398,88	23040	0,33
T10_05	18007,89	26310	0,34
T10_06	16693,86	25260	0,33
T10_07	17730,68	29880	0,30
T10_08	16155,12	25530	0,32
T10_09	20965,68	32100	0,33
T10_10	15922,99	24840	0,32
T10_11	19683,90	29730	0,33
T10_12	17298,11	26490	0,33
T10_13	17228,01	24750	0,35
T10_14	17869,86	27870	0,32
T10_15	16152,83	23250	0,35
T10_16	16338,29	26190	0,31
T10_17	17438,56	27510	0,32
T10_18	15710,62	23220	0,34
T10_19	15837,47	24390	0,32
T10_20	18977,90	27510	0,34
Gjennomsnitt			0,33

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,115$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,038$$

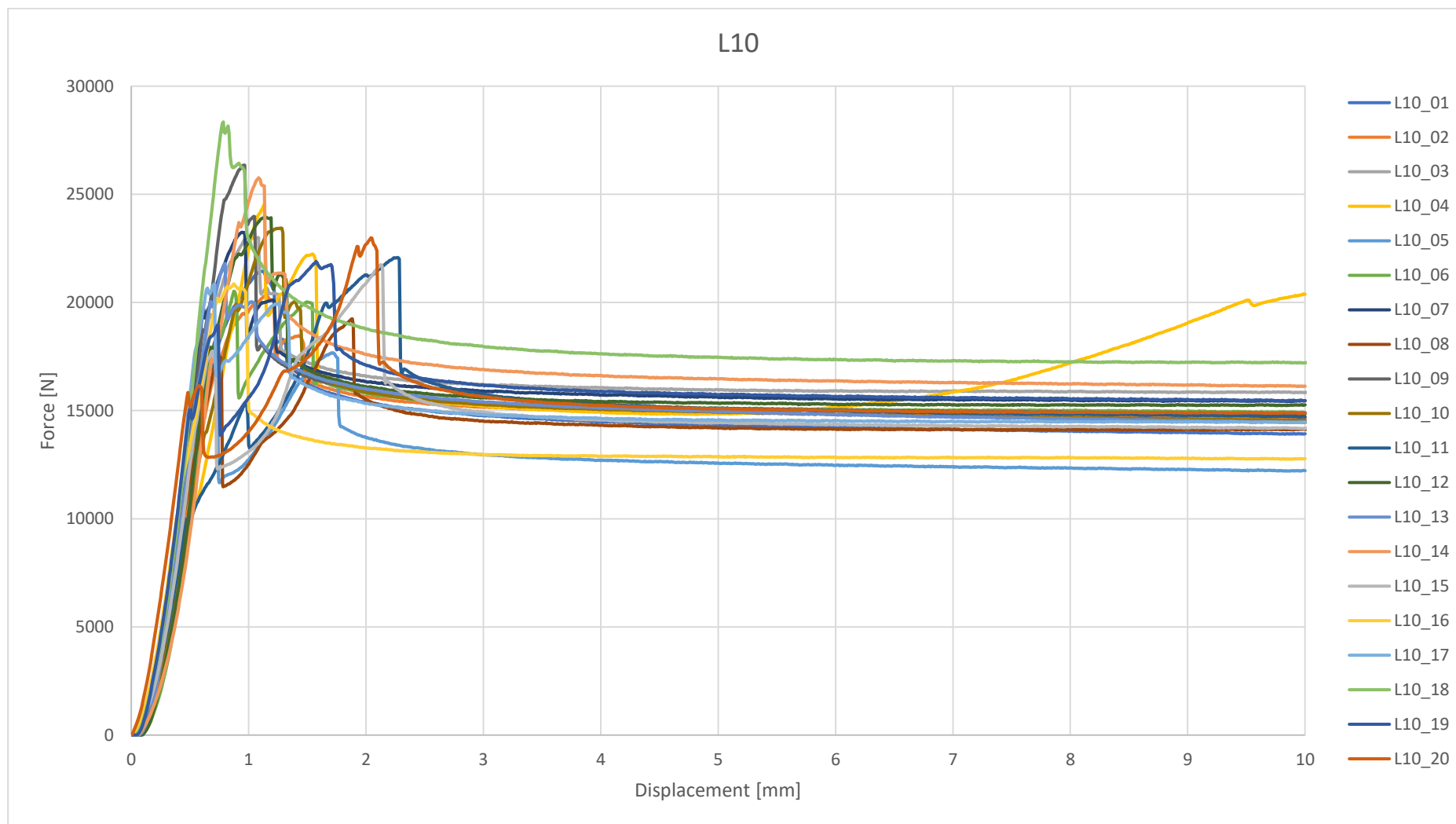
Det er gjennomført 20 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 20$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 1,93$

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,30$$

4.4.6 L10



Figur 34 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie L10

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 17 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie L10

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
L10_01	21438,95	21690	0,49
L10_02	20365,47	22290	0,46
L10_03	23048,96	24810	0,46
L10_04	24535,89	24960	0,49
L10_05	17437,63	19710	0,44
L10_06	20520,45	20730	0,49
L10_07	23245,58	22500	0,52
L10_08	17554,53	22200	0,40
L10_09	26345,80	24090	0,55
L10_10	23442,12	25350	0,46
L10_11	15343,92	22980	0,33
L10_12	23946,95	24240	0,49
L10_13	21800,01	22740	0,48
L10_14	25761,55	26880	0,48
L10_15	17756,61	23070	0,38
L10_16	20853,45	19260	0,54
L10_17	20857,11	22080	0,47
L10_18	28340,35	23100	0,61
L10_19	18944,20	25080	0,38
L10_20	16153,05	25410	0,32
Gjennomsnitt			0,46

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,784$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,163$$

Det er gjennomført 20 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 20$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 1,93$

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,33$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 18 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien L10

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
L10_01	13931,47	20880	0,33
L10_02	14646,79	22170	0,33
L10_03	15830,41	25020	0,32
L10_04	20385,47	23310	0,44
L10_05	12217,05	19200	0,32
L10_06	14918,90	20490	0,36
L10_07	15455,43	22290	0,35
L10_08	14131,57	22260	0,32
L10_09	14832,04	23730	0,31
L10_10	14553,74	23880	0,30
L10_11	14710,82	22470	0,33
L10_12	15262,65	24180	0,32
L10_13	14450,16	22140	0,33
L10_14	16125,80	26130	0,31
L10_15	14178,45	22830	0,31
L10_16	12774,27	19170	0,33
L10_17	14460,78	21870	0,33
L10_18	17209,79	23100	0,37
L10_19	15465,55	24660	0,31
L10_20	14878,75	25290	0,29
Gjennomsnitt			0,33

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,111$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,089$$

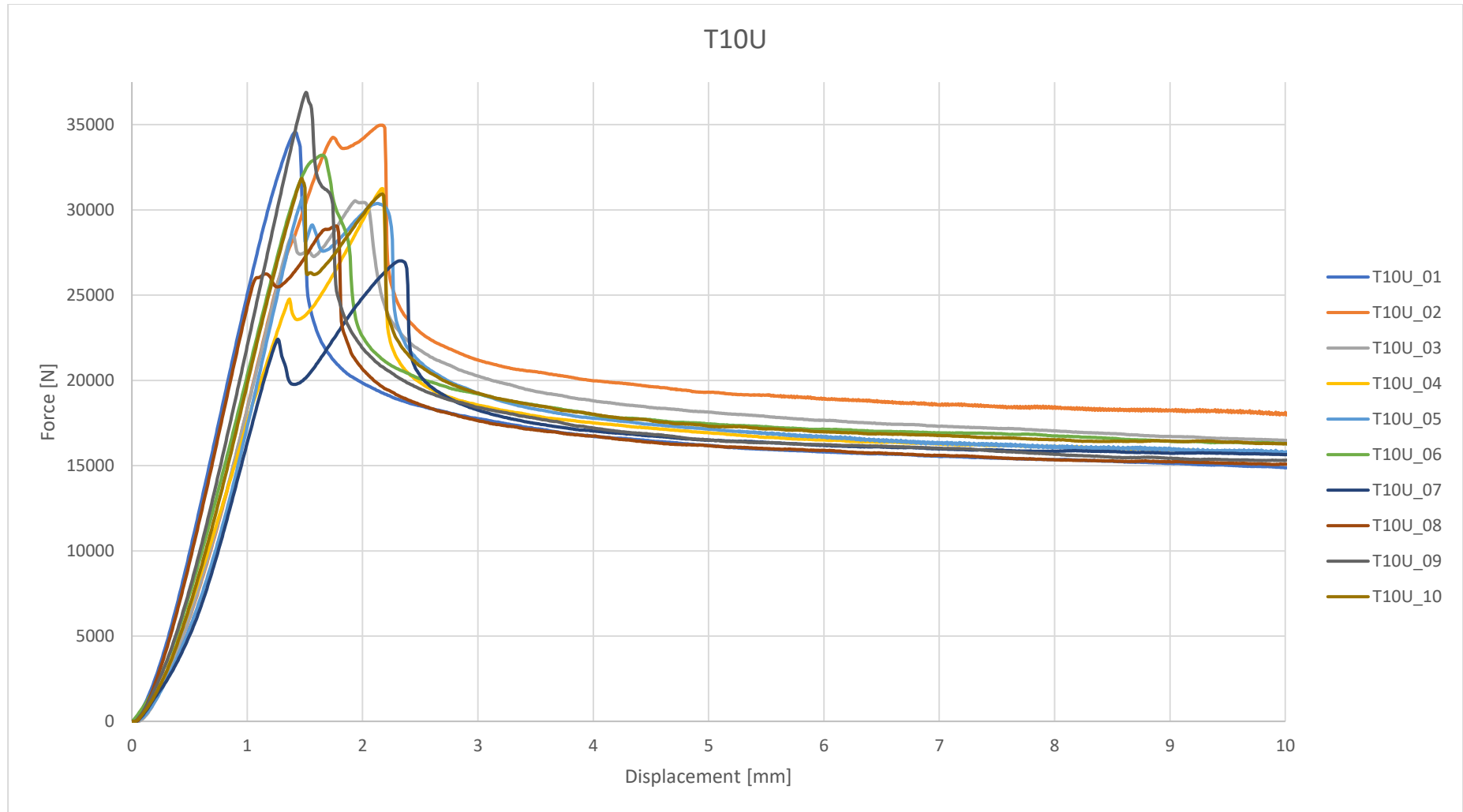
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 20$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 1,93$

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,28$$

4.4.7 T10U



Figur 35 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie T10U

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 19 - Bruddlast, oppspenningskraft og statistisk friksjonskoeffisient for serie T10U

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
T10U_01	34572,68	32640	0,53
T10U_02	34254,09	36630	0,47
T10U_03	28480,77	32970	0,43
T10U_04	24776,83	31380	0,39
T10U_05	30762,95	34710	0,44
T10U_06	33211,48	35640	0,47
T10U_07	22422,68	30660	0,37
T10U_08	26248,30	32820	0,40
T10U_09	36895,13	35370	0,52
T10U_10	31841,37	35610	0,45
Gjennomsnitt			0,45

Snittverdi for den statistiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,811$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,118$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statistiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,35$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 20 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien T10U

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
T10U_01	14878,13	25260	0,29
T10U_02	18116,38	29790	0,30
T10U_03	16474,79	28050	0,29
T10U_04	15737,64	28290	0,28
T10U_05	15813,47	28170	0,28
T10U_06	16289,46	28260	0,29
T10U_07	15641,83	26940	0,29
T10U_08	15078,85	27990	0,27
T10U_09	15307,41	27090	0,28
T10U_10	16292,43	29130	0,28
Gjennomsnitt			0,29

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,256$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,030$$

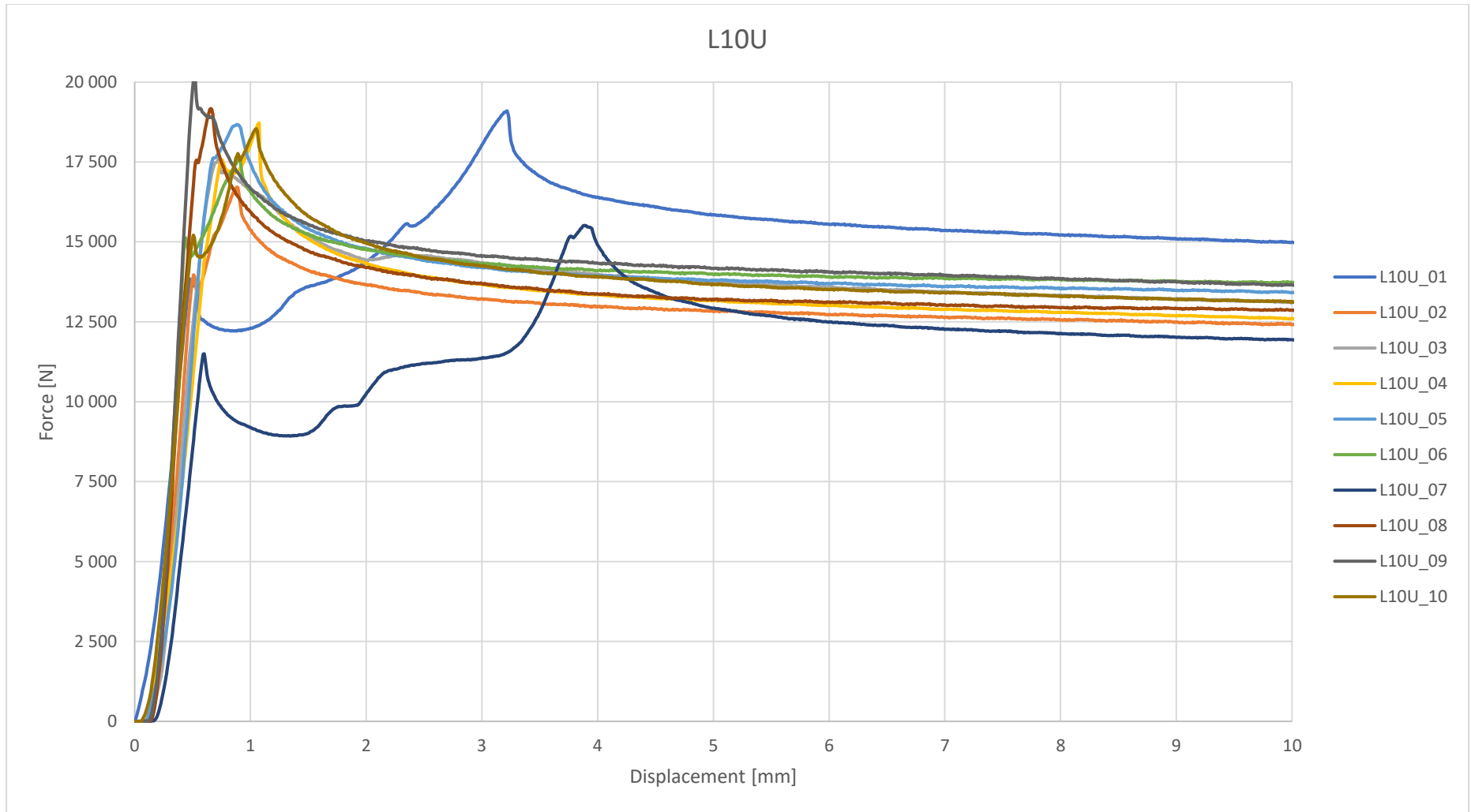
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,27$$

4.4.8 L10U



Figur 36 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie L10U

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 21 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie L10U

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
L10U_01	13848,02	27600	0,25
L10U_02	16715,62	23820	0,35
L10U_03	17596,41	25110	0,35
L10U_04	17570,81	25590	0,34
L10U_05	18670,10	24720	0,38
L10U_06	15126,85	26070	0,29
L10U_07	11495,53	23970	0,24
L10U_08	19175,15	24060	0,40
L10U_09	20248,93	25230	0,40
L10U_10	15214,50	24930	0,31
Gjennomsnitt			0,33

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,120$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,182$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,22$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 22 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien L10U

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F ₁₀ [N]	Oppspenning, P ₁₀ [N]	Friksjonskoeffisient, μ _k []
L10U_01	14989,49	26250	0,29
L10U_02	12414,53	22770	0,27
L10U_03	13120,81	24210	0,27
L10U_04	12596,61	23940	0,26
L10U_05	13410,31	23760	0,28
L10U_06	13716,79	25470	0,27
L10U_07	11942,40	23520	0,25
L10U_08	12868,20	23280	0,28
L10U_09	13652,55	23850	0,29
L10U_10	13137,33	23880	0,28
Gjennomsnitt			0,27

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,296$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,047$$

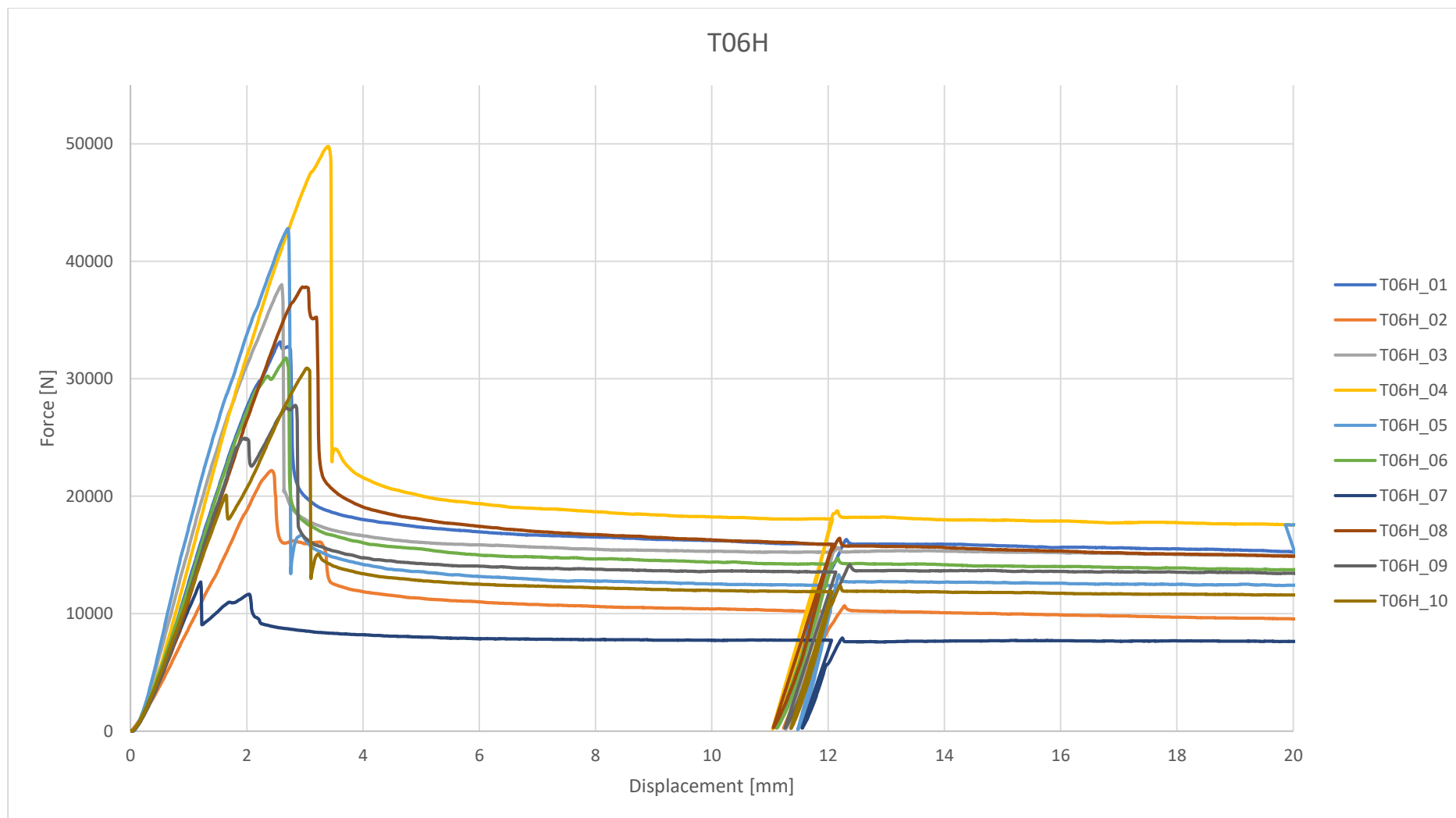
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir n = 10.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man k_s = 2,10.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,25$$

4.4.9 T06H



Figur 37 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie T06H

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 23 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie T06H

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
T06H_01	33130,47	30210	0,55
T06H_02	22194,21	19230	0,58
T06H_03	38005,31	30510	0,62
T06H_04	49778,57	35940	0,69
T06H_05	42793,70	28920	0,74
T06H_06	30224,69	26460	0,57
T06H_07	12706,04	12960	0,49
T06H_08	37809,41	33750	0,56
T06H_09	24949,79	23550	0,53
T06H_10	20109,54	21630	0,46
Gjennomsnitt			0,58

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,556$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,144$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,42$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 24 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien T06H

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
T06H_01	16221,82	23520	0,34
T06H_02	10412,66	14100	0,37
T06H_03	15307,99	23070	0,33
T06H_04	18225,50	23910	0,38
T06H_05	12533,71	18420	0,34
T06H_06	14390,44	19980	0,36
T06H_07	7731,81	10740	0,36
T06H_08	16282,11	24720	0,33
T06H_09	13616,73	19890	0,34
T06H_10	11979,96	18300	0,33
Gjennomsnitt			0,35

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,057$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,051$$

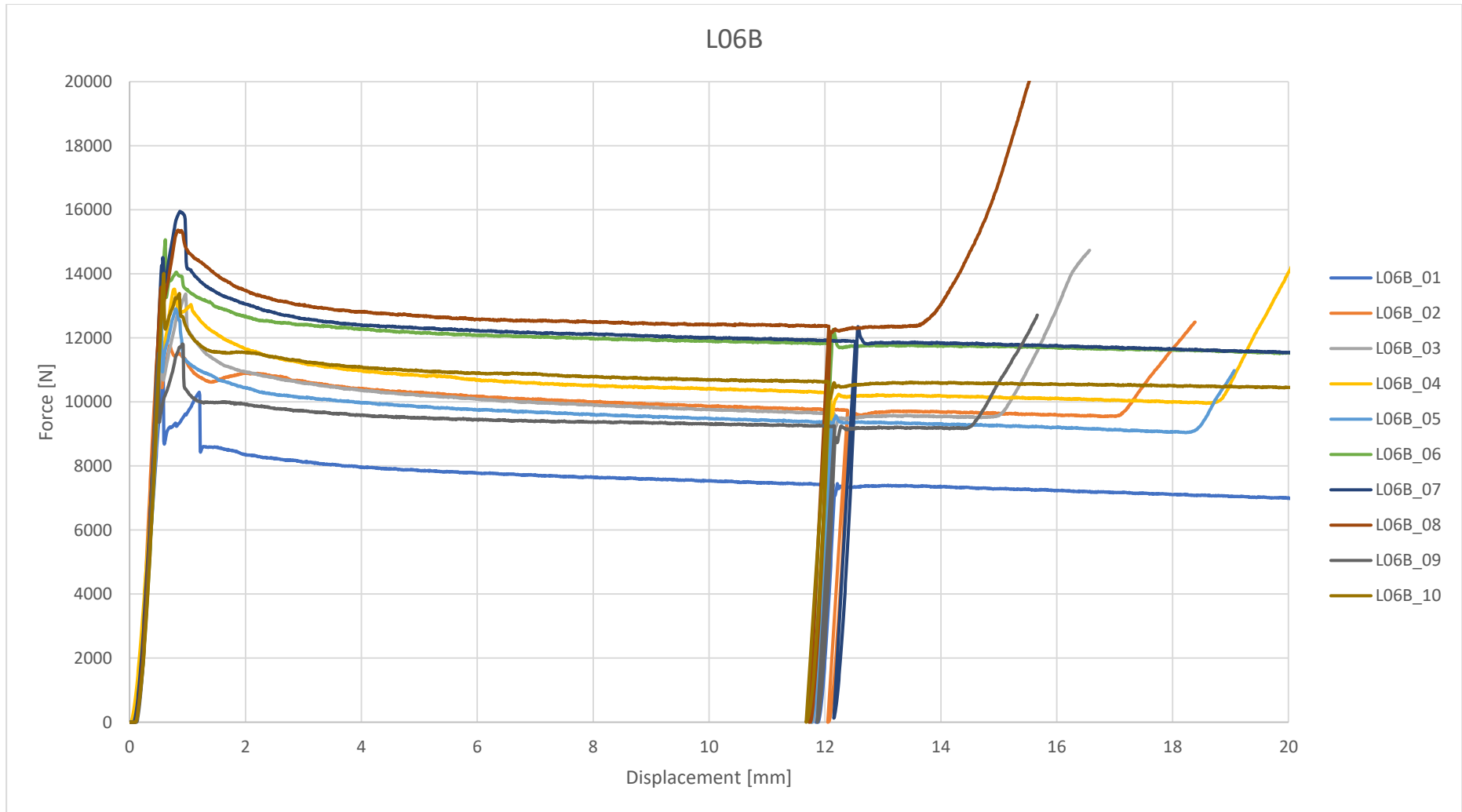
Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,31$$

4.4.10 L06B



Figur 38 - Felles kraft- forskyvningsdiagram for serie L06B

Statisk friksjonskoeffisient

Tabell 25 - Bruddlast, oppspenningskraft og statisk friksjonskoeffisient for serie L06B

Forsøk	Bruddlast, F [N]	Oppspenning, P [N]	Friksjonskoeffisient, μ_s []
L06B_01	10783,55	13740	0,39
L06B_02	12959,31	17640	0,37
L06B_03	13368,25	16830	0,40
L06B_04	13521,05	16920	0,40
L06B_05	12529,30	16440	0,38
L06B_06	15063,72	19530	0,39
L06B_07	15946,45	21090	0,38
L06B_08	15363,69	20070	0,38
L06B_09	11516,08	15720	0,37
L06B_10	14008,52	18330	0,38
Gjennomsnitt			0,38

Snittverdi for den statiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -0,957$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,028$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den statiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{s, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,36$$

Kinematisk friksjonskoeffisient

Tabell 26 - Last og oppspenning ved 10 mm forskyvning samt kinematisk friksjonskoeffisient for serien L06B

Forsøk	Last ved 10 mm forskyvning, F_{10} [N]	Oppspenning, P_{10} [N]	Friksjonskoeffisient, μ_k []
L06B_01	7527,03	12840	0,29
L06B_02	9864,04	17040	0,29
L06B_03	9762,74	15930	0,31
L06B_04	10412,58	16470	0,32
L06B_05	9472,17	15330	0,31
L06B_06	11908,76	19200	0,31
L06B_07	12017,26	20610	0,29
L06B_08	12415,61	19590	0,32
L06B_09	9303,97	15270	0,30
L06B_10	10685,17	17910	0,30
Gjennomsnitt			0,30

Snittverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten når det er antatt log- normal fordeling:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\mu_i) = -1,191$$

Standardavviket blir:

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\mu_i) - \bar{y})^2} = 0,039$$

Det er gjennomført 10 tester, hvor ingen av forsøksresultatene forkastes. Dette gir $n = 10$.

Fra NS-EN 14358:2016 finner man $k_s = 2,10$.

Den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten blir dermed:

$$\mu_{k, kar} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) = 0,28$$

4.4.11 Oppsummering

Tabell 27 - Sammenligning av resultater

Serie	Antall forsøk, n	Statisk friksjon			Kinematisk friksjon		
		Gjennomsnitt	Karakteristisk verdi	Standardavvik	Gjennomsnitt	Karakteristisk verdi	Standardavvik
T03	10	0,67	0,57	0,070	0,33	0,31	0,026
L03	10	0,47	0,25	0,247	0,33	0,30	0,036
T06	10	0,62	0,56	0,044	0,34	0,30	0,064
L06	10	0,51	0,39	0,127	0,32	0,30	0,026
T10	20	0,57	0,44	0,125	0,33	0,30	0,038
L10	20	0,46	0,33	0,163	0,33	0,28	0,089
T10U	10	0,45	0,35	0,118	0,29	0,27	0,030
L10U	10	0,33	0,22	0,182	0,27	0,25	0,047
T06H	10	0,58	0,42	0,144	0,35	0,31	0,051
L06B	10	0,38	0,36	0,028	0,30	0,28	0,039

4.5 Observasjoner og diskusjon av resultatene

Verdiene for friksjonskoeffisienten viser at denne varierer med hvor store oppspenningene har vært i dekket. Ses det bort fra at størrelsen på oppspenningskreftene og dermed også utglidningskreftene har vært forskjellige, viser last- forskyvningskurvene at de fleste testene har hatt testforløp som ligner hverandre. Ved teststart påførtes en konstant økende last fram til utglidningen av midtklossen begynte. I bruddpunktet, der glidningene startet, var de påførte kreftene blitt så store at friksjonskreftene ikke lenger greide å holde mot disse. Dette kunne ses av kraft-forskyvningskurvene ved at kreftene redusertes samtidig som utglidningene fortsatt foregikk med den konstante hastigheten som testmaskinen var innstilt på. Etterhvert flatet kraft- forskyvningskurven ut, noe som betyr at det kun var nødvendig med en konstant påføring av krefter for å få videre utglidning av klossen.

For enkelte av testene har det oppstått flere lasttopper. Grunnene til dette er analysert gjennom Aramis, og i mange av tilfellene kommer det fram at prøvene har vært for dårlig opplagt. Utglidningene langs de to glideplanene har dermed startet på ulike tidspunkter og resultert i to lasttopper. Den første av lasttoppene har hovedsakelig oppstått når tilstrekkelig kontakt mellom prøvestykket og det dårlig plasserte opplegget er oppnådd. Gjennom analysene viste det seg at det ved denne lasttoppen samtidig var antydninger til utglidninger langs en av glideplanene. Siden dette er et svakhetstegn for dekkene, er derfor verdien for denne påførte lasten fortsatt benyttet til beregningen av friksjonskoeffisientene. Et resultat av dette er at disse friksjonskoeffisientene oppnår lavere verdier enn de andre friksjonskoeffisientene i serien.

I testene der den andre av de to lasttoppene var den største, ble friksjonskoeffisienten beregnet både for maks påført last og for lasten oppnådd ved første lasttopp. Om makslasten samsvarte med første toppen, ble friksjonskoeffisienten kun beregnet for makslasten. I oppgaven er det likevel kun friksjonskoeffisientene fra de første lasttoppene som er presentert. Verdiene for friksjonskoeffisientene der makslasten er gitt av en andre lasttopper vil ikke følge papirutgaven av rapporten. Beregningene for alle

friksjonskoeffisientene vil derimot være vedlagt rapporten i form av elektroniske dokumenter.

Andre tester viste at prøvene var tilstrekkelig plassert på oppleggene, men at det fremdeles ble to lasttopper i plottene. Analysene viser at dette skyldes at glidningene ved de to glideflatene begynner til forskjellige tidspunkter. Dette kan for eksempel ha oppstått dersom den vertikalt påførte lasten ikke ble påført tilstrekkelig sentrisk på den midtre treklossen. Kraftene vil dermed ha blitt større langs den ene av glideflatene. De ulike utglidningene kan også skyldes at friksjonskoeffisienten er forskjellig for de to flatene. Resultat er dermed at den ene glideflaten vil kunne stå imot større krefter enn den andre glidelaten.

Stålklossen som ble lagt på den midtre treklossen i prøvestykket hadde som hovedformål å hindre at det oppstod lokale deformasjoner i treet. Samtidig skulle denne være med å redusere de mulige effektene dersom vertikallasten ble påført eksentrisk på prøvestykket. Klossen hadde derfor en tykkelse på 2 cm for å øke klossens stivhet. De øvrige dimensjonene var slik at den store delen av overflaten til treklossen som ble forsøkt dyttet ut var dekket. Stålklossens store flate og stivhet, førte dermed til at den vertikalt påførte lasten kunne antas å virke som en jevnt fordelt last med tyngdepunkt sentrisk på den midtre treklossens overflate.

