

Duktilitet av lettbetong

Torstein Birkeland
Brage Fredheim

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Jan Arve Øverli, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2015

FAGOMRÅDE: Konstruksjonsteknikk	DATO: 5. juni 2015	ANTALL SIDER: 84 + 33 (vedlegg)
------------------------------------	-----------------------	------------------------------------

TITTEL:

Duktilitet av lettbetong

Ductility of Lightweight Aggregate Concrete

UTFØRT AV:

Brage Fredheim
Torstein Birkeland



SAMMENDRAG:

I denne oppgaven er data fra firepunkts bøyetester av 16 fullskala lettbetongbjelker og trykktesting av 24 prizmer av lett- og normalbetong blitt behandlet. Dataene stammer fra masteroppgaver skrevet ved NTNU våren 2012-2015. I arbeidet med denne oppgaven har det blitt gjennomført sentrisk trykktesting av 6 prizmer av normalbetong med og uten fiber.

Lettbetong har sprøere bruddoppførsel ved trykkbrudd enn normalbetong. I konstruksjonssammenheng ønsker man duktile brudd slik at man får forvarsel på bruddet. I tidligere masteroppgaver er det sett på forskjellige tiltak for å forbedre duktiliteten til lettbetong. Disse tiltakene omfatter tilsetning av fiber i trykktesting, og bruk av fiberarmering og bøylere i bøyetesting. Hovedmålet med denne oppgaven er å sammenstille resultatene fra de foregående masteroppgavene for å vurdere tiltakenes effekt på duktiliteten.

Bjerkene som ble testet besto av bøylearmering med senteravstand 100 og 270 mm med og uten fiber, bøylefrie bjelker med fiberarmering av 3 ulike fibertyper, samt referansebjelker bestående av hverken bøylere eller fiber. Alle bjerkene var overarmerte slik at brudd oppsto i trykksonen. Lettbetongen hadde en romdensitet på rundt 1800 kg/m³ og fasthet på 35-40 MPa.

Prismene som ble testet ble produsert med fiberinnhold på 0,0, 0,5 og 1,0 volumprosent av både lett- og normalbetong. Fibertypen som ble benyttet var Dramix 65/60. Lettbetongen hadde fasthet på 34-36 MPa, mens normalbetongen hadde fasthet på 57-62 MPa. Hver prøvetype ble trykktestet sentrisk og eksentrisk med eksentrisitet lik b/6, som ved lineærelastisk oppførsel ikke gir spenninger på minst belastet side.

Resultatene fra bjelketestingen viste at bøylere og fiber hadde positiv effekt på duktiliteten, både hver for seg, men med størst effekt i kombinasjon. Ved bruk av bøylere fikk bjerkene sprø brudd, men ved videre nedbøyning ble lastkapasiteten til bjerkene med tette bøylere opprettholdt. Bjerkene med stålfiber hadde bedre duktilitet enn bjerkene med basaltfiber.

Ved prismetestingen avsluttet testingen ved brudd for de fleste prismene, og tegn til duktilitet ble kun observert ved eksentrisk testing av lettbetong med fiber. De fleste prismene fikk sprøbrudd karakterisert som eksplosive. Normalbetong hadde sprøere oppførsel enn lettbetong, men forskjellen i trykkfasthet var over 20 MPa for de to betongtypene.

FAGLÆRER: Jan Arve Øverli

VEILEDER(E): Jan Arve Øverli

UTFØRT VED: Institutt for Konstruksjonsteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er det avsluttende arbeidet for de to studentene Brage Fredheim og Torstein Birkeland ved det to-årige masterprogrammet Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU. Masteroppgaven er skrevet for institutt for konstruksjonsteknikk med Jan Arve Øverli som faglærer. Oppgaven er en videreføring av oppgaven «Duktilitet av fiberarmert lettbetong under trykk» skrevet av Daniel Jettli og Gøran Sæther fra våren 2014, og har bestått av å trykkteste prizmer med og uten fiber for å undersøke hvordan fiberarmert betong oppfører seg under trykk.

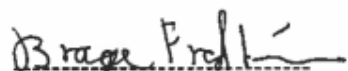
Brage har først tatt en 3-årig bachelor ved Universitet i Agder (UiA), mens Torstein har gått alle sine 5 år på NTNU. Fagbakgrunnen er omtrent den samme der begge har tatt fordypning i konstruksjon.

Oppgaven er en del av et større forskningsprosjekt i regi av COIN (senter for forskningsbasert innovasjon innen betong). Vi har gjennom hele semesteret vært i kontakt med en rekke forskjellige personer i ulike faser av prosjektet, og vi vil takke alle som har bidratt til utformingen av oppgaven. Vi vil rette en spesiell takk til Jan Arve Øverli for god veiledning gjennom hele semesteret, Steinar Seehuus som ga oss god og detaljert hjelp med bruk av maskiner på laboratoriet samt gode livsråd, og resten av teamet ved betonglaboratoriet ved NTNU som har vært involvert i vår oppgave.

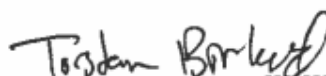
Vi vil også takke hverandre for et meget godt samarbeid gjennom hele masteroppgaven. Vi kjente hverandre ikke fra før og tok derfor en stor risiko da vi bestemte oss for å skrive masteroppgaven sammen, men samarbeidet har gått over all forventning og våren 2015 har vært preget av god stemning, produktive diskusjoner og uten konflikter.

Masteroppgaven har vært godt balansert med en litteraturodel som ga oss tyngde og kunnskap for å kunne analysere resultatene, en praktisk del der vi utførte de nødvendige testene og tilslutt en analysedel hvor vi diskuterte de resultatene vi fikk.

Trondheim, juni 2015



Brage Fredheim



Torstein Birkeland

Sammendrag

I denne oppgaven er data fra firepunkts bøyetester av 16 fullskala lettbetongbjelker og trykktesting av 24 prizmer av lett- og normalbetong blitt behandlet. Dataene stammer fra masteroppgaver skrevet ved NTNU våren 2012-2015. I arbeidet med denne oppgaven har det blitt gjennomført sentrisk trykktesting av 6 prizmer av normalbetong med og uten fiber.

Lettbetong har sprøere bruddoppførsel ved trykkbrudd enn normalbetong. I konstruksjonssammenheng ønsker man duktile brudd slik at man får forvarsel på bruddet. I tidligere masteroppgaver er det sett på forskjellige tiltak for å forbedre duktiliteten til lettbetong. Disse tiltakene omfatter tilsetning av fiber i trykktesting, og bruk av fiberarmering og bøylere i bøyetesting. Hovedmålet med denne oppgaven er å sammenstille resultatene fra de foregående masteroppgavene for å vurdere tiltakenes effekt på duktiliteten.

Bjelkene som ble testet besto av bøylearmering med senteravstand 100 og 270 mm med og uten fiber, bøylefrie bjelker med fiberarmering av 3 ulike fibertyper, samt referansebjelker bestående av hverken bøylere eller fiber. Alle bjelkene var overarmerte slik at brudd oppsto i trykksonen. Lettbetongen hadde en romdensitet på rundt 1800 kg/m^3 og fasthet på 35-40 MPa.

Prismene som ble testet ble produsert med fiberinnhold på 0.0, 0.5 og 1.0 volumprosent av både lett- og normalbetong. Fibertypen som ble benyttet var Dramix 65/60. Lettbetongen hadde fasthet på 34-36 MPa, mens normalbetongen hadde fasthet på 57-62 MPa. Hver prøvetype ble trykktestet sentrisk og eksentrisk med eksentrisitet lik $b/6$, som ved lineærelastisk oppførsel ikke gir spenninger på minst belastet side.

Resultatene fra bjelketestingen viste at bøylere og fiber hadde positiv effekt på duktiliteten, både hver for seg, men med størst effekt i kombinasjon. Ved bruk av bøylere fikk bjelkene sprø brudd, men ved videre nedbøyning ble lastkapasiteten til bjelkene med tette bøylere opprettholdt. Bjelkene med stålfiber hadde bedre duktilitet enn bjelkene med basaltfiber.

Ved prismetestingen avsluttet testingen ved brudd for de fleste prismene, og tegn til duktilitet ble kun observert ved eksentrisk testing av lettbetong med fiber. De fleste prismene fikk

sprøbrudd karakterisert som eksplosive. Normalbetong hadde sprøere oppførsel enn lettbetong, men forskjellen i trykkfasthet var over 20 MPa for de to betongtypene.

Summary

This thesis evaluates data from four-point bending tests conducted on 16 lightweight aggregate concrete beams, as well as compression tests conducted on 24 concrete prisms. The data originates from master theses written at NTNU 2012-2015. In working on this thesis, compression tests on six prisms of normal weight aggregate concrete with centric load have been conducted.

Lightweight aggregate concrete has a more brittle behavior in case of failure in the compression zone compared to normal weight aggregate concrete. This is an unwanted manner as far as structural design is concerned, due to the fact that failure occurs without any pre-warning. The former master theses reviewed different actions to increase the ductility of lightweight aggregate concrete. The actions reviewed were addition of fiber in compression tests and addition of fiber and stirrups in bending tests. The main objective of this study is to compare the results from the former master theses to review these actions effect on the ductility of lightweight aggregate concrete.

The beams that were tested consisted of stirrups with centric distance 100 and 270 mm with and without fiber, beams without stirrups made with 3 different fiber types, as well as benchmark beams with neither stirrups nor fiber. The beams were over-reinforced to ensure failure in the compression zone. The lightweight aggregate concrete had a mass density around 1800 kg/m^3 and a compressive strength in the range of 35-40 MPa.

The prisms that were tested consisted of both lightweight and normal weight aggregate concrete with fiber in a volumetric percentage of 0.0, 0.5 and 1.0. The fiber type was Dramix 65/60. The lightweight aggregate concrete had a compressive strength in the range of 34-36 MPa, while the normal weight aggregate concrete had a compressive strength varying from 57 to 62 MPa. The prisms were tested with both centric and eccentric load. The eccentricity was equal to $b/6$, which by linear elastic conduction implies no stresses at the least loaded side.

The results from the beam testing showed that both stirrups and fibers had good effect on the ductility when separated, but with best effect when combined. Beams with stirrups had brittle

failure, but maintained a high load capacity as the deflection increased. Beams with steel fibers had more ductile behavior than beams with basalt fibers.

All the prisms had brittle failures, and signs of ductility were only observed when fiber-reinforced lightweight aggregate concrete was tested with eccentric loading. Most prisms had failures characterized as explosive, as concrete parts flew in the air at failure. Normal weight concrete showed more brittle behavior than light weight aggregate concrete, but their difference of compressive strength was more than 20 MPa.

Symboloversikt

NB = Normalbetong

LB = Lettbetong

λ = Aspect ratio. Ratioen mellom lengde og diameter på stålfibre

f_{ck} = Karakteristisk trykkfasthet for betong

f_{cd} = Dimensjonerende trykkfasthet for betong

μ_i = Middelerdi

S_x = Standardavvik

X_x = Estimert karakteristisk verdi

σ_c = Spenning i betongen

ε_c = Tøyning i betongen

Φ = Tøyningsgradient

P = Romdensitet til sylindrene

F_{maks} = Maks last målt i kN på prismene

$\varepsilon_{br,tverr}$ = Langsgående tøyning

$\varepsilon_{br,langs}$ = Tverrgående tøyning

k = Krumming

Innhold

Forord.....	i
Sammendrag.....	iii
Summary.....	v
Symboloversikt.....	vii
Figurliste.....	x
Tabell-liste.....	xiii
1 Innledning.....	1
2 Litteraturstudium.....	3
2.1 Normal- og lettbetong.....	3
2.1.1 Tilslag til lettbetong.....	3
2.1.2 Bruksområde lettbetong.....	4
2.2 Duktilitet.....	5
2.2.1 Bruddmekanisme i normalbetong.....	6
2.2.2 Bruddmekanisme i lettbetong.....	8
2.3 Fiber.....	9
2.3.1 Fiber i betong.....	10
2.3.2 Bruddmekanisme i betong med fiber.....	11
2.3.3 Ujevn fiberfordeling.....	12
2.4 Omslutningseffekt.....	13
2.5 Tøyningsgradient.....	15
3 Laboratorium.....	17
3.1 Innledning.....	17
3.2 Prismetest.....	19
3.2.1 Dimensjonering av prismene.....	19
3.2.2 Utførelse av prismetest.....	19
3.2.3 Instrumentering av prismene.....	21
3.3 Sylindertest.....	24
3.4 Bjelketest.....	26
4 Resultater.....	29
4.1 Resultater sylindertester.....	29
4.2 Resultater bjelketester.....	30
4.3 Resultater prismetester.....	33
4.3.1 Kraft – tid.....	36
4.3.2 Spenning – tøyning.....	37
4.3.3 Langsgående tøyning – Tid.....	38

4.3.4	Normalisert spenning – tøyning	39
4.3.5	Tverrtøyning – tid	41
4.3.6	Bruddform	42
5	Sammenstilling av resultater.....	45
5.1	Kraft – Tid.....	46
5.2	Spenning – Tøyning	48
5.3	Tøyning – Tid	50
5.4	Normalisert spenning – tøyning	52
5.5	Tverrtøyning – tid	54
5.6	Bruddtøyning.....	56
6	Tidligere masteroppgaver duktilitet lettbetong	57
6.1	Oppsummering master 2012	57
6.2	Oppsummering master 2013	59
7	Analyse/diskusjon av resultater.....	61
7.1	Sammenligning av duktilitet bjelker og prismer	61
7.2	Bjelkenes duktilitet	63
7.3	Alternativ fremstilling av bjelkenes duktilitet	64
7.3.1	Bøyer og omslutningseffekt	68
7.3.2	Tolkning av bøyleeffekt.....	69
7.3.3	Forskjell på fibertyper	69
7.4	Prismenes duktilitet.....	71
7.4.1	Trykkapasitet.....	73
7.4.2	Effekt av betongtype	74
7.4.3	Effekt av tøyingsgradient for prismene	75
7.4.4	Diskusjon av bruddlinje og bruddoppførsel	76
8	Konklusjon.....	79
9	Forslag til videre arbeid	80
10	Feilkilder.....	81
11	Bibliography	82
12	Vedlegg	85