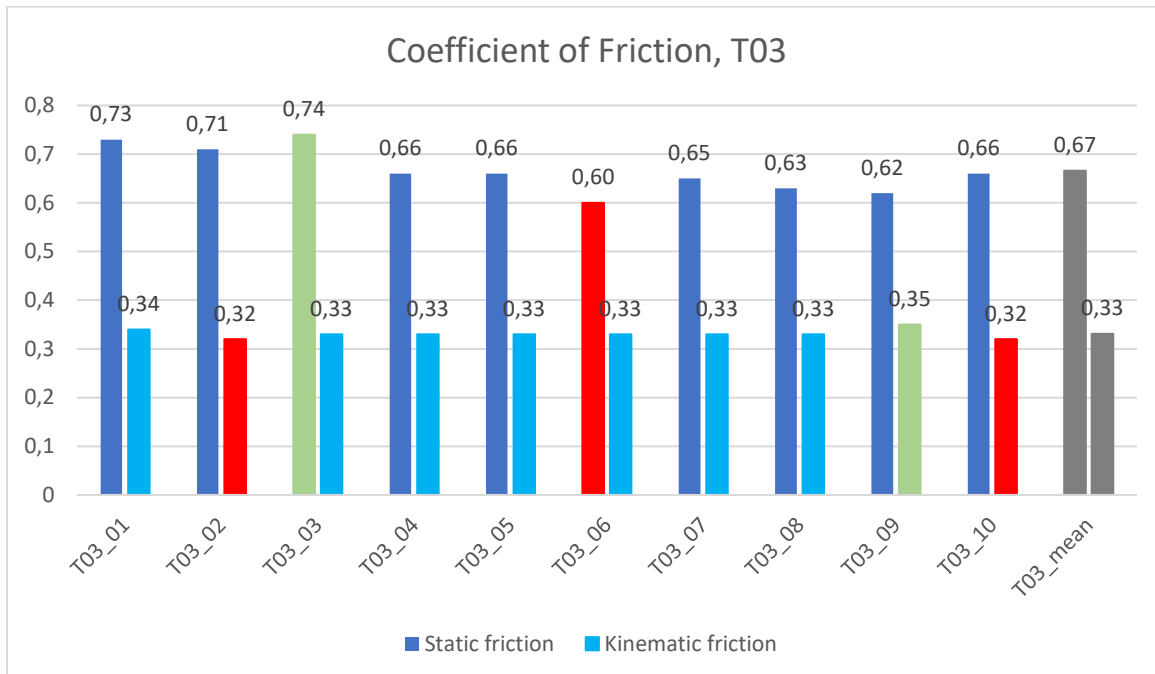
Forskyvningene registrert av testmaskinen kan skyldes både deformasjoner i stålklossen og deformasjoner i treet. Deformasjonskurvene fra Aramis vil derfor være mer nøyaktige ved undersøkelser av treklossens utglidninger siden disse forskyvningene er beregnet fra forskyvningene av prikkemønsteret. Den store tykkelsen på stålklossen skulle øke klossens stivhet og med det hindre at det oppstod store deformasjoner i den. Dette ga grunnlag for at forskyvningsdiagrammene fra testmaskinen likevel kunne benyttes, siden det kunne antas at deformasjonene i stålklossen var så små at de kunne neglisjeres.

Registreringen av de påførte kreftene vil være mer nøyaktige fra testmaskinen enn fra Aramis. Grunnen til dette ligger i korrigeringsfaktoren som må gjøres for å få kreftene inn i Aramis. Korrigeringen skal gjøre at nullpunktene for de to maskinene blir mer samsvarende. Likevel er det vanskelig å få til denne korrigeringen helt nøyaktig.

En observasjon som var gjentakende for testene med forskyvning på tvers av fiberretningen var at det ved flere av gjennomføringene kunne høres en jevn dunkelyd undervegs i testingen. Lyden kunne høres etter at den kinematiske friksjonen hadde begynt å virke i prøvene. Observasjonen var tydeligst i testene hvor prøvestykkene ikke hadde ligget oppspente ei uke før testing. Likevel var det tendenser til denne dunkelyden også for noen av testene som hadde ligget oppspente i ei uke. For seriene med glidninger langs med fibrene var det ingen tegn til denne dunkelyden.

4.5.1 Observasjoner og kommentarer til de enkelte seriene

T03:



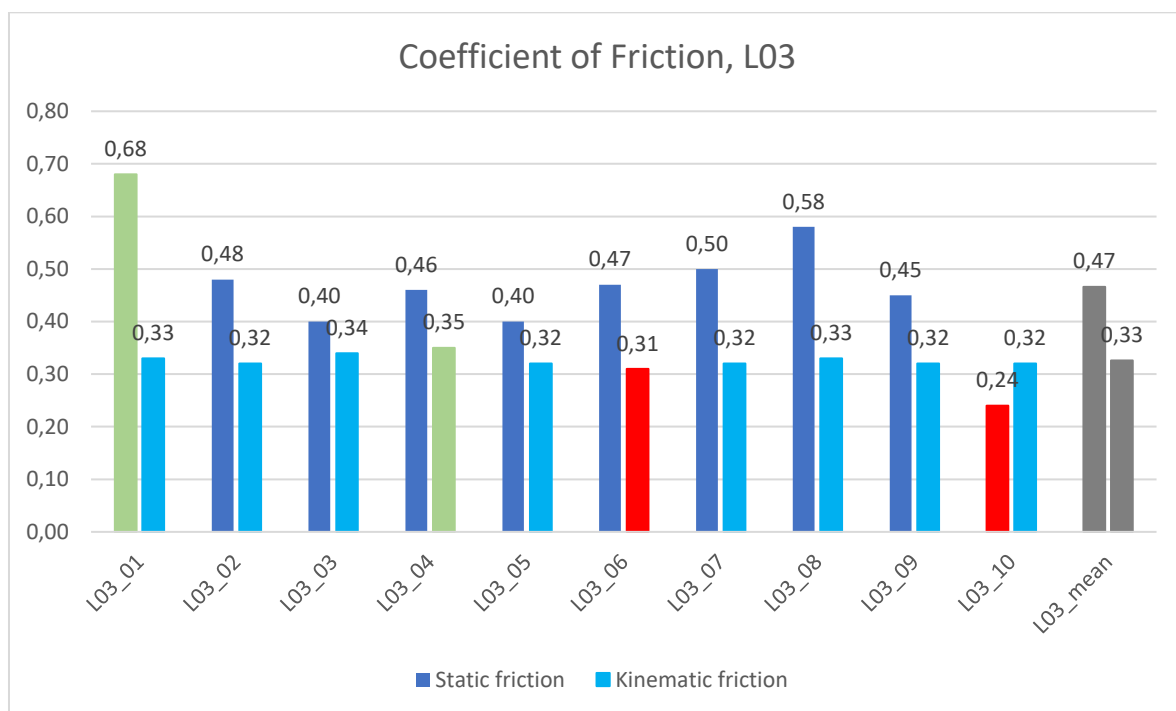
Figur 39 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie T03

Figur 39 viser at resultatene fra denne serien ga relativt jevne verdier for både den statiske og den kinematiske friksjonskoeffisienten, og var med det av seriene med de minste standardavvikene. Verdiene for den statiske friksjonskoeffisienten varierte mellom 0,60 og 0,74. For den kinematiske friksjonskoeffisienten lå verdiene mellom 0,32 og 0,35. Ingen av resultatene skiller seg tydelig ut og skaper grunnlag for undersøkelser på enkelttester. Dette understrekes samtidig gjennom observasjoner av last- forskyvningskurvene til denne serien, vist i figur 29. Heller ikke for disse er det noen av testene som tydelig skiller seg ut eksempelvis med ekstreme verdier for de påførte kreftene eller ved at formen på ei av kurvene avviker fra de andre kurvene.

De fleste av testene i denne serien har last- forskyvningskurver hvor det er oppnådd kun en lasttopp før lastene videre har blitt redusert til en omtrent konstant verdi. Testene 4, 5 og 10

er unntakene, hvor det etter at den første lasttoppen er nådd igjen har oppstått en mindre lasttopp. Last- forskyvningskurvene for disse testene viser at etter makslasten for prøvestykket er oppnådd og lastene har begynt å reduseres, har det igjen blitt nødvendig å påføre større krefter for å opprettholde konstant glidning av midtklossen. I disse last- forskyvningskurvene er det derfor et nytt påfølgende toppunkt i plottene før kreftene er redusert til den konstante kraften som må påføres for å få konstant utglidning. Denne andre toppen i lastdiagrammene kan tyde på at områder med større motstand kom i kontakt med hverandre etter de første glidningene hadde skjedd. Resultatet gjorde at det var nødvendig med påføring av større krefter for å få ytterligere utglidninger.

L03:



Figur 40 - Statiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie L03

Gjennom beskuelse av verdiene for de statiske friksjonskoeffisientene, vist i figur 40, kan det ses at disse verdiene varierer mer enn for serie T03. Etter å ha beregnet den statiske friksjonskoeffisienten er det funnet at den største verdien ligger på 0,68, mens den laveste

friksjonskoeffisienten er helt nede i 0,24. Dette betyr at den minste statiske friksjonskoeffisienten bare utgjør 35% av den største oppnådde friksjonskoeffisienten. Dette til stor forskjell fra serie T03 hvor den minste friksjonskoeffisienten utgjorde hele 80% av den største oppnådde friksjonskoeffisienten. Den store forskjellen mellom de statiske friksjonskoeffisientene i denne serien understrekes av standardavviket. Dette er det største som er funnet fra alle de testede seriene. For den kinematiske friksjonskoeffisienten er verdien jevnere med variasjoner mellom 0,31 og 0,35. Denne parameteren har samtidig en gjennomsnittsverdi som ligger nærmere de andre serienes resultater, og variansen er vesentlig mye lavere.

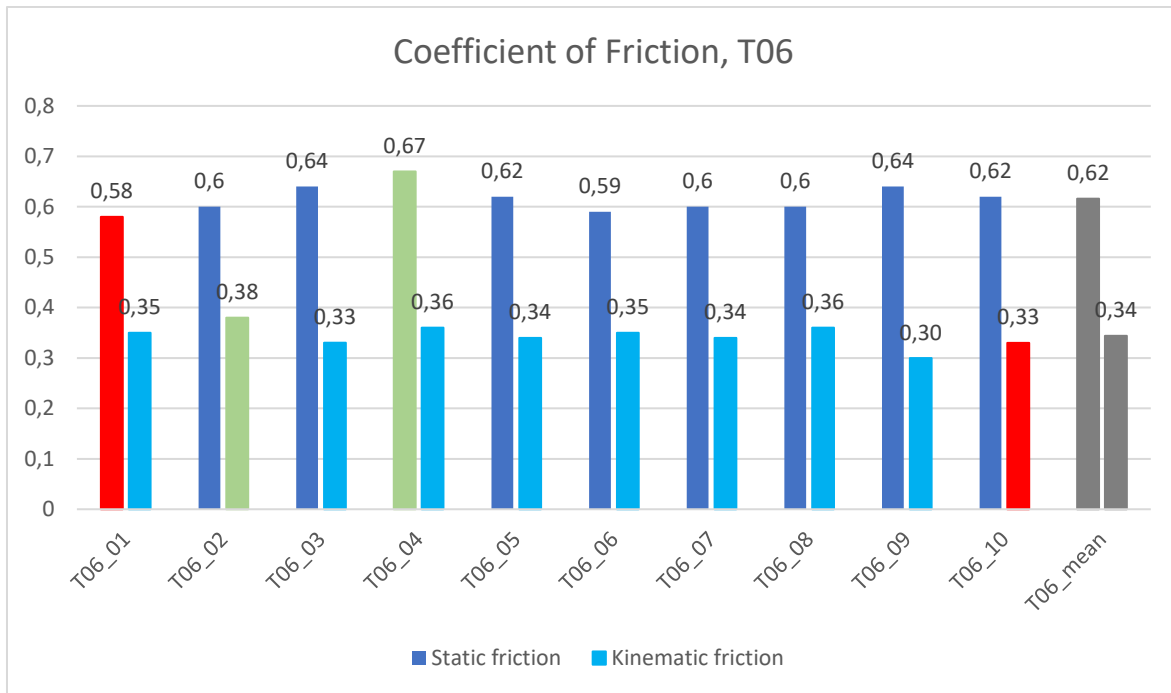
Den store variasjonen for den statiske friksjonsparameteren gjenspeiles også i plottene for last- forskyvningskurvene. I forhold til serien T03, hvor alle kurvene hadde omtrent samsvarende form, er det mye større variasjoner i hvordan oppførselen var for testene i serie L03. Dette både med tanke på når i forskyvningsforløpet lasttoppene oppstår, og i forhold til hvilke laster som må settes på før den statiske friksjonen slutter å virke.

Resultatene fra test 10 skiller seg spesielt ut fra de andre resultatene i denne serien. Aramis er derfor benyttet for å få et bedre inntrykk av hvordan testforløpet var for denne prøven. Gjennom analysene i Aramis observeres det at den venstre klossen ikke lå med god kontakt på det venstre opplegget når testen ble startet. Da vertikalkraften ble satt på for å dytte ut den midtre klossen, ble i stedet prøvestykket presses ned på opplegget. Av analysene kommer det samtidig fram at det oppstår glidninger langs den høyre glideflaten allerede ved den første toppen på last- forskyvningskurva. Glidningene mellom venstreklossen og midtklossen begynner derimot ikke før den venstre klossen er presset ned på oppleggsblokken. Det virker som at nedpressingen av prøvestykket før glidningene kunne begynne hadde en negativ påvirkning på friksjonskoeffisienten. Dette er trolig grunnen til at friksjonen ble så lav for denne testen.

Til sammenligning er også test 1 undersøkt i Aramis. Last- forskyvningskurva til denne testen har kun ett toppunkt, og er blant testene i serien som ga den høyeste friksjonskoeffisienten. Fra Aramis kan det observeres at det for denne prøven er god kontakt mellom de ytre klossene og oppleggene allerede fra start. Dette med resultat at de ytre klossene omtrent ikke har vertikale forskyvninger under hele testforløpet. Av aramisanalysene kan det også ses at utglidningene ved hver av de to glideflatene er jevnstore. Dette fører til at det ikke er noen rotasjoner i klossen, noe som kunne ha oppstått om friksjonskreftene og utglidningen hadde vært større langs den ene av glideflatene.

Kraft- forskyvningskurvene til de fleste av testene (unntakene er test 1 og 8) i denne serien består av to toppunkter for lasten, hvor makslasten hovedsakelig oppnås i det siste av de to punktene. Test 2 er et eksempel på dette. For denne testen viser Aramis at det første toppunktet kommer når glidningene ved høyre glideflate begynner. Ved denne toppen holder den venstre klossen og midtklossen fortsatt sammen. Den andre toppen, og makslasten, skapes når det oppstår utglidninger ved den venstre siden av midtklossen. Også for denne testen skyldes den ujevne utglidningen delvis at det er en glippe mellom den venstre treklossen og den venstre stålklossen som prøvestykket legges opp på. Det antas at dette er grunnen til at det også i mange av de andre testene har oppstått to toppunkter.

T06:



Figur 41 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie T06

Som for testene med 0,3 MPa oppspenning og glidning på tvers av fiberretningen, ga også denne serien liten variasjon i friksjonsparameternes verdier. Dette gjorde denne serien til en av seriene med de minste variasjonene for de beregnede statiske friksjonskoeffisientene. Maksverdien for den statiske friksjonskoeffisienten ble for denne serien 0,67, mens den minste verdien for denne serien var 0,58. Maksimums- og minimumsverdiene er markert ved grønne og røde søyler i figur 41, hvor friksjonskoeffisientene fra serien er presentert. Den lille variasjonen og de høye verdiene for friksjonskoeffisientene resulterte i at denne serien fikk en høy verdi for den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten. For den kinematiske friksjonen var verdiene som for de foregående seriene enda tettere, med verdier mellom 0,38 og 0,30.

De fleste (1, 3, 4, 5, 6, 7, 9 og 10) testene i denne serien har last- forskyvningskurver som ligner på hverandre. Disse forløpene ligger i tillegg på kurvene fra serien T03, hvor lasten gikk opp til et makspunkt for deretter å bli redusert til en konstant verdi. Enkelte av disse testene opplevde også, som i serie T03, at en mindre lasttopp oppstod etter at makslasten

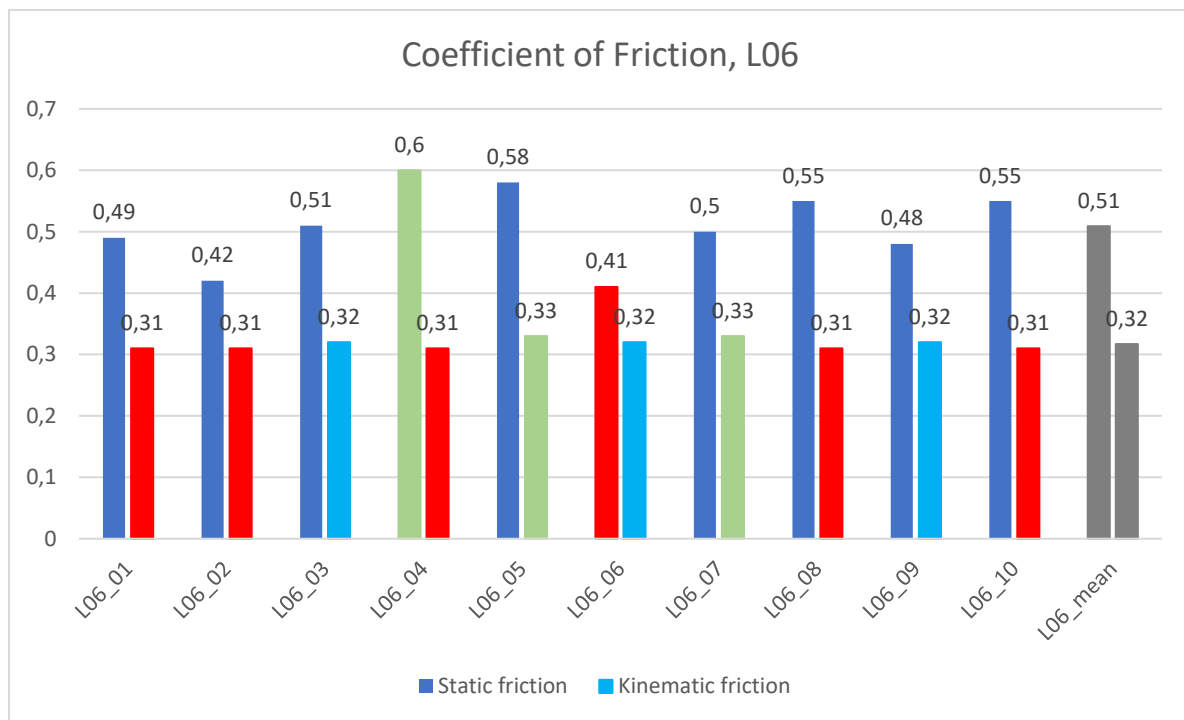
var oppnådd. For en del av grafene (1, 3, 6, 7 og 9) er det ikke en tydelig andre topp, men det kan observeres at reduksjonen av lastpåføringen stopper opp en liten stund før reduksjonen fortsetter fram til den konstante lasten for glidefriksjonen er oppnådd.

Test nummer 5 ble valgt ut som en av testene med en tydelig første lasttopp hvor makslasten inntreffer og hvor en liten lasttopp oppstår etter dette første bruddet. Observasjoner fra Aramis viser at det gjennom hele denne testen er god kontakt mellom oppleggene og de ytre klossene i prøvestykket. Ingen forskyvninger av prøvestykket kommer derfor av at eventuelle glipper ved oppleggene har måtte tettes. Av analysene kommer det samtidig fram at det kun oppstår glidninger ved den ene glideflaten når den første lasttoppen registreres. Når den andre toppen etter hvert oppstår, begynner også glidningene ved den andre glideflaten. Dette er med på å bygge oppunder antagelsene presentert i serien L03, om at seriene med to topper kan ha fått disse grunnet ujevne utglidninger ved de to glideflatene.

Dette var den første serien der forsøkene ble gjort med av- og pålasting underveis i testingen. For de to første testene ble det derfor prøvd ut ulike metoder for hvordan dette kunne gjøres på en god måte. Et resultat av denne utprøvingen er at lastene for test 2 er veldig små etter at de blir satt på igjen andre gangen. Dette skjedde fordi feil verdier ble nullstilt før testen ble restartet. Metoden benyttet på første testen i serien viste seg å gi riktigere resultater og denne metoden ble derfor benyttet i de senere testene.

Til tross for de små verdiene oppnådd etter andre runden med pålasting, kan fortsatt resultatene fra begynnelsen av denne testen benyttes. Lastverdiene for påført last ved lasttoppene og ved 10 mm utglidning er derfor benyttet til beregning av den statiske og kinematiske friksjonskoeffisienten.

L06:



Figur 42 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie L06

Resultatene fra denne serien, utført med glidninger langs med fiberretningen, viser som for serien L03 at variasjonen av den statiske friksjonskoeffisienten er større ved glidninger på tvers av fiberretningen. Den største verdien for friksjonskoeffisienten ble funnet som 0,60 og den minste verdien fra disse testene var 0,41. Dette gir at den største friksjonskoeffisienten i denne serien er 46% større enn den minste friksjonskoeffisienten i denne serien. For serien T06 var dette forholdet derimot 87%.

For den kinematiske friksjonen var derimot verdiene veldig mye jevnere, dette kan ses av figur 42. Fem av de ti testene i serien fikk en friksjonskoeffisient på 0,31. Dette var samtidig den minste oppnådde verdien for den statiske friksjonskoeffisienten i denne serien. Den største oppnådde verdien for den kinematiske friksjonen var 0,33 og ble funnet for to av prøvene. Disse jevne resultatene gjorde at denne serien fikk den minste variansen for de kinematiske friksjonskoeffisientene.

Fra kraft- forskyvningskurvene til denne serien kan det ses at det har vært noe variasjon i utglidningsforløpene. De tre første testene har to tydelige lasttopper som kommer nokså tett etter hverandre. Det kan derfor antas at glidningene i disse testene har en lignende oppførsel som test 5 i serie T06, altså at de to sidene begynner å gli på hver sine tidspunkt uten at det er store komplikasjoner med oppleggene.

Test 6 har også fått to lasttopper, og er samtidig den kurva som skiller seg mest fra de andre i serien. Last- forskyvningskurven ser ut til å ha en lignende oppførsel som test 10 i serien L03, som viste seg å være dårlig opplagt. Analyser i Aramis, viser at dette også er tilfellet for denne testen. Det er en lignende glippe mellom opplageret på venstre side og klossen, tilsvarende hva det var for test 10 i serie L03. Tettingen av denne sprekken samsvarer i stor grad med når den første toppen på kurven inntreffer.

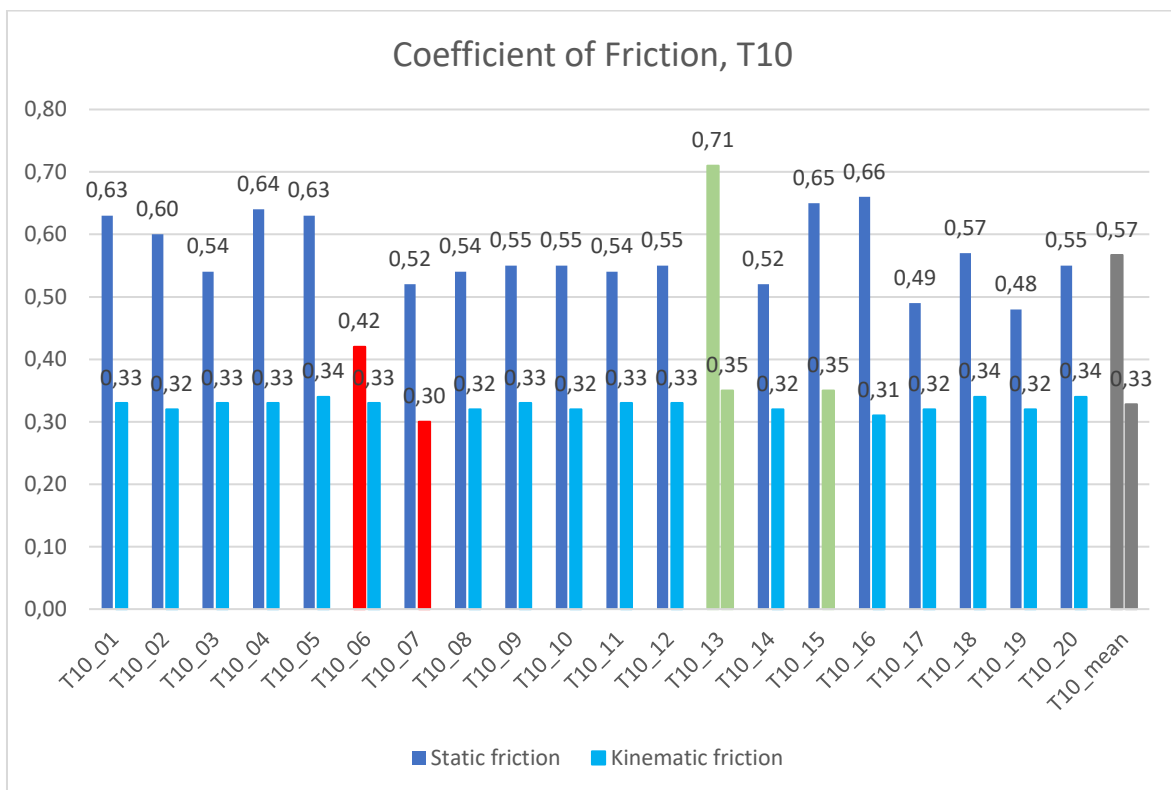
Til tross for at friksjonskoeffisienten fra test 6 ikke avviker så mye fra de andre verdiene i serien, gir denne testen den laveste friksjonskoeffisienten med verdien 0,41. Test 2 følger tett etter med en friksjonskoeffisient på 0,42. Undersøkelser i Aramis viser at den lave verdien også for test 2 skyldes problemer med oppleggene. Det er en glippe mellom opplegget og den venstre klossen som må tettes før glidninger i det venstre glideplanet kan oppstå.

Test 1 og test 3, som hadde lignende last- forskyvningsdiagrammer som test 2, viser derimot at det helt fra starten er god kontakt mellom de ytre klossene og oppleggene. Dette kan være grunnen til at disse testene har oppnådd mye høye verdier for friksjonsparameteren. De to toppene på last- forskyvningskurvene kommer antageligvis av at glidningene langs de to glideflatene begynner på ulike tidspunkter. Trolig kan dette begrunnes med at friksjonskoeffisientene ikke er helt identiske i de to glideflatene eller at lasten er påført med en liten eksentrisitet.

Test 1 er et eksempel på et tilfelle der andre toppen utgjør makslasten. Beregningene av friksjonskoeffisientene som kommer av de to toppene viser imidlertid at det er svært liten

forskjell mellom dem. For det første bruddet ble friksjonskoeffisienten beregnet til å være 0,49. Ved den andre, og høyeste lasten, ble friksjonskoeffisienten beregnet til å være 0,50. Dette viser hvor tette verdiene kan være for de to lasttoppene innen en prøve. En årsak til disse tette verdiene kan komme av at det ikke bare er den påførte lasten som endres, men også kreftene i lastcella. Siden tidspunktet for når lastene i de to toppene inntreffer er forskjellige er også lastene hentet ut fra lastcellen forskjellige, noe som påvirker resultatet av friksjonskoeffisienten.

T10:



Figur 43 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie T10

I de tidligere seriene med glidninger på tvers av fiberretningen har den minste friksjonskoeffisienten tilsvart over 80% av den største friksjonskoeffisienten i serien. I denne serien endte dette forholdet i underkant av 60%. Dette viser at det er vesentlig større

forskjeller mellom største og minste oppnådde friksjonskoeffisient i denne serien. Ved vurdering av dette er det likevel viktig å huske på at i denne serien er det gjennomført dobbelt så mange tester som i de tidligere seriene. Ved beregningen av standardavviket er dette tatt hensyn til ved at verdien for k_s er endret. Dette er grunnen til at standardavviket for denne serien likevel ender i nærheten av standardavvikene fra de andre seriene.

Verdiene for den statiske friksjonskoeffisienten endte mellom 0,42 og 0,71. Verdiene for den kinematiske friksjonen ble funnet mellom 0,30 og 0,35. Dette viser at variasjonen for denne friksjonsparameteren fortsatt er lav.

Analysen i Aramis viser at det ikke har vært noen komplikasjoner med oppleggene for test 6. Årsaken til avvikene for friksjonskoeffisienten skyldes derfor trolig noe annet. Allerede under gjennomføringen ble det påpekt at denne testen hadde en noe merkelig oppførsel i forhold til testene som var gjennomført tidligere i serien. Etter testen var ferdig utført og prøvestykket ble tatt fra hverandre viste det seg at de ytre klossene hang fast i stålplatene. Grunnen til dette var at platene benyttet til denne testen var malt. Malingen virket som et klister og førte dermed til at klossene satt fast til platene. Denne fastklistringen antas det at kan ha hatt innvirkning på denne testens resultater.

Også testene 17 og 19 ble gjennomført med malte stålplater. Også for disse testene hang klossene fast i stålplatene ved demontering av prøvestykket. Disse testene er de to prøvene som har fått de nest minste verdiene for friksjonskoeffisienten med verdier på 0,48 og 0,49. Dette er derfor med på å bygge opp under antagelsen om at det har hatt en innvirkning på resultatet at platene var malt. At klossene hang fast til stålplatene ved disse testene kan også delvis observeres i Aramis. I disse testene er forskyvningene for de ytre klossene mindre sammenlignet med forskyvningene i de andre gjennomførte testene.

Det er likevel merkelig at det kun er i denne serien de malte platene har hatt en så tydelig innvirkning på resultatet. En årsak til dette kan være at dette var en av seriene med de største oppstrammingene, samt at denne serien ble lagret oppspente i overkant av ei uke før testene ble gjennomført. Det at denne serien også var den første serien hvor disse platene

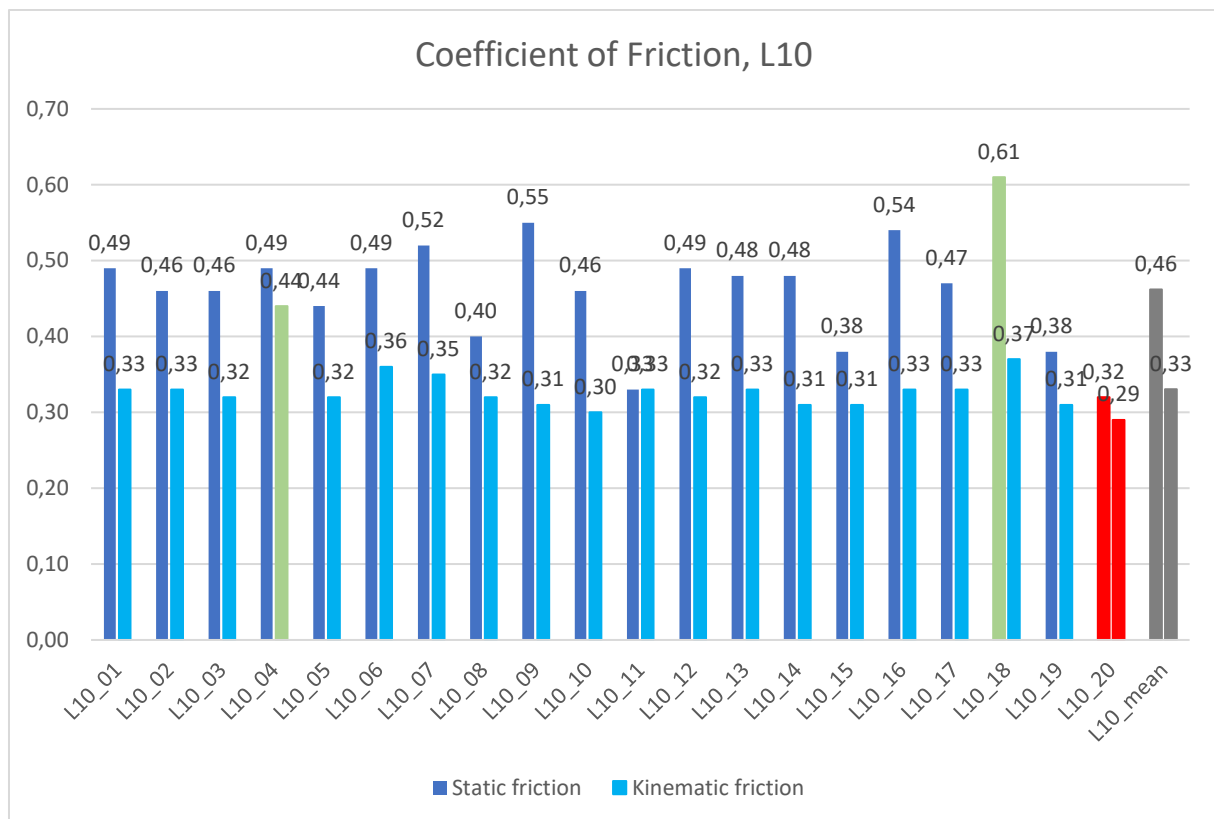
ble benyttet kan være en annen innvirkende faktor. Slik som klisteret på en tapebit gradvis blir svakere og svakere jo flere ganger den festes på nytt, kan det antas at klistereffekten fra malingen også har blitt redusert for hver gang platene er benyttet til testing av et nytt prøvestykke.

En annen observasjon fra denne prøveserien er at test 13 har oppnådd størst verdier både for den statiske og kinematiske friksjonskoeffisienten. Likevel skal det presiseres at test 15 oppnådde samme minimumsverdi for den kinematiske friksjonskoeffisienten. Av resultatene fra de ulike seriene, er det bare i et fåtall av seriene at den statiske og den kinematiske har blitt størst for samme prøve. Det tyder derfor ikke på at det er noen sammenheng mellom at testene som oppnår de største statiske friksjonskoeffisientene, også oppnår de høyeste verdiene for de kinematiske friksjonskoeffisientene.

For forsøkene utført på de små klossene, hadde denne serien de høyeste knakelydene når utglidningene startet. Testene i serien viste at det var en tydelig sammenheng mellom at jo høyere smell, desto tydeligere var toppen for makslast og droppet ned til den konstant påsatte lasten ved kinematisk friksjon var tydeligere. Et eksempel på et slikt tilfelle er test 15. Undersøkelser gjennomført med Aramis viser at det i denne testen var god kontakt mellom oppleggene og de ytre treklossene allerede fra testen var startet. Dette resulterer i at det undervegs i testen oppstår lite vertikale forskyvninger av disse klossene ettersom testen forløper. Fra undersøkelsene i Aramis kan det også observeres at det har vært en jevn glidning langs de to glideflatene gjennom hele testen.

Testene som har samme form som test 15 på kraft- forskyvningskurven kan antas å være de mest korrekte i form av at det er minst feilkilder, eksempelvis som ujevne utglidninger eller dårlig plasserte prøver på oppleggene. Det viser seg at testene (1, 2, 5, 13, 16 og 18) som har en tilsvarende form på kraft- forskyvningskurva som test 15, er blant testene som har oppnådd størst statiske friksjonskoeffisienter i denne serien.

L10:



Figur 44 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie L10

Figur 44 viser at også denne serien ble gjennomført med 20 tester. Resultatene for den statiske friksjonskoeffisienten endte mellom 0,32 og 0,61, noe som tilsvarer et forhold mellom minimum- og maksimumsverdien på omtrent 50%. Dette forholdet er omtrent like stort som i de tidligere seriene med forskyvninger langs fiberretningen. Dette til tross for at det i denne serien er gjennomført dobbelt så mange tester sammenlignet med de andre seriene med langsgående forskyvninger.

For den kinematiske friksjonsparameteren lå verdiene mellom 0,29 og 0,44. Dette viser at den kinematiske friksjonsparameteren er lite påvirket av hvilke oppspenninger som er satt på prøvestykkene. Gjennomsnittsverdiene som er funnet fra de undersøkte testene, samt den lille variasjonen i serienes resultater, beviser samtidig at friksjonsparameteren er rimelig uavhengig av om testene ble utført langs med eller på tvers av fiberretningen.

Den minste statiske friksjonskoeffisienten kom fra test 20. Denne testen oppnådde i denne samme serien den laveste kinematiske friksjonskoeffisienten. På grunn av det store avviket mellom disse verdiene sammenlignet med resultatene fra de andre prøvene i serien, er det tatt en nærmere kikk på denne testen i Aramis. Som for de undersøkte testene i de tidligere seriene hvor det er observert en lignende kraft- forskyvningskurve, er det også for denne testen problemer ved opplegget som fører til de lave friksjonsparameterne. Som tidligere viser analysene at det oppstår glidninger mellom kontaktflatene samtidig som prøven presses ned på opplegget. Lastverdien fra dette punktet benyttes derfor til beregningen av den statiske friksjonen. Dette til tross for at den andre lasttoppen, hvor maksverdien for testen opptrer, gir en friksjonskoeffisient som ligger nærmere de statiske friksjonskoeffisientene for de andre prøvene i serien.

På samme måte som at det ikke virker til å være noen sammenheng i at prøvene med størst statisk friksjonskoeffisient også får størst kinematisk friksjonskoeffisient, virker det heller ikke til å være en slik sammenheng for minimumsverdiene. Det er kun i tre av de testede seriene at den laveste statiske friksjonskoeffisienten har oppstått i samme prøve som den laveste kinematiske friksjonskoeffisienten. Likevel kunne en tro at dette i større grad kunne inntreffe. Grunnen til denne antagelsen skyldes at det virker som om feilkildene har en innvirkning på hvor store verdier som oppnås for friksjonsparameterne. I prøvene med mye feilkilder kunne dette derfor gitt utslag ved at begge friksjonsparameterne ble små.

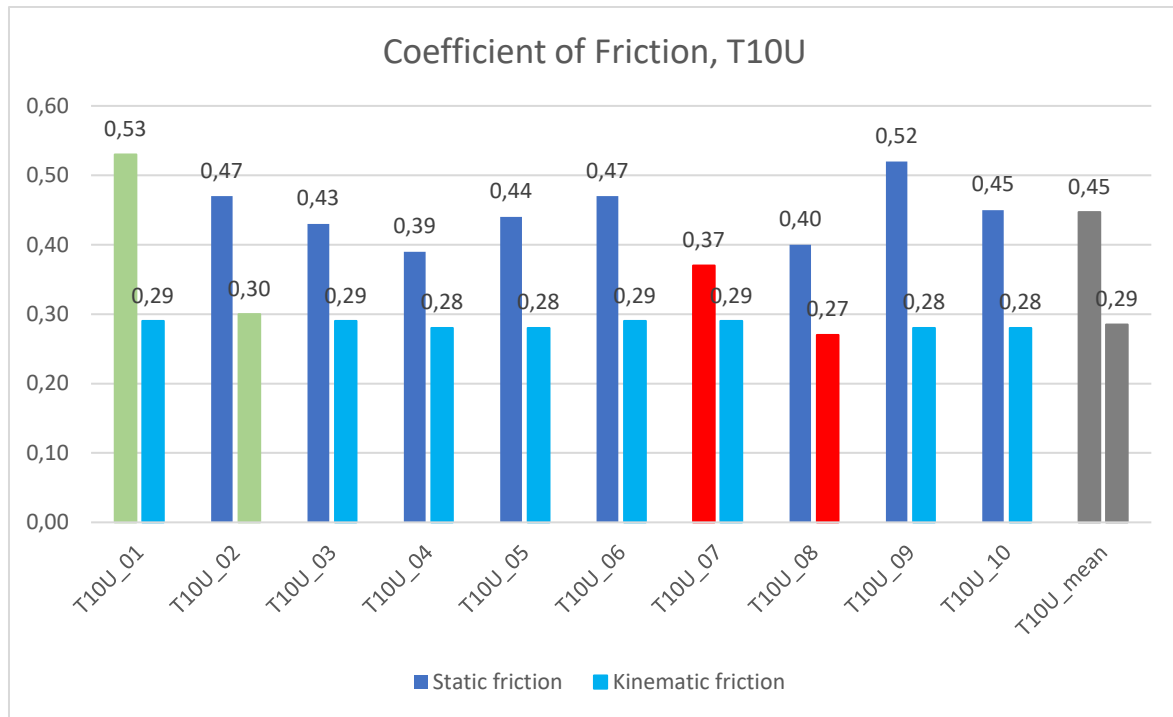
Det observeres at test 11 har fått en omtrent tilsvarende lav verdi for den statiske friksjonsparameteren som test 20. Sammenligning av kraft- forskyvningskurvene for disse to testene viser at oppførselen for påføring av last ettersom utglidningene har skjedd har hatt lignende utviklinger. Det antas derfor at det også i denne testen har vært kontaktfeil mellom prøvestykket og oppleggene. Analyser med Aramis bekrefter denne antagelsen.

Test 4 oppnådd en usedvanlig høy verdi for den kinematiske friksjonen. Nærmere undersøkelser av denne testens last- forskyvningskurve viser at de påførte kreftene har

begynt å øke igjen før en forskyvning på 10 mm er oppnådd. Økningen i påførte krefter, som også kan observeres mot slutten av noen av de andre testene, skyldes at det sentrisk plasserte stålstaget ikke har vært plassert tilstrekkelig unna kantene av hullet i treklossene. Tilfellene der lastene har begynt å øke igjen kommer trolig av at det har oppstått kontakt mellom klossen som forsøkes presset ut og stålkabelen som holder prøvestykket sammen. Det har dermed vært behov for en større kraft for å få til utglidningene siden det samtidig har krevdes at stålstaget bøyes ned.

Plottene fra lastcellen viser at det undervegs i forsøkene har vært lite variasjoner i oppspenningene for denne serien. Dette har for enkelte av testene gjort det vanskelig å plukke ut riktige verdier fra plottene til beregningen av friksjonskoeffisientene. Forstørring av den vertikale akselen har imidlertid hjulpet en god del for avlesning av plottene. Gjennom denne forstørrelsen kom det fram at det også i denne serien var tendenser til at kreftene som opptrådte i lastcellen fulgte utviklingen av lastpåføringen av utglidningskraften. Det at variasjonen i opptredende kraft i lastcellen var så liten gjorde imidlertid at konsekvensene ved å ha valgt feil verdier fra diagrammet, har hatt liten innvirkning på resultatet av friksjonskoeffisienten.

T10U:



Figur 45 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie T10U

Dette var den første serien som det ble utført testinger på. Grunnet dette krevde denne serien litt mer tid siden prosessene rundt utførelsen måtte tenkes ut. Resultatene fra gjennomføringen viste likevel lite tegn til at det i denne serien har vært usikkerheter underveis. Figur 45 viser at de statiske friksjonskoeffisientene ligger mellom 0,37 og 0,53, noe som betyr at den minste oppnådde verdien utgjorde omtrent 70% av maksverdien. Dette viser at forskjellen mellom største og minste verdi ikke er vesentlig mye større for denne serien sammenlignet med disse forholdene fra tidligere serier. Forskjellene kan også like gjerne komme av ulikheter i prøvestykkene, som at det har vært vanskeligheter med utførelsen. Den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten fra denne serien antyder likevel at den langvarige oppspenningen i de tidligere seriene kan ha hatt en positiv effekt, siden disse seriene har fått større gjennomsnittsverdier for friksjonsparameteren.

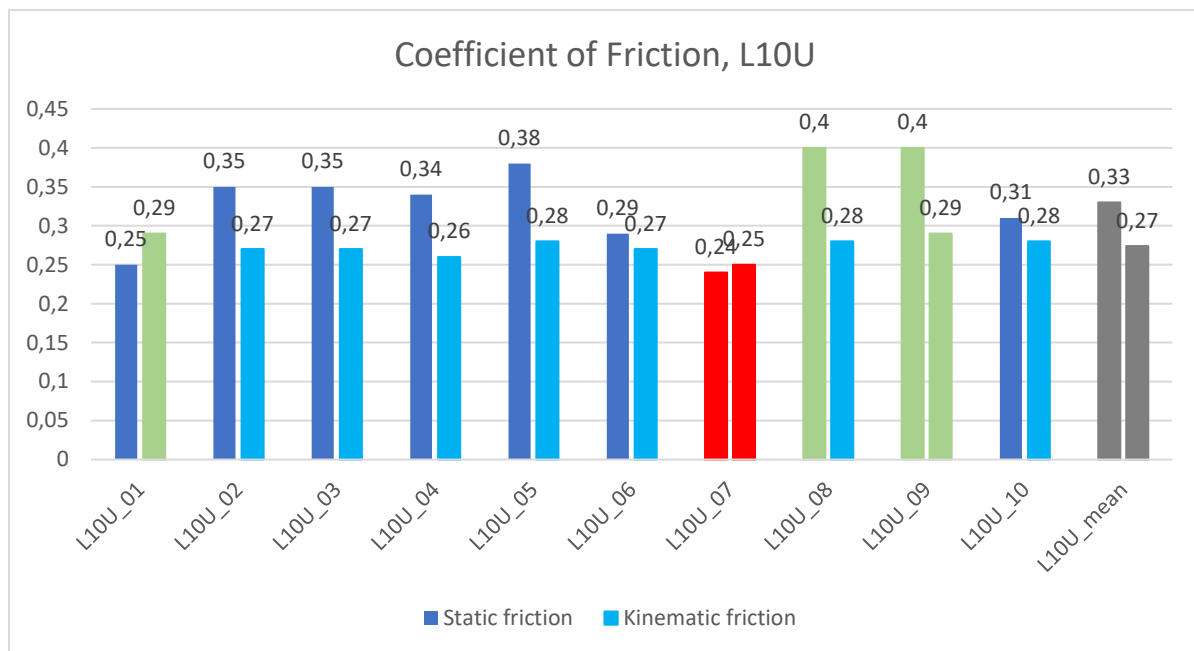
Den kinematiske friksjonskoeffisienten oppnådde verdier mellom 0,27 og 0,30. Nettopp at disse prøvestykkene ikke har blitt lagret oppspente over en lenger periode kunne vært en faktor som var med å øke variasjonen i de oppnådde resultatene. Dette ser det likevel ikke ut

som har hatt noen innvirkning. Det ser derimot ut som om varigheten av oppspenningen har innvirket også på størrelsen av den kinematiske friksjonsparameteren. Også denne har fått en litt lavere verdi sammenlignet med verdiene som er oppnådd tidligere.

Kurvene plottet fra testmaskinen viser jevne resultater. Det er ingen av testene som tydelig skiller seg ut i verdiene for friksjonskoeffisientene og det er heller ikke noen av plottene som skiller seg vesentlig ut fra de andre. Slik som for de tidligere gjennomførte seriene, skyldes de største variasjonene for plottene hvorvidt det er en eller to toppunkter. I grafene med to toppunkter varierer det om det er det første eller andre av toppunktene som har oppnådd de høyeste lastene. Likevel er det fortsatt alltid verdien fra den første av toppene som har blitt benyttet til å beregne friksjonskoeffisienten. Verdiene for friksjonskoeffisientene fra de to lasttoppene har heller ikke vist store forskjelle. Et eksempel på dette er test 5 hvor omtrent helt like krefter er påført i de to lasttoppene. Dette med resultat at begge de statiske friksjonskoeffisientene fra disse lasttoppene ender opp som 0,44.

Test 8 har også fått to lasttopper gjennom testforløpet. I denne testen er det derimot en forskjell på omtrent 1,2kN for de påførte utglidningskreftene. Til tross for denne forskjellen i påførte laster er de oppnådde friksjonskoeffisientene 0,40 for første lasttopp og 0,43 for makslasten. Beregninger på disse størrelsene viser at mens den påførte lasten ble i underkant av 5% større, økte friksjonskoeffisientens verdi med 7%. Omtrent tilsvarende forhold fås også mellom verdiene fra lasttoppene i test 3 i denne serien. Disse resultatene antyder at forholdet mellom endringene i påført last følger forholdet for endringen i friksjonskoeffisientene.

L10U:



Figur 46 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie L10U

Figur 46 viser at de statiske friksjonskoeffisientene i denne serien hadde som for de andre seriene gjennomført med glidninger på langs, noe større variasjoner i oppnådde verdier. Disse varierte fra 0,24 for testen som fikk den laveste statiske friksjonen, til 0,4 som var den høyeste oppnådde verdien. Også i denne serien uten langvarige oppspenninger, ser det ut til at fraværet av den langvarige oppspenningen har hatt en påvirkning på hvor stor friksjonskoeffisienten har blitt. Verdiene fra denne serien viser at denne er litt mindre sammenlignet med friksjonskoeffisientene fra seriene med ei ukes oppspenninger.

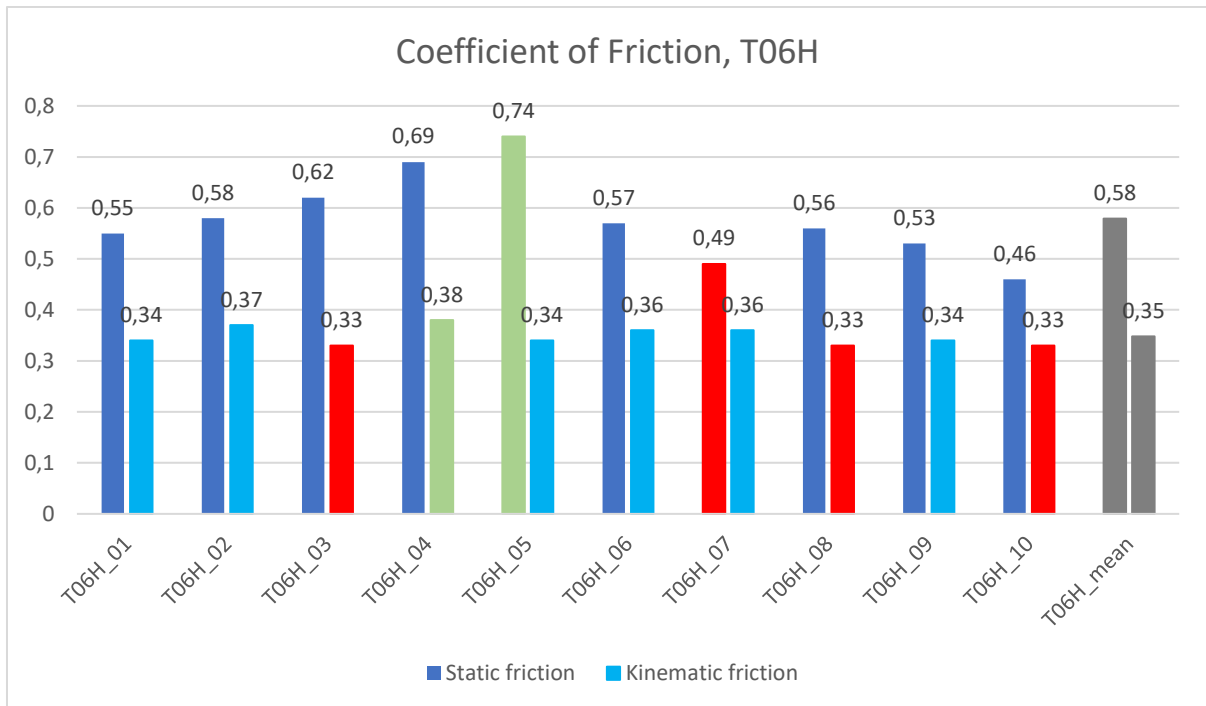
De kinematiske friksjonskoeffisientene for denne serien er som i de andre seriene mer jevne med tanke på hvilke verdier som er oppnådd for de ulike testene. Maksverdien som ble oppnådd i denne serien lå på 0,29 og minimumsverdien var 0,25. Dette ga en gjennomsnittlig kinematisk friksjonskoeffisient på 0,27 og et standardavvik på 0,030. Dette viser at mangelen på de langvarige oppspenningene også har virket inn på størrelsen av den kinematiske friksjonskoeffisienten.

Test 1 og test 7 har plott som det i tidligere serier har vist seg gir store avvik for den statiske friksjonskoeffisienten. I disse tidligere seriene har avvikene vist seg å komme av at det har vært en glippe mellom det ene opplegget og prøvestykket som er testet. En antagelse om at dette var grunnen til at også disse testene hadde slike store avvik førte til at test 7, som hadde den desidert laveste verdien for friksjonskoeffisienten, ble undersøkt i Aramis. Bildene fra testforløpet viser at antagelsen med dårlig utført plassering av prøvestykket stemmer. Dette gjelder i tillegg ved begge oppleggene i denne testen. Den første toppen på lastforskyvningskurva skyldes derfor hovedsakelig at klossene presses ned på oppleggene. Tydelige glidninger mellom klossene oppstår ikke før ved neste lasttopp i kraftforskyvningsplottet. Til tross for dette er det likevel friksjonskoeffisienten funnet for den første lasttoppen som er benyttet til beregning av gjennomsnittsverdier og karakteristiske verdier. Dette selv om verdien for friksjonskoeffisienten oppnådd ved den maksimale påføringslasten i tillegg lå nærmere de andre friksjonskoeffisientene som ble funnet i denne serien. Ved senere arbeider med resultatene kan det derfor vurderes hvorvidt friksjonskoeffisienten fra makslasten i stedet skal benyttes.

Resultatene fra test 7 viser tydelig at det har vært komplikasjoner underveis i testgjennomføringen. Dette blant annet gjennom at den statiske friksjonskoeffisienten har fått en mindre verdi enn den kinematiske friksjonskoeffisienten. Dette strider både mot teorien for friksjon og mot resultatene som er funnet fra de andre testene. Det uventede resultatet antas at kan begrunnes de store feilkildene rundt oppleggingen av testen.

Denne seriens resultater for friksjonskoeffisientene viser at disse to testene (1 og 7) er de som skiller seg ut i forhold til størrelsene som ellers er oppnådd for parameteren. Beregning av friksjonskoeffisientene med benyttelse av makslastene som er oppnådd gjennom testene, gir i stedet en gjennomsnittlig friksjonskoeffisient på 0,35. Dette resultatet er høyere, men nærmere de oppnådde verdiene for den statiske friksjonskoeffisienten fra de andre seriene. En slik sammenligning vil likevel ikke gi et helt riktig bilde. Dette fordi den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten som er funnet for de andre seriene ikke er korrigert for disse samme type feilene.

T06H:



Figur 47 - Statiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie T06H

I serien T06H ble forsøkene gjort på klosser som hadde større glideflater. Dette med resultat at friksjonsparameterne ble mindre i denne serien sammenlignet med verdiene for friksjonskoeffisientene fra serien T06. Dette var gjeldende både for den statiske og kinematiske friksjonen.

Verdiene for den statiske friksjonskoeffisienten kan det ses av figur 47 at endte opp mellom 0,46 og 0,74. Dette gir et forholdstall mellom den minste og største oppnådde friksjonskoeffisienten på 62%. Denne prosenten endte lavere enn hva som er oppnådd i de andre seriene hvor forsøkene er gjennomført på tvers av fiberretningen. Dette viser at forskjellen mellom største og minste verdi var større i denne serien. Standardavviket viste imidlertid at det ikke var større variasjoner i denne serien i forhold til variasjonene ved de andre seriene.

Den kinematiske friksjonskoeffisienten fikk verdier mellom 0,33 og 0,38. Dette ga en stor variasjon i oppnådde verdier for den kinematiske friksjonen sammenlignet med variasjonene for denne parameteren i de tidligere undersøkte seriene.

Plottene for kreftene og forskyvningene fra testene i denne serien tyder på at det har vært lite komplikasjoner med utførelsen av disse testene. Last- forskyvningskurvene viser i tillegg at de store klossene ga et mer forutsigbart testforløp. Dette kommer fram ved at alle kurvene har en lignende utvikling i plottene. I alle testene kunne lasten påføres fram til en tydelig lasttopp ble nådd. I flesteparten av prøvene kom så et kraftig smell i det de statiske friksjonskreftene ikke lenger greide å stå imot vertikalkreftene.

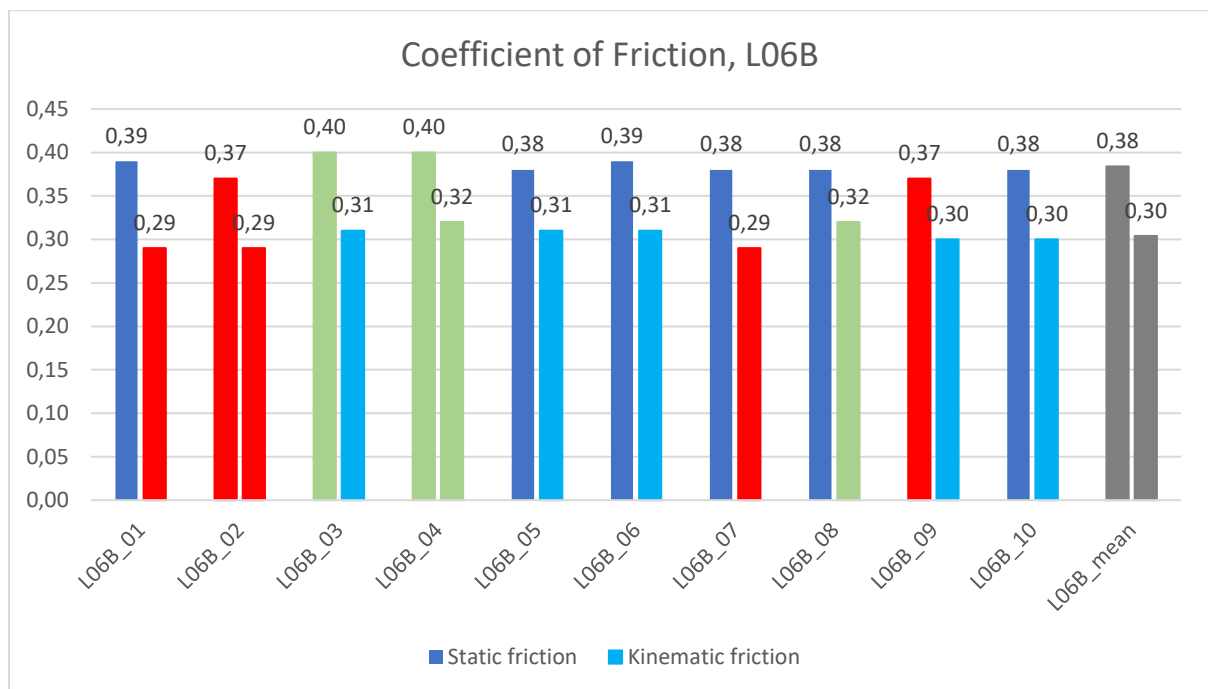
Test 7 skiller seg mest ut i forhold til de andre testforløpene. Denne har de laveste påførte kreftene i serien. Samtidig er dette også en av de tre testene i serien med to tydelige lasttopper. Aramisanalysene av testen viser at også denne testen har vært dårlig plassert på det høyre opplegget og at den første lasttoppen derfor har oppstått som et resultat av dette. Dette spiller antageligvis også inn for at det er denne testen som har fått den laveste statiske friksjonskoeffisienten i denne serien.

Den største statiske friksjonskoeffisienten i serien ble funnet for test 5. Det er derfor gjort analyser også på denne testen i Aramis. Sammenlignet med hvordan utglidningene av midtklossen var i seriene med mindre klosser, går det mye lenger tid før glidningene inntreffer for de store klossene. Når glidningene først skjer kan det observeres at det skjer et stort rykk i den midterste klossen. Dette skjer på sekunder, og kan derfor tydelig observeres fra bildene i Aramis.

Kraft- forskyvningskurvene fra denne serien viser at stigningstallet på kurvene er lavere enn hva det har vært i de tidligere seriene. Grafene viser at kreftene kan påføres over lenger tid, og større forskyvninger påføres, før den statiske friksjonen slutter å virke. Fra

observasjonene på test 5 i Aramis tyder det på at den midtre klossen utsettes for en sammentrykking i stedet for å gli ut så lenge den statiske friksjonen virker i prøvestykket. Sammentrykkingen skjer trolig i hver av trefiberne, og fordi prøvene i denne serien var høyere var det derfor flere fibre som kunne presses sammen før klossene måtte gi etter for vertikalkreftene. Resultatet av dette var at kurven ble mindre bratt. Siden en stor del av sammentrykkingen trolig var elastiske deformasjoner, fikk klossen sin opprinnelige høyde igjen når klossene begynte å gli ut. Denne utvidelsen vil være større i de store klossene enn i de små klossene fordi det er flere fibre som kan utvide seg. Disse store utvidelsene kan ha virket inn for at plottene i denne serien hadde større reduksjoner i påførte krefter etter at grensen for den statiske friksjonen var nådd. Dette kan også være grunnen til at det fra bildene registrert av Aramis vistes mye tydeligere når utglidningene i disse testene startet.

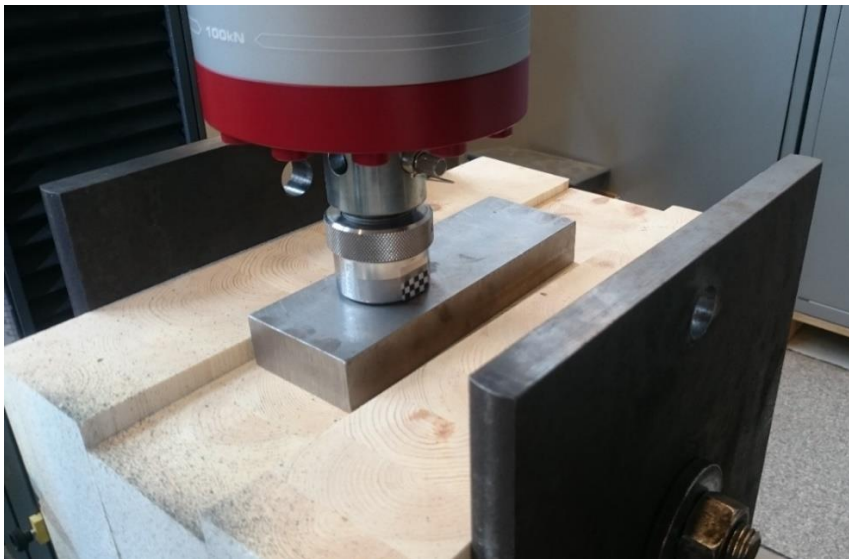
L06B:



Figur 48 - Statistiske og kinematiske friksjonskoeffisienter fra serie L06B

Også forsøkene i denne serien ble gjort på klosser med større glideflater. Resultatene fra denne serien, vist i figur 48, ga de absolutt jevneste verdiene for den statiske

friksjonskoeffisienten. Likevel er det større usikkerheter rundt hvor sikre de oppnådde verdiene er i forhold til de andre seriene. Dette fordi en stor feilkilde i denne serien var at det i mange av testene oppstod rotasjoner om stålbolten, vist i figur 49. Grunnen til at dette skjedde er at det samme testoppsettet ble benyttet, med samme avstand mellom testmaskinen og kameraene for registrering i Aramis som for de mindre klossene. Siden Aramis var stilt inn til å måle overflater med denne bestemte avstanden mellom kameraene og prøvestykket, måtte derfor de bredere prøvene plasseres slik at den påførte vertikallasten ikke traff sentrisk på midtklossens overflate. Dette med resultat at når denne lasten ble påført prøvestykket, oppstod rotasjoner om den sentriske stålbolten samtidig som den gled ut.



Figur 49 - Testing av klosser med større bredde. Glidningene foregår langs fiberretningen. Av bildet kan det ses at lasten treffer eksentrisk på den midtre treklossen. Dette har ført til at klossen har glidd ut mer i forkant enn i bakkant av prøvestykket. Disse rotasjonene kan ha hatt negativ innvirkning på verdiene av friksjonskoeffisientene.

Den statiske friksjonskoeffisienten fikk verdier mellom 0,37 og 0,40. Dette gir et forholdstall på hele 93%. Dette er svært liten forskjell mellom den største og minste oppnådde verdien, spesielt sammenlignet med forholdstallene fra de tidligere seriene. Tidligere har samtidig testingen vist at variasjonen i verdier har vært størst for seriene med glidninger langs med fiberretningen. Heller ikke dette stemmer for serien L06B.