Figurliste

Figur 2.1: Lecakuler.....	4
Figur 2.2: Arbeidsdiagram med kurver for ulike materialoppførsler.....	5
Figur 2.3: Bruddlinje gjennom lett- og normalbetong.....	6
Figur 2.4: Skjematisk representasjon av C-G-mekanismen.....	7
Figur 2.5: Arbeidsdiagram for lett- og normalbetong.....	8
Figur 2.6: Former og tverrsnitt på fibre.....	9
Figur 2.7: Fiberets virkning på riss.....	11
Figur 2.8: Distribusjon av stålfibre i betong.....	12
Figur 2.9: Demonstrasjon av hindring som kan forårsake fiberballing.....	13
Figur 2.10: Treaksiell spenningstilstand.....	13
Figur 2.11: Spenning-Tøyningssammenheng.....	14
Figur 2.12: Illustrasjon av tøyninggradient.....	15
Figur 3.1: Vannbad med lagret prøvestykker.....	17
Figur 3.2: oppsett av testrigg.....	20
Figur 3.3: Sfærisk sylinder t.v. og metallplater t.h.....	21
Figur 3.4: oppsett av målerne.....	22
Figur 3.5: LVDT kjerne.....	22
Figur 3.6: Bærbar PC for registrering av data fra prismetest.....	23
Figur 3.7: pålimt måler.....	23
Figur 3.8: oppsett av målere.....	24
Figur 3.9: Oppsett på sylindertest.....	25
Figur 3.10: Bærbar PC for registrering av data fra sylindertesten.....	25
Figur 3.11: LVDT måler.....	27
Figur 3.12: Oppsett av bjelketest.....	27

Figur 4.1: Kraft-Tid for bjelker	31
Figur 4.2: Kraft - Forskyvning for bjelker	32
Figur 4.3: Kraft – Tid for prismer	36
Figur 4.4: Spenning - tøyning.....	37
Figur 4.5: Langsgående tøyning - Tid	38
Figur 4.6: Normalisert spenning – tøyning	39
Figur 4.7: Normalisert spenning – tøyning. 1 % fiber	40
Figur 4.8: Tverrtøyning - Tid.....	41
Figur 4.9: Sekunder før brudd.....	42
Figur 4.10: Bruddform for 0 % t.v. og 1 % fiberinnhold t.h.	43
Figur 4.11: Bruddflaten til normalbetong med 0%fiberinnhold	44
Figur 4.12: Bruddflate til normalbetong med 1% fiberinnhold	44
Figur 5.1: Kraft – Tid, lettbetong sentrisk.....	46
Figur 5.2: Kraft – Tid, lettbetong eksentrisk.....	46
Figur 5.3: Kraft – Tid, normalbetong sentrisk	47
Figur 5.4: Kraft – Tid, normalbetong eksentrisk	47
Figur 5.5: Spenning – Tøyning, lettbetong sentrisk	48
Figur 5.6 Spenning – Tøyning, lettbetong eksentrisk	48
Figur 5.7: Spenning – Tøyning, normalbetong sentrisk	49
Figur 5.8 Spenning – Tøyning, normalbetong eksentrisk.....	49
Figur 5.9: Tøyning – Tid, lettbetong sentrisk	50
Figur 5.10: Tøyning – Tid, lettbetong eksentrisk	50
Figur 5.11: Tøyning – Tid, normalbetong sentrisk	51
Figur 5.12: Tøyning – Tid, normalbetong eksentrisk	51
Figur 5.13: Normalisert Tøyning – Tid, lettbetong sentrisk	52
Figur 5.14: Normalisert Tøyning – Tid, lettbetong eksentrisk	52
Figur 5.15: Normalisert Tøyning – Tid, normalbetong sentrisk.....	53

Figur 5.16: Normalisert Tøyning – Tid, normalbetong eksentrisk	53
Figur 5.17: Tverrtøyning – Tid, lettbetong sentrisk	54
Figur 5.18: Tverrtøyning – Tid, lettbetong eksentrisk	54
Figur 5.19: Tverrtøyning – Tid, normalbetong sentrisk	55
Figur 5.20: Tverrtøyning – Tid, normalbetong eksentrisk	55
Figur 6.1. Utsnitt av normalisert last - forskyvning for alle bjelker	58
Figur 6.2: Normalisert nedbøyning	59
Figur 6.3: Normalisert nedbøyning	60
Figur 7.1: Normalisert tøyning	63
Figur 7.2: Mål for duktilitet med utgangspunkt i normalisert nedbøyning	66
Figur 7.3: Normalisert - last forskyvningsforløp for bjelkepar 1-4	67
Figur 7.4: Normalisert - last forskyvningsforløp for bjelkepar 5-8	67
Figur 7.5: Kraft - tid for bjelketesting i 2012	68
Figur 7.6: Illustrasjon av avvik til bjelkepar 7	69
Figur 7.7: Normalisert tøyning	71
Figur 7.8: Tverr mot langs normalisert	72
Figur 7.9: Trykkapasitet sylindere i forhold til prismer	73

Tabelliste

Tabell 3.1: oversikt over prøvestykkene	18
Tabell 3.2 Relasjon mellom CMOD og nedbøyning.....	26
Tabell 4.1: Resultater sylindertester.....	29
Tabell 4.2: Resultater bjelketester	30
Tabell 4.3: Resultatene fra kraft forskyvning for bjelker	31
Tabell 4.4: Bøyestrekkefasthet for bjelker	32
Tabell 4.5: Identifikasjon av prismetester	33
Tabell 4.6 – Nøkkelverdier fra prismetesting	34
Tabell 4.7: Bruddlast for prismer	36
Tabell 4.8: Maksimal spenning og maksimal langsgående tøyning for prismer	37
Tabell 4.9: Tverrtøyning.....	41
Tabell 5.1: Tøyning ved brudd for prismene	56
Tabell 6.1: Bjelkeedata for de ulike bjelkekonfigurasjonene	57
Tabell 7.1: Nøkkelverdien for prøvene.....	62
Tabell 7.2: Bjelkeoversikt	64
Tabell 7.3: Data for duktilitet.....	65
Tabell 7.4: Duktilitetsøkning i forhold til basaltfiber	70
Tabell 7.5: Sammenligning av lett- og normalbetong	74
Tabell 7.6: Endringer ved eksentrisk testing i forhold til sentrisk testing.....	75
Tabell 7.7: Endringer ved eksentrisk testing i forhold til sentrisk testing.....	76

1 Innledning

Betong er et av de mest brukte bygningsmaterialene i dagens samfunn, og det lages ved å blande sement, vann, sand, stein og tilsetningsstoffer som ved en kjemisk reaksjon kalt hydratisering danner betong. Betong er lett å forme før det herder, noe som gjør betong veldig allsidig og formbart materiale. Kun fantasien setter grenser for hva man kan lage.

Betong er et materiale som har blitt brukt i lang tid, men det er stadig i utvikling for å forbedre egenskapene, eksempelvis levetid, styrke, vekt, formbarhet eller duktilitet. I de senere år har lettbetong blitt et mer populært valg, men til tross for mange gode egenskaper har det noen svakheter i forhold til normalbetong. Det er i hovedsak den sprøe bruddoppførselen til lettbetong som gjør at normalbetong er å foretrekke, spesielt i bærende konstruksjoner.

For av sikkerhetshensyn søker man alltid å bruke duktile byggematerialer for å få deformasjonstegn eller en slags forvarsel på brudd på konstruksjoner. I betongkonstruksjoner ønsker man at armeringen styrer duktiliteten, og dette gjøres ved å underarmere konstruksjonen slik at armeringen flyter før brudd. I regelverket tillates ingen tøyning i lettbetong etter at maksimal spenning er oppnådd, altså må det dimensjoneres med at lettbetong går til brudd når maksimalspenning er nådd. Et av tiltakene gjort for å øke duktiliteten i lettbetong er ved å tilsette fiber.

Denne oppgaven går ut på å fullføre de resterende testene som ikke ble gjennomført våren 2014 fordi maskinen som da ble brukt ikke hadde tilstrekkelig kraft. Våren 2014 ble det trykktestet 12 lettbetong-prismer med og uten fiber, både eksentrisk og sentrisk samt 6 normalbetong prismer med og uten fiber, eksentrisk. 1 prisme av normalbetong ble forsøkt testet sentrisk uten å nå brudd, de resterende 5 normalbetong-prismene har blitt trykktestet sentrisk våren 2015.

Oppgaven skal se på virkningen ved bruk av fiber i lett- og normalbetong ved både sentriske og eksentriske trykktester.

Rapporten kan deles inn i 7 deler:

- Litteraturredel
- Laboratorium og beskrivelse av forsøket
- Presentasjon av resultater
- Sammenligning av resultater fr 2014 og 15
- Oppsummering av tidligere masteroppgaver som omhandler duktilitet i lettbetong
- Analyse/diskusjon av resultater
- Konklusjon

2 Litteraturstudium

2.1 Normal- og lettbetong

Betong kan grovt sett betraktes som et materiale bestående av to komponenter, tilslag og sementpasta. Det er også et materiale som går gjennom to faser, fersk og herdet tilstand. I fersk tilstand er betongen lett å bearbeide og forme etter eget ønske. Når betongen er herdet vil den oppnå betydelig styrke i trykk, mens den svake kapasiteten i strekk kompenseres for med å legge inn strekkarmering. Dette gjør betong til et meget ettertraktet bygningsmateriale. Normalbetong har densitet mellom 2200-2500 kg/m³. Når densiteten på betongen er lavere enn 2200 kg/m³, omtales den som lettbetong. Den fullstendige definisjonen i EC2 lyder slik: *Betong med lukket struktur og en densitet som ikke er større enn 2200 kg/m³, og som består eller inneholder en andel kunstige eller naturlige lette tilslag med en partikkeldensitet mindre enn 2000 kg/m³* [1, 2]

Lettbetong kan spores hele 5000 år tilbake i tid da det ble brukt til å bygge tårnene Mohenjo-Daro og Harappa. Siden den gang har etterspørselen etter lettbetong økt, men med lite tilgang til naturlig tilslag til lettbetong har man begynt å produsere det i fabrikker. [3]

2.1.1 Tilslag til lettbetong

Densiteten og styrken til betongen avhenger av hvilke materialer som blir brukt, og forskjellen på materialene er store. Selv tilslag av samme type materiale kan oppnå forskjellig densitet ved å bruke ulike produksjonsmetoder. [3]

Lette tilslag kan brukes i alle fraksjoner, men det mest vanlige er å bruke en kombinasjon av lettilslag i grovfraksjonen (>4 mm) kombinert med naturlig sand i finfraksjonen (≤4 mm). Dersom lettilslag også brukes i finfraksjonen kan betongdensiteten reduseres med opptil 400 kg/m³, med liten reduksjon av fastheten. Da vil riktignok bruddet i lettbetongen bli sprøere enn bruddet i en lettbetong med naturlig sand i finfraksjonen. [4]

De mest vanlige tilslagene til lettbetong i Norge er Leca og Liapor, men Stalite og Lytag kan også være aktuelle å bruke. Leca og Liapor blir fremstilt av at henholdsvis leire og knust skifer som formes til kuler og brennes på en temperatur mellom 1100-1200 °C i en roterovn. Ved høye temperaturer utvikles ekspanderende gass som gjør at kulene blir porøse og får lav egenvekt. Siden tilslaget utvikles gjennom en industriell prosess, kan det fremstilles tilslag med ulike egenskaper ved å endre på brennetemperatur og benytte ulike materialer. Høyere densitet på tilslaget gir betong med høyere trykkfasthet, men også større egenvekt. [3, 4]



Figur 2.1: Lecakuler

2.1.2 Bruksområde lettbetong

Den største motivasjonen for bruk av lettbetongen i konstruksjoner er den lave egenvekten som gjør den aktuell som byggemateriale i bruer med lange spenn, høye bygninger, i marine konstruksjoner og gulv i industribygg. I Norge har lettbetong blitt brukt i prestisjeprosjekter som Troll-plattformen, Nordhordalandsbrua, Sandhornøya bru og Heidrun flyteplattform. Den lave egenvekten gir flere praktiske fordeler i de fleste byggeprosjekt, blant annet i reduksjon av fundament på grunn av konstruksjonens lavere egenvekt, tid- og kostnadsbesparelser ved løfting/håndtering av elementer og benyttelse av større prefabrikkerte elementer.