Siden prøvestykkene var bredere enn oppleggsklossene er det ikke mulig å se oppleggene for disse seriene i bildene fra Aramis. Dette fører videre til at det ikke er mulig å få info om oppleggsbetingelsene fra analysene i Aramis. I plottene for last- forskyvningskurvene til test 1, 5, 9 og 10 er det likevel blitt registrert to lasttopper. Fra observasjonene fra de tidligere seriene har lignende utviklinger i plottene vist at det som regel har vært problemer med oppleggingen av prøvene. Det kan derfor tyde på at det også i denne serien har vært trøbbel med plasseringen av prøven på oppleggene.

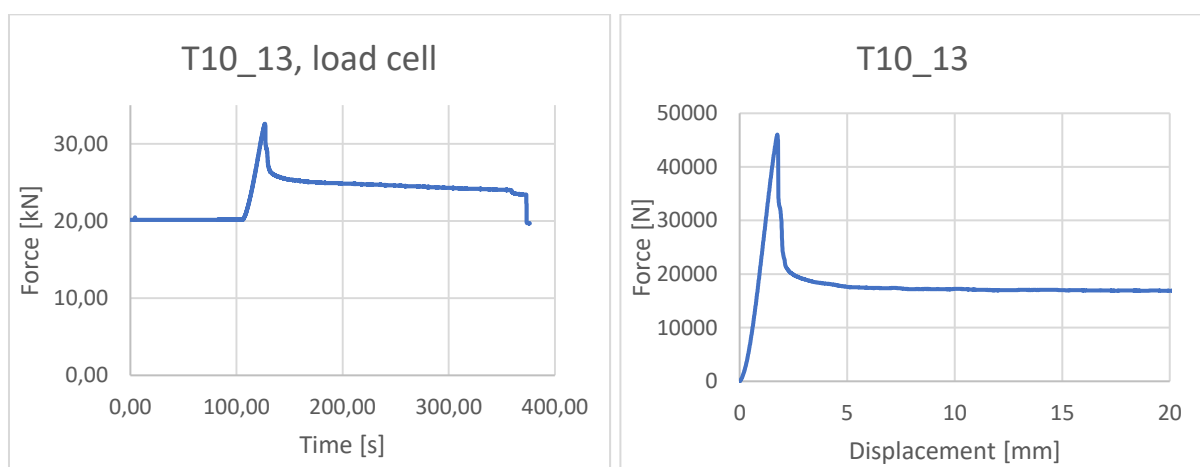
Last- forskyvningskurvene viser at forholdet mellom lasten i lasttoppen og den konstant påførte lasten er mindre enn i de tidligere seriene. Denne påføringen er i tillegg helt motsatt av lastpåføringen på klossene i serien T06H, hvor det var en stor kraft påført ved makslasten, mens den konstant påførte kraften var mye mindre.

Fra teoridelen kom det fram at dimensjonsendringene er større på tvers av fiberne enn langs med fiberne. Sammenpressingen av prøvestykkene vil derfor trolig være mindre for denne serien siden trykket har virket langs med fiberne. Dette kan forklare hvorfor det ikke er mulig å observere en like tydelig start på utglidningene i denne serien sammenlignet med hvor tydelig dette var for serien T06H. I tillegg vil nok det at tverrsnittshøyden av disse klossene er lik som tverrsnittshøyden for de små klossene spille inn for at utglidningene starter omtrent likt i disse seriene. At brattheten av kraft- forskyvningskurvene for de bredere klossene ligner mer på brattheten fra seriene med de små klossene, kan skyldes at disse klossene hadde samme tverrsnittshøyde.

4.5.2 Lastcellen og vurderinger av plottene fra denne

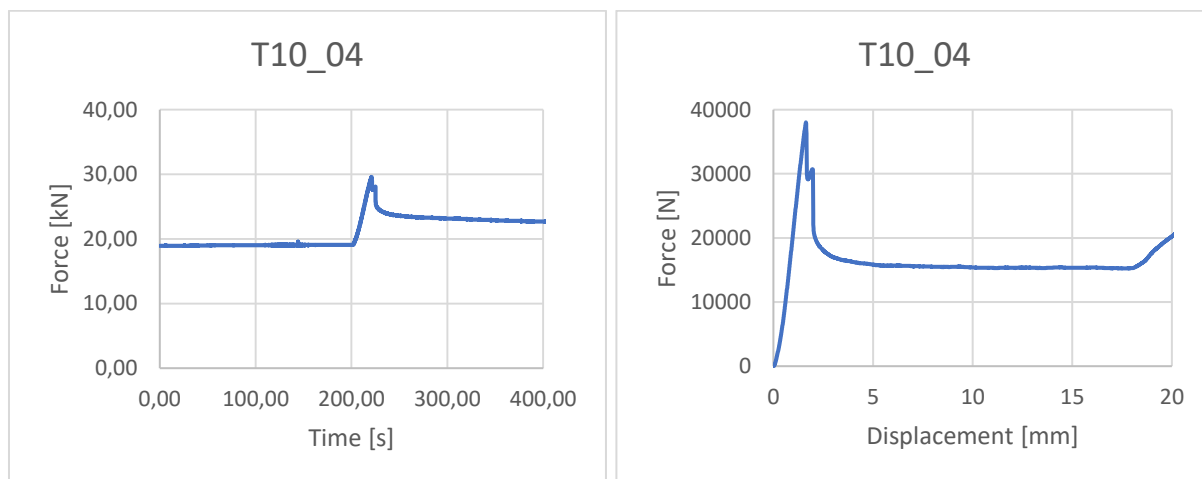
Under monteringen av prøvestykkene ble oppspenningskreftene kontrollert gjennom lastcellen. Når verdiene fra lastcellen viste at den ønskede oppspenningen var nådd, var prøvene klare enten til lagring eller til videre testing. Registreringen av opptredende last i lastcellen ble startet umiddelbart etter at den ønskede oppspenningslasten var påført prøvestykket. Dette enten prøvestykkene ble spent opp til direkte testing, eller de var spent opp på nytt med den sentriske bolten etter de hadde vært lagret ei uke. Målingene fra lastcellen ble derfor startet før prøvestykket var plassert i testmaskinen og registreringene fra friksjonstesting var klare til å startes. Et resultat av dette er at plottene for lasten i lastcellen ikke har samme nullpunkt for tidsmålingen som last- forskyvningsplottene fra testmaskinen. En utfordring var derfor å vite hvilke verdier fra lastcellen som samsvarte med verdiene fra kraft- forskyvningskurvene.

Det viste seg at de opptredende kreftene i lastcella ofte samsvarte med hvordan utskyvningslasten påført midtklossen varierte. For disse tilfellene ble jobben med å kombinere de riktige verdiene fra lastcellen og testmaskinen derfor noe forenklet. Test 13 fra serien T10, vist i figur 50, er et eksempel på hvor godt samsvar det kunne være mellom plottene fra lastcellen og testmaskinen. Selv for testene hvor plottene fra testmaskinen ga to lasttopper på kraft- forskyvningskurven viser det seg å være lignende opptreden for lasten i lastcellen. Dette er vist i figur 51 gjennom plottene fra test 4 i serien T10.



Figur 50 - Til venstre er plottet fra lastcella til test 13 i serien T10 gitt. Plottet til høyre gir last- forskyvningskurva for test 13 i serien T10. Det kan ses fra de to plottene at det er tydelige likheter for hvordan kreftene opptre i de to plottene.

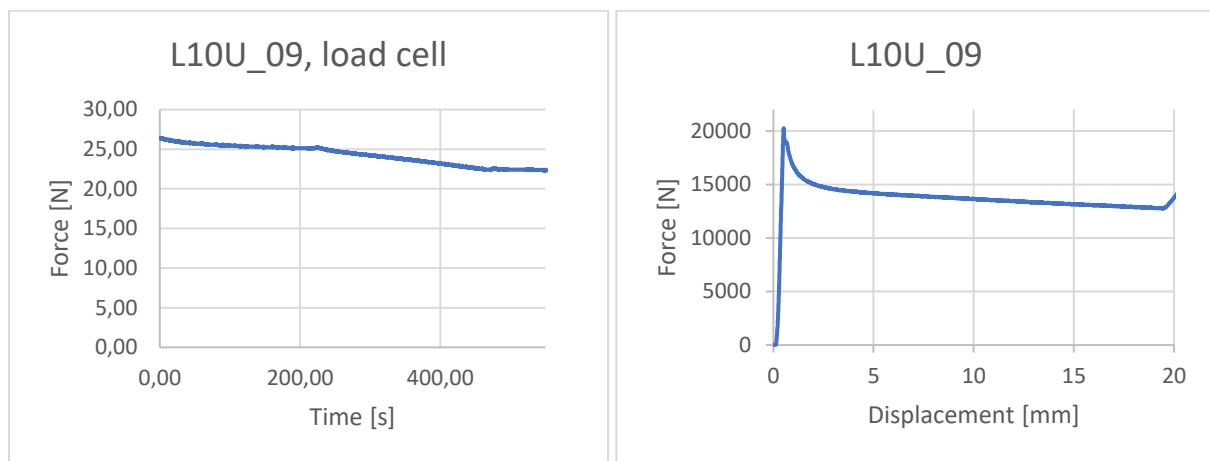
Beregninger på tiden mellom to lasttopper i forhold til forskyvningene som har oppstått i last- forskyvningskurvene, viser at denne er tilsvarende tiden mellom lasttoppene i lastcellen. Dette understreker antagelsene om at variasjonene i den påførte vertikallasten i stor grad gjenspeiles gjennom variasjonene i lastcellen.



Figur 51 - Plott fra lastcellen og kraft- forskyvningskurva for test 4 i serie T10. Det viser seg at det er godt samsvar mellom de to plottene, selv når det har oppstått flere lasttopper under testingen.

For enkelte av seriene var det ikke like tydelig hvilke verdier som hørte sammen fra lastcellen og last-forskyvningskurva. Dette gjaldt spesielt seriene der prøvestykkene ble testet med glidning langs fiberretningen og seriene hvor friksjonstestene ble gjennomført umiddelbart etter at oppspenningene var påsatt. Test 9 i serien L10U vist i figur 52 er et eksempel på et slikt tilfelle. Registreringene fra lastcella viser ingen tydelige tegn på at friksjonstesting har startet og gir dermed lite hint om hvilke verdier som skal benyttes for beregningene av friksjonskoeffisientene. For å få et litt bedre inntrykk av variasjonene i lastcellen for disse seriene ble det forsøkt å formatere aksene. På den måten kom variasjonene i lastcellen tydeligere fram og mindre lasttopper kunne observeres. Verdiene fra disse ble benyttet videre til beregninger.

Målingene fra lastcellen viste at så fort det ikke ble påført krefter på prøvestykket oppstod det umiddelbart en reduksjon av kreftene igjen. På de fem minuttene det tok fra prøvestykket var ferdig oppspent til det var plassert i testmaskinen hadde oppspenningene allerede blitt redusert med noen kilonewton. Denne reduksjonen var spesielt tydelig i seriene hvor prøvestykkene ble spent opp og testet samme dagen. I mange av disse serienes plott, blant annet test 9 som vist i figur 52 under, kan denne gradvise nedgangen i påførte oppspenningskrefter observeres.



Figur 52 - Til venstre er plottet fra test 9 i serien L10U vist. Last- forskyvningskurva til samme test er gitt ved plottet til høyre. Disse plottene viser at det ikke alltid var godt samsvar mellom de to plottene.

Reduksjonen av oppspenningskreftene var ikke like markante i forsøkene der prøvestykkene var lagret ei uke med oppspenningen før friksjonstestene ble utført. Dette kan skyldes at de forsinkede elastiske deformasjonene ikke lenger var like store når disse prøvene ble testet. Dette fordi prøvestykkene hadde vært utsatt for denne konstante kraften i lenger tid. Til tross for dette var det til tider vanskeligheter med å vite hvilke verdier som hørte sammen fra de to forskjellige plottene, også for tester med en ukes oppspenning. Disse komplikasjonene var mest gjeldende for seriene med glidninger langs med fibrene.

Typisk for testene med godt samsvar mellom lastene i lastcella og den påførte vertikallasten var at det var en lignende økning av kreftene og et klart toppunkt i begge plottene. Etter lasttoppen hadde inntruffet var det igjen en jevn reduksjon av kreftene i lastcellen samtidig som midtklossen ble skjøvet ut med en konstant kraft. I plottene med vanskeligheter, ble det

i stedet registrert jevnt store verdier for oppspenningskreftene gjennom hele testingen. Dette resulterte i at det var større usikkerheter rundt hvilke verdier som skulle benyttes til de videre beregningene.

En konsekvens av denne økningen i oppspenning ettersom testen utføres er at de funnede friksjonsparameterne egentlig gjelder for spenninger som er større enn det navnene på prøveseriene tilsier. Likevel er oppspenningene i prøvestykkene samsvarende med spenningene ved teststart.

Beregninger gjort på forholdet mellom kreftene ved teststart og kreftene ved lasttoppen, viser at kreftene i lasttoppen er omtrent 10% større enn ved teststart for seriene som er gjennomført med glidninger i fiberretningen. I seriene med glidninger på tvers av fiberretningen er forskjellene mellom disse lastene større. For disse seriene utgjorde oppspenningslasten ved teststart omtrent 60% av oppspenningskreftene ved makslast. Resultatene fra beregningene av forholdene mellom de opptredende lastene i lastcellen viste at seriene med de minste forholdene samtidig var de seriene hvor det var vanskeligst å hente ut verdiene fra lastcellen. Dette er positivt siden innvirkningen på friksjonskoeffisientene dermed vil være mindre dersom feil verdier er hentet ut fra disse lastcelleplottene.

Sammenhengen mellom plottene fra lastcellen og kraft- forskyvningskurvene kommer trolig av «hengekøyeeffekten». Med dette menes at når den vertikale kraften påføres prøvestykket vil stålkabelen få en bueform, tilsvarende formen på en opphengt hengekøye. Denne bøyingen av stålstaget gjør at det oppstår ekstra spenninger stålet. Disse spenningene vil videre føre til økte spenninger i prøvestykkene. Resultatet er at når kreftene påført for å få til den vertikale utglidningen økes, vil dermed også kreftene i lastcellen øke. Etter at lasttoppen er nådd, viser flertallet av plottene fra lastcellen at kreftene i denne har blitt gradvis redusert. Dette skyldes antagelig at stålstaget gradvis har fått en mindre bøy igjen etter at klossene har begynt å gli.

4.5.3 Forsøk med av- og pålasting undervegs i testene

Testene i de første seriene viste at etter midtklossen var skjøvet ut 10 mm, var det lite som skjedde i testene før klossene eventuelt kom i kontakt med oppspenningsstålet. Klossen så ut til å gli ut med en konstant kraft, noe som stemmer med teorien, men det var også alt som skjedde. Det ble derfor besluttet å gjøre en variasjon ved testgjennomføringen. For seriene T03, L03, T06 og L06 ble derfor en ny metode for testing forsøkt.

I den nye prosedyren ble følgende utført: Når klossen var glidd ut i overkant av 10 mm, ble lastpåføringen stoppet og bommen som påførte lasten ble heist opp et lite stykke. Deretter ble bommen igjen senket slik at der var kontakt mellom den allerede utskjøvede klossen og elementet som påførte utglidningskraften. Den automatiske påføringen av last ble deretter satt i gang igjen. En hensikt med denne metoden for lastpåføring var å få et inntrykk av trevirkets oppførsel når kraften ble fjernet for så å bli satt på igjen. Gjennom dette var det også mulig å få kunnskaper om hvordan lameller som allerede har begynt å gli ut i tverrspente dekker, vil kunne oppføre seg videre.

En annen grunn til at det var ønskelig å forsøke denne metoden for lastpåføring, var at denne lastsituasjonen samsvarer bedre med hvordan kreftene vil virke på brua når dekket utsettes for trafikk. Første runden med de påførte trykkreftene kan tilsvare at det fremste hjulsettet på en bil kjører over dekket. Når dette har passert vil lasten fjernes, men like etterpå vil dekket igjen utsettes for krefter fordi bakhjulene passerer over dette samme punktet på brudekket.

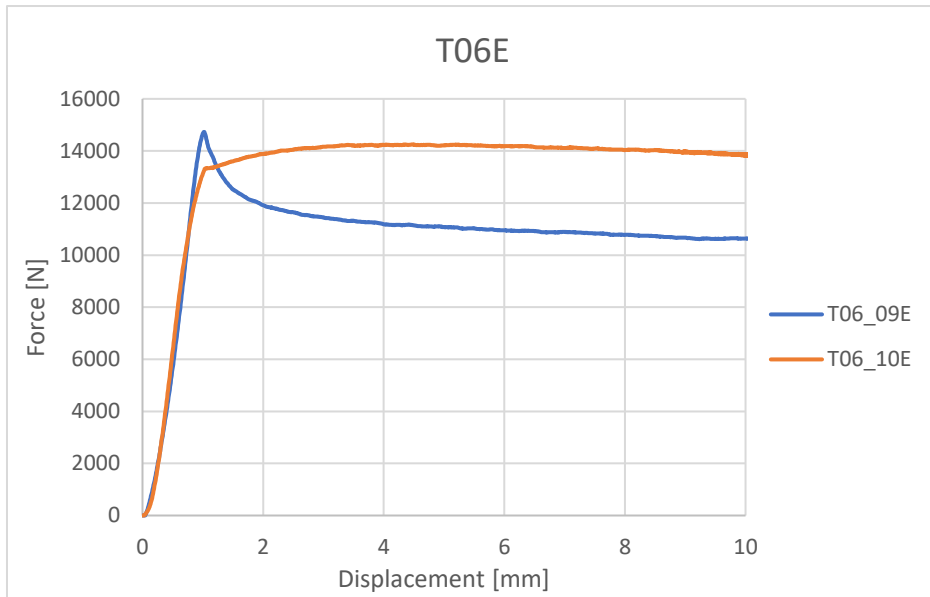
I denne omgangen ble det kun gjort forsøk der testene ble startet igjen en gang. Ved videre testing kan det være ønskelig å teste med enda flere av- og pålastninger i løpet av en test. Dette fordi det på store lastebiler kan være helt opp i fire hjulsett, og dermed fire sykler, for hver passering. Det kan også tenkes at det kan være jevn trafikk på brua og dermed mange biler som passerer på rad. Med utgangspunkt i dette kan det være interessant å teste enda flere runder av- og pålasting for samme prøvestykke.

Resultatene ved denne variasjonen for gjennomføring var overraskende. Testingen med å sette på lasten i to runder, viste at lasten satt på i andre runde gikk direkte opp til samme verdien som rett før testen ble stoppet. For noen av testene var det mulig å observere et lite dropp på last- forskyvningskurvene akkurat når lasten nådde omtrent samme verdier som før testene ble stoppet, men disse var nokså ubetydelige. Det kunne heller ikke høres noen tydelig knakelyd. Resten av testen gikk deretter som for de tidligere testene, med en jevn utskyvning av midtklossen.

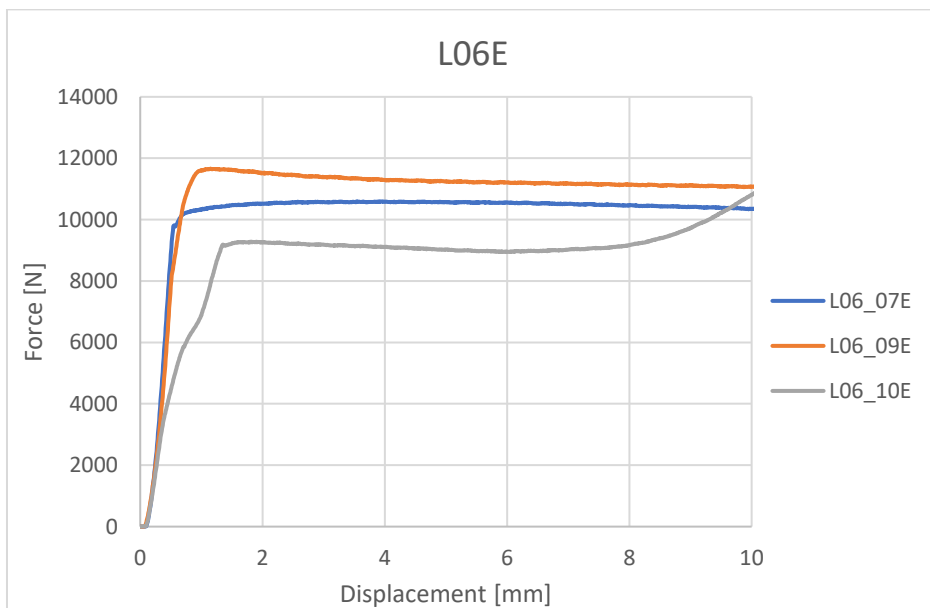
Plottene for last- forskyvningskurvene viste altså tydelig at maksimalkreftene som ble oppnådd første gangen, og som ble benyttet til å beregne den statiske friksjonen, ikke kunne oppnås ved en andre runde med testing. Siden dette resultatet var noe overraskende, ble forsøkene delvis variert. En av disse variasjonene var at det for enkelte av prøvene ble forsøkt å vente opptil en time før forsøkene ble fortsatt. Likevel viser ikke disse testene noen forskjell i oppførsel i forhold til forsøkene der lasten ble påført og testene startet igjen umiddelbart.

På grunn av disse overraskende resultatene, ble det besluttet å gjøre noen ekstra tester. Noen av de allerede testede prøvestykkene ble derfor spent opp igjen til samme oppspennings som de var testet ved tidligere, og nye friksjonstester ble utført en andre gang. Alle de retestede prøvene bestod av prøvestykker fra seriene med 0,6 MPa oppspenning, hvor både glidninger langs med og på tvers av fiberretningen ble forsøkt.

Kraft- forskyvningskurvene fra ekstratestene er plottet i figur 53 og figur 54. Disse viser at selv for disse testene, hvor klossene er tatt helt fra hverandre før de er satt sammen igjen, oppstår det i svært liten grad noen lasttopp før grafen for påført last igjen flater ut. Den eneste av testene som ser ut til å ha et lite innslag av dette er test 9 som er testet med glidninger på tvers av fiberretningen. Likevel er denne lasttoppen svært liten sammenlignet med hvor stor lasttoppen for denne testen var ved første runde med friksjonstestinger.



Figur 53 - Kraft- forskyvningskurvene til prøvestykkene med glidninger på tvers av fiberretningen og som var spent opp en andre gang



Figur 54 - Kraft- forskyvningskurvene til prøvestykkene med glidninger langs med fiberretningen og som var spent opp en andre gang

Nøyaktigere sammenligninger mellom kreftene som er oppnådd for at utglidning skal skje viser at det ikke er nøyaktig samme verdiene som påføres igjen andre gang. Det viser seg heller ikke at det er noen sammenheng med at for eksempel alle testene i denne andre runden får litt lavere utglidningskrefter. For eksempel krevdes det ved første testing omtrent

10 000 Newton for å skyve ut midtklossen for test T06_09E. I denne andre runden med testing er denne kraften derimot på omkring 14 000 N. Motsatt er det for test L06_10E. Denne har oppnådd en utglidningskraft på omtrent 10 000 N i første runde med testing, mens gjennom andre runde med tester oppnåddes kun 9000 N.

Likevel er det ikke tilstrekkelig å kun gjøre sammenligninger på kreftene som trengtes for å skyve ut klossene andre gangen. Som presentert under teorien, vil de nødvendige utglidningskreftene avhenge av hvilke oppspenningskrefter som påføres. Oppspenningene som er påført ved reoppspenningen er med stor sannsynlighet avvikende fra hvilke oppspenninger som var påført prøvestykkene ved første testing. Beregning av kinematiske friksjonskoeffisienter, med oppspenningene fra andre runde med tester vil derfor gi et riktigere bilde på om det er samme friksjonsverdier som oppnås ved repeterende tester.

For fire av de fem retestede forsøkene viser det seg at friksjonskoeffisienten som var opptredende i prøvestykket ved første runde med testing, også var opptredende når prøvene ble testet en andre gang.

4.5.4 Klossenes densiteter

Tabell 28 - Statiske og kinematiske friksjonskoeffisienter samt gjennomsnittlig densitet for klossene i de ulike seriene

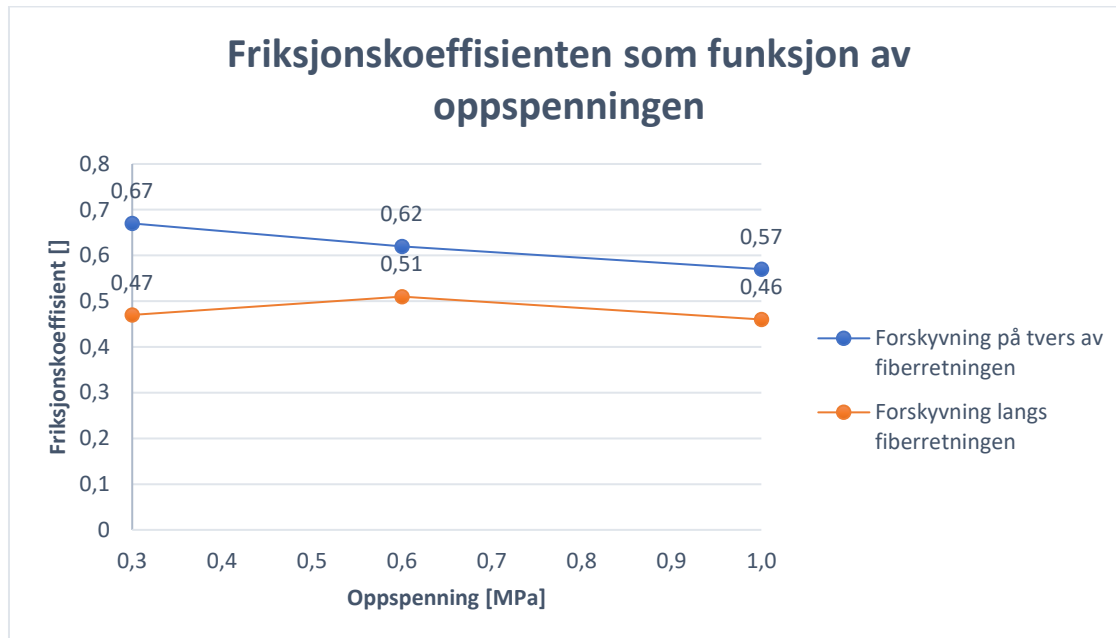
Prøveserie	Gjennomsnittlig statisk friksjonskoeffisient	Gjennomsnittlig kinematisk friksjonskoeffisient	Gjennomsnittlig densitet av klossene i serien
T03	0,67	0,33	455
L03	0,47	0,33	460
T06	0,62	0,34	458
L06	0,51	0,32	458
T10	0,57	0,33	462
L10	0,46	0,33	457
T10U	0,45	0,29	457
L10U	0,33	0,27	461
T06H	0,58	0,35	481
L06B	0,38	0,30	477

Som en del av undersøkelsene ble alle klossene veid og densiteten av hver kloss beregnet. Det var videre ønskelig å se om det kunne være noen sammenheng mellom densiteten og friksjonsparameteren til klossene. For å undersøke denne muligheten for sammenheng ble gjennomsnittsdensiteten for hver serie beregnet. Denne densiteten var funnet som gjennomsnittet av densiteten til alle de benyttede treklossene i serien. Videre ble det sett på hvordan densitetene varierte mellom hver av seriene og om disse variasjonene også kunne finnes igjen blant friksjonsparameterne.

De gjennomsnittlige friksjonskoeffisientene samt densitetene for seriene er gitt i tabell 28. Undersøkelser på disse verdiene viste liten sammenheng mellom variasjonene i densiteter og variasjon i friksjonskoeffisienter. Densiteten av klossene i prøvestykket har derfor trolig lite innvirkning på friksjonen og friksjonskoeffisientens størrelse.

4.6 Diskusjon av resultatene fra de ulike seriene

Testing langs fiberretning i forhold til på tvers samt endring i oppspenning



Figur 55 - Diagrammet viser hvilke statiske friksjonskoeffisienter som er fått for de ulike oppspenningene. Av plottet kommer det samtidig fram hvordan verdiene for friksjonsparameterne endres ettersom oppspenningene endres.

De statiske friksjonskoeffisientene som ble funnet fra seriene med lagrede oppspente prøvestykker, er plottet som funksjon av størrelsen på oppspenningen i figur 55. Av denne figuren kan det ses at størrelsen på den statiske friksjonskoeffisienten avtar ettersom de påsatte oppspenningskreftene øker.

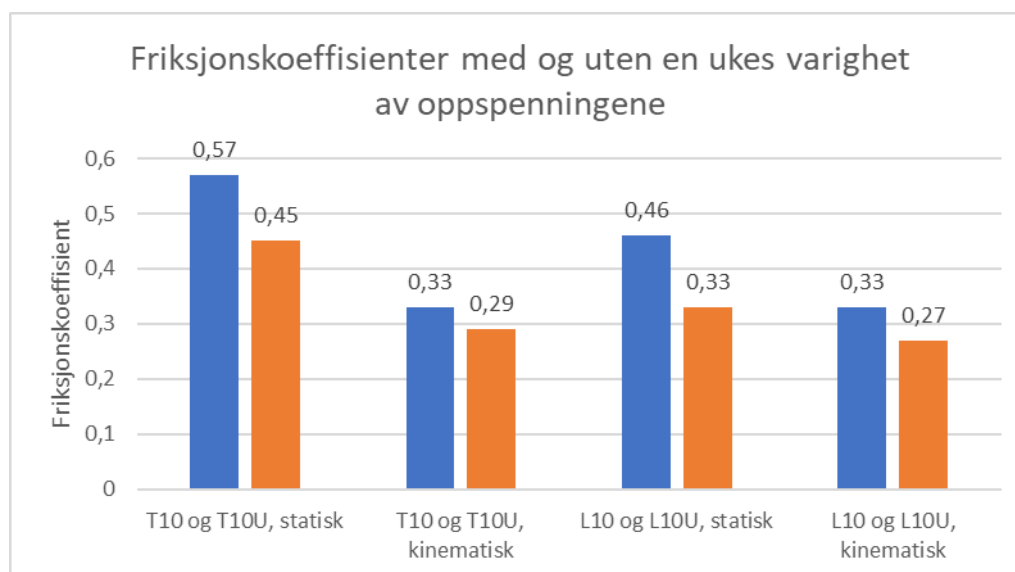
For seriene med tester utført på tvers av fiberretningen ser det ut til at denne økningen er tilnærmet lineær for den statiske friksjonskoeffisienten ettersom spenningene reduseres. Denne samme observasjonen er ikke like tydelig for seriene med forskyvninger langs med fiberretningen. Dette kan komme av at den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten for serien med 0,3 MPa oppspenning ble noe lav grunnet komplikasjonene med oppleggene. For de to andre seriene med forsøk langs fiberretningen virker det som det er mer likheter i variasjonen for friksjonskoeffisienten sammenlignet med seriene med forsøk på tvers av fiberretningen.

En annen observasjon er at prøvene hvor forskyvningene har skjedd på tvers av fiberretningen har oppnådd en større friksjonskoeffisient enn prøvene med forskyvninger langs med fiberretningen.

Fra seriene med 0,6 MPa oppspenning og 1,0 MPa oppspenning virker det i tillegg til at det er en nokså konstant forskjell i verdiene mellom den statiske friksjonskoeffisienten for testene utført langs med og på tvers av fiberretningen. Det er imidlertid forskjellen mellom verdiene som er konstant, slik at den prosentvise forskjellen i verdier blir mindre ettersom oppspenningskreftene blir mindre. For oppspenningene på 1,0 utgjør eksempelvis friksjonskoeffisienten for forskyvninger på langs 80,7% av friksjonskoeffisienten ved testing på tvers av fibrene. Med oppspenninger på 0,6 MPa er denne økt til 82,3%.

Prøvestykker spent opp og testet samme dagen mot lagrede oppspente tester

Testresultatene viste at det hadde en positiv effekt å lagre prøvestykkene oppspente uten noen bevegelse mellom treklossene etter sammenpressingen, før prøvene ble testet. Seriene med 1,0 MPa oppspenning, både med og uten den en uke lange oppspenningen, er plottet i figur 56. Denne viser at friksjonskoeffisientene oppnådde høyere verdier både for seriene med forskyvninger på tvers og langs med fiberretningen når prøvene var lagret oppspente ei uke før friksjonen ble testet.