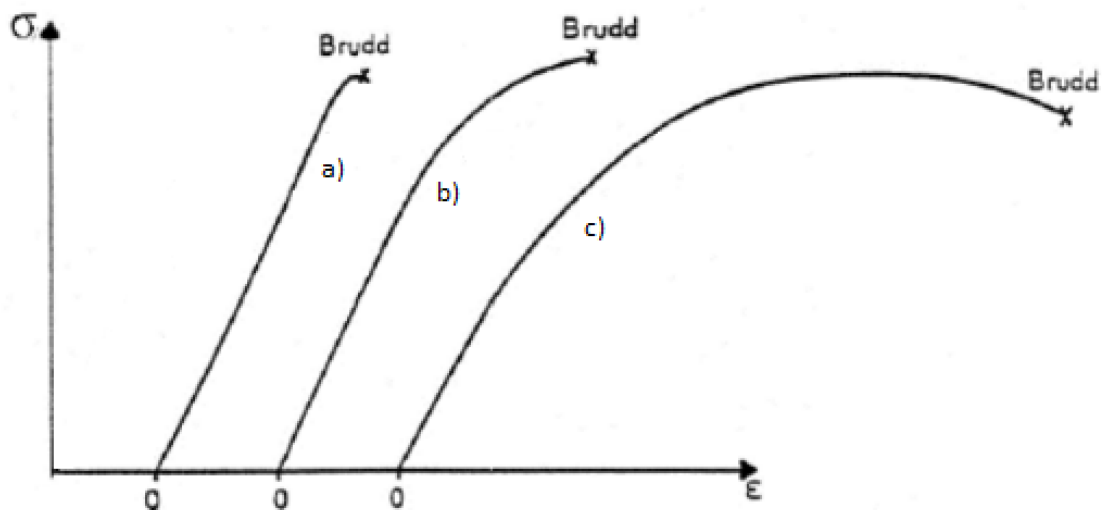
Selv om kostnaden for å produsere lettbetong er noe dyrere på grunn av tilslaget, vil totalkostnadene være mindre. I tillegg til de nevnte grunnene over, har lettbetong bedre holdbarhet og det vil være behov for mindre vedlikehold. Når bygget engang skal rives kreves det mindre energi.

Et materiale med lav densitet har dårligere varmeledningsevner i forhold til et materiale med høyere densitet. Dette gir lettbetong bedre varmeisolasjonsegenskaper i forhold til normalbetong, og tykkelsen på vegger og gulv kan reduseres som følge av dette. På grunn av lettbetongs dårlige varmeledningsevne har lettbetong gode brannmotstandsegenskaper i forhold til normalbetong, så lenge brannen ikke er av typen hydrokarbonbrann der temperaturen vil stige fort over en kort periode.

Til tross for lettbetongs mange gode egenskaper er normalbetong å foretrekke i de fleste tilfeller på grunn av lettbetongs dårlige duktilitet/sprøe oppførsel. [3, 4, 5]

2.2 Duktilitet

Duktilitet beskriver et materiales evne til å tåle plastiske deformasjoner uten å miste sin lastbærende kapasitet.



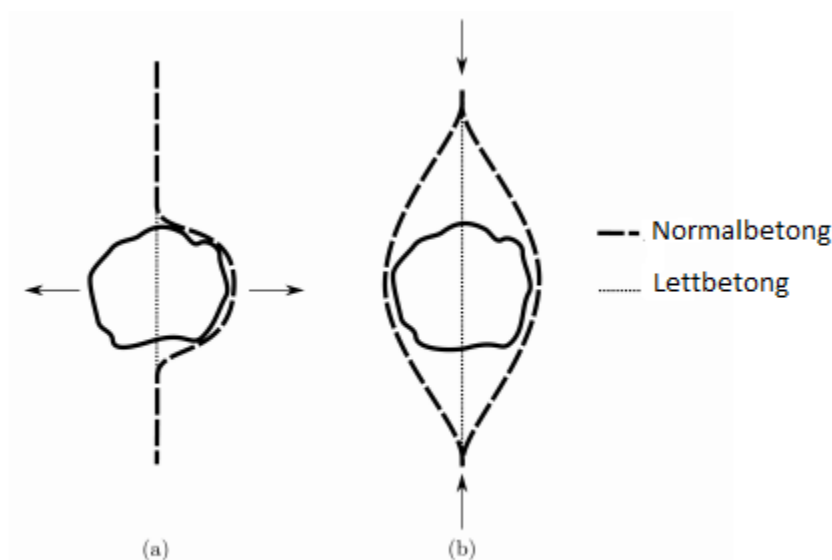
Figur 2.2: Arbeidsdiagram med kurver for ulike materialoppførsler. Sprøtt (b) Svakt duktil (c) Duktil

Fra arbeidsdiagrammet til et materiale kan man bestemme duktiliteten ut fra materialets oppførsel i den plastiske sonen. Et duktilt materiale kjennetegnes av store tøyninger før brudd, og at kapasiteten holdes oppe selv for store tøyninger. Dette betegnes som et seigt brudd. Et ikke-duktilt materiale kjennetegnes av at kapasiteten raskt reduseres når tøyningen øker, og at brudd oppstår for liten økning av tøyning. Dette betegnes som et sprøtt brudd.

Av sikkerhetshensyn foretrekkes det alltid å bruke duktile materialer i konstruksjoner for å få et forvarsel på konstruksjonssvikt. TEK 10 stiller krav om at det benyttes materialer som gjør at konstruksjonen kan oppnå nødvendig duktilitet og robusthet. Kravene til duktilitet finner man i Eurokode 8. [5, 6, 1, 7]

2.2.1 Bruddmekanisme i normalbetong

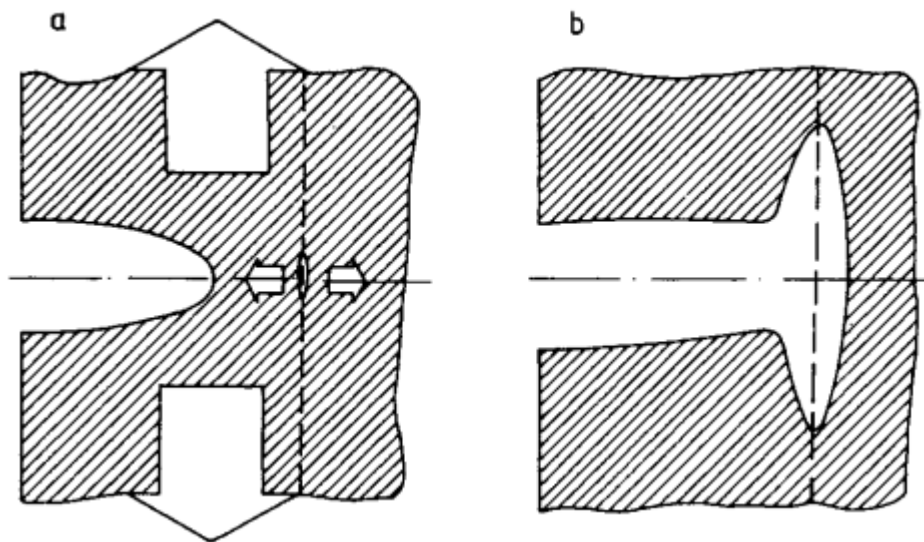
I utviklingen fra fersk til herdet fase vil det oppstå mange feil eller diskontinuiteter i betongen forårsaket av bl.a. hydrering av sementpastaen, svinn og segregering. Disse feilene, som hovedsakelig opptrer i grensesnittet mellom tilslaget og matriksen, fører til reduksjon av styrken til betongen. Dette skyldes at det oppstår spenningskonsentrasjoner i feilene som virker som spenningsforsterkere. Spenningskonsentrasjonen fører til rissdannelse, først mikroriss som senere kan utvikle seg til makroriss. Overgangssonene mellom tilslag og matriks er derfor den svakeste sonen i betongen, og bruddlinjen går gjennom disse sonene se **Figur 2.3**



Figur 2.3: Bruddlinje gjennom lett- og normalbetong a) Betong i strekk b) Betong i trykk [8]

Betong er i utgangspunktet et sprøtt materiale, det vil si at når et riss først har oppstått, evner ikke betongen å stanse rissutviklingen. Materialer som er duktile kan forme glideplan eller avrunde rissenden, og dermed tåle store deformasjoner før de bryter sammen. Likevel betegnes normalbetong som kvasi-sprøtt, fordi den har en viss seighet før brudd. Dette kan forklares ved

hjelp av Cook-Gordon-effekten (C-G). Når et riss har oppstått i betongen, vil det i følge C-G virke to spenningsfelt rundt risset, et spenningsfelt parallelt med lastretningen som har maksverdi ved rissenden, og et spenningsfelt perpendikulært med lastretningen som har maksverdi noe foran rissenden. I utgangspunktet vil et riss i et sprøtt materiale føre til at materialet går til brudd, men siden betong er et inhomogent materiale, vil risset støte på flere svake soner. Når et riss nærmer seg en svak sone, vil spenningsfeltet foran primærrisset føre til at det oppstår et sekundært riss i den svake sonen. Det sekundære risset krever mer energi for å forplante seg i konstruksjonen, og dermed øker bruddenergien til konstruksjonen. Konstruksjonen kan omfordele spenninger og får dermed en seigere bruddoppførsel. [8, 9, 10, 11, 12, 5, 13]

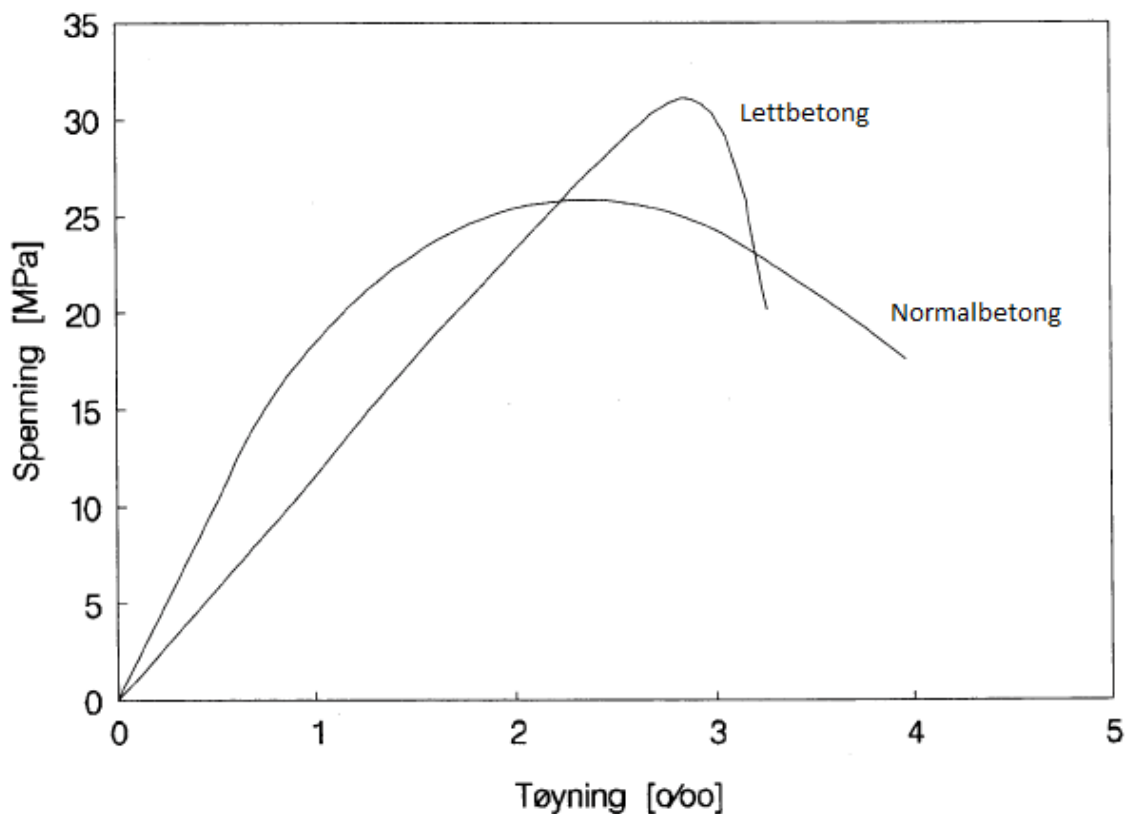


Figur 2.4: Skjematisk representasjon av C-G-mekanismen. (a) Enden av et riss blir utsatt for strekkspenninger (store piler), mens det foran rissenden vil oppstå et sekundært spenningsfelt (små piler) som kan åpne et sekundært riss i en svak sone (stiplet linje). (b) Primærrisset sammenfaller med sekundærrisset. [11]

2.2.2 Bruddmekanisme i lettbetong

Lettbetong består av porøst tilslag, og dette gjør at sementpastaen penetrerer innsiden av tilslaget under herdeprosessen. Dette bidrar til en god binding mellom de to komponentene, og lettbetong har derfor ingen svak overgangssone. De to komponentene har også relativt like stivhetsegenskaper. Forenklet kan man derfor betrakte lettbetong som et homogent materiale, hvilket forklarer dens sprø bruddoppførsel. Mikroriss vil ikke oppstå i overgangssonen mellom tilslag og matriks, men når riss først oppstår vil konstruksjonen fort gå til brudd. Dette kan observeres i arbeidsdiagrammet ved at lastkapasiteten synker raskt etter overgangen fra elastisk til plastisk sone, og påfølgende brudd skjer ved en liten tøyningsokning. Pålastningskurven er lineær, som skyldes at det ikke dannes mikroriss. De like stivhetsegenskapene til komponentene i lettbetong forklarer også hvorfor bruddlinjen går tvers gjennom tilslag og matriks (**Figur 2.3**)

Lettbetong med naturlig tilslag har omtrent halvparten så stor bruddenergi som normalbetong med samme fasthet. [4, 8, 9, 5, 14]