Figur 56 - Friksjonskoeffisientene fra seriene med 1,0 MPa oppspenning hvor prøvene enten er testet umiddelbart etter oppspenning eller hvor prøvene er lagret oppspente ei uke før de er testet

For testene på tvers av fiberretningen og med testing umiddelbart etter oppspenning, ble den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten 0,45. For serien som først var utsatt for ei ukes oppspenning økte friksjonsparameterens verdi med 25% til 0,57. Også serien med utglidninger langs med fiberretningen fikk en større verdi for når prøvestykkene hadde ligget oppspente i ei uke. Serien uten langvarig oppspenning ga friksjonsparameteren som 0,33 mens den ble 0,46 for serien med en ukes oppspenning. Dette er en økning i verdi på nesten 40%.

Den kinematiske friksjonen har i prøveseriene gitt lite antydninger til å være påvirket av størrelsen på oppspenningene eller hvorvidt testene er gjort med forskyvningene av klossene langs med eller på tvers av fiberretningen. Faktoren for varigheten av oppspenningene hadde derimot en innvirkning på denne parameteren. Mens seriene med en ukes lagring av oppspenning har oppnådd friksjonskoeffisienter rundt 0,30, ga friksjonstestene for seriene T10U og L10U kun verdiene 0,27 og 0,25. Dette forskjellen på friksjonskoeffisientene kan redusere dekkets lastkapasitet med opptil 20%.

Ulike størrelser på klossene

Forsøkene som ble gjort med større prøvestykker ga lavere statiske friksjonskoeffisienter enn for de mindre klossene som var utsatt for samme oppspenningskrefter. Forholdstallene mellom de små og store klossene med glidninger på tvers av fiberretningen viser at friksjonsparameteren er 7% større for de minste klossene. En tilsvarende sammenligning gjort for seriene med glidninger langs fiberretningen viser derimot at friksjonsparameteren for de mindre klossene er hele 25% større enn for de store klossene.

Som nevnt i kapitlet «observasjoner fra seriene» har friksjonskoeffisienten i serien med store klosser og glidninger langs fiberretningen spesielt mange feilkilder i forbindelse med testgjennomføringen. Dette kan ha hatt negative innvirkninger på verdien for friksjonskoeffisienten, og det antas at dette er grunnen til at denne har blitt relativt liten.

Den kinematiske friksjonskoeffisienten for de større klossene utsatt for glidninger på tvers av fiberretningen blir 3% større enn for de mindre klossene utsatt for samme oppspenningskreftene og med tilsvarende glideretninger. Samtidig gir de større klossene med glidninger langs fiberretningen en kinematisk friksjonsparameter som er 6% mindre enn friksjonsparameteren for de mindre klossene. Dette betyr at variasjonen av disse friksjonskoeffisientene er i samme størrelsesorden som variasjonene for friksjonskoeffisientene har vært i enkelte av prøveseriene. Ut fra dette er den kinematiske friksjonsparameteren trolig uavhengig av størrelsene på flatene som glir mot hverandre.

Statisk og kinematisk friksjonskoeffisient

Av søylediagrammene plottet for de statiske og kinematiske friksjonskoeffisientene fra testene, antydes det at forskjellene mellom disse parameterne er større i testene med forskyvninger på tvers av fiberretningen. Nærmere undersøkelser på disse forskjellene viser at dette i stor grad også stemmer. I testene hvor utglidningen av midtklossen foregikk med fiberretningen lå forholdet mellom den kinematiske og den statiske friksjonskoeffisienten rundt 70% for klossene med 0,3 MPa oppspenning. Omtrent samme forholdstall ga også sammenligningen av disse parameterne ved en oppspenning på 1,0 MPa. Prøveserien på 0,6 MPa fikk derimot større forskjeller mellom den statiske og den kinematiske friksjonskoeffisienten. Dette ga et forholdstall på 63%. Ut fra dette er det lite som tyder på at det er noen sammenheng mellom hvordan forholdet mellom friksjonskoeffisientene endres ettersom oppspenningene endres.

Likevel viser seriene at denne observasjonen ikke gjelder når glidningene har skjedd på tvers av fiberretningen. Forholdstallet mellom den kinematiske og statiske friksjonen er 49,3 % for serien med 0,3 MPa oppspenning. Forholdet øker ettersom forspenningene i prøvestykkene øker, og for serien med 1,0 MPa oppspenning var dette kommet opp i 57,9%. Denne økningen i forholdstallet forteller at jo høyere oppspenningene blir, jo mindre blir forskjellen mellom den statiske og den kinematiske friksjonskoeffisienten.

For seriene hvor det er testet med større klosser og seriene uten en ukes oppspenninger oppnås enda større forholdstall mellom den kinematiske og statiske friksjonsparameteren. I begge disse variasjonene, med glidninger langs med fibrene, ender forholdet på omtrent 80%. For seriene med glidningene på tvers av trefibrene ligger forholdene mellom 60% og 65%.

4.7 Diskusjon av resultatene mot tidligere gjennomførte undersøkelser

I alle de tidligere gjennomførte forsøkene er testene spent opp og friksjonen testet på samme dag. Ved sammenligninger av resultatene fra masteroppgaven med resultatene som er funnet tidligere, er det derfor forsøkene som er gjort uten den ukeslange oppspenningen som gir det beste sammenligningsgrunnlaget.

Kalbitzer fant gjennom utføringen av forsøkene at treslaget benyttet i prøvestykkene hadde liten innvirkning for friksjonsoppførselen. På bakgrunn av dette kan resultatene fra denne masteroppgaven sammenlignes mot de tidligere testene. Dette til tross for at de tidligere forsøkene hovedsakelig er gjennomført på gran, mens prøvestykkene benyttet til denne rundens tester var av furu. Kalbitzers undersøkelser var utført med 10,1 % og 14,0% fuktighet i prøvene. Samtidig fant han ut at fuktighetsinnholdet i prøven var av de mer avgjørende faktorene for friksjonskoeffisienten. Fuktigheten ved testingene i masteroppgaven var på 12%. Samtidig er det gitt av eurokoden at verdier for friksjonsparameteren, når fuktigheten er mellom 12% og 16% i trevirket, kan finnes ved interpolasjon. Friksjonskoeffisientene som oppnås i testene med 12% fuktighet burde derfor ligge omtrent midt mellom verdiene for friksjonsparameterne ved 10,1% og 14,0% fuktighet.

Verdiene for den statisk friksjonskoeffisient ble likevel overraskende stor i de gjennomførte forsøkene sammenlignet med verdiene Kalbitzer fant. Han fant verdiene for den statiske friksjonen i seriene med 10,1% fuktighet og forskyvninger på tvers av fiberretningen til å være 0,28. Dette er nesten 40 % mindre enn friksjonsparameteren som ble funnet fra

tilsvarende serie ved testingene i masteroppgaven, hvor den gjennomsnittlige statiske friksjonen ble 0,45. Den kinematiske friksjonskoeffisienten funnet for denne samme serien ble imidlertid 0,29. Denne verdien ligner mer på Kalbitzers resultater.

Fra serien med høvlede overflater og 14,0% fuktighet var friksjonskoeffisienten 0,41 fra Kalbitzers forsøk. Denne verdien er derfor nærmere resultatene for testene ved 12% fuktighet. Likevel er denne verdien fortsatt liten med tanke på at siden fuktighetsinnholdet var høyere i Kalbitzers forsøk enn i testene i masteroppgaven.

Testene utført på av Bekk, Hangaard og Ravnås har derimot oppnådd større friksjonskoeffisienter enn hva det er kommet fram til gjennom vårens forsøk. Fra friksjonsforsøkene Bekk, Hangaard og Ravnås utførte med glidninger på tvers av fiberretningen ble friksjonskoeffisienten 0,66. Dette er nesten 50% større enn verdiene for friksjonskoeffisienten funnet fra forsøkene utført i masteroppgaven. Selv om det var større forskjell mellom friksjonsparameterne fra disse testene og testene utført i masteroppgaven, var det likevel flere likhetstrekk i hvordan testene ble utført sammenlignet med de tidligere testgjennomføringene.

Sammenligning av seriene med forskyvning parallelt med fiberretningen viser at det også for disse resultatene er avvik i de oppnådde verdiene. Kalbitzers serie med 10,1% fuktighet og glidninger parallelt med fibre ga en friksjonskoeffisient på 0,24. I forsøkene med 14,0% fuktighet var den økt til 0,30. Disse resultatene ligger nærmere resultatet for den statiske friksjonen fra serie L10U, hvor friksjonskoeffisienten ble 0,33. Også dette resultatet gjelder for prøver med en fuktighet på omtrent 12%. Av tilsvarende årsaker som for seriene med glidninger på tvers av fiberretningen burde derfor denne verdien vært noe lavere.

Gjennom forsøkene fra Gjøvik, hvor forsøk med utglidninger langs fibre er utført, er det funnet en friksjonskoeffisient på 0,52 for glidninger på høvlede overflater. Dette er en

vesentlig mye høyere verdi. Samtidig har analysene fra serien L10U vist at noen av friksjonskoeffisientene ble veldig lave grunnet dårlige plasseringer av prøvestykkene på opplagerne. Hadde dette vært unngått hadde trolig den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten fra denne serien også vært noe større.

Fra eurokoden er friksjonstallet for glidninger mellom to høvlede treoverflater med 12% fuktighet 0,20 for utglidninger vinkelrett på fiberretningen, mens den er 0,17 for utglidninger parallelt med fiberretningen. Disse verdiene ligger langt under verdiene funnet for den statiske friksjonskoeffisienten i de gjennomførte friksjonstestene. Den minste verdien fra friksjonstestene var 0,25 og ble funnet som den karakteristiske verdien for den kinematiske friksjonskoeffisienten i serien med kort varighet for oppspenningen og forskyvninger i fiberretningen. Selv denne verdien er i overkant av 30% større enn den minste friksjonsparameteren fra eurokoden.

Fra friksjonstestene utført gjennom masteroppgaven kommer det fram at størrelsen på friksjonsparameteren er omvendt proporsjonal med oppspenningen, altså at friksjonsparameterens verdi øker ettersom oppspenningen reduseres. Denne sammenhengen er derimot ikke funnet i forsøkene gjennomført ved Träteck, hvor det også ble forsøkt å variere oppspenningene. Kalbitzer fant ut at variasjon av oppspenningene ikke hadde noen særlig innvirkning på friksjonskoeffisienten før fuktigheten i trevirket var 18%. I resultatene han har fått fra testene med disse fuktighetene virker det fortsatt ikke som om det er noen tydelig sammenheng mellom friksjonstallets variasjon og oppspenningenes variasjon.

Resultatene fra seriene hvor lastene ble påført i to runder, samt resultatene fra de retestede prøvestykkene, viste at den statiske friksjonen som ble oppnådd første gangen ikke var mulig å oppnå ved en andre pålasting. På grunn av dette er verdiene funnet for de kinematiske friksjonskoeffisientene sikrere å benytte ved senere prosjektering av tverrspente dekker. Dette fordi det er vanskelig å vite hvilke påkjenninger materialene er utsatt for før de

benyttes som materialer i dekkene. Dersom de benyttede bjelkene eksempelvis har ligget oppstablet før monteringen og det har skjedd glidninger mellom disse bjelkene, kan de statiske friksjonskreftene allerede være svekket.

4.8 Konkluderende punkter fra friksjonsforsøkene

- De statiske friksjonskoeffisientene ved forskyvninger på tvers av fiberretningen er generelt større enn ved forskyvninger langs med fiberretningen. Gjennom forsøkene er det samtidig funnet at variasjonen i verdiene for friksjonskoeffisientene er lavere i seriene hvor forsøkene er gjennomført på tvers av fiberretningen.
- Den kinematiske friksjonskoeffisienten virker til å være mer uavhengig av hvilke forspenninger dekket er utsatt for. Det viser seg også at denne i mindre grad er avhengig av om forsøkene gjøres langs med eller på tvers av fiberretningen. Varigheten av oppspenningene virker derimot til å virke inn for størrelsen på denne parameteren.
- Fra sammenhengen mellom påførte oppspenningskrefter og oppnådde verdier for friksjonsparameteren, virker det som om disse kan være omvendt proporsjonale. Det betyr at når oppspenningene reduseres, øker friksjonskoeffisienten mellom bjelkene i dekket. Denne sammenhengen var tydeligst for seriene med utglidninger på tvers av fiberretningen. En lignende sammenheng er derimot ikke funnet i tidligere gjennomførte undersøkelser. Videre undersøkelser vil derfor være nødvendig for at denne sammenhengen skal kunne være gjeldende.
- Det å spenne opp prøvestykkene og så lagre disse med de påførte spenningene ei uke før friksjonen i dem er testet, virker til å ha hatt en positiv effekt på de oppnådde friksjonskoeffisientene. Både den statiske og den kinematiske friksjonskoeffisienten har blitt større i seriene hvor prøvene er lagret oppspente ei uke sammenlignet med seriene uten denne langvarige oppspenningen.
- Forsøkene utført på klosser med større glideflater viste at disse fikk en lavere friksjonskoeffisient enn klossene med de mindre overflatene, når oppspenningskreftene i de to seriene var like store. Til tross for at friksjonskoeffisienten ikke skal avhenge av spenningene, og dermed arealet av

glideflatene i prøvestykkene, tyder resultatene fra seriene med større glideflater på at disse likevel kan ha en innvirkning.

- I de høyere klossene, hvor glidningene skjedde på tvers av fiberretningen, viste plottene at det gikk lenger tid før den maksimale statiske friksjonen ble nådd. Grunnen til denne langsommere lastpåføringen skyldes trolig at det i de høyere prøvene er flere trefiber enn i de små prøvene som kan presses sammen før den statiske friksjonen slutter å virke på grunn av for store utglidningskrefter.
- Når trelamellene først har vært utsatte for glidninger, vil friksjonskoeffisienten mellom disse flatene aldri kunne bli like stor igjen. Etter glidninger mellom flatene har begynt å oppstå, viser resultatene fra testene hvor lasten er påført en andre gang at det antageligvis aldri vil være mulig å få en større friksjonskoeffisient enn den kinematiske.

5 Avslutningsvis

Gjennom arbeidet med masteroppgaven er det gjennomført 120 tester i laboratoriet med mål om å øke kunnskapen rundt friksjonsoppførselen i tre. Friksjonen ble testet ved at tre treklosser ble spent sammen ved hjelp av stålplater og stålstag, deretter ble den midterste av klossene forsøkt dyttet ut. Dimensjonene av klossene var enten 166 x 166 x 90 mm eller 400 x 166 x 90 mm. Både oppspenningenes størrelser og varighet ble variert, samt at det ble forsøkt å dytte ut klossene både langs med og på tvers av fiberretningen. I tillegg har det blitt gjort enkelte forsøk hvor prøvestykkene er spent opp og testet en andre gang.

Både oppspenningskreftene og utskyvningskreftene ble registrert underveis i testingen. Disse kreftene ble deretter benyttet til å beregne friksjonskoeffisientene fra de ulike testene. Friksjonskoeffisientene har til slutt blitt sammenlignet, både mot hverandre og mot resultatene fra de tidligere gjennomførte undersøkelsene.

Fra undersøkelsene kom det fram at prøvene med ei ukes oppspenning fikk større friksjonskoeffisienter enn prøvene som ble testet umiddelbart etter at oppspenningene var påført. Økningen i verdiene gjelder både for den statiske og den kinematiske friksjonskoeffisienten, og er gjeldene for utglidninger både langs med og på tvers av fiberretningen. Dette betyr at kapasiteten til dekkene trolig vil være større om dekkene får ligge oppspente og uten påkjenninger i minst ei uke før de begynner å brukes.

Videre viste undersøkelsene at når de påførte oppspenningskreftene ble økt, redusertes størrelsen på den statiske friksjonskoeffisienten for seriene med utglidninger på tvers av fiberretningen. Sammenhengen var ikke like tydelig for seriene med utglidninger langs med fiberretningen, men antydninger til denne tendensen kunne observeres også for disse seriene. Ved tidligere undersøkelser på friksjonen i tverrspente dekker er det ikke funnet like tydelige sammenhenger mellom størrelsen på oppspenningen og verdien til friksjonskoeffisienten. Skulle denne sammenhengen likevel vise seg å stemme betyr dette at reduksjonen i hvor store laster som kan påføres dekket, vil være mindre enn reduksjonen i

oppspenningene, som eksempelvis kan komme av at trevirket kryper på grunn av de konstant påførte lastene. Det må presiseres at observasjonen med økende friksjonstall ved reduserte oppspenninger kun gjelder for de statiske friksjonskoeffisientene. Verdiene som ble funnet for de kinematiske friksjonskoeffisientene tydet på at disse var mer uavhengige, både av hvilke oppspenninger som var påført prøvestykkene og av retningene for utglidningene i forhold til fiberretningen.

Observasjonene som ble gjort fra testene hvor prøvestykkene ble forsøkt satt sammen og testet på nytt, viste at den statiske friksjonskoeffisienten ikke kunne oppnås en andre gang. Resultatene viste at det i stedet var verdiene for den kinematiske friksjonskoeffisienten som ble oppnådd. Dette tyder på at så fort det har oppstått glidninger mellom bjelkene i tverrspente dekker vil den statiske friksjonsparameteren for disse bjelkesidene aldri kunne oppnås igjen. Det vil derfor bli en betydelig reduksjon av kapasiteten i dekket hvis utglidninger skulle inntreffe. En reoppstramming av dekket etter utglidningene har skjedd vil gjøre at det kan utsettes for større krefter på grunn av de økte oppspenningene, men man kan ikke regne med at friksjonsparameteren blir like stor som før bjelkene gled ut.

Et utgangspunkt for oppgaven var en mistanke om at verdiene for friksjonskoeffisientene gitt i eurokoden var for konservative. Disse verdiene varierer mellom 0,17 for glidninger i fiberretningen til 0,40 for glidninger på tvers av fiberretningen og gjelder når to høvlede overflater glir mot hverandre. Resultatene fra forsøkene viste at alle de karakteristiske verdiene som ble beregnet for den statiske friksjonen ligger over disse verdiene. Likevel er ikke marginen så stor for enkelte av seriene. Samtidig vil det på grunn av funnene med at den statiske friksjonen ikke vil kunne oppnås en andre gang, antageligvis være mer riktig å benytte de kinematiske friksjonene til dimensjonering. De kinematiske koeffisientene ble funnet til å ha en verdi på omtrent 0,30 i nesten samtlige serier.

6 Videre arbeid

En stor del av arbeidet med masteroppgaven har gått med i laboratoriet der klossene til prøvestykkene først ble tilvirket. Deretter ble de spent opp og lagret før de til slutt kunne testes. Gjennom dette arbeidet er det samlet inn mye data, både underveis i oppspenningsprosessen og når de ferdige prøvestykkene ble friksjonstestet. I denne masteroppgaven er det hovedsakelig dataene fra friksjonstesting som er behandlet videre. Likevel vil det trolig være mulig å hente ut enda flere erfaringer fra dataene som er innhentet. Registreringen av avstander mellom forankringsplatene underveis i oppspenningsprosessen kan være et eksempel på data som er registrert under laboratoriearbeidet, men som det ble for knapp tid til å gjøre nærmere undersøkelser på i denne oppgaven. Et annet eksempel på noe som kunne vært undersøkt enda mer er hvordan klossenes densiteter spiller inn på friksjonen. Dette er nevnt i et lite avsnitt i denne masteroppgaven, men kunne antageligvis vært studert enda nøyere.

Fra friksjonskoeffisientene som er funnet fra forsøkene er det beregnet karakteristiske verdier for hver av seriene. Ved beregning av disse karakteristiske verdiene ble det antatt at resultatene fra friksjonstestene følger en log-normalfordeling. Hvorvidt resultatene fra friksjonstestene faktisk følger en slik fordeling ble det ikke tid til å undersøke i denne omgangen. Fra de tidligere gjennomførte testene kom det heller ikke tydelig fram om resultatene kunne antas å følge en slik fordeling. Ved videre arbeid med friksjonskoeffisientene funnet i denne oppgaven bør det derfor gjøres nærmere undersøkelser på om resultatene faktisk følger en log-normalfordeling. Viser det seg at denne fordelingen ikke stemmer bør det beregnes nye karakteristiske verdier.

Seriene hvor lasten ble påført i flere runder viste overraskende resultater. Gjennomføring av flere forsøk hvor tverrspente dekker utsettes for sykliske laster vil derfor kunne være av interesse. Dette fordi denne lastpåføringen er mer samsvarende med hvordan lastene på brudekkene faktisk vil opptre. Siden det kun var 5 prøvestykker som ble spent opp igjen en andre gang og testet på nytt er det også lite grunnlag å trekke konklusjoner på. Flere

gjennomføringer vil derfor være nødvendig for å få et sikrere grunnlag for å dra slutninger. Det som eksempelvis kan testes ut ved senere serier er å forsøke å påføre lasten i enda flere sykler. Store lastebiler vil for eksempel ha opptil fire hjulakslinger, og testing med lastpåføring i fire runder vil derfor kunne være av interesse. I de fem prøvestykkene som ble spent opp igjen ble friksjonstestene gjennomført umiddelbart etter gjenoppspenningen. For fremtidige forsøk kan det være av interesse å forsøke å lagre de reoppspente prøvene i ytterligere ei uke før de testes på nytt.

Gjennom arbeidet med prosjektoppgaven ble det begynt å lage en modell i elementprogrammet Abaqus. Denne benyttet oppsettet fra forsøkene og skulle på sikt blant annet kunne vise spenningene i klossene undervegs i lastpåføringen. Justeringene fra prosjektoppgaven viste seg å ikke være tilstrekkelig for å få modellen til å virke, noe som førte til at arbeidet med modellen ble for omfattende i denne omgang.

Arbeidet med å få denne modellen til å stemme med de gjennomførte forsøkene ble dermed mer omfattende enn først antatt. Tiden ble derfor for knapp til å få på plass noen god modell. Grunnet dette er det ikke presentert noen ny elementmetode- modell med resultater i denne oppgaven. Det er likevel ønskelig å få på plass en slik modell. Videre arbeid på dette er derfor nødvendig.

Referanser

- [1] K. Bell, *Dimensjonering av Trekonstruksjoner*, Bergen: Vigmostad og Bjørke AS, Fagbokforlaget, 2017.
- [2] K. W. L. ALSÉN. "Norske trebruer del av industrieventyr," 29. april, 2018; <https://samferdselinfra.no/artikler/norske-trebruer-del-av-industrieventyr/407058>.
- [3] M. A. Ritter, S. R. Duwadi, and P. D. H. Lee, "National Conference on Wood Transportation Structures," *Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-94. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 494 p., vol. 94, 1996.*
- [4] Statens Vegvesen, *Trebruer, rapport nr. 422*, 2017.
- [5] A. Pousette, P. Jacobsson, M. Gustavsson *et al.*, "Stress Laminated Bridge Decks, Part II," *Nordic Timber Bridge Project. Trätekn-Swedish Institute for Wood Technology Research*, vol. 26, 2002.
- [6] Regjeringen. "Bruk av tre," 29. april, 2018; <https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/skogbruk/innsikt/bruk-av-tre/id2009518/>.
- [7] Statens Vegvesen, "Bruprosjektering. Håndbok N400," 2014.
- [8] A. K. Paulsrud, "Friksjonsmålinger på lameller i forspente dekker," Prosjektoppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim, Norge, 2017.
- [9] Treteknisk, Norsk treteknisk institutt "Utgave nr. 40: Trevirkets oppbygging og egenskaper," 6. februar 2018; <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygging-og-egenskaper.pdf>.
- [10] M. Foslie. "Gran: egenskaper," 6. februar, 2018; <https://snl.no/gran-egenskaper>.
- [11] M. Foslie. "Furu: egenskaper," 6. februar, 2018; <https://snl.no/furu-egenskaper>.
- [12] Norsk Standard, "Konstruksjonstrevirke, Fasthetsklasser," 2016.
- [13] J. V. Thune. "Betong," 19. februar, 2018; <https://snl.no/betong>.
- [14] A. Bekk, L. Hangaard, H. Ravnås *et al.*, "Friksjon tre mot tre - En eksperimentell studie av hvordan friksjon mellom lameller i tverrspente brudekker påvirker størrelsen på nødvendig spennkraft. ; Friction timber against timber - An experimental study of how friction between laminations in stress-laminated bridge decks affects the size of the required prestress," 2016.
- [15] R. Crocetti, R. Kliger, E. Serano *et al.*, *Limtreboka: Norske limtreprodusenters forening*, 2015.
- [16] T. E. E. Galåen. "Trebruas renessanse," 16. februar 2018; <https://www.moelven.com/no/Aktuelt/Mediarom/Reportasjearkiv/Trebruas-renessanse/>.
- [17] Treteknisk, Norsk Treteknisk Institutt. "Utgave nr. 8: Tre og miljø," 23. januar 2018; <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/8-Tre-og-miljo.pdf>.
- [18] Norsk Standard, "NS-EN 1995-2, Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 2: Bruer."
- [19] R. Crocetti, K. Ekholm, and R. Kliger, "Stress-laminated-timber decks: state of the art and design based on Swedish practice," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 453-461, May 01, 2016.
- [20] F. M. Massaro, "Timber Bridge Decks," in TKT4212 - Trekonstruksjoner 2, NTNU, 2017.
- [21] T. Kalbitzer, "Stress- laminated Timber Bridge Decks, Experiments regarding the Coefficient og Friction between Laminations," Diplomarbeit, Institut für Tragwerksbau, fachgebiet Holzbau, Technische universität München, 1999.
- [22] R. C. Hibbeler, and K. B. Yap, "Friction," *Statics, Mechanics for Engineers*, pp. 389 - 449, Singapore: Pearson Education South Asia Pte Ltd, 2012.
- [23] H. Ormestad. "Friksjon," 6. november, 2017; <https://snl.no/friksjon>.
- [24] P. Jerstad, B. Sletbak, A. A. Grimenes *et al.*, *Rom Stoff Tid, fysikk 1*, Oslo: J. W. Cappelens Forlag AS, 2007.
- [25] P. Jerstad, B. Sletbak, A. A. Grimenes *et al.*, *Rom Stoff Tid, Fysikk 2*, Oslo: Cappelen Damm, 2008.
- [26] J. A. Støvneng, "Forelesningsnotat, Friksjon," in TFY4106 Fysikk, NTNU, 2014.

- [27] R. C. Hibbeler, *Mechanics of materials*, Singapore: Pearson Education South Asia Pte Ltd, 2013.
- [28] F. M. Massaro, "Moisture Dependency," in TKT4212 - Trekonstruksjoner 2, NTNU, 2017.
- [29] M. A. Ritter, and S. United, *Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance*, Washington, DC: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff, 1990.
- [30] Norsk Standard, "Trekonstruksjoner. Beregning og verifisering av karakteristiske verdier," 2016.
- [31] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers *et al.*, "Chapter 6: Some Continuous Probability Distributions," *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, pp. 187 - 236, Essex, England: Pearson Education Limited, 2014.
- [32] G. Forsberg, *Friktionsprovning*, SP Träteknik, 2010.
- [33] P. A. Fjellström, *Friktionsprovning*, SP Trä, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2012.
- [34] Norsk Standard, "Trekonstruksjoner. Konstruksjonstre og limtre. Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper," 2010.
- [35] gom, *Inspection Basic, GOM Software 2017. Brukermanual for Aramis*, Tyskland, 2017.

Vedlegg

Vedlegg A – Densitet av klossene

T03

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
T03_01	166	166	90	1060,6	1094,5	1142,6	428	441	461
T03_02	166	166	90	1046,8	1170,2	1215,0	422	472	490
T03_03	166	166	90	1041,7	1237,3	1178,2	420	499	475
T03_04	166	166	90	1103,3	1265,3	1177,6	445	510	475
T03_05	166	166	90	1107,3	1081,0	1148,1	446	436	463
T03_06	166	166	90	1119,9	1105,2	1013,2	452	446	409
T03_07	166	166	90	1185,5	1145,5	1063,4	478	462	429
T03_08	166	166	90	1062,0	1133,5	1152,4	428	457	465
T03_09	166	166	90	1098,4	1177,6	1187,0	443	475	479
T03_10	166	166	90	1055,0	1106,7	1167,0	425	446	471

L03

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
L03_01	166	166	90	1145,6	1152,6	1056,7	462	465	426
L03_02	166	166	90	1141,8	1169,3	1103,9	460	471	445
L03_03	166	166	90	1205,2	1083,7	1118,1	486	437	451
L03_04	166	166	90	1214,4	1160,8	1096,6	490	468	442
L03_05	166	166	90	1154,7	1201,7	1178,7	466	485	475
L03_06	166	166	90	1144,5	1157,6	1105,7	461	467	446
L03_07	166	166	90	1163,1	1239,7	1246,9	469	500	503
L03_08	166	166	90	1062,2	1116,6	1079,6	428	450	435
L03_09	166	166	90	1141,4	1104,3	1129,7	460	445	456
L03_10	166	166	90	1090,1	1115,8	1144,2	440	450	461

T06

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
T06_01	166	166	90	1178,2	1152,8	1073,8	475	465	433
T06_02	166	166	90	1150,7	1085,1	1091,4	464	438	440
T06_03	166	166	90	1218,6	1150,0	1158,7	491	464	467
T06_04	166	166	90	1193,9	1186,7	1168,8	481	479	471
T06_05	166	166	90	1100,9	1124,0	1111,0	444	453	448
T06_06	166	166	90	1069,3	1070,5	1143,9	431	432	461
T06_07	166	166	90	1234,7	1066,7	1155,5	498	430	466
T06_08	166	166	90	1102,2	1136,3	1205,8	444	458	486
T06_09	166	166	90	1165,4	1207,2	1192,6	470	487	481
T06_10	166	166	90	1042,6	1106,0	1001,6	420	446	404

L06

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
L06_01	166	166	90	1072,9	1104,4	1164,1	433	445	469
L06_02	166	166	90	1114,4	1123,7	1148,7	449	453	463
L06_03	166	166	90	1150,8	1144,3	1088,7	464	461	439
L06_04	166	166	90	1077,1	1200,9	1126,6	434	484	454
L06_05	166	166	90	1048,3	1259,3	1078,9	423	508	435
L06_06	166	166	90	1223,8	1091,8	1070,2	493	440	432
L06_07	166	166	90	1150,3	1150,9	1142,7	464	464	461
L06_08	166	166	90	1195,4	1209,7	1037,1	482	488	418
L06_09	166	166	90	1030,9	1213,6	1109,0	416	489	447
L06_10	166	166	90	1187,5	1168,1	1156,0	479	471	466

T10

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
T10_01	166	166	90	1193,5	1149,4	1174,4	481	463	474
T10_02	166	166	90	1191,8	1234,1	1212,3	481	498	489
T10_03	166	166	90	1212,2	1155,1	1205,9	489	466	486
T10_04	166	166	90	1173,2	1117,0	1097,3	473	450	442
T10_05	166	166	90	1200,2	1166,8	1182,8	484	470	477
T10_06	166	166	90	1125,9	1174,7	1178,7	454	474	475
T10_07	166	166	90	1086,8	1229,1	1154,7	438	496	466
T10_08	166	166	90	1166,8	1201,9	1033,4	470	485	417
T10_09	166	166	90	1216,5	1125,9	1197,0	491	454	483
T10_10	166	166	90	1133,7	1105,4	1245,9	457	446	502
T10_11	166	166	90	1016,4	1163,0	1132,9	410	469	457
T10_12	166	166	90	1046,1	1058,5	1141,0	422	427	460
T10_13	166	166	90	1138,8	1072,5	1091,8	459	432	440
T10_14	166	166	90	1149,1	1128,1	1123,9	463	455	453
T10_15	166	166	90	1171,6	1068,0	1175,3	472	431	474
T10_16	166	166	90	1109,3	1129,3	1118,6	447	455	451
T10_17	166	166	90	1190,8	1169,8	1154,7	480	472	466
T10_18	166	166	90	1197,9	1131,8	1089,7	483	456	439
T10_19	166	166	90	1163,5	1133,4	1075,2	469	457	434
T10_20	166	166	90	1051,3	1124,2	1183,4	424	453	477

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
L10_01	166	166	90	1202,4	1072,1	1204,9	485	432	486
L10_02	166	166	90	1054,7	1166,7	1032,1	425	470	416
L10_03	166	166	90	1110,5	1219,5	1238,5	448	492	499
L10_04	166	166	90	1125,8	1106,1	1072,1	454	446	432
L10_05	166	166	90	1123,0	1075,9	1116,8	453	434	450
L10_06	166	166	90	1196,5	1081,6	1199,2	482	436	484
L10_07	166	166	90	1165,8	1178,3	1093,2	470	475	441
L10_08	166	166	90	1169,4	1185,4	1174,8	472	478	474
L10_09	166	166	90	1150,9	1237,1	1148,0	464	499	463
L10_10	166	166	90	1140,8	1094,2	1057,3	460	441	426
L10_11	166	166	90	1116,3	1169,7	1266,5	450	472	511
L10_12	166	166	90	1091,0	1116,8	1152,1	440	450	465
L10_13	166	166	90	1086,5	1109,9	1137,6	438	448	459
L10_14	166	166	90	1126,7	1136,5	1101,5	454	458	444
L10_15	166	166	90	1084,3	1133,5	1184,3	437	457	478
L10_16	166	166	90	1076,2	1099,3	1095,5	434	443	442
L10_17	166	166	90	1137,4	1189,1	1106,5	459	479	446
L10_18	166	166	90	1119,9	1155,9	1103,0	452	466	445
L10_19	166	166	90	1128,8	1113,7	1116,2	455	449	450
L10_20	166	166	90	1132,6	1047,2	1167,5	457	422	471

T10U

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
T10U_01	166	166	90	1186,5	1082,5	1108,5	478	436	447
T10U_02	166	166	90	1173,2	1076,6	1112,8	473	434	449
T10U_03	166	166	90	1049,9	1147,3	1245,4	423	463	502
T10U_04	166	166	90	1049,3	1091,5	1166,1	423	440	470
T10U_05	166	166	90	1062,0	1195,9	1196,4	428	482	482
T10U_06	166	166	90	1105,9	1067,2	1198,8	446	430	483
T10U_07	166	166	90	1191,8	1144,9	1123,5	481	462	453
T10U_08	166	166	90	1239,7	1030,9	1207,7	500	416	487
T10U_09	166	166	90	1165,5	1114,5	1069,2	470	449	431
T10U_10	166	166	90	1137,3	1108,4	1162,9	459	447	469

L10U

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
L10U_01	166	166	90	1153,8	1162,1	1208,6	465	469	487
L10U_02	166	166	90	1120,9	1087,8	1121,3	452	439	452
L10U_03	166	166	90	1146,6	1159,8	1144,4	462	468	461
L10U_04	166	166	90	1096,6	1001,6	1222,4	442	404	493
L10U_05	166	166	90	1122,6	1134,7	1133,0	453	458	457
L10U_06	166	166	90	1158,1	1183,3	1210,8	467	477	488
L10U_07	166	166	90	1169,5	1122,2	1162,4	472	452	469
L10U_08	166	166	90	1205,6	1164,9	1158,9	486	470	467
L10U_09	166	166	90	1099,2	1121,0	1093,2	443	452	441
L10U_10	166	166	90	1066,0	1192,2	1182,8	430	481	477

T06H

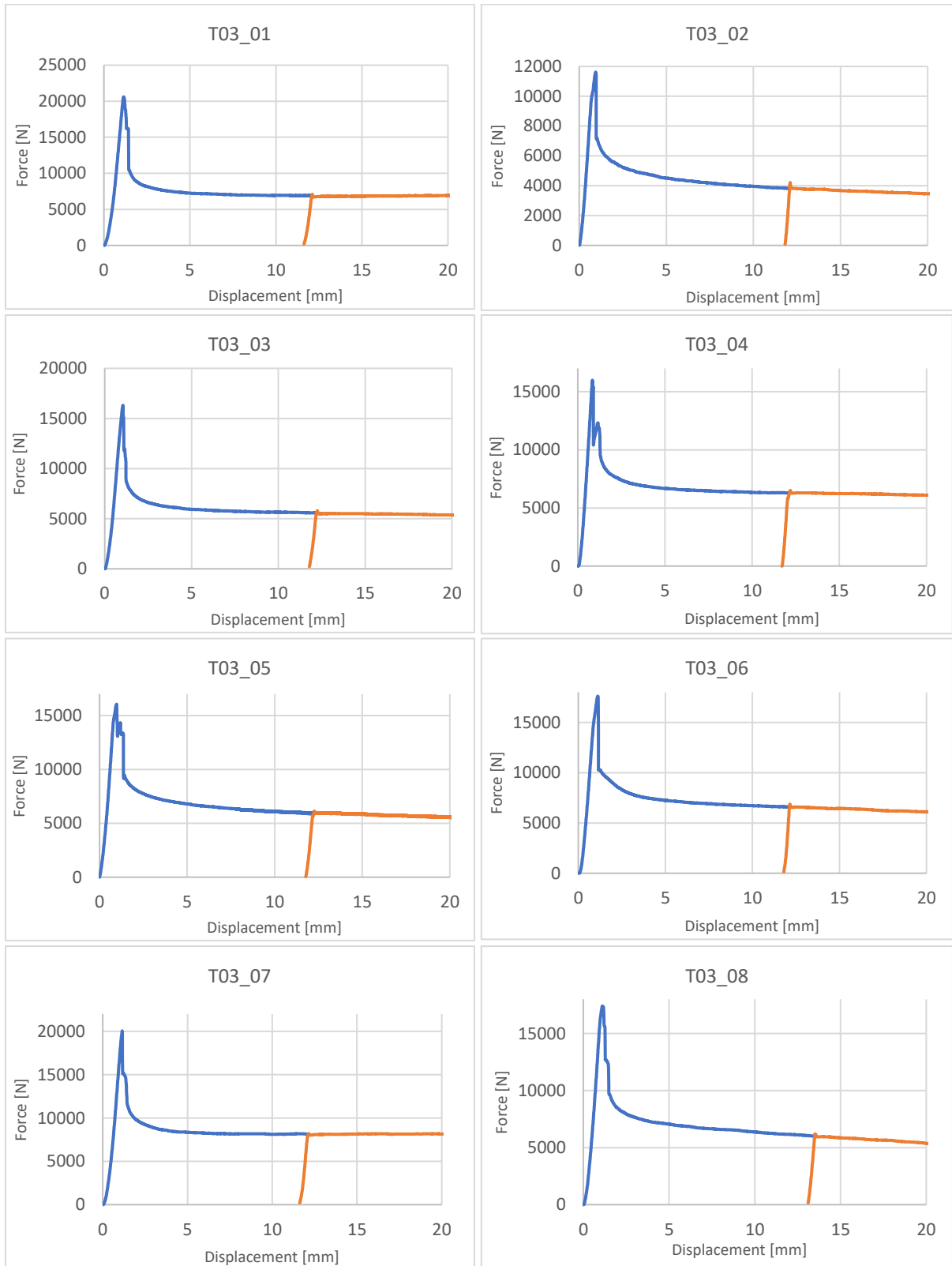
Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
T06H_01	166	400	90	2816,0	2831,0	2897,7	471	474	485
T06H_02	166	400	90	2890,7	2841,6	2864,8	484	476	479
T06H_03	166	400	90	2843,8	2887,0	2879,0	476	483	482
T06H_04	166	400	90	2845,9	2814,3	2947,1	476	471	493
T06H_05	166	400	90	2850,0	2804,9	2930,6	477	469	490
T06H_06	166	400	90	2940,9	2804,0	2873,4	492	469	481
T06H_07	166	400	90	2921,2	2902,8	2811,1	489	486	470
T06H_08	166	400	90	2897,8	2874,3	2799,0	485	481	468
T06H_09	166	400	90	2931,9	2931,6	2875,8	491	491	481
T06H_10	166	400	90	2845,8	2996,4	2809,0	476	501	470

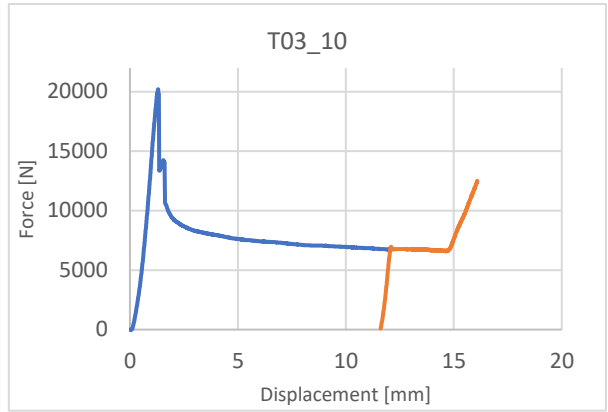
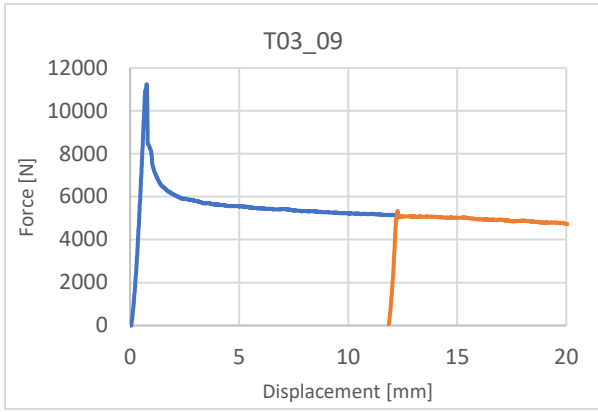
L06B

Forsøk	Dimensjoner på klossene [mm]			Vekt [g]			Densitet [kg/m ³]		
	Bredde	Høyde	Tykkelse	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3	Kloss 1	Kloss 2	Kloss 3
L06B_01	400	166	90	2842,7	2910,2	2825,8	476	487	473
L06B_02	400	166	90	2828,0	2916,4	2806,4	473	488	470
L06B_03	400	166	90	2892,7	2813,5	2829,6	484	471	473
L06B_04	400	166	90	2816,1	2855,6	2852,6	471	478	477
L06B_05	400	166	90	2792,6	2930,7	2770,8	467	490	464
L06B_06	400	166	90	2833,6	2944,2	2844,3	474	493	476
L06B_07	400	166	90	2904,9	2802,9	2916,2	486	469	488
L06B_08	400	166	90	2819,0	2916,0	2897,1	472	488	485
L06B_09	400	166	90	2901,5	2779,7	2805,3	486	465	469
L06B_10	400	166	90	2903,3	2809,9	2825,3	486	470	473

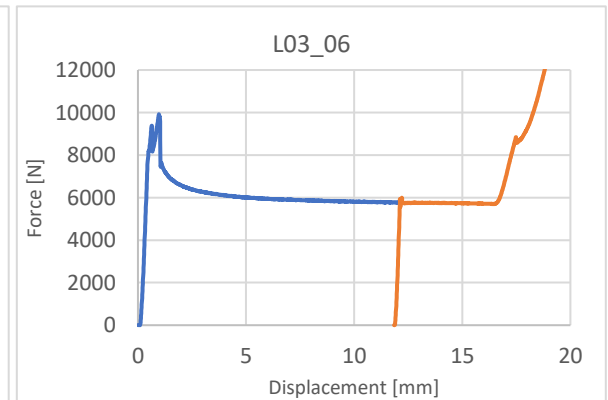
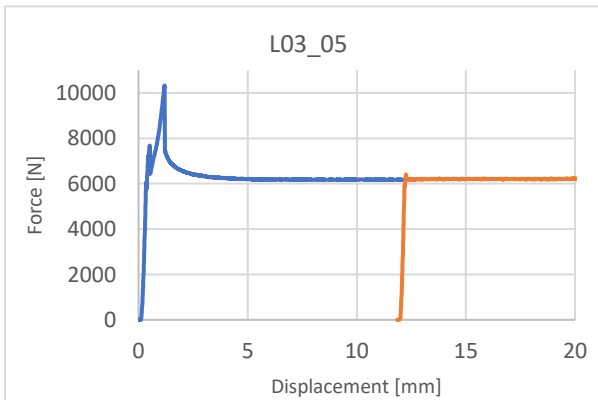
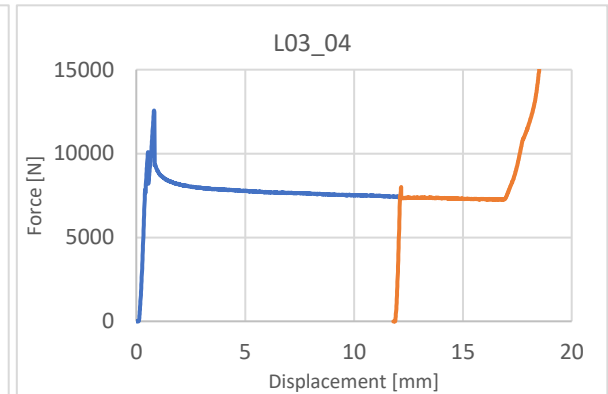
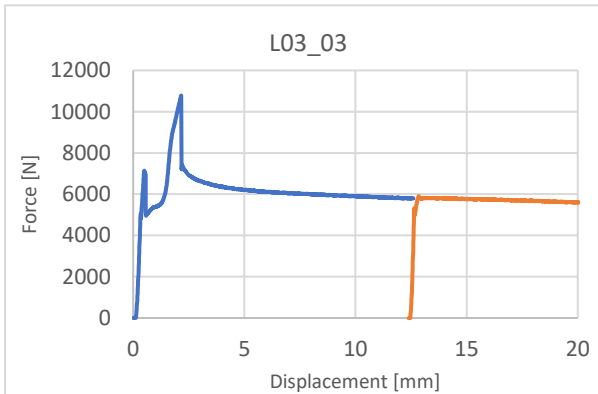
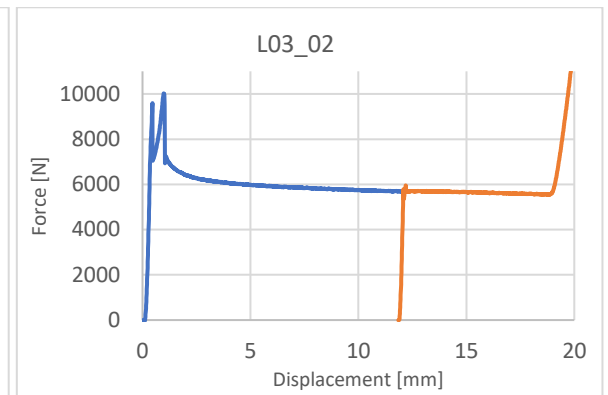
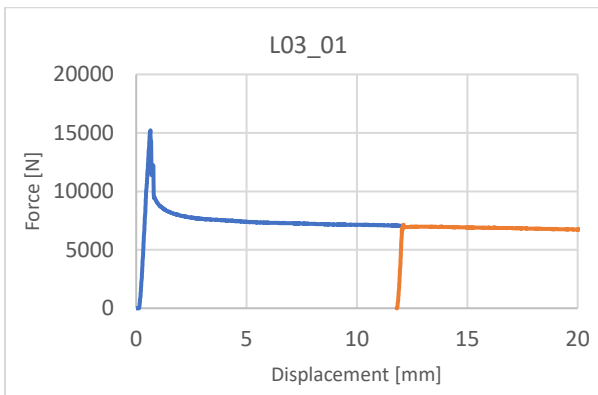
Vedlegg B – Last-forskyvningskurver for utglidningen av midtklossen

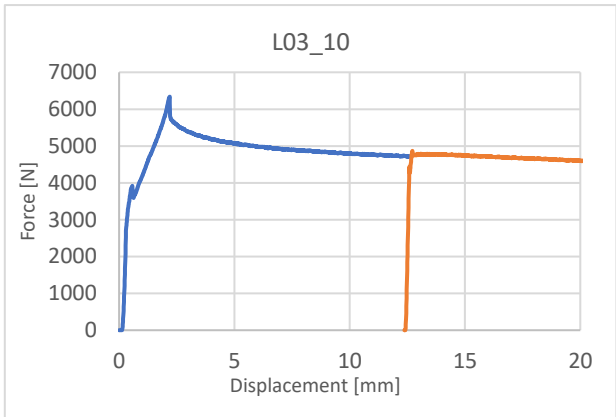
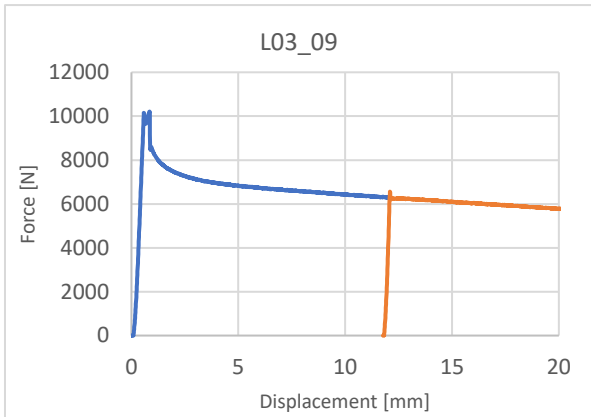
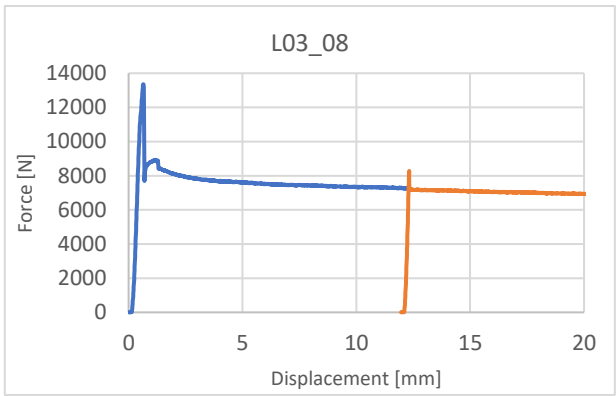
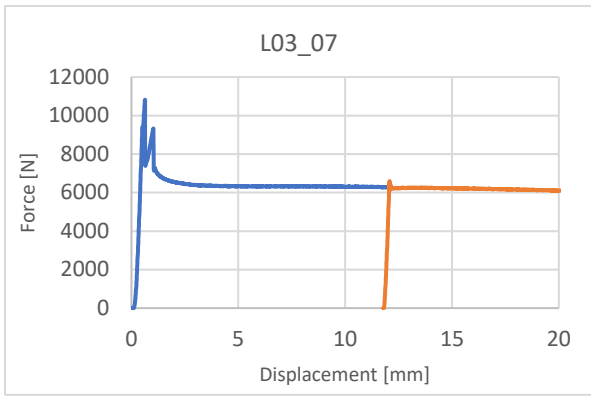
T03



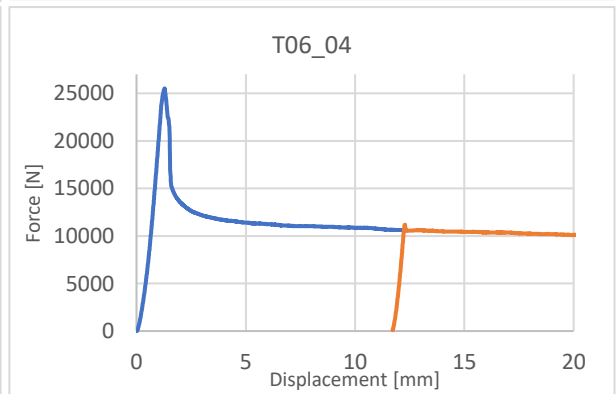
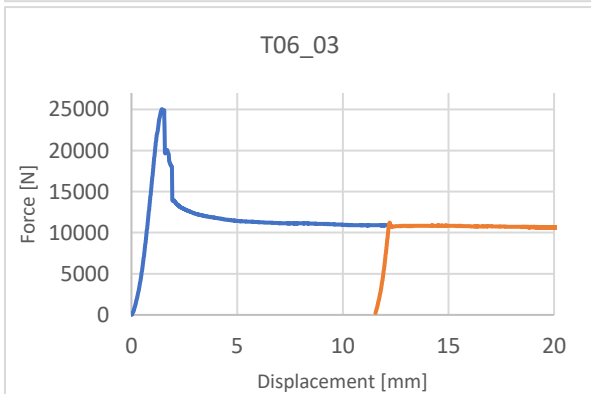
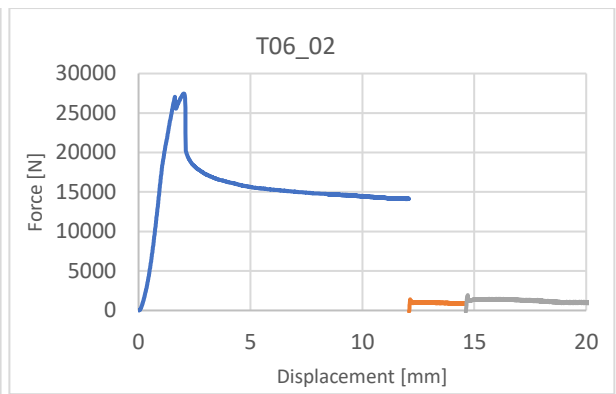
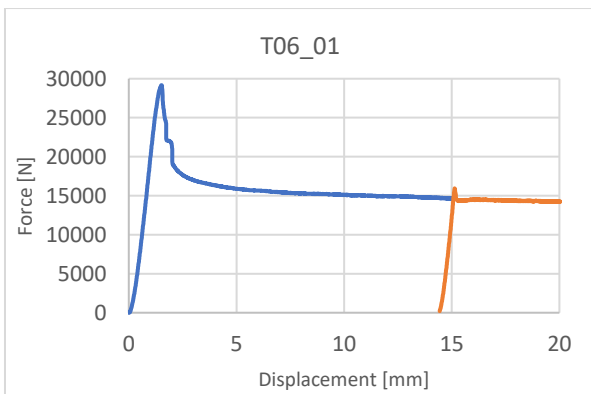


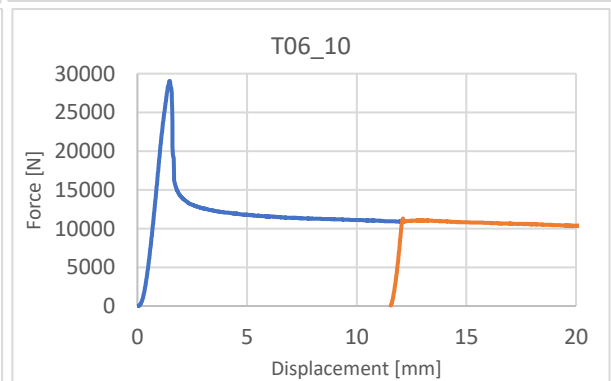
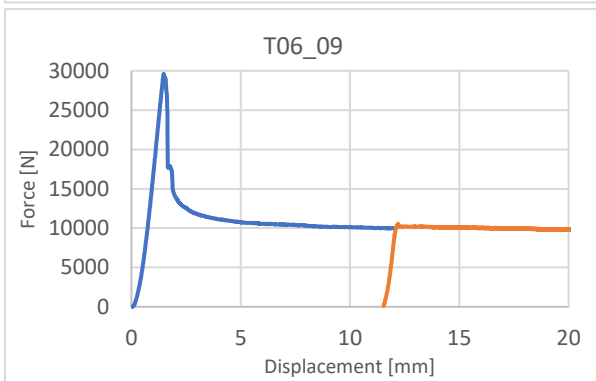
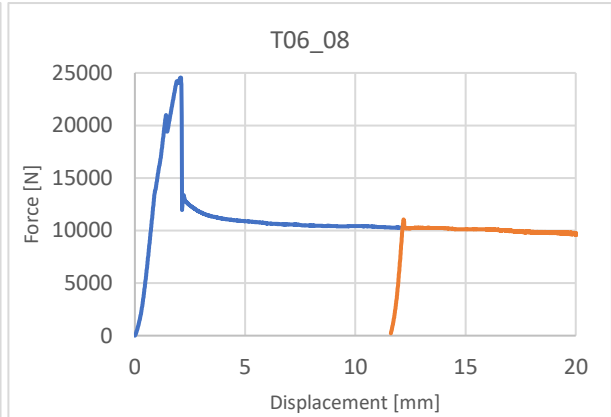
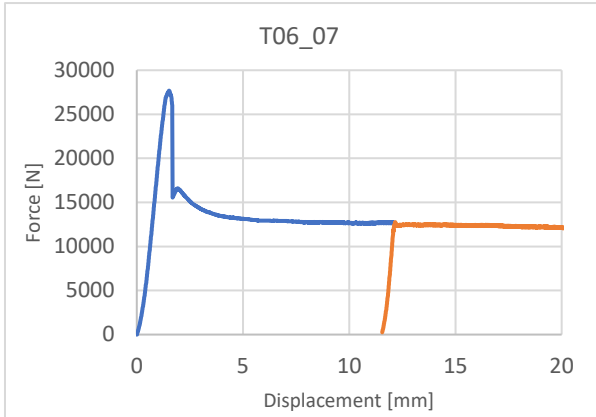
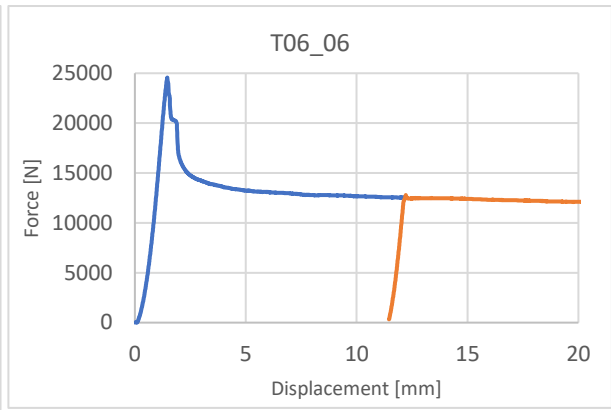
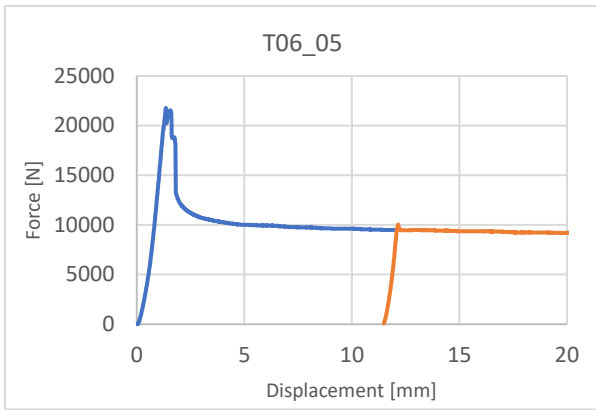
L03



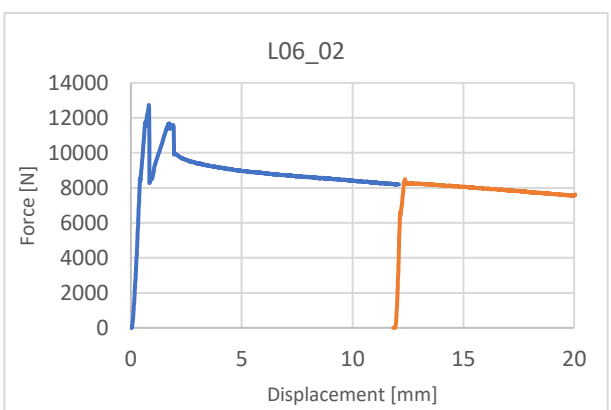
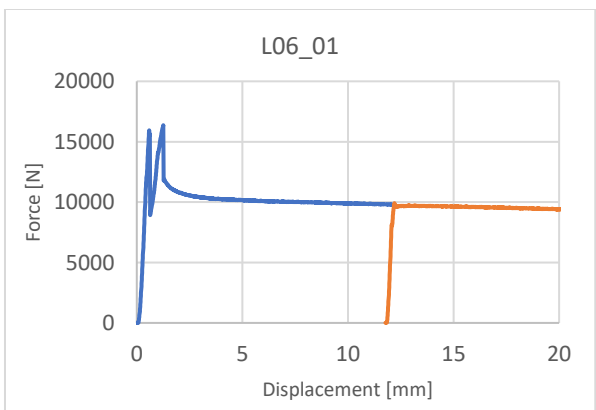


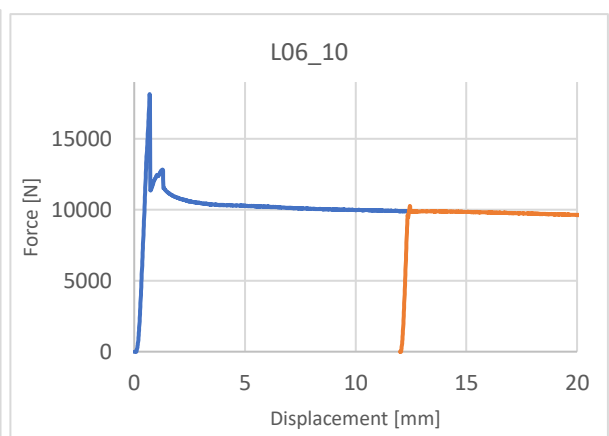
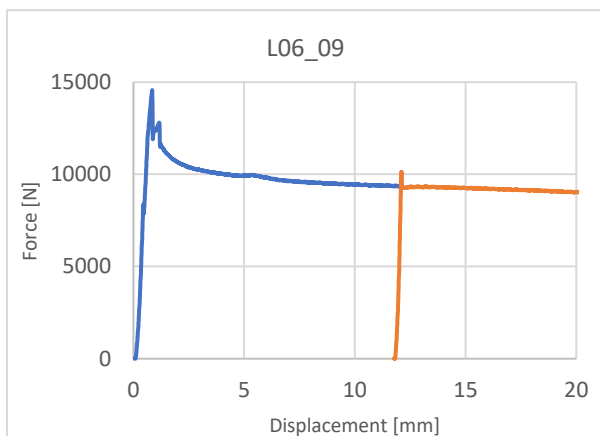
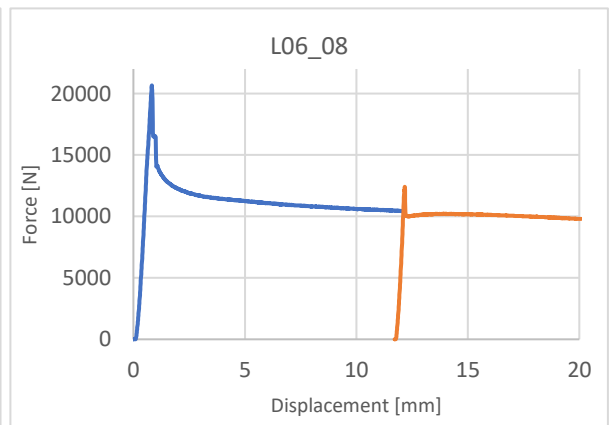
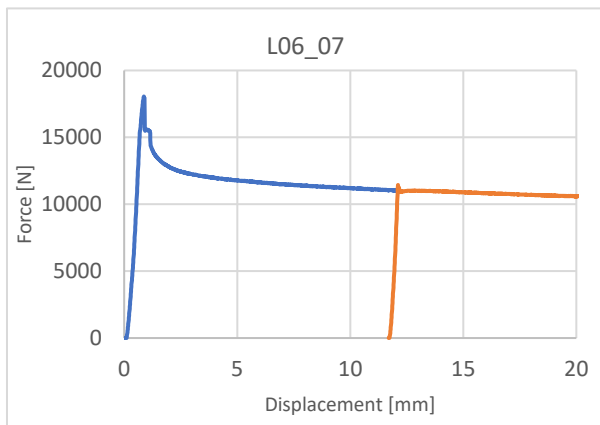
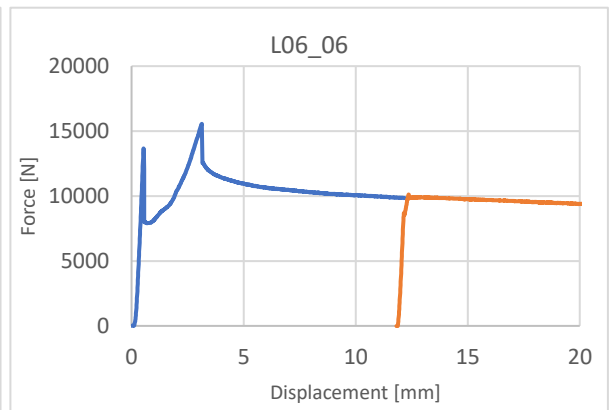
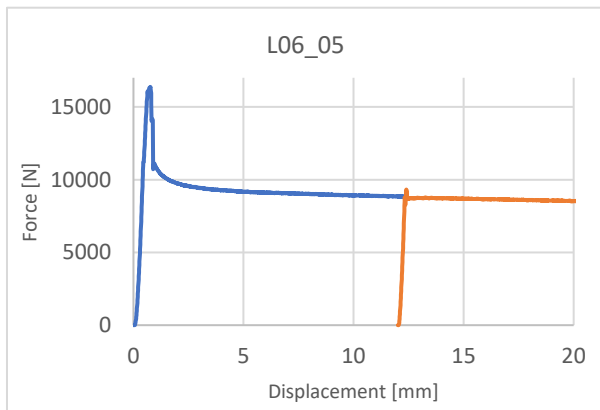
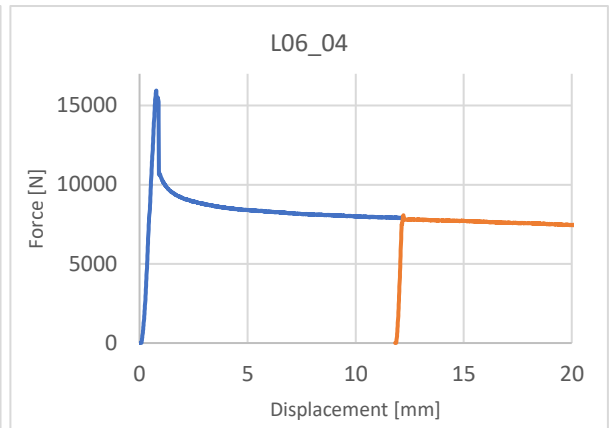
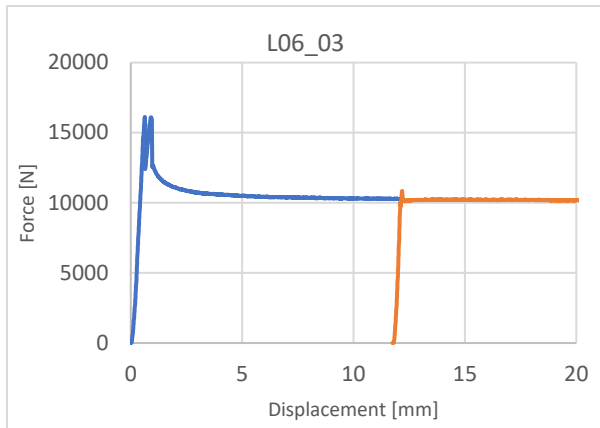
T06