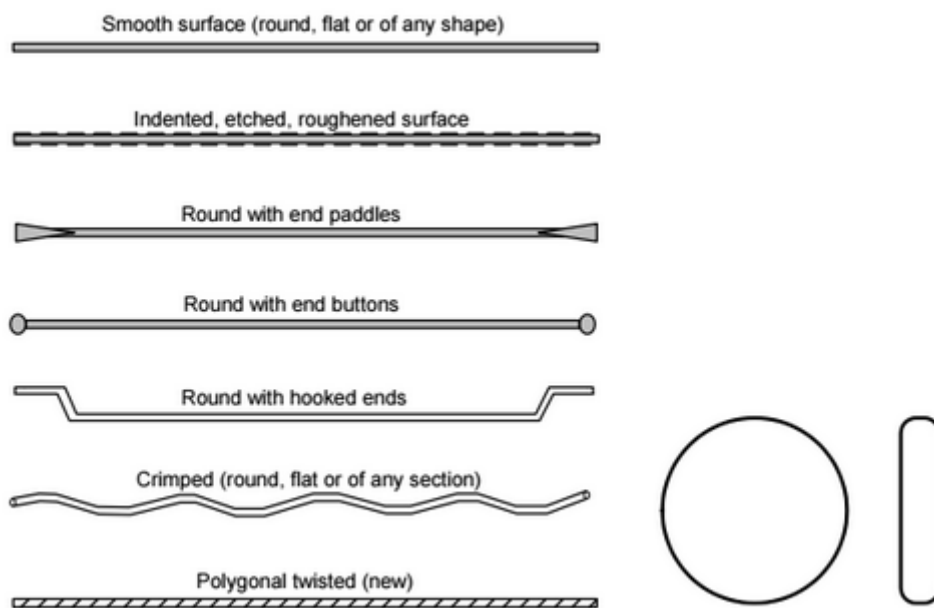


Figur 2.5: Arbeidsdiagram for lett- og normalbetong [4]

2.3 Fiber

Fiber har blitt brukt i flere tusen år for å styrke egenskapene til materialer som er svakere i strekk enn i trykk. Et av de eldste eksemplene på bruk av fibre kan spores tilbake 3500 år da murstein ble forsterket med strå for å bygge det 57 meter høye Aqar Quf. [14]

Siden den gang har fibrene utviklet seg og kan nå komme i forskjellige tverrsnitt, materialer og lengder. Eksempel på tverrsnitt er kvadratiske, rektangulære, triangulære og flate, og blant materialene som blir brukt er stål, titan, glass, karbon, asbest, cellulose og syntetiske fibre. [15]



Figur 2.6: Former og tverrsnitt på fibre [15]

Den mest brukte type fibre i dag er stålfibre med sirkulært tverrsnitt med lengde fra 25 mm til 60 mm, og omkrets fra 0.4 til 0.8 mm. Ratioen mellom lengde og diameter på stålfibrene danner aspect ratio (λ), Denne ratioen er vanlig å oppgi når man skal karakterisere stålfibre. Verdien ligger vanligvis mellom 20 og 100 på stålfibre. [15]

$$\lambda = \frac{L}{D}$$

Tidligere (50- og 60-tallet) var stålfibre glatte og helt rette, men på moderne stålfibre består fasongen av en deformert form i hele eller i endene på fibre (Figur 2.6). Dette gjøres for å forbedre det mekaniske samholdet mellom materialene, som for eksempel mellom fiber og betong. For noen type fibre kan også overflaten bli behandlet for å øke samholdet til betongen. [14]

2.3.1 Fiber i betong

Historisk sett har den mest vanlige armering i betong kommet i form av kontinuerlige armeringsstenger som har blitt plassert i konstruksjonen etter nøye kalkuleringer for å øke strekk- og skjærkapasiteten. Armering i betong kan også komme i form av fibre som blir blandet ut med betongen før den herder. Fordelingen av fibre i den ferdige betongmatriksen blir optimalt tilfeldig fordelt, og vil derfor bidra til å bedre strekkfastheten i betongen. Dette innebærer at betong med fiberarmering får økt duktil oppførsel og blir mer effektiv til å kontrollere og hindre sprekk- og rissdannelser.

Andre fordeler som blir nevnt av Kanstad [16] ved bruk av fiber i betong er bestandighet, utmattingsstyrke, støtmotstand, slitasjemotstand, robusthet mot svinn, temperatursvingninger og brannmotstand. En ulempe er at betongen får mindre støpelighet og blir vanskeligere å arbeide med. [15, 14]

Typiske bruksområder til fiberarmert betong er veier, broer, veggkledning, rehabilitering av allerede eksisterende konstruksjoner, flate dekker, og prefabrikkerte industrigulv [16]

For at fibre skal ha effekt og utføre ønskelige arbeidsoppgaver i betongmatriksen bør fibre ha følgende mekaniske egenskaper:

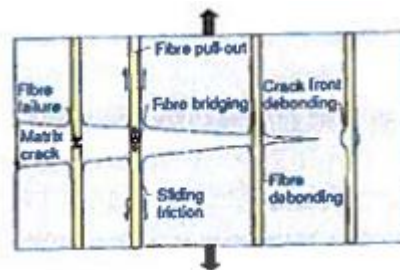
- Strekkfasthet som er høyere (to-fire ganger høyere) enn strekkfastheten til betongmatriksen
- Bindestyrke med betongmatriksen som er minst like stor som strekkfastheten til betongmatriksen.
- En elastisitetmodul som er minst 3 ganger høyere enn betongmatriksen

[15, 17]

Fibrene blir karakterisert som tilslag og derfor blandet inn samtidig som tilslaget. Ved utregninger av mengde fibre brukes volumprosent, og derfor vil 1 volumprosent av stålfibre ha forskjellig vekt mot 1 volumprosent av polypropylene fibre. Ved bruk av for mye fiber i betongen vil bearbeidligheten av betongen bli vanskelig, og fiberballing kan lett oppstå.

2.3.2 Bruddmekanisme i betong med fiber

På samme måte som de svake sonene i normalbetong stopper riss og omfordeler spenninger (Cook-Gordon-effekten), vil fiber virke som en risstopper i lettbetong. Når rissenden nærmer seg et isolert fiber, vil det oppstå spenninger i grensesnittet mellom fiberet og matriksen som fører til dannelse av et sekundært riss parallelt med fiberet (**Figur 2.7**). Fiber initierer dannelse av mikroriss i lettbetong, og forbedrer seigheten til lettbetongen fordi konstruksjonen kan absorbere mer energi (bruddenergien øker). Ved videre påføring av last vil primærrisset øke i rissvidde, og fiberet vil da fungere som en bro over primærrisset og ta opp strekkspenningene. Ved påføring av mer last vil fibrene etterhvert enten strekke seg og ryke, eller bli dratt ut av matriksen (pull-out) hvis heften er dårlig. Effekten av fiberet vil være avhengig av stivhet, lengde, heft og forankring. Bruk av fiber vil gi lettbetongen en seigere bruddoppførsel og høyere bruddenergi. Det vil oppstå flere synlige riss i fiberarmert lettbetong før den går til brudd, hvilket gir oss et forvarsel på bruddet. [5, 14, 18]

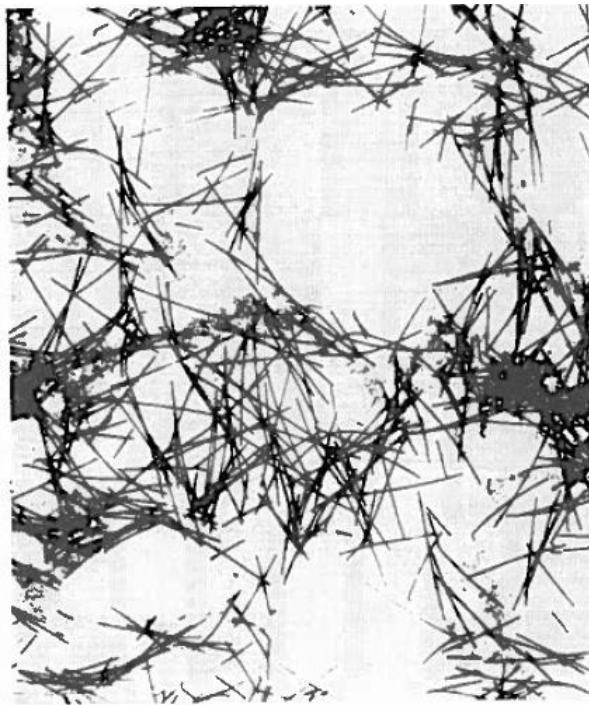


Figur 2.7: Fiberets virkning på riss

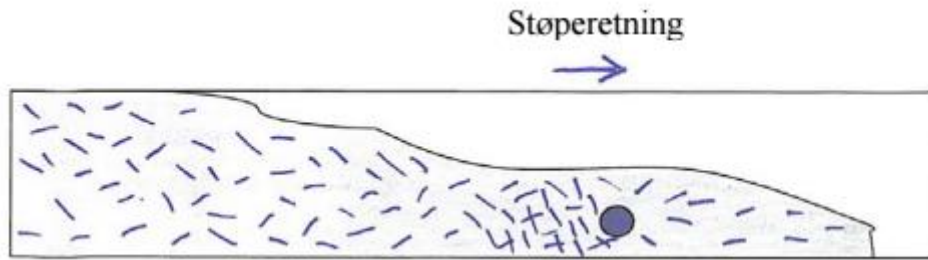
Det er viktig å understreke at fibre og armeringstenger på generell basis har forskjellige roller i moderne betongkonstruksjoner og kan som regel ikke erstatte hverandre, ofte så vil fiber og armeringstenger bli brukt sammen for å utnytte hverandres egenskaper. Et unntak er i tynne plater der fiberinnholdet er mellom 5-20 volumprosent og det fungerer som hovedarmering. [14]

2.3.3 Ujevn fiberfordeling

Et problem med bruk av fiber i betong er at fiberfordelingen sjeldent er jevnt fordelt og en tilfeldig orientering av fibrene i betongen er vanskelig å oppnå. Jevnheten i volumfordelingen av fibrene er meget følsom for blanding og konsolideringsprosess og i praksis er en uniform fordeling sjeldent oppnåelig. En ujevn fordeling av fibre kan skape svakhetssoner i betongen, se **Figur 2.8**, noe man helst vil unngå. På **Figur 2.9** ser man fibre hope seg opp og skape en ujevn fordeling av fiber, såkalt fiberballing. Dette kan skje rundt stangarmering, elektrikerrør, føringer med mer, og kan avhenge av støperetning. Men ujevn fordeling av fiber kan også forekomme under vanlig støping uten noen form for hindringer. En måte å forhindre ujevn fordeling av fiber er ved bruk av vibrator. I bærende konstruksjoner er det viktig med en jevnest mulig fordeling av fibre for å sikre forutsigbare resultater



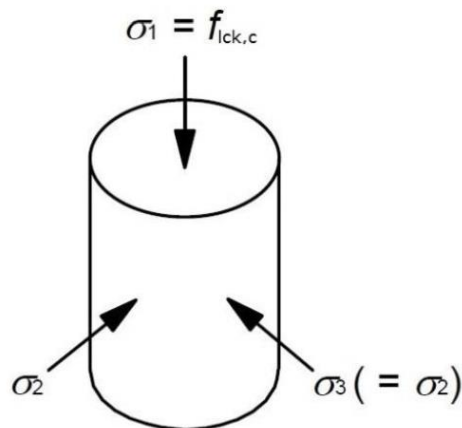
Figur 2.8: Distribusjon av stålfibre i betongobservert gjennom røntgen viser ikke-uniform fordeling av fibrene [16] [19]



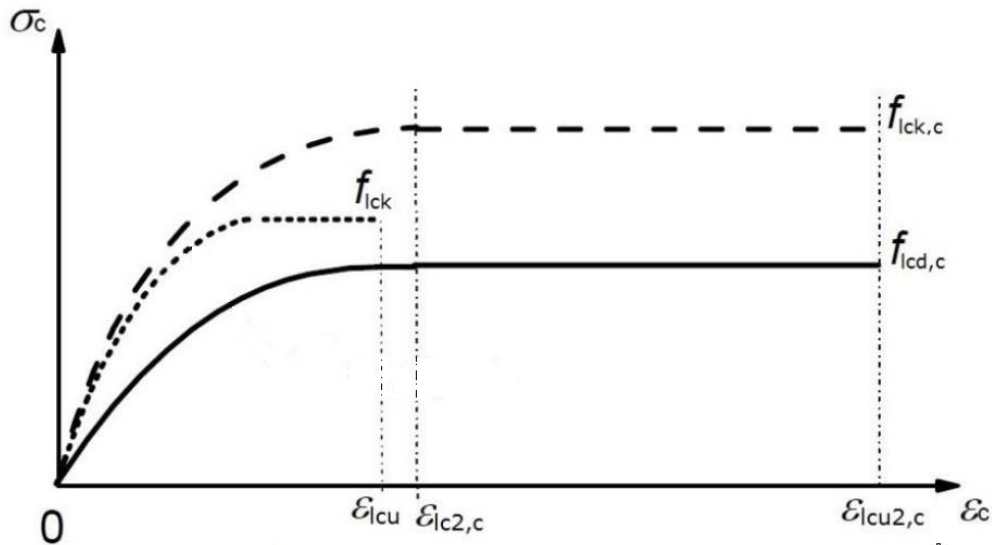
Figur 2.9: Demonstrasjon av hindring som kan forårsake fiberballing[16]

2.4 Omslutningseffekt

Et betongelement som blir utsatt for trykkspenninger (se kraft σ_1 på **Figur 2.10**) vil oppleve en utvidelse i tverretning som vil skape interne strekkrefter i betongelementet. Ved å påføre en effektiv trykkspenning (se krefter σ_2 og σ_3 **Figur 2.10**) i tverretning vil tverrutvidelsen bli forhindret, og det skapes en endring av det effektive spennings- og tøyingsforholdet. Dette fenomenet er kjent som omslutningseffekt. Resultatet av omslutningseffekten vil være høyere karakteristisk fasthet og kritiske tøyninger, som igjen vil resultere i økt trykkapasitet og duktilitet som vist på **Figur 2.11**.



Figur 2.10: Treaksiell spenningstilstand. [1]



Figur 2.11: Spenning-Tøyningssammenheng for betong med forhindrede tverrutvidelse
[1]

For å oppnå omslutningseffekt, eller treaksiell trykkspenningstilstand, kan betongen bli omsluttet av et annet materiale. Dette forhindrer betongen i å utvide seg, og kalles for en aktiv omslutningseffekt. En passiv måte å oppnå omslutningseffekt på, er å legge inn lukkede bøyler med liten senteravstand, eller ha kroker eller/og fibre i betongen for å overføre de interne strekkraftene til det innlagte stålet. [1]

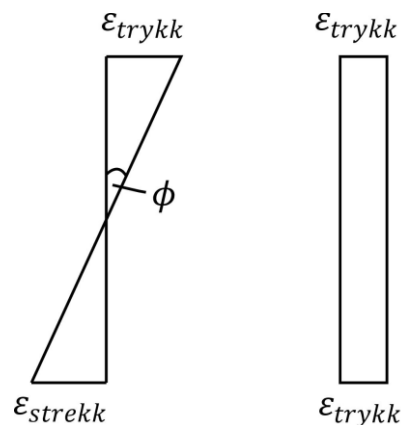
Når betong testes i enaksiale trykktester vil det oppstå friksjon mellom betongen og stålplaten i topp og bunn. Friksjonen gjør at det overføres skjærspenninger, og det oppstår dermed en treaksiell spenningstilstand i topp og bunn av betongprøven. Brudd vil oppstå midt i prøven hvor betongen ikke blir forhindrede for tverrutvidelse, og bruddet vil bevege seg parallelt med trykkretningen. Når bruddet kommer til enden av prøven, vil skjærkraftene fra stålplaten forhindre tverrutvidelse og gjøre at betongprøven tåler mer last før endelig brudd inntreffer. Med andre ord kan betongprøven få en duktil/seig oppførsel som skyldes testapparatet og ikke selve materialegenskapene. Dette kan også observeres ved at kubetrykkfastheten er større enn sylindertykkfastheten for samme betongblanding. Kuber får enda større påvirkning av skjærkraftene fra stålplatene, og dermed tåler kubene større last. [1]

2.5 Tøyningsgradient

Med tøyningsgradient menes forholdet mellom tøying i topp og bunn av et tverrsnitt. Gradienten, ϕ , er vinkelen mellom tøyingene.

$$\Phi = \frac{\varepsilon_{streck} + \varepsilon_{trykk}}{h}$$

der h = tverrsnittshøyde



Figur 2.12: Illustrasjon av tøyningsgradient.[20]

Virkingen av tøyningsgradienten i fiberarmert betong i trykk er todelt, ettersom den påvirker både betongens styrke og duktilitet. I begge tilfeller er forskjellen i deformasjonen til de forskjellige fibrene avgjørende for effekten. Den tverrgående deformasjonen til fiberet med størst trykkspenninger blir motvirket av de mindre belastede fibrene, som omslutter det mest belastede fiberet med spenninger som hindrer fiberet i å utvide seg i tverretning. Denne omslutningseffekten fører til en økning av maksimal spenning på 10-30 %, men avhenger av raten mellom bredde og dybde på trykksonen. Ved økning av denne raten øker effekten. [21]

3 Laboratorium

3.1 Innledning

Dette kapittelet tar for seg i detalj fremgangsmåte og oppsett på hvordan prismene, sylindrene og bjelkene ble testet.

Prøvestykkene som ble testet våren 2015 ble laget våren 2014 av studentene Daniel Jettli, Gøran Sæther og laboratorieteknikere ved NTNU. Det vil ikke bli forklart hvordan prøvestykkene ble laget, da dette står i Masteroppgaven fra 2014, “Duktilitet av fiberarmert lettbetong under trykk” skrevet av Daniel Jettli og Gøran Sæther [20]. Resepten til normalbetong ble bestemt av SINTEF (se vedlegg A)

Prøvestykkene som ikke ble testet våren 2014 består av 12 sylindere, 12 bjelker og 6 prizmer. Disse har blitt lagret i et vannbad (**Figur 3.1**) til testing våren 2015. **Tabell 3.1** viser en oversikt over alle prøvene som ble laget våren 2014 (hentet fra master2014) [20]. Prøvene som er markert med rødt er de prøvestykkene som ble testet våren 2015.



Figur 3.1: Vannbad med lagret prøvestykker

Tabell 3.1: oversikt over prøvestykkene

Betongtype	Prismer		Sylindere	Bjelker
	Sentrisk	eksentrisk		
NDC 0 %	2 *	2	3	ingen
NDC 0.5%	2 **	2	3	3
NDC 1.0 %	2	2	3	3
LWC 0 %	2	2	3	ingen
LWC 0.5 %	2	2	3	3
LWC 1.0 %	2	2	3	3

* Det ble testet 3 sentriske og 1 eksentrisk normalbetong 0 %-prisme, ettersom den eksentriske testen hadde voldsomt eksplosivt brudd som av sikkerhetsmessige hensyn utgjorde en trussel.

** Det ble kun testet én sentrisk NDC 0,5 %-prøve ettersom ett av prismene ble forsøkt kjørt til brudd våren 2014 uten hell.

3.2 Prismetest

3.2.1 Dimensjonering av prismene

Valg av dimensjon på prismene har betydning for resultatene av trykktestingen. Det var Jettli og Sæther i samarbeid med SINTEF som bestemte størrelsen på prismene, og de tok hensyn til slankhet som er beskrevet i deres masteroppgave:

Dimensjonene til prismene ble bestemt ut fra ønsket om å oppnå en bestemt slankhet. Ved for liten slankhet vil randforstyrrelsene ved kontaktsonen påvirke resultatet og ikke gi representative målinger, ettersom det blir skapt en omslutningseffekt i topp og bunn av prøvestykket. Ved en for høy slankhet på elementene vil de knekke ut som søyler. Det er ønskelig med en enaksiell spenningstilstand i midten av prøvestykket slik at det kun er fiberarmering som bidrar til å forhindre tverrutvidelse.

Som nevnt i litteraturstudiet viser forsøk at elementer med slankhet rundt 2,5 er vil en unngå påvirkning av randforstyrrelser. Dette indikerer at det blir dannet en sone i midten med tilnærmet uniform enaksiell spenningstilstand der bruddet oppstår, og midtsonen vil da være upåvirket av randbetingelsene. [20, p. 18]

Størrelsen på prismene ble dermed satt til 150mm*150mm*375mm, og ønsket om slankhet på 2,5 ble følgelig oppnådd:

$$\lambda = \frac{l}{d} = \frac{375\text{mm}}{150\text{mm}} = 2,5$$

Fibrene som ble brukt i prismene var av typen Dramix 65/60, som tilsvarer fibertypen benyttet i flere av bjelketestene fra tidligere masteroppgaver fra NTNU.

3.2.2 Utførelse av prismetest

Test av prismene ble utført i henhold til NS-EN 12390-3:2009 - Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet. [21] Testriggeren for trykktesting av prismene ble satt opp av laboratoriearbeiderne ved NTNU (**Figur 3.2**). Under testing ble prismet plassert mellom 2 metallplater (**Figur 3.3**), metallplatene hadde overflateareal på 150*150 mm og tykkelse 25mm. For å unngå eksentrisk belastede prizmer, og isteden få et jevnt trykk over hele overflaten for å oppnå sentrisk trykk, ble det plassert en sfærisk sirkel på toppen av prismet (**Figur 3.3**). Siden flere av prismene fra testingen i 2014 hadde eksplosive brudd, var det risiko for flyvende objekter under trykktestingen. Det ble derfor satt opp og skrudd fast en kvadratisk

boks laget av plast rundt prismet under testing (**Figur 3.2**). Personer i området ble også bedt om å ha på seg hørselvern og holde god avstand til forsøket. Se bilde av det ferdige oppsettet på **Figur 3.2**.

Våren 2014 ble det benyttet en maskin ved navn Howden 1000 kN. Våren 2015 var det blitt installert en ny maskin som hadde en økt trykkapasitet slik at sentrisk testing på normalbetong kunne bli gjennomført. Ifølge Standarden [21] skal maskinen ha en konstant pålastningshastighet innenfor området $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, men for å gjennomføre testen så likt som Master2014 [20] ble belastningen satt til 0,3 mm/min. Grunnen for at de valgte å sette belastningen til 0,3 mm/min, var at det ikke er ønskelig med en konstant pålastningshastighet i disse forsøkene. Etter brudd på prismene vil motstanden reduseres, og maskinen vil kompensere for dette tapet og momentant knuse prismene.



Figur 3.2: oppsett av testrigg



Figur 3.3: Sfærisk sylinder t.v. og metallplater t.h.

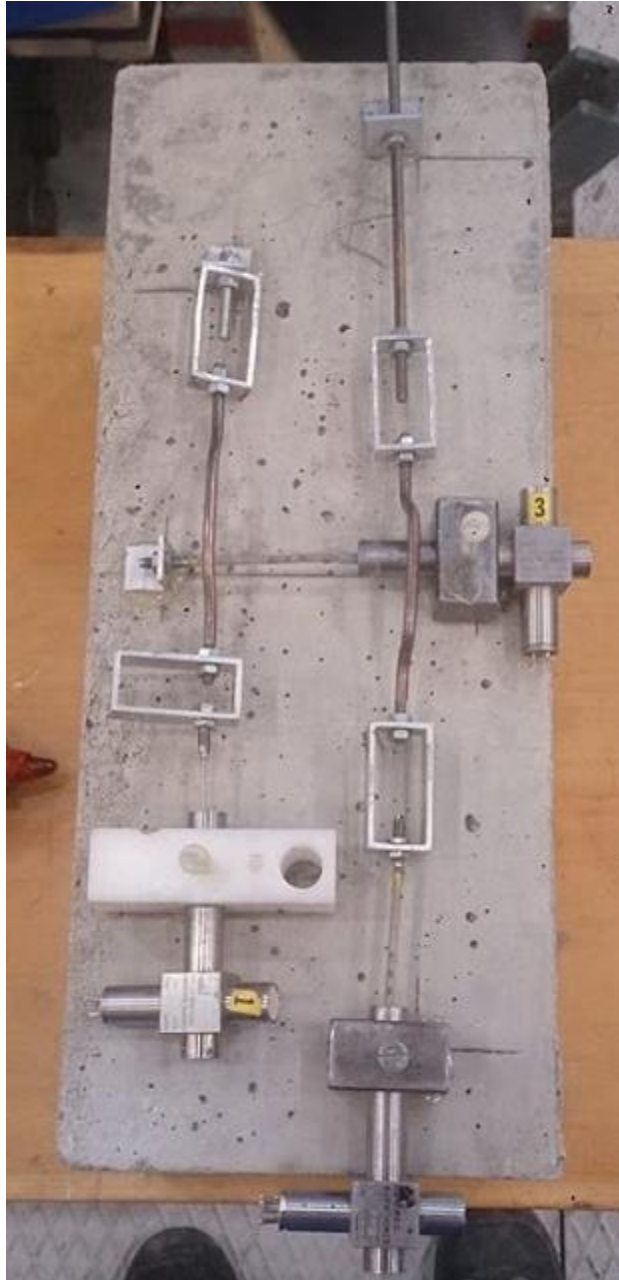
3.2.3 Instrumentering av prismene

Ved test av prismene skulle det måles forskyvninger både på langs og på tvers, og maksimalt trykk prismet kan ta opp før det gikk til brudd.

For å måle forskyvninger på prismet ble det satt på totalt 6 givere/målere, 3 på nordsiden og 3 på sørsiden. På hver side var det 2 langsgående målere som var på henholdsvis 300 mm og 200 mm, og disse målte langsgående forskyvninger. Det var også en tverrgående måler på 100 mm på nord- og sørsiden som målte tverrforskyvning (**Figur 3.4**). For å oppnå ønsket lengde på målerne, ble de satt sammen av ulike komponenter. De ble deretter limt på overflaten til betongen (**Figur 3.7**). Det var viktig å få mekanismen helt stiv slik at målingene ble så nøyaktige som mulig. For å få mekanismen stiv ble alt av skruer strammet og rikelig med lim ble brukt slik målerne var festet godt til betongen.

Måleinstrumentene som ble benyttet til å måle forskyvninger var LVDT (Linear variable differential transformer). LVDT-målerne består av en kjerne, som er et bevegelig element som ligger i en spole uten at kjernen og spolen er i fysisk kontakt. Når kjernen beveger seg friksjonsløst inni spolen, vil den induerte spenningen endre seg. Denne spenningsendringen kan konverteres til lengdeendring av kjernen, i dette tilfellet antall millimeter forskyvning. Siden kjernen ikke er i fysisk kontakt med spolen, er systemet friksjonsløst og nøyaktig. [22]

På figur **Figur 3.4** vises det de 3 målerne/giverene satt sammen av forskjellige elementer. **Figur 3.5** viser et bilde av kjernen til en LVDT måler.

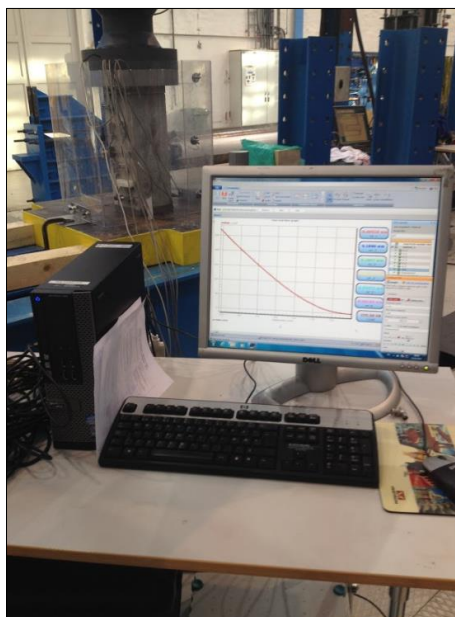


Figur 3.4: oppsett av målerne. 3 målere: 2 langsgående på 200 mm (til venstre) og 300mm (til høyre) og en tverrgående på 100mm



Figur 3.5: LVDT kjerne. [22]

LVDT-ene ble koblet til en HBM spider8 som videre ble koblet til en bærbar PC (**Figur 3.6**) som kjørte programvaren CatmanAP V3.2.2. Instron 8800 som styrte hastigheten på riggen ble også koblet til spideren. Ved å koble LVDT-ene og Instron 8800 fikk vi registrert forskyvninger og last som ble påført prismet. Hastigheten på registrering av data ble satt til 2 Hz på de 2 første prismene, og på de siste 4 prismeprovvene ble det satt til 50 Hz ved en feiltakelse. 1 Hz tilsvarer én registrering per sekund.



Figur 3.6: Bærbar PC for registrering av data fra prismetest



Figur 3.7: pålimt måler

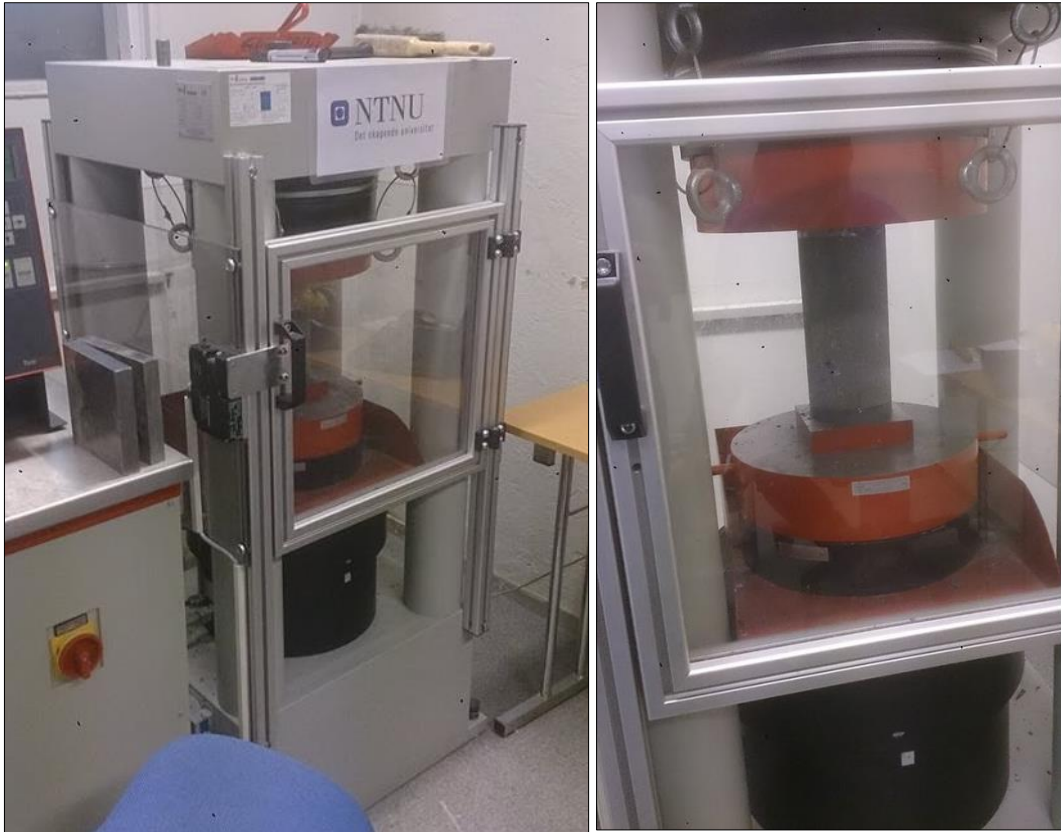


Figur 3.8: oppsett av målere

3.3 Sylindertest

Sylindrene som ble testet var 200 mm høye med en diameter på 100 mm. Dette er standard dimensjoner.

Trykktesting av sylindrene ble utført i henhold til NS-EN 12390-3:2009 - Prøving av herdnet betong - Del 3:Prøvelegemers trykkfasthet. [21]. Ved test av sylindrene skulle maksimalt trykk sylindrene tålte før de gikk til brudd måles. Ved utførelse av testen ble trykkmaskinen Tonitechnic (**Figur 3.9**) benyttet, og dataene ble registret på en bærbar maskin med programvaren Testxpert (**Figur 3.10**). Sylindrene ble først slipt for å sikre jevn overflate, som igjen førte til at trykklasten ble påført jevnt fordelt. Deretter ble sylindrene veid i vann og luft. Under testing ble sylindrene plassert mellom to metallplater. Standardens [21] krav om pålastningshastighet på $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ble fulgt.



Figur 3.9: Oppsett på sylindertest



Figur 3.10: Bærbar PC for registrering av data fra sylindertesten

3.4 Bjelketest

Bjelkene hadde standard dimensjoner, dvs. lengde på 550 mm og tverrsnittsareal på 150 x 150 mm. Testing av bjelkene ble utført i samsvar med metoden beskrevet i NS-EN 14651:2005+A1:2007 [23]. Hensikten med testing av bjelker med fibre var å måle resterende bøyestrekfasthet ved forskjellige rissvidder. Før testing hadde det blitt saget et hakk i bjelkenes underkant midt i spennet for å sørge for at riss starter samme sted hver gang. Hvis risset startet andre steder ville prøven bli forkastet. Utsagingen, eller notchet, var 5 mm bredt og 25 mm dypt. Spennlengden på bjelketesten var 500 mm, og last ble påført midt i spennet.

Metoden i standarden tar utgangspunkt i måling av rissvidden i underkant av bjelken (CMOD). Testutførelsen avviker fra standarden på dette punktet ved at det ble målt nedbøyning av bjelken midt i spennet. Standarden tar riktignok hensyn til også denne målemetoden, og inkluderer formel for relasjonen mellom nedbøyning og rissvidde:

$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04$$

Det gir følgende tabell for relasjonen mellom CMOD og nedbøyning:

Tabell 3.2 Relasjon mellom CMOD og nedbøyning

	CMOD	δ
Prop.grense	0,05	0,08
CMOD ₁ = δ_1	0,5	0,47
CMOD ₂ = δ_2	1,5	1,32
CMOD ₃ = δ_3	2,5	2,17
CMOD ₄ = δ_4	3,5	3,02

For å måle nedbøyning midt på bjelken ble det plassert 2 LVDT målere (**Figur 3.11**) på hver side av bjelkens midtre del. Pålastningshastigheten fra riggen ble satt til 0,20 mm/min og registrering av data ble satt til 2 Hz. Når begge LVDT målerne målte en forskyvning på 4 mm eller mer ble forsøket avsluttet.



Figur 3.11: LVDT måler



Figur 3.12: Oppsett av bjelketest

4 Resultater

I det følgende kapittelet vil resultatene fra laboratoriumsarbeidet bli presentert. Ettersom testingen har vært en videreføring av arbeidet til Jettli og Sæther [20], er alle resultat presentert med oppsett i samsvar med deres masteroppgave.

4.1 Resultater sylindertester

I **Tabell 4.1** finner vi en oversikt over betongsylindernes gjennomsnittlige (μ) og karakteristiske verdi (X) til sylindernes trykkfasthet (f_{ck}) og romdensitet (ρ), samt tilhørende standardavvik (S). Tabellen er inndelt i forskjellen mellom lett- og normalbetong, og fiberinnhold målt i volumprosent. For detaljerte resultater for hver sylinderprøve og utregninger på middelverdi, karakteristisk verdi og standardavvik, se vedlegg B og F.

Tabell 4.1: Resultater sylindertester

Lettbetong						
Fiber [%]	X_{fck} [N/mm ²]	μ_{fck} [N/mm ²]	S_{fck} [N/mm ²]	X_p [kg/m ³]	μ_p [kg/m ³]	S_p [kg/m ³]
0,5	46,0	47,1	0,7	1721,8	1762,9	25,1
1	35,5	47,9	7,6	1563,8	1809,8	150,0
Normalbetong						
0,5	65,7	71,8	3,7	2219,7	2264,5	27,3
1	74,3	77,1	1,7	2267,3	2345,1	47,4

Den gjennomsnittlige trykkfastheten til lettbetong med 0,5 % og 1 % fiberinnhold er 47,1 N/mm² og 47,91 N/mm², mens gjennomsnittlig trykkfasthet til normalbetong med 0,5 % og 1 % fiberinnhold er henholdsvis 71,8 N/mm² og 77,1 N/mm². For lettbetong med 1 % fiberinnhold er standardavviket på 7,6 N/mm². Det store standardavviket skyldes at prøve 5 scoret høyt på trykkfasthet sammenlignet med de to andre prøvene (se vedlegg B).

4.2 Resultater bjelketester

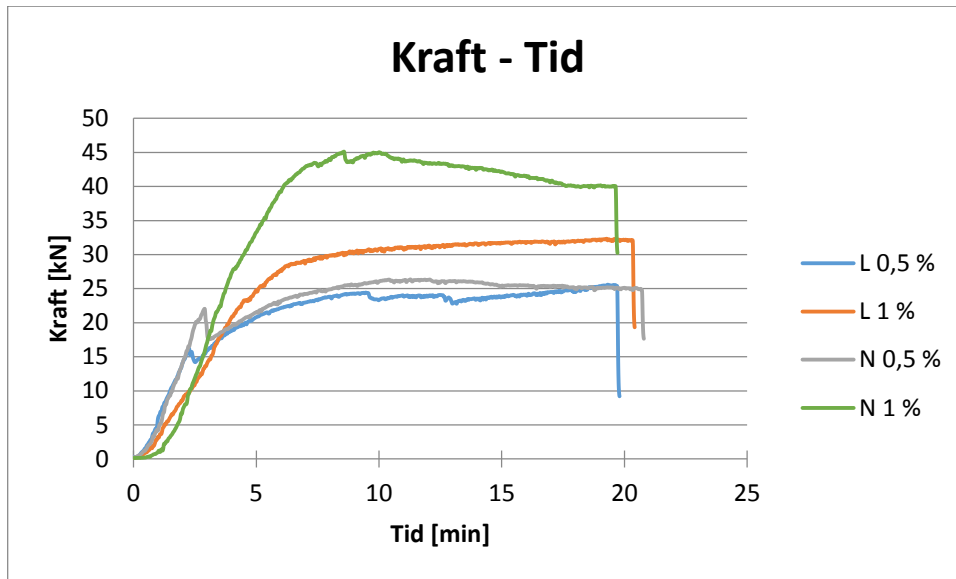
I **Tabell 4.2** finner vi en oversikt over bjelkenes gjennomsnittlige (μ) og karakteristiske verdi (X) til betongens strekkfasthet, samt tilhørende standardavvik (S). Verdiene representerer strekkfasthet ved 1. riss, altså ved proporsjonalitetsgrensen. Tabellen er inndelt i forskjellen mellom lett- og normalbetong, og fiberinnhold målt i volumprosent. For detaljerte resultater for hver bjelkeprøve og utregninger av middelerverdi, karakteristisk verdi og standardavvik, se vedlegg C og F.

Den gjennomsnittlige strekkfastheten til lettbetong med 0,5 % og 1 % fiberinnhold er 5,2 N/mm² og 4,3 N/mm², mens gjennomsnittlig strekkfasthet til normalbetong med 0,5 % og 1 % fiberinnhold er henholdsvis 6,7 N/mm² og 7,1 N/mm².

Tabell 4.2: Resultater bjelketester

Lettbetong			
Fiber [%]	X_{σ} [N/mm ²]	μ_{σ} [N/mm ²]	S_{σ} [N/mm ²]
0,5	4,8	5,2	0,2
1	2,0	4,3	1,4
Normalbetong			
0,5	4,9	6,7	1,1
1	5,0	7,1	1,3

Tabell 4.3 og **Figur 4.1** presenterer resultatene fra kraft og forskyvning i henhold til Standard.



Figur 4.1: Kraft-Tid for bjelker

Tabell 4.3: Resultatene fra kraft forskyvning for bjelker i henhold til standard

δ [mm]	Kraft [kN]			
	Lettbetong		Normalbetong	
	0,5 %	1 %	0,5 %	1 %
0-0,08	16,2	13,8	22,0	23,5
$\delta_1 = 0,47$	19,6	26,8	21,4	39,2
$\delta_2 = 1,32$	23,8	30,5	25,5	44,3
$\delta_3 = 2,17$	23,9	31,3	26,1	43,4
$\delta_4 = 3,02$	24,0	31,9	25,4	41,7

Disse verdiene fører til følgende verdier for bøyestrekfastheten f :

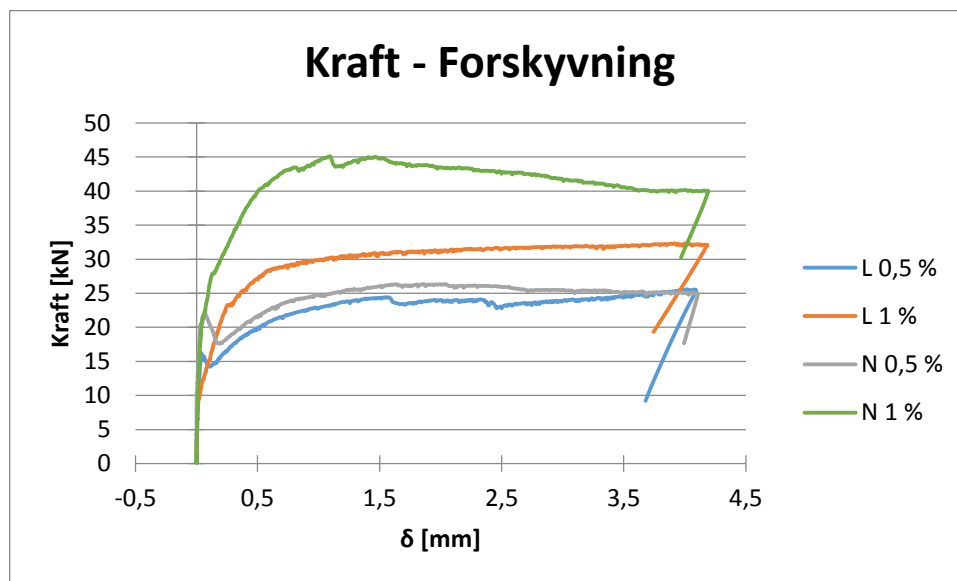
Tabell 4.4: Bøyestrekfasthet for bjelker

	Lettbetong		Normalbetong	
	0,5 %	1 %	0,5 %	1 %
$f_{ct,L}$	5,7	4,9	7,7	8,3
$f_{R,1}$	6,9	9,4	7,5	13,8
$f_{R,2}$	8,4	10,7	9,0	15,6
$f_{R,3}$	8,4	11,0	9,2	15,3
$f_{R,4}$	8,4	11,2	8,9	14,7

$f_{ct,L}$ er bjelkens bøyestrekfasthet ved proporsjonalitetsgrensen, mens $f_{R,i}$ representerer bjelkenes resterende bøyestrekfasthet ved forhåndsdefinerte rissverdier.

$$f = \frac{3Fl}{2bh_{sp}^2}$$

Figur 4.2 viser de ulike bjelketypenes forhold mellom kraft og forskyvning i senter av bjelken.



Figur 4.2: Kraft - Forskyvning for bjelker

4.3 Resultater prismetester

Det ble totalt testet 6 prizmer. 3 prizmer med fiberinnhold 0 %, 1 prisme med fiberinnhold 0,5 % og 2 prizmer med fiberinnhold 1 %. Tabell 1 viser ID-nummer til de ulike prøvestykkene, og disse samsvarer med ID-numrene til prismene brukt i Jettli og Sæthers masteroppgave fra 2014 [20]. Ett av prismene med 0 % fiber ble testet uten bruk av sfærisk sylinder, og resultatene fra dette prismet er derfor ikke tatt hensyn til.

Tabell 4.5 viser resultatene fra prismetestene. Det blir presentert maks last og spenning målt i kN og N/mm² før prismene gikk til brudd. Det er vist et gjennomsnitt av de totalt 4 langsgående tøyningene på nord- og sørsiden av prismet ved 60, 90 og 100 % oppnåelse av bruddlast med tilhørende standardavvik. Et gjennomsnitt av de to tverrgående tøyningene på nord- og sørsiden av prismet ved 60 og 100 % oppnåelse av bruddlast er også presentert. Det er ikke regnet ut standardavvik på de tverrgående prøvene siden det kun er to registrerte målinger.

Tabell 4.5: Identifikasjon av prismetester

Betongtype	Serie-ID	Prizmer	
		Sentrisk	Eksentrisk
Lettbetong 0 %	LA	LA 1-2	LA 3-4
Lettbetong 0,5 %	LB	LB 1-2	LB 3-4
Lettbetong 1 %	LC	LC 1-2	LC 3-4
Normalbetong 0 %	NA	NA 1-2	NA 4*
Normalbetong 0,5 %	NB	NB 1**	NB 3-4
Normalbetong 1 %	NC	NC 1-2	NC 3-4

* Kun én eksentrisk test av sikkerhetshensyn på grunn av voldsomt eksplosivt brudd.

** Kun én prøve fordi den andre prøven ble forsøkt testet til brudd i 2014. Rigger hadde ikke nok kapasitet.

Tabell 4.6 – Nøkkelværdier fra prismetesting

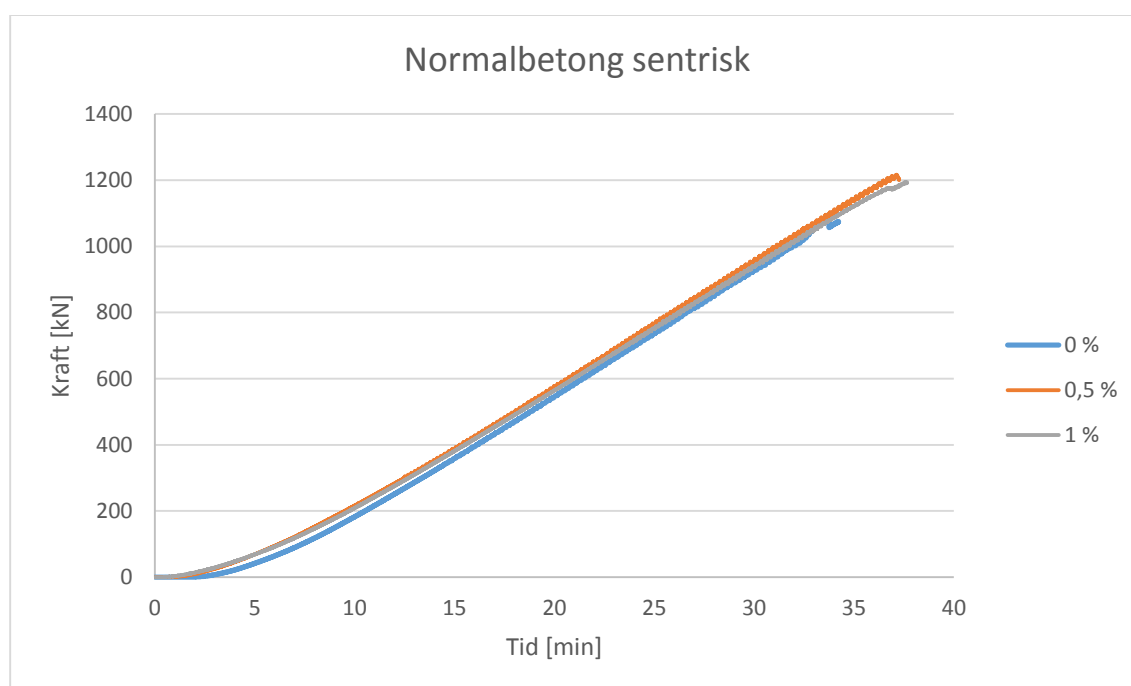
Prøvestykke	F_{maks} [kN]	σ_{maks} [N/mm ²]	$\epsilon_{br,tverr}$ [‰]	$\epsilon_{br,langs}$ [‰]	S_x	$\epsilon_{br,90l}$ [‰]	$S_x 90$	$\epsilon_{br,60l}$ [‰]	$S_x 60$	$\epsilon_{br,60t}$ [‰]
NA1	1169,7	52	0,19	2,07	0,45	1,7	0,35	1,03	0,2	0,04
NA2	1075	47,8	4,35	1,9	0,25	1,61	0,2	1,01	0,14	0
NB1	1216,7	54,1	0,49	2,33	1,13	1,72	0,49	1,04	0,32	0,14
NC1	1238,3	55	0,66	2,88	1,01	2,23	0,68	1,52	0,55	0,07
NC2	1163,7	51,7	0,05	1,64	1,74	1,52	0,95	0,85	0,84	0,52

Grafene i dette kapitlet representerer gjennomsnittet av testresultatene fra prøvestykkene med samme fiberinnhold, og vil derfor sammenligne hvordan ulik fiberprosent påvirker betongens oppførsel. Grafer for hvert enkelt prisme og hver enkel giver er presentert i vedlegg. Følgende resultater vil bli presentert i respektiv rekkefølge; sammenhengen mellom påført kraft og tid, arbeidsdiagram, langsgående tøyning over tid, normalisert spenning og tøyning og tverrtøyning over tid. Det er også presentert tabeller med bruddlast, maksimal spenning, maksimal langsgående tøyning og maksimal tverrgående tøyning.

4.3.1 Kraft – tid

Tabell 4.7: Bruddlast for prismer

	NA1	NA2	NB1	NC1	NC2
Bruddlast [kN]	1170	1075	1200	1238	1151



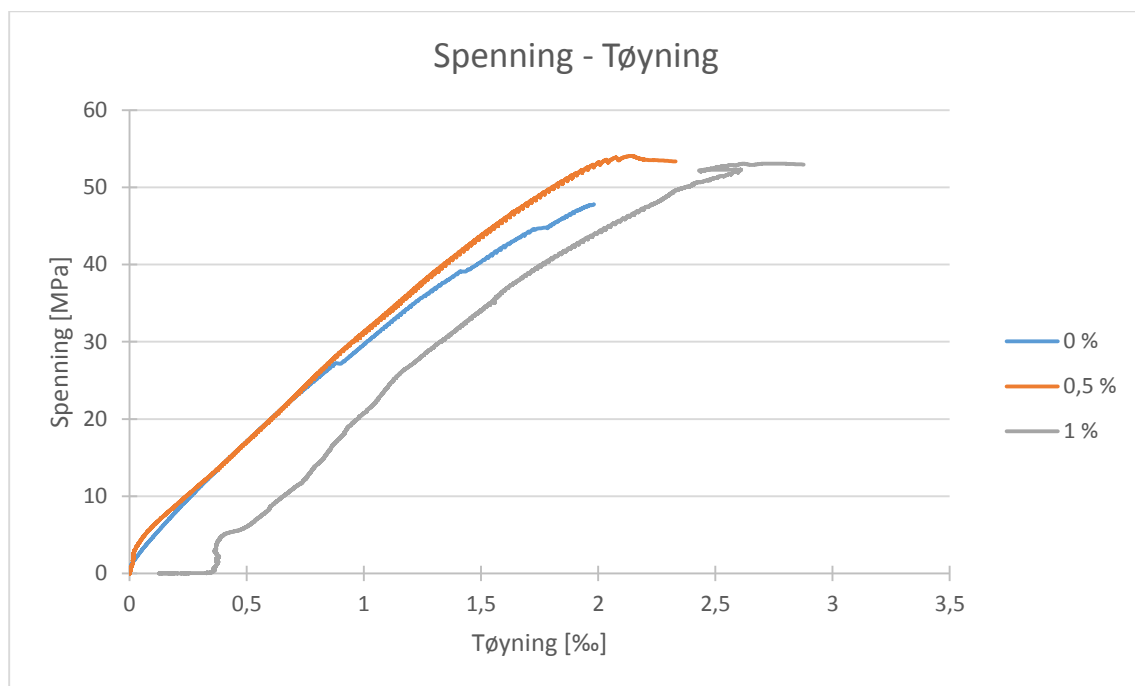
Figur 4.3: Kraft – Tid for prismer

Prismene oppførte seg likt på tross av ulik fiberandel. Bruddet var sprøtt for alle prismene, men for prismene uten fiber var bruddene også svært eksplosive. Prismene med fiber hadde i gjennomsnitt en noe høyere bruddlast enn prismene uten fiber.

4.3.2 Spenning – tøyning

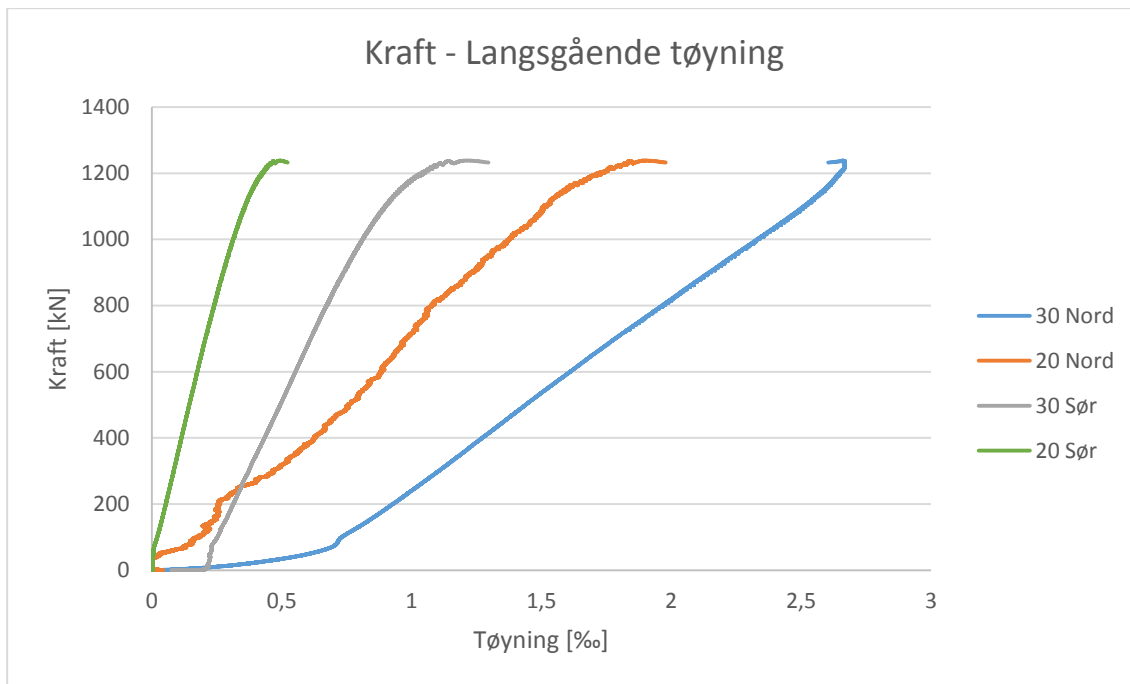
Tabell 4.8: Maksimal spenning og maksimal langsgående tøyning for prismer

	NA1	NA2	NB1	NC1	NC2
Spenning [N/mm ²]	52,0	47,8	54,1	55,0	51,7
Tøyning [%]	2,1	1,9	2,3	2,9	1,6



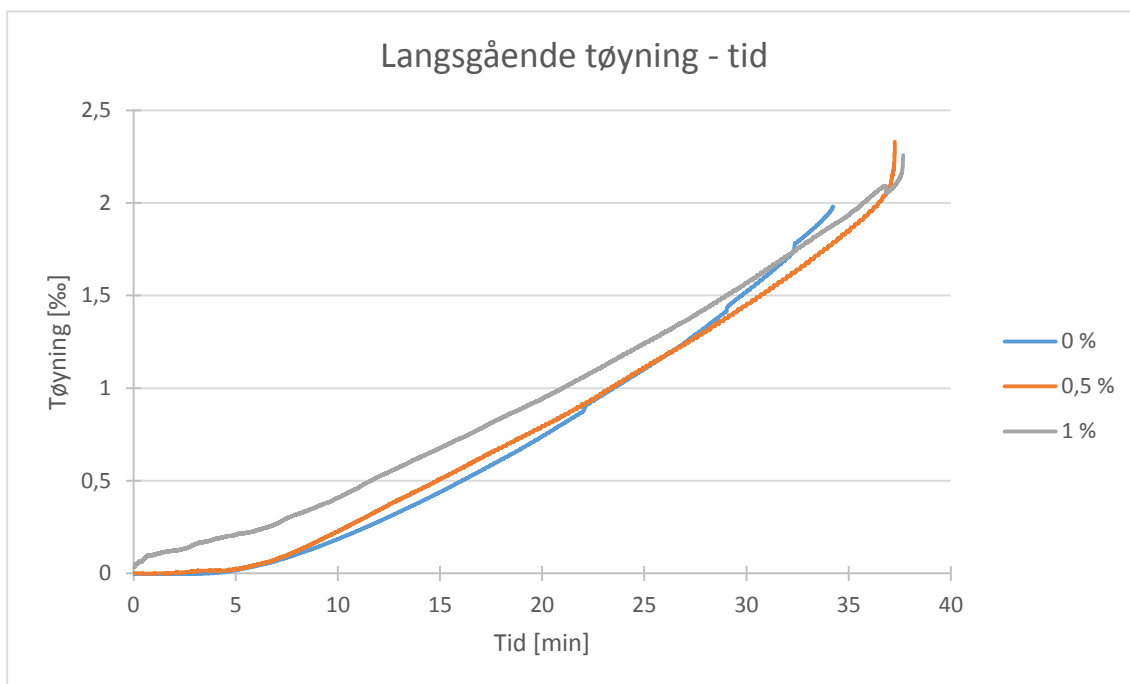
Figur 4.4: Spenning - tøyning

Prismene uten fiber når maks spenning ved maks tøyning. Med fiber blir maks spenning oppnådd før maks spenning er oppnådd, altså tåler prismene noe deformasjon i post-peaksonen, og lastkapasiteten opprettholdes i denne kortvarige sonen. Det tok riktignok kun 8 sekunder fra toppunktet til bruddpunktet for prismet med 0,5 % fiber. Prismene med fiber hadde likt forhold mellom spenning og tøyning under testingen, bare at kurven til 1 %-fiber er forskjøvet på x-aksen. Det ble funnet at den ene giveren på prøve NC1 skilte seg ut ved å registrere mye tøyning for liten last. På denne giveren var antakeligvis ikke skruene strammet godt nok, som gjorde at giveren ikke var helt stiv.



Figur 4.5 – Forskjell på givene for prøve NC1

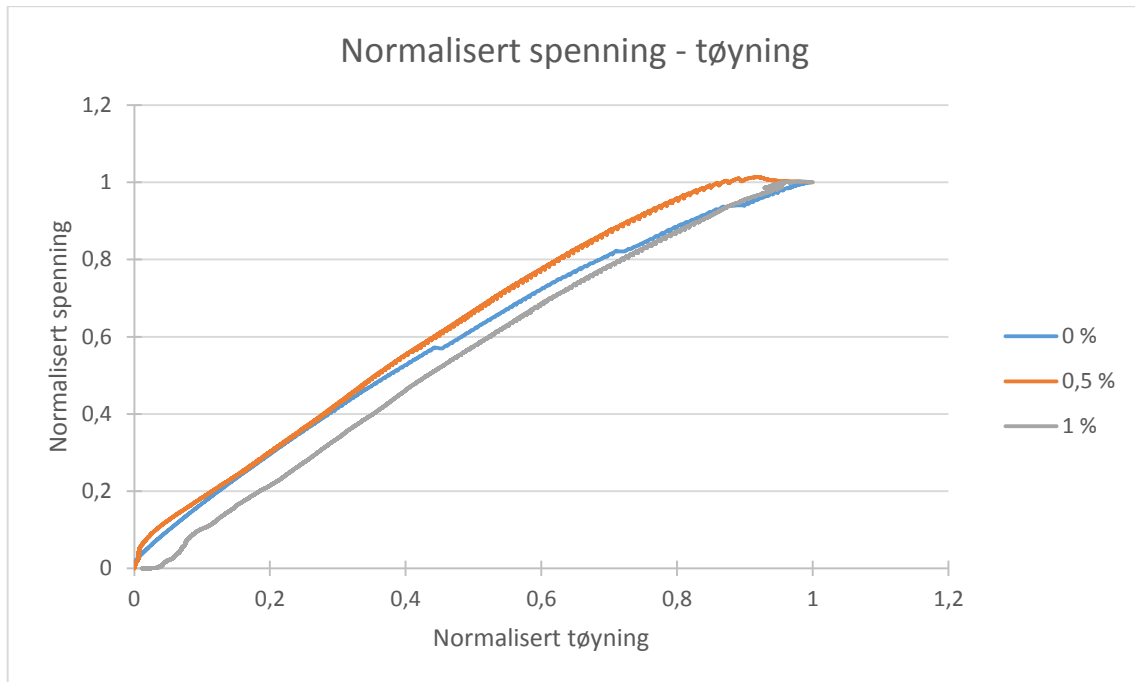
4.3.3 Langsgående tøyning – Tid



Figur 4.5: Langsgående tøyning - Tid

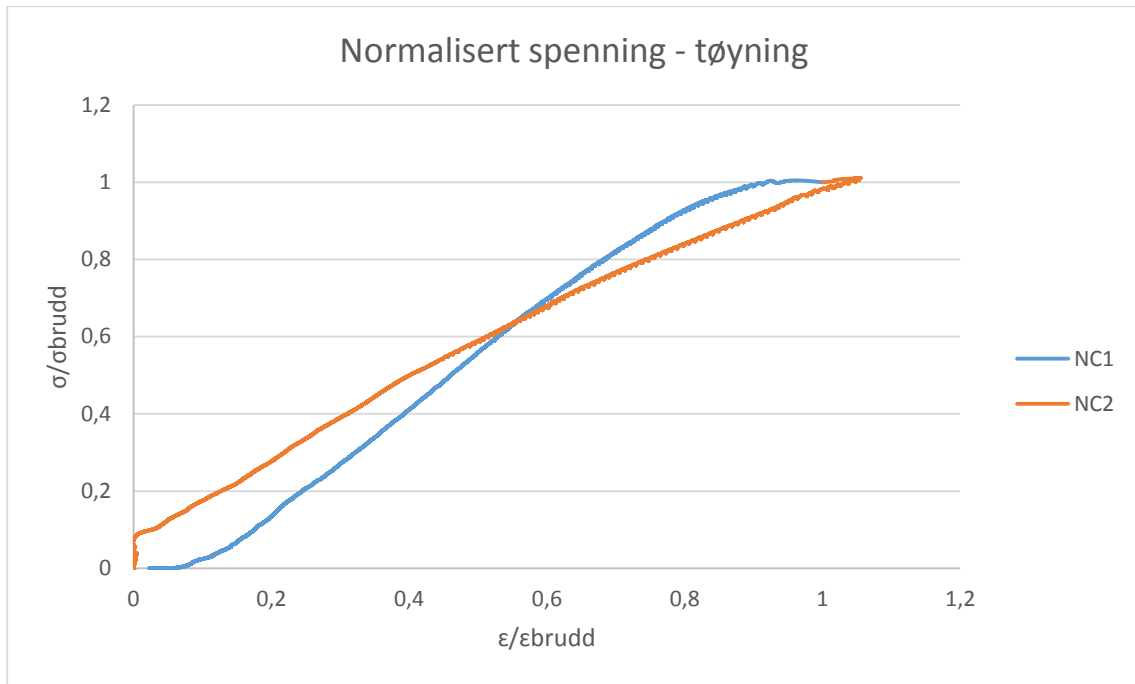
Prismene med fiber viser en liten knekk i kurven før brudd, hvilket antyder at tøyningssendringen per tid økte like før testen ble avsluttet.

4.3.4 Normalisert spenning – tøyning



Figur 4.6: Normalisert spenning – tøyning

Ingen av prismene fikk tøyninger som overskred bruddtøyningen. Prismene med 0,5 % fiber nådde maks spenning allerede ved en tøyning på omtrent 85 % av bruddtøyningen, de andre prismene hadde jevn og nærmest lineær økning av spenning og tøyning. For prismene med 1 % fiber oppførte de to prøvene seg noe ulikt, som vist i figur 4.7. NC1 oppnår spenning tilsvarende bruddspenning allerede ved tøyning på 90 % av bruddtøyningen, mens NC2 øker tilnærmet lineært, men overstiger bruddtøyning med 5 % 15 sekunder før brudd. Både giver 20 nord og 30 sør fikk lavere verdier de siste 15 sekundene av testingen.



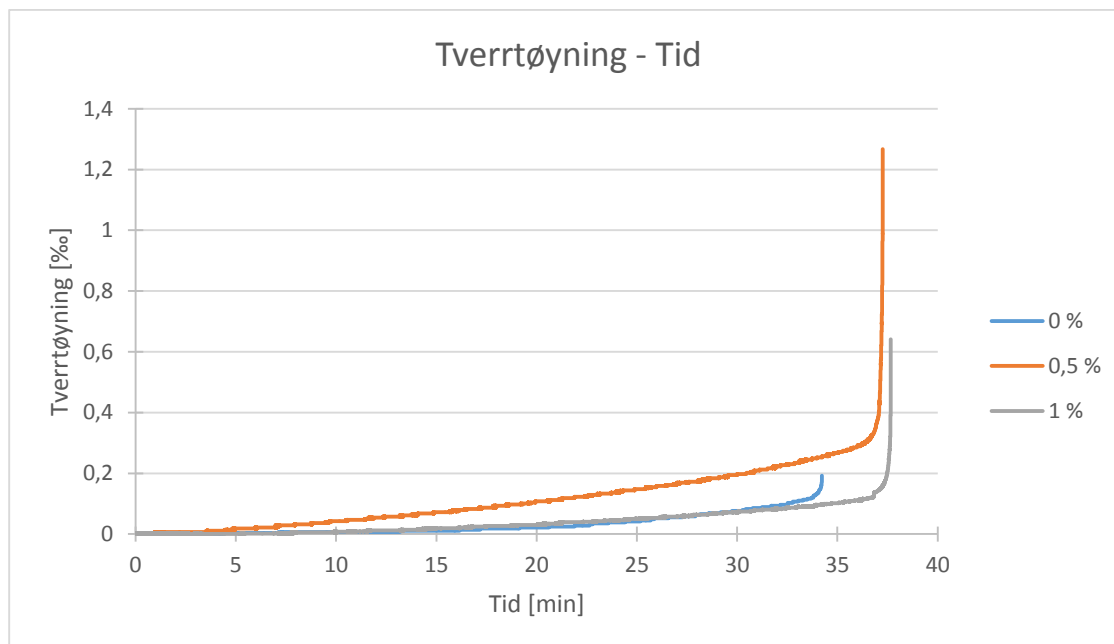
Figur 4.7: Normalisert spenning – tøyning. 1 % fiber

4.3.5 Tverrtøyning – tid

Tabell 4.9: Tverrtøyning

	NA1	NA2	NB1	NC1	NC2
Tøyning [‰]	0,2	N/A*	1,3	1,2	0,2

*For 0 %-prismene er kun resultatene fra NA1 tatt hensyn til. Tverrgiverne på NA2 hang seg opp.



Figur 4.8: Tverrtøyning - Tid

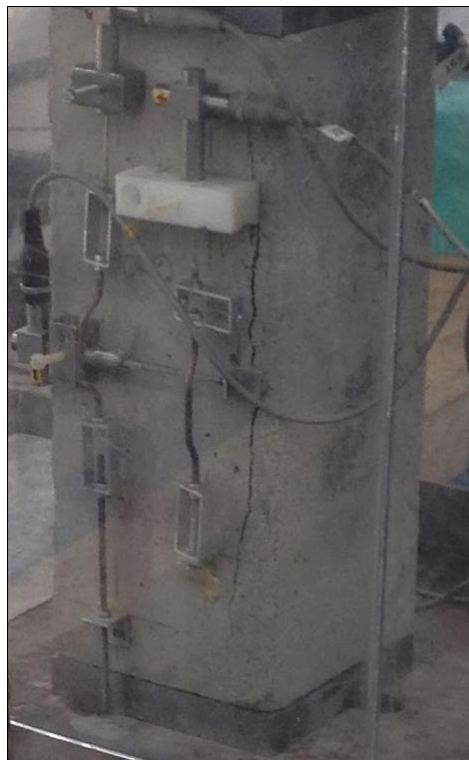
Tverrtøyningen får en markert knekk like før brudd for samtlige prismene. Under testingen ble det observert at når tverrtøyningen begynte å øke eksponentielt kom bruddet. Det ser ut til at tilsatt fiber gir en økning av maks tverrtøyning, men dataene fra **Tabell 4.9** viser stor spredning på lite datagrunnlag. Dessuten bidrar ikke den økte maksimale tverrtøyningen til økt duktilitet når økningen skjer eksponentielt like før brudd.

4.3.6 Bruddform

Samtlige prøver opplevde eksplosivt eller sprøtt brudd når prøvene nådde sin maksimale trykkapasitet. Ved brudd gikk det også et kraftig drønn gjennom lokalene. På grunn av de eksplosive bruddene falt målerne av og videre logging av data ble umulig.

Prismene med 0 % fiberinnhold ble totalt knust ved brudd (**Figur 4.10**), mens prismene med fiberinnhold på 0,5 eller 1 % opprettholdt sin form (**