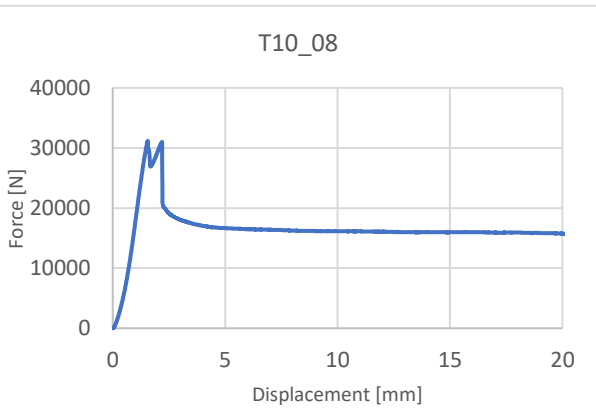
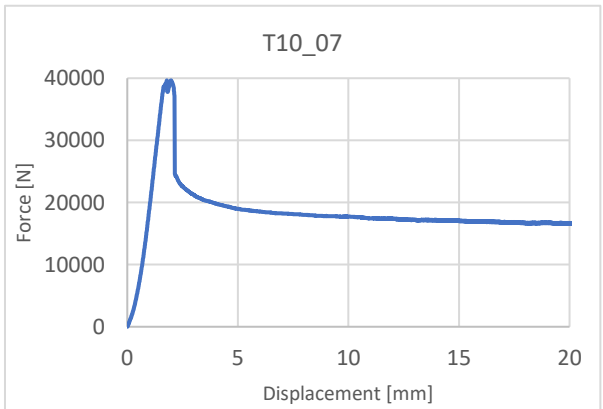
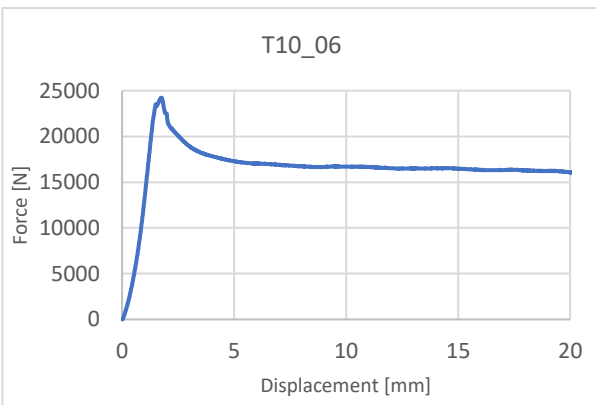
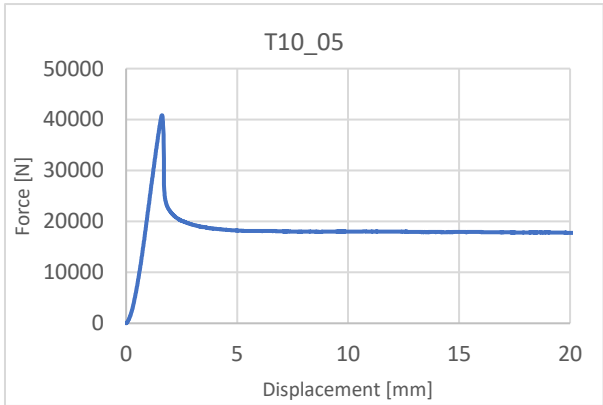
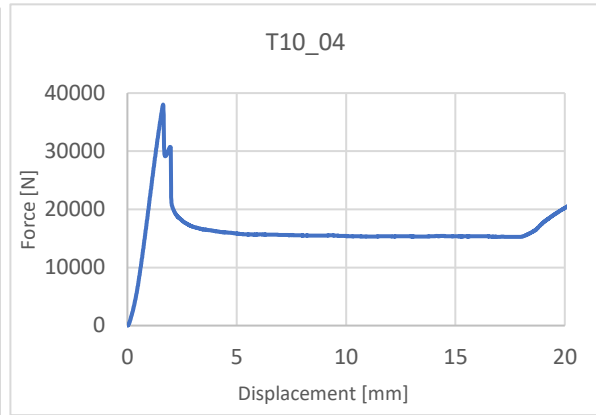
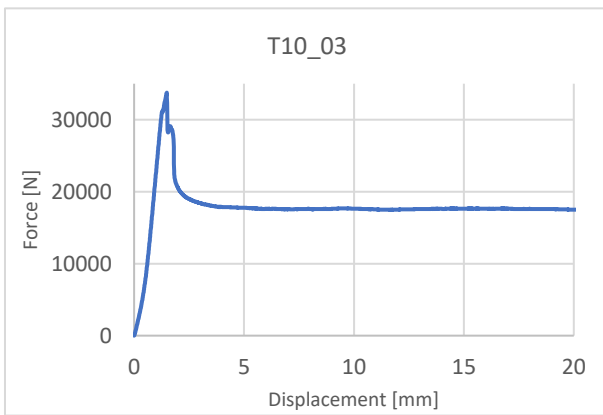
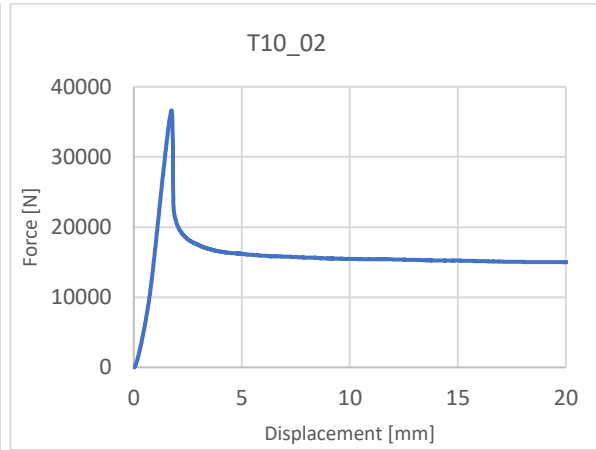
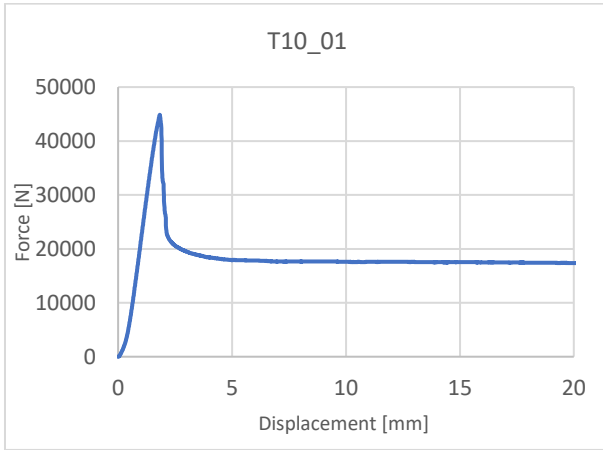


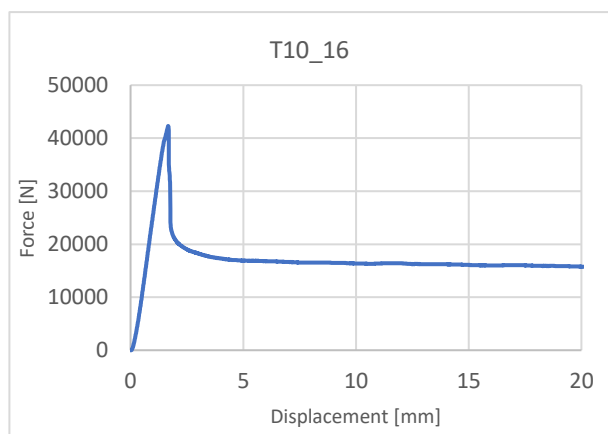
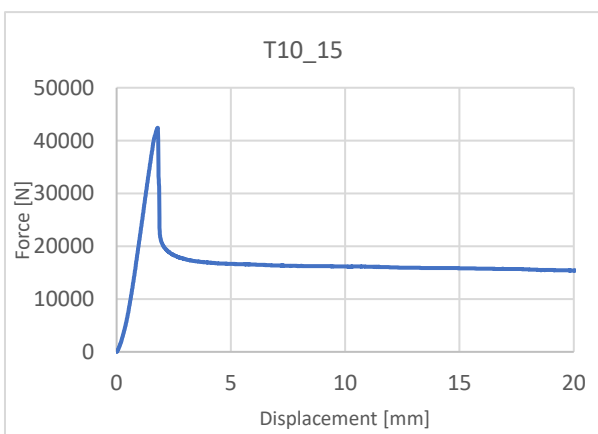
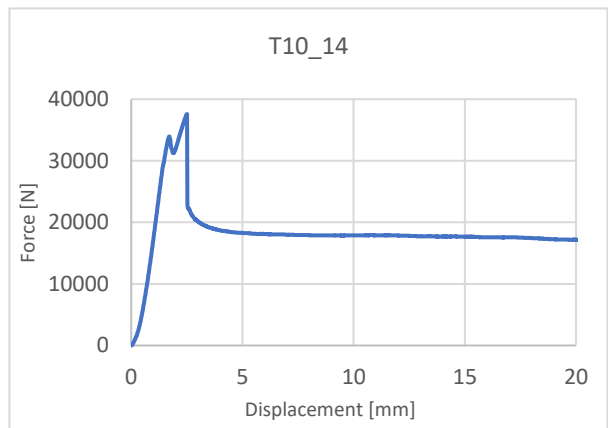
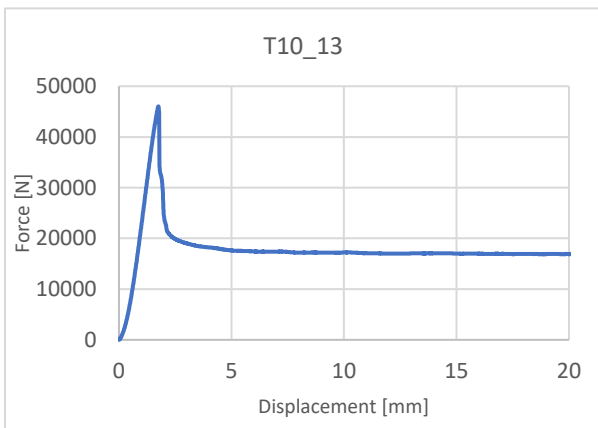
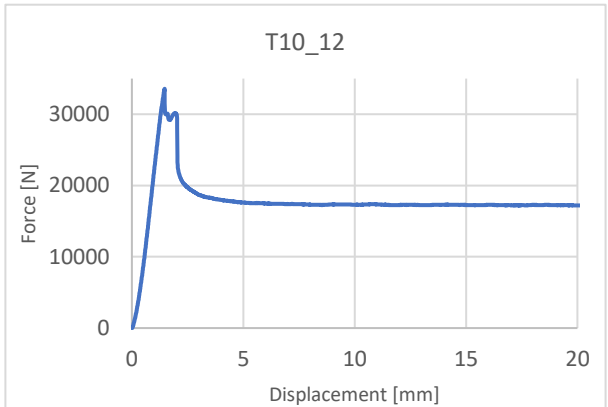
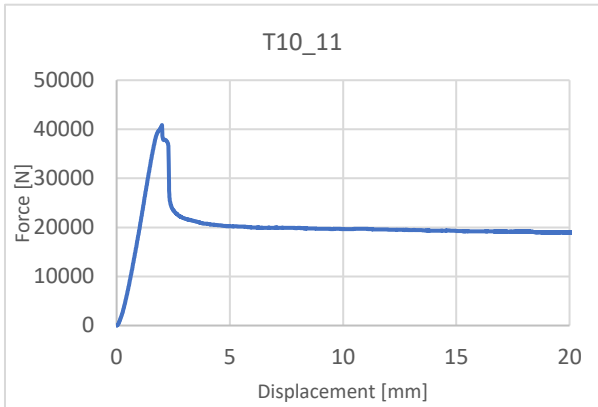
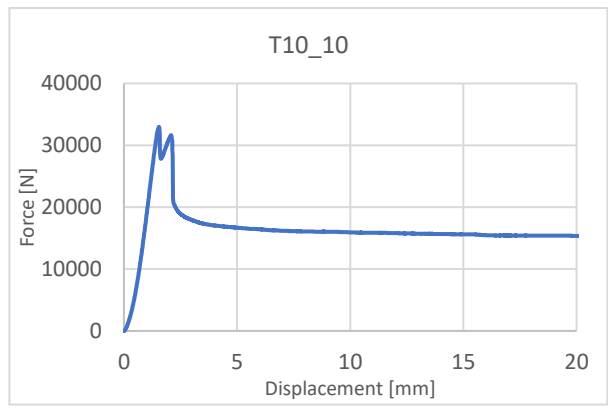
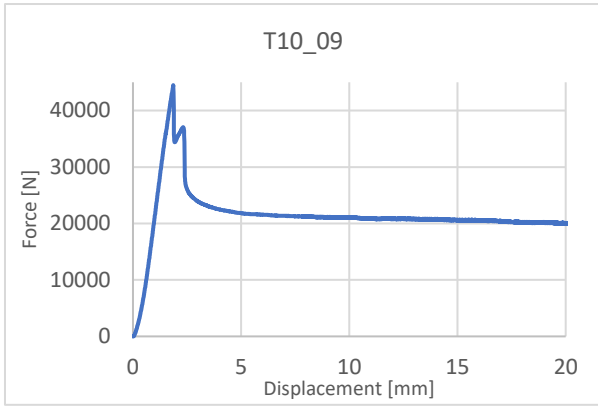
L06

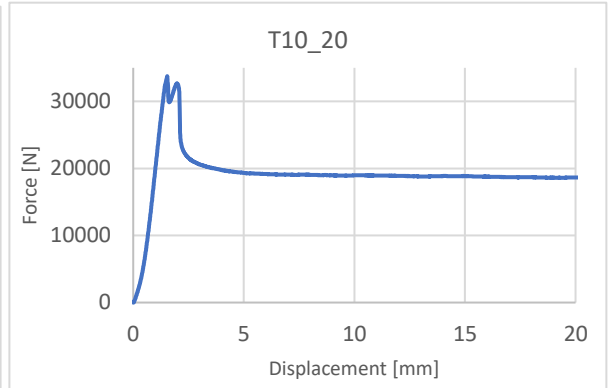
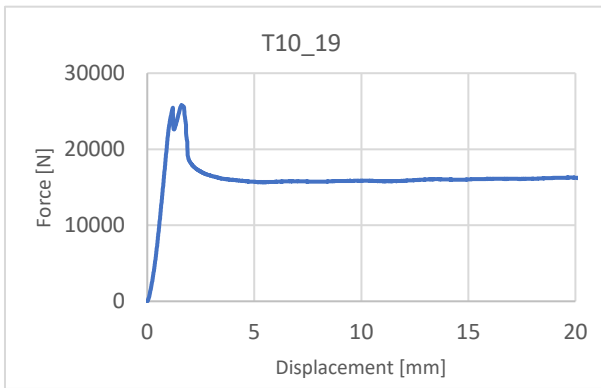
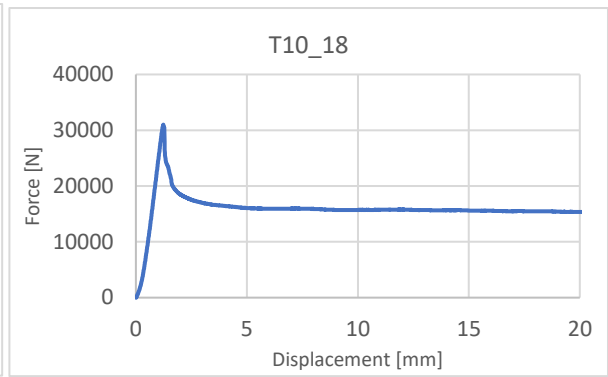
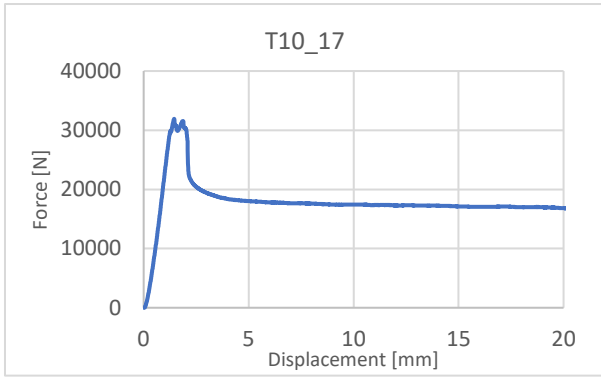




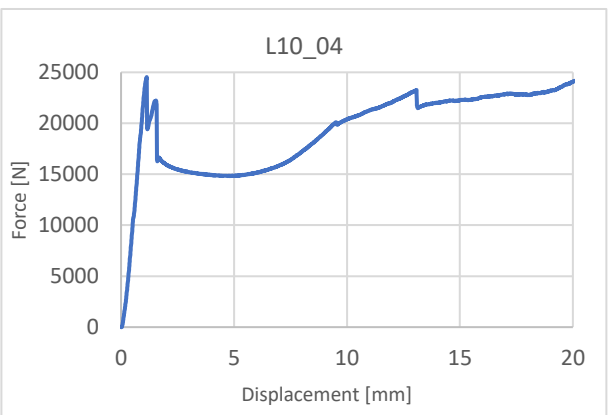
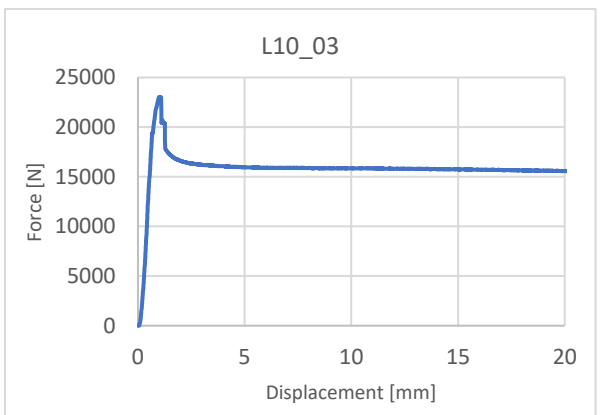
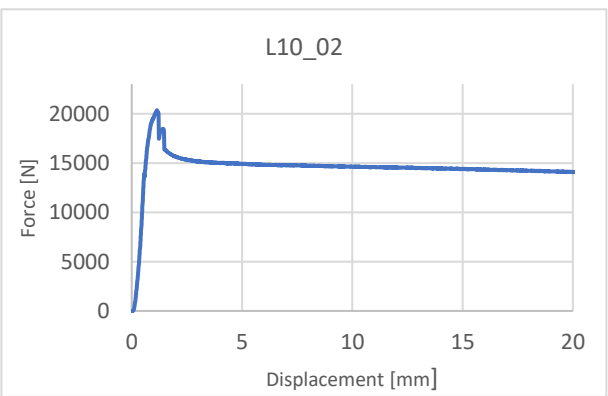
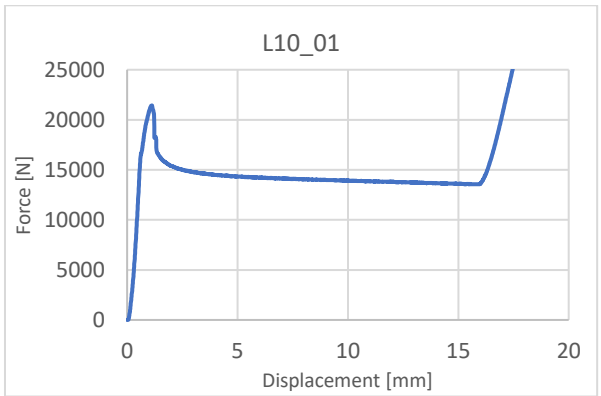
T10

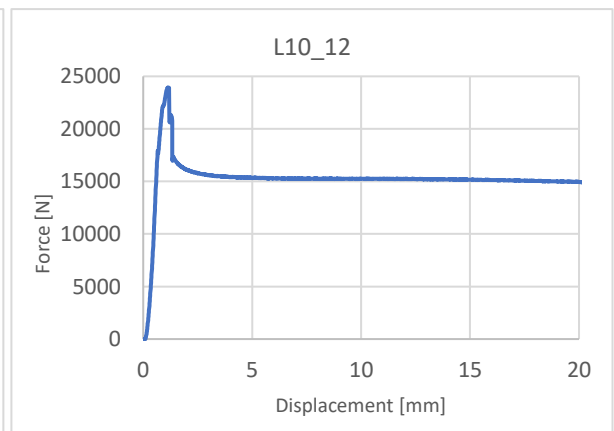
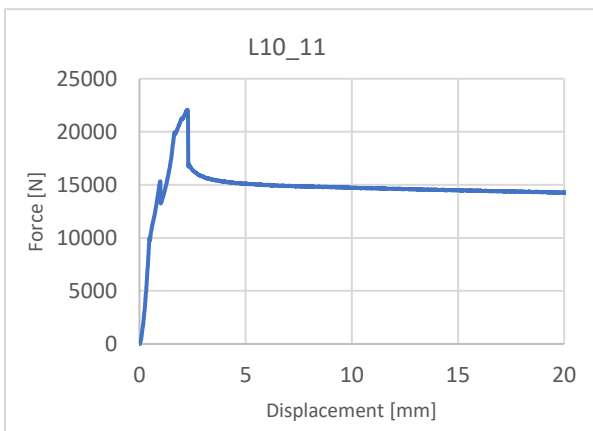
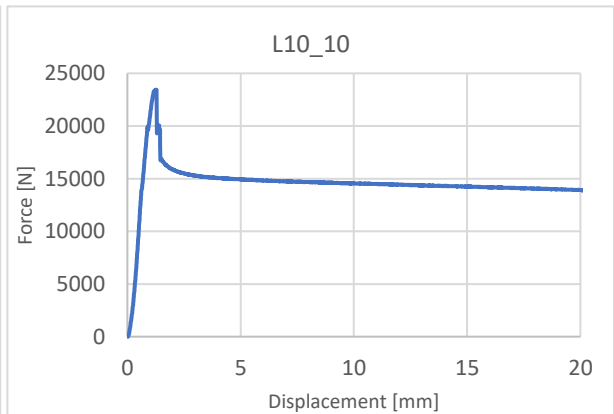
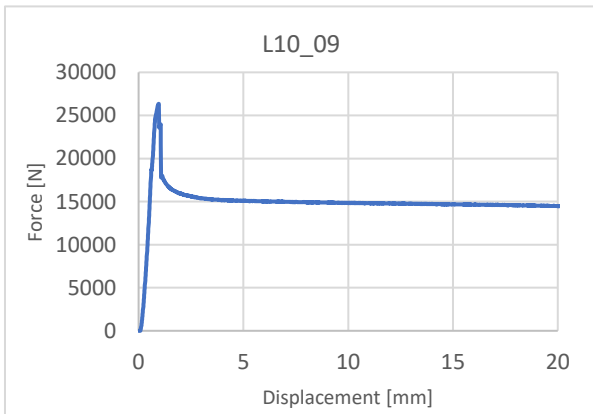
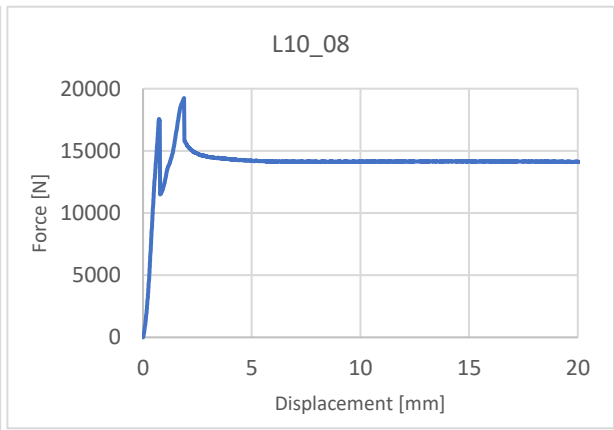
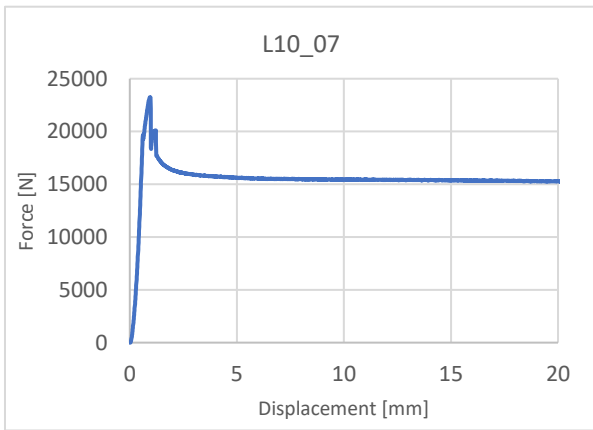
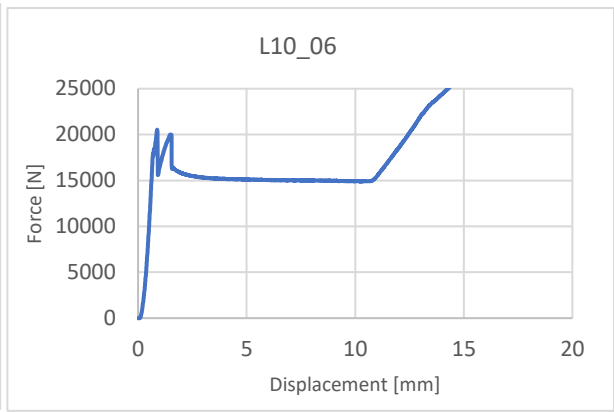
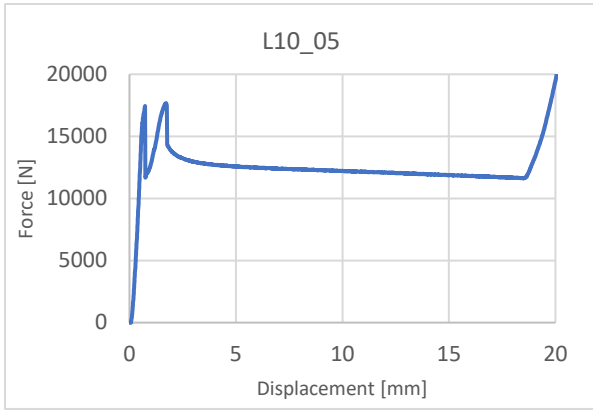


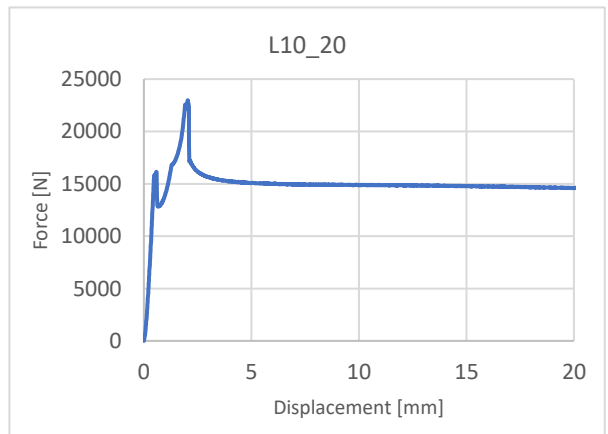
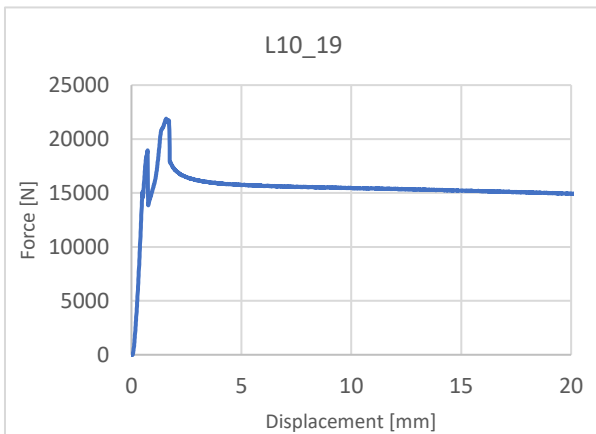
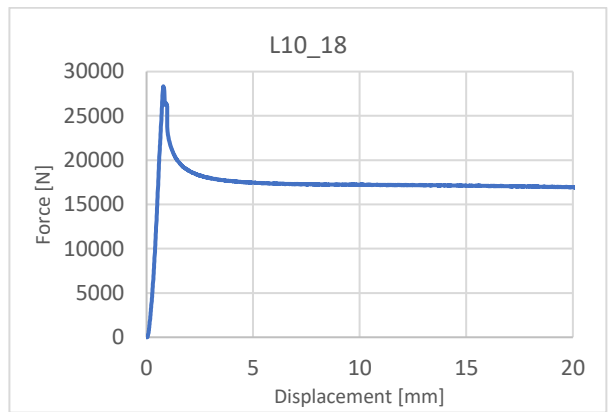
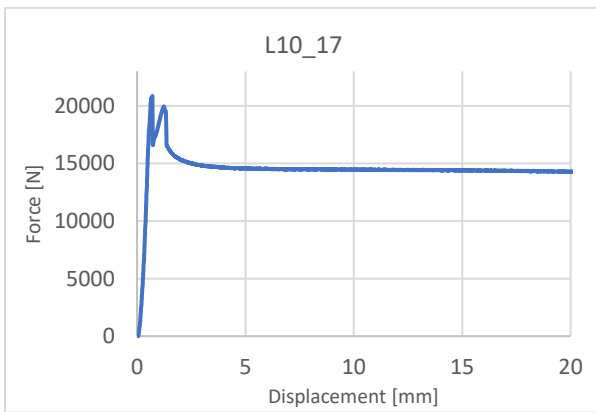
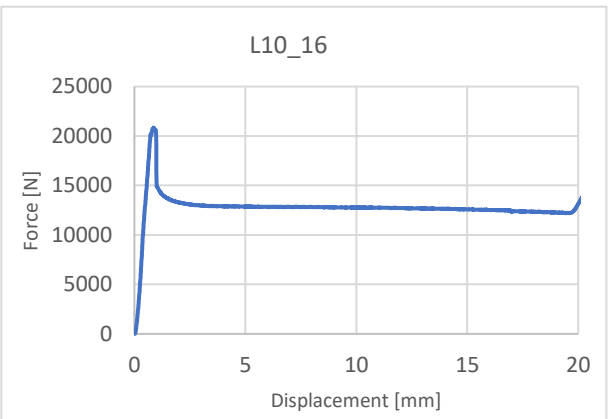
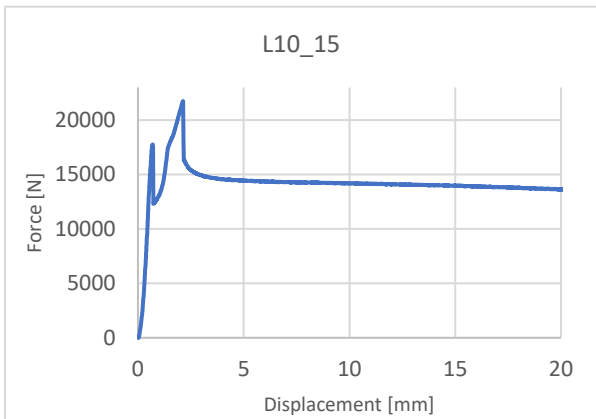
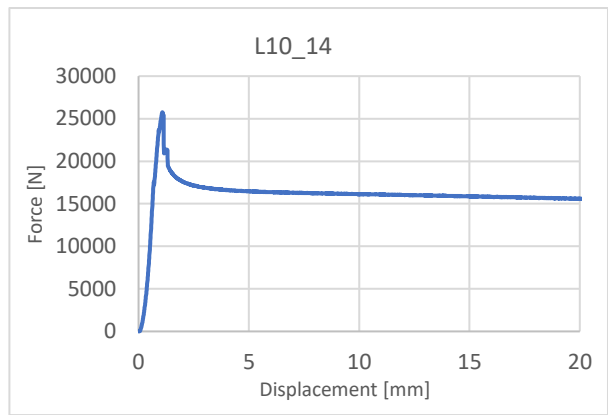
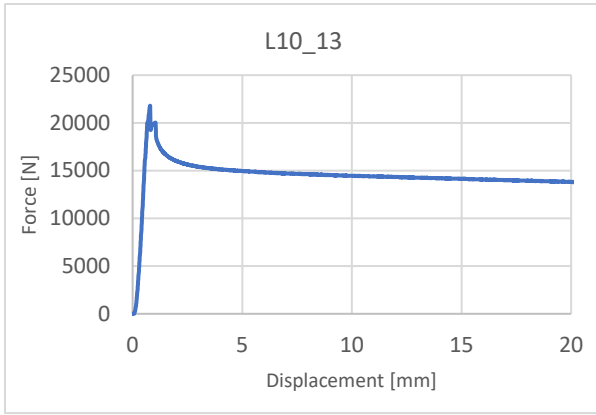




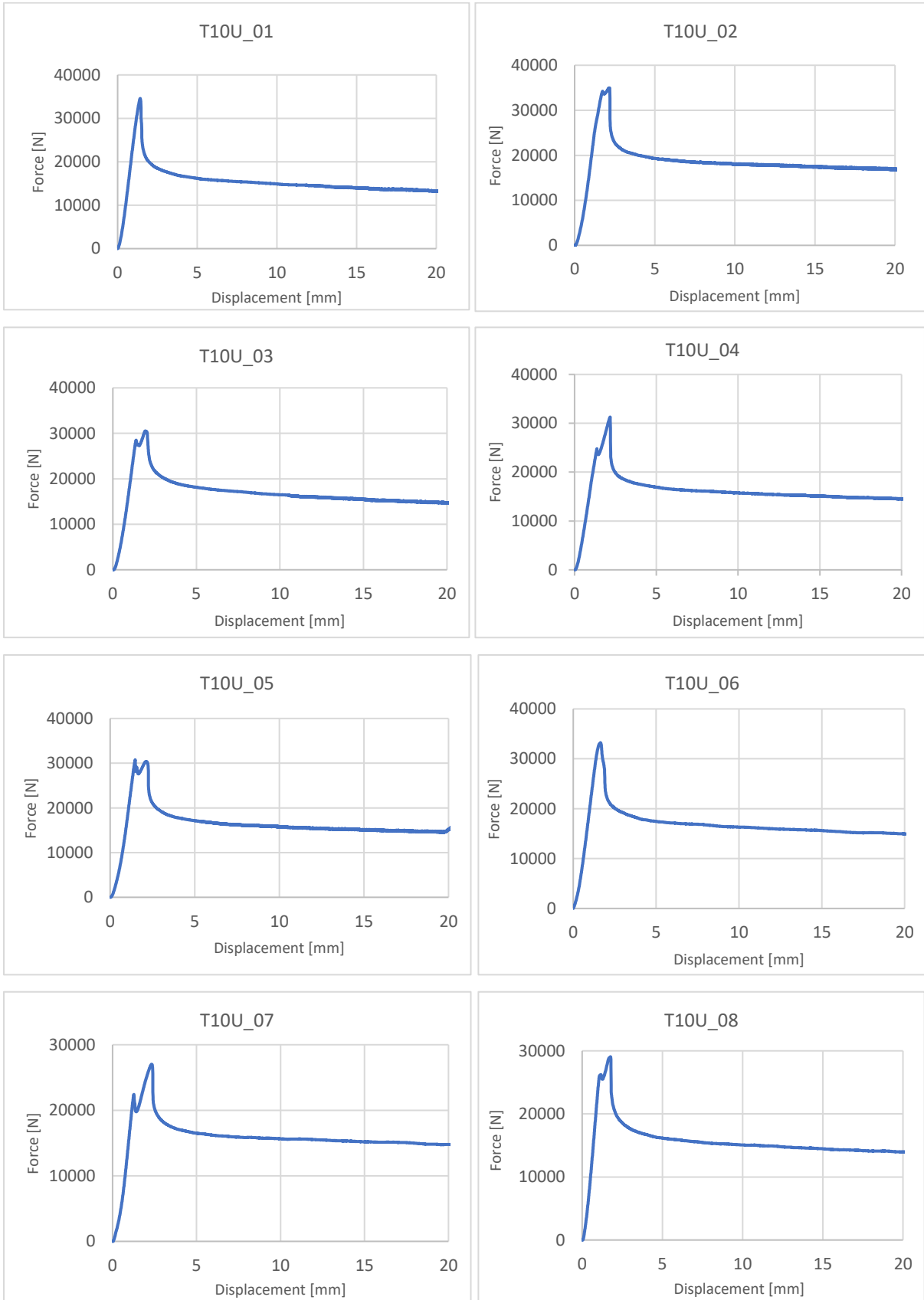
L10

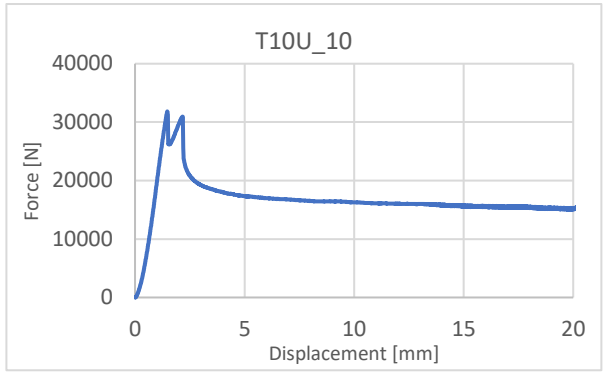
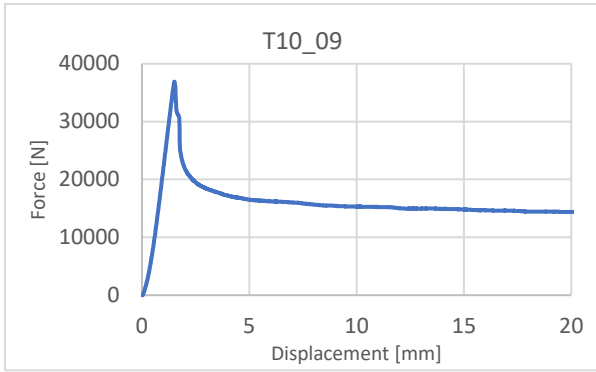




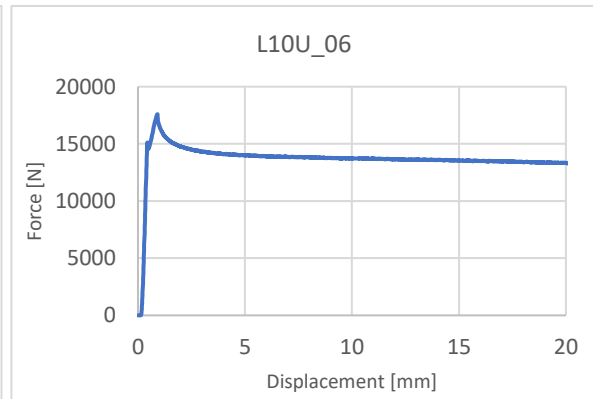
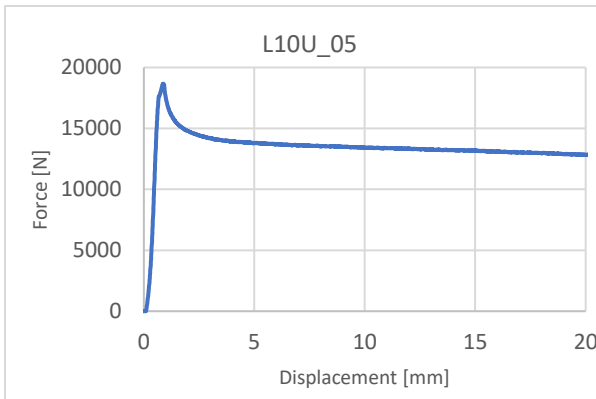
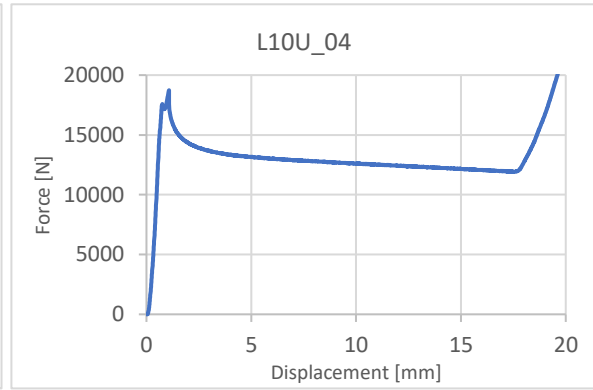
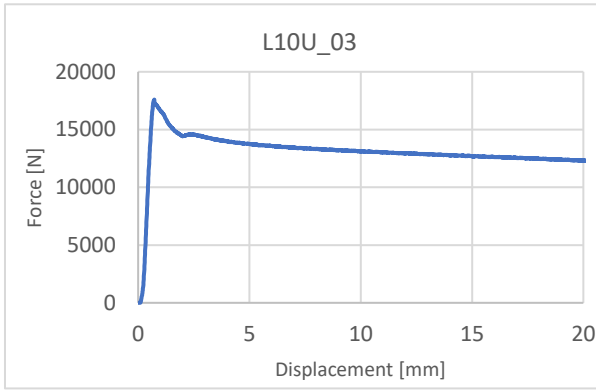
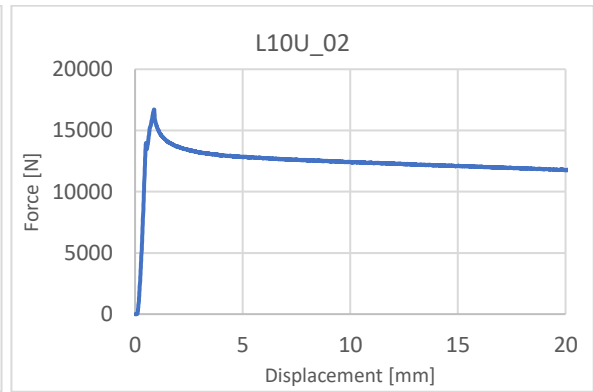
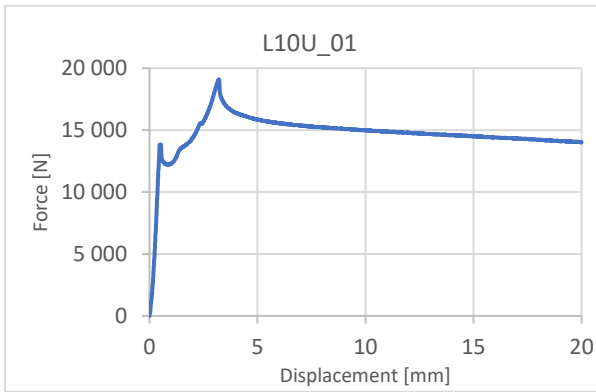


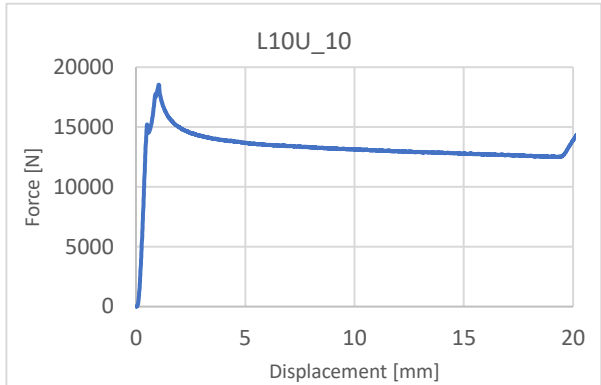
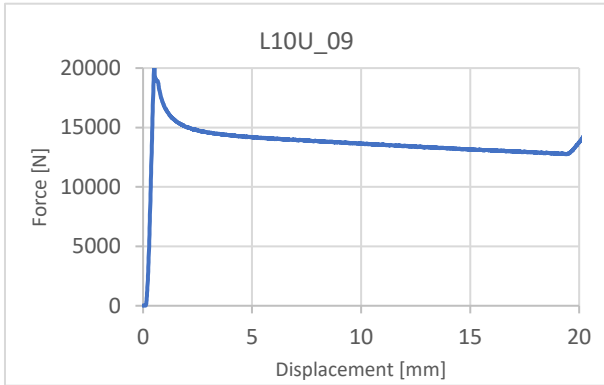
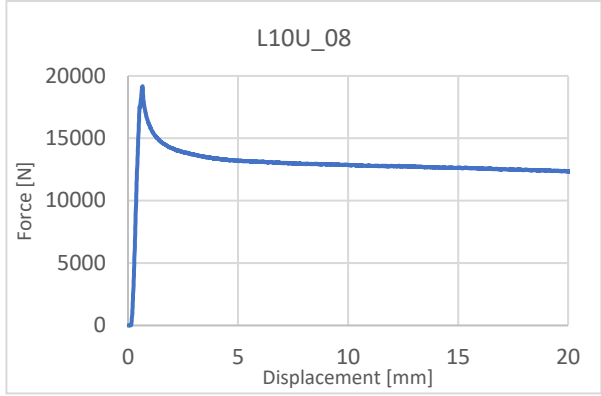
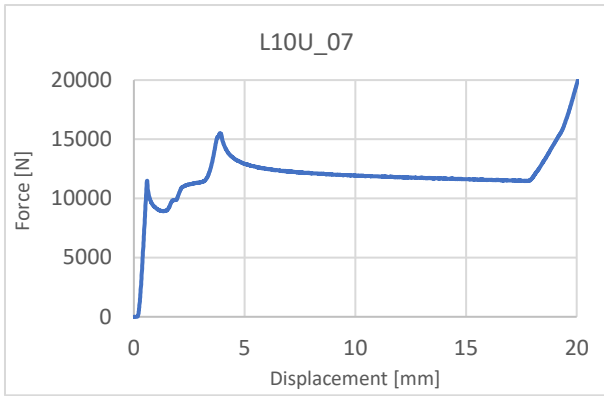
T10U



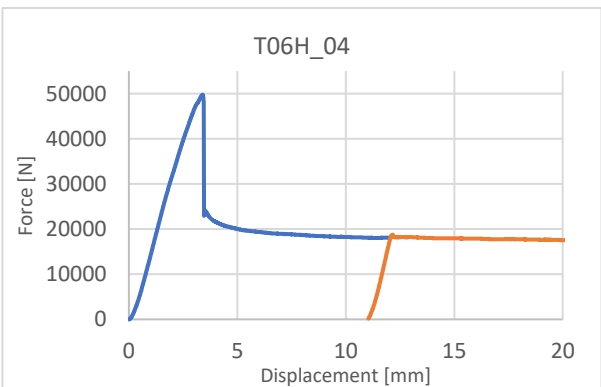
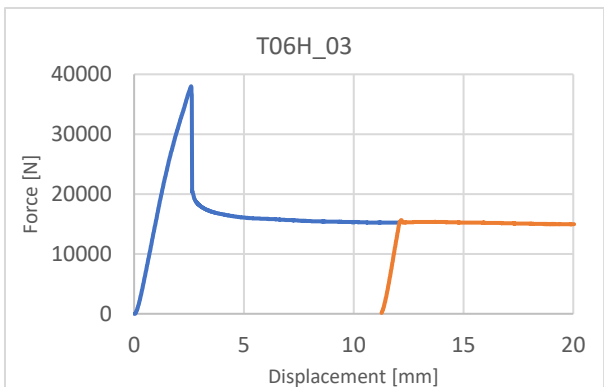
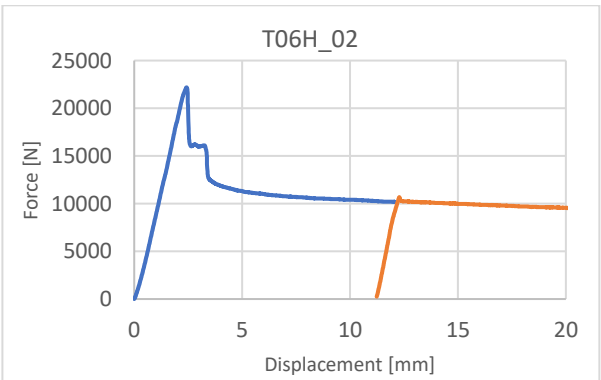
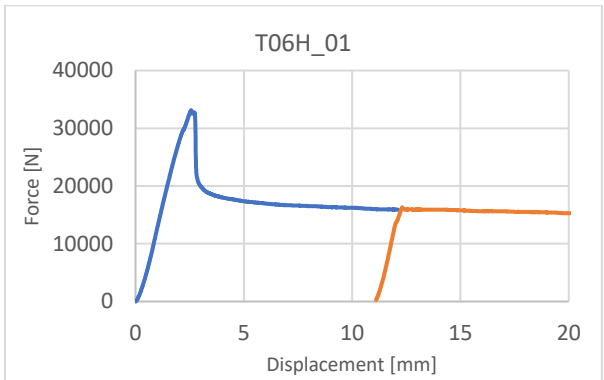


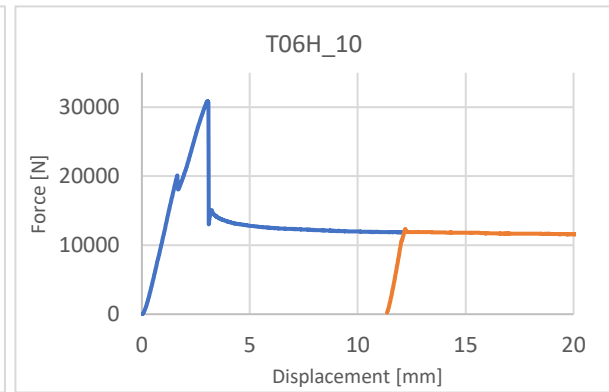
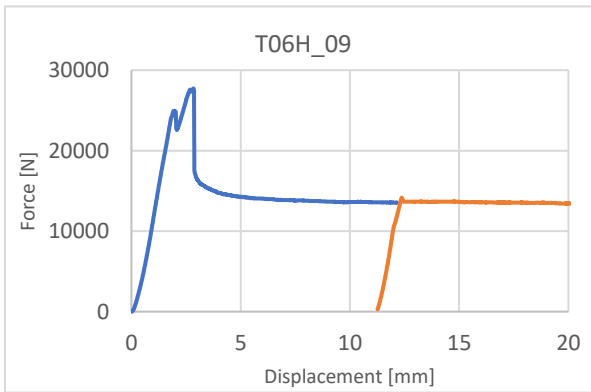
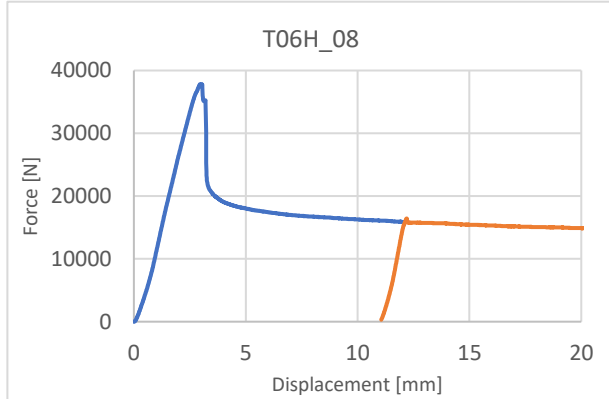
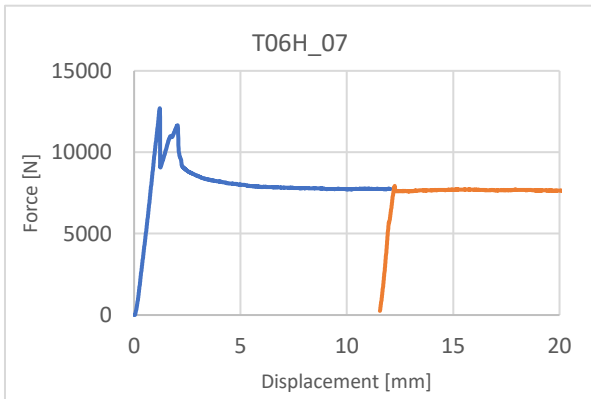
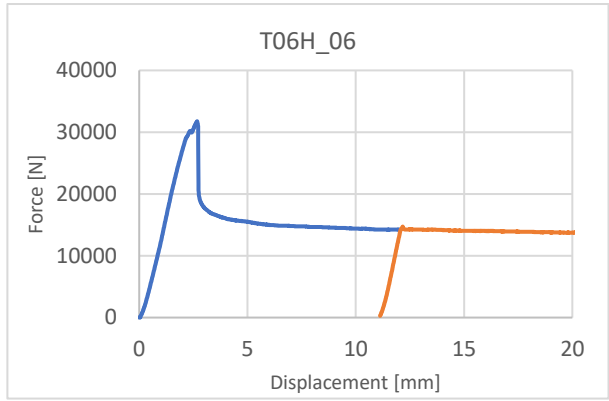
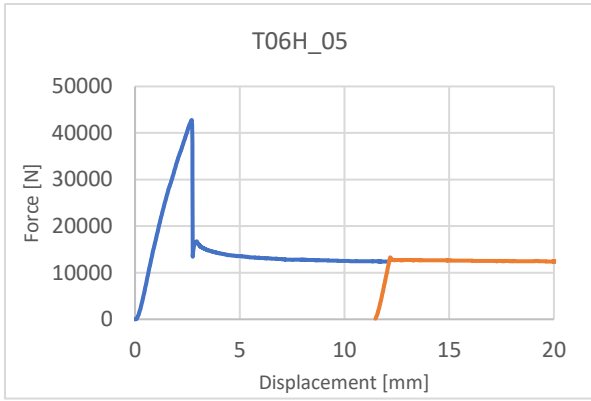
L10U



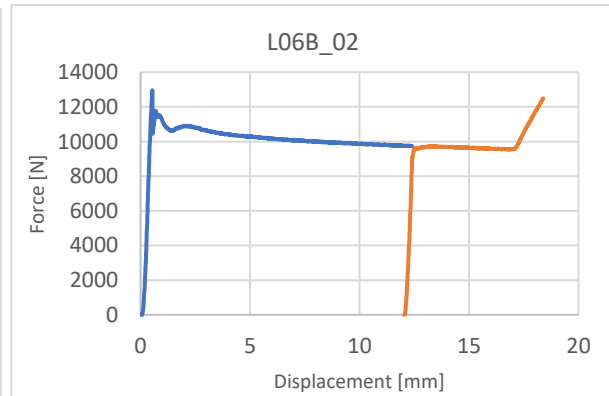
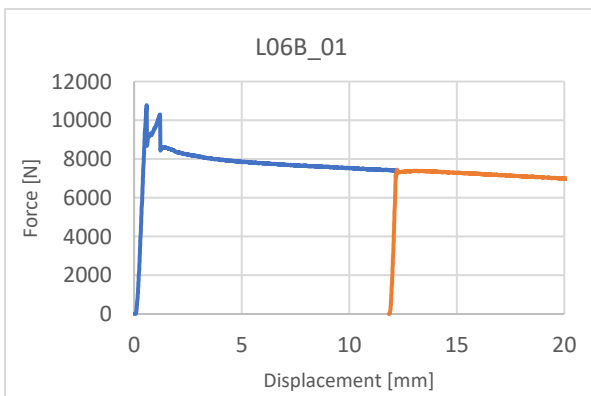


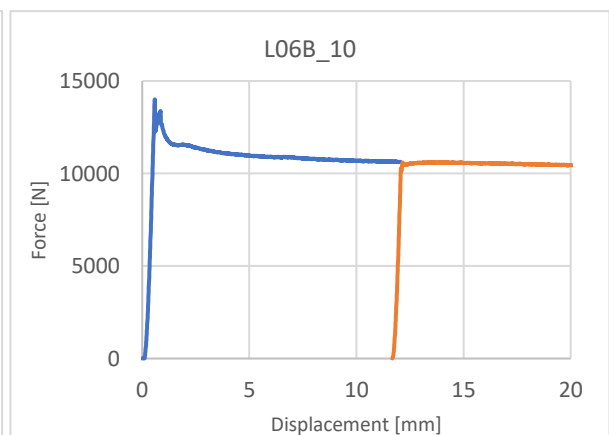
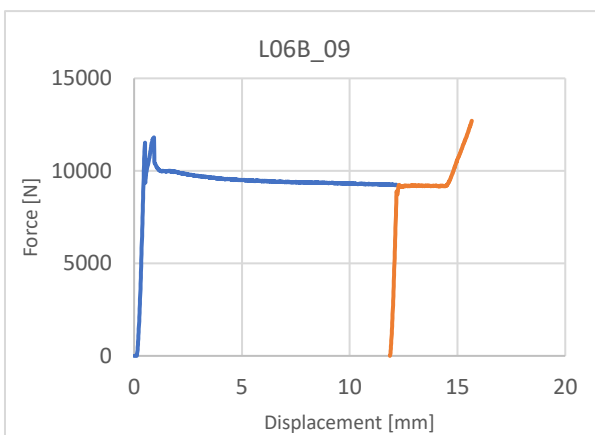
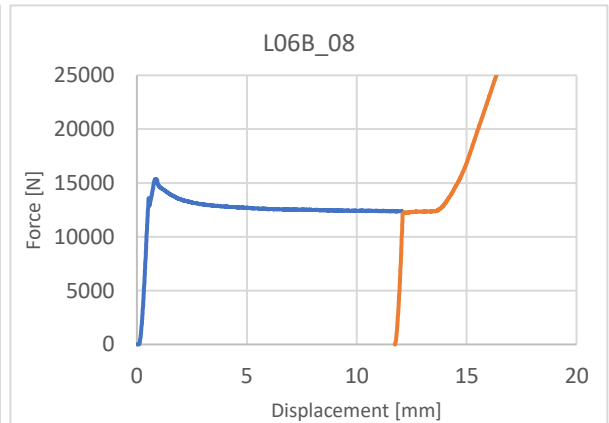
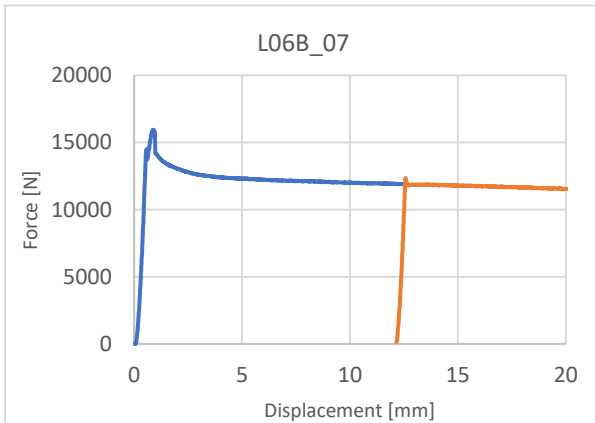
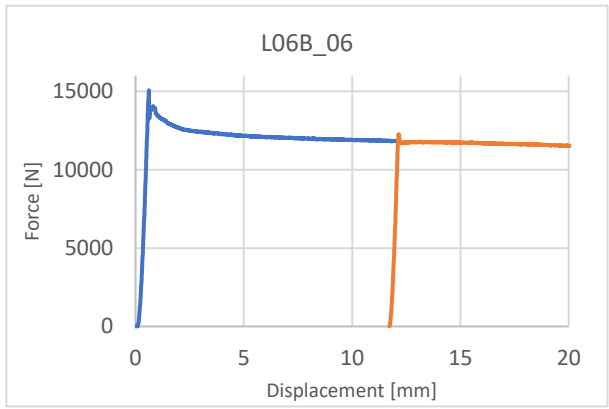
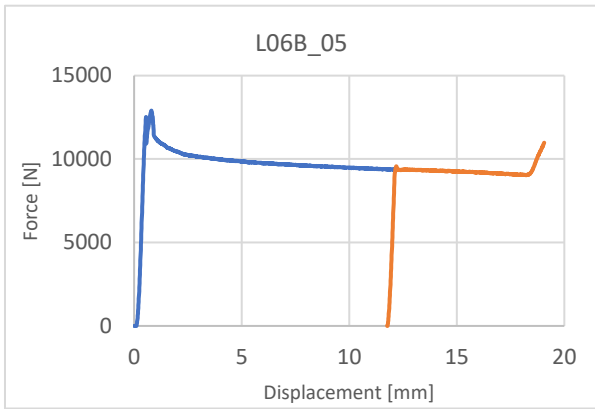
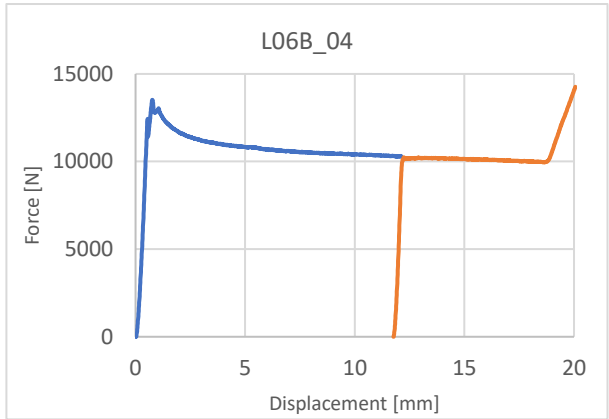
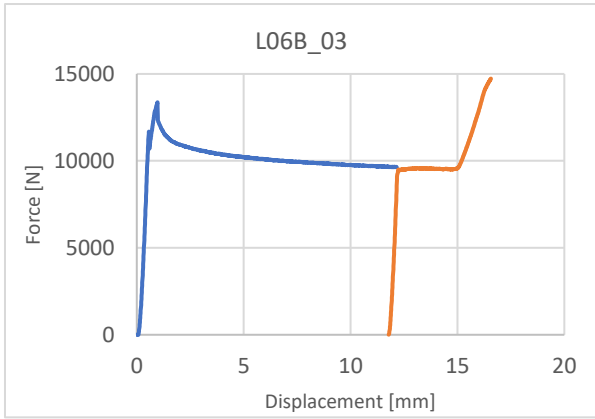
T06H





L06B





Ekstra

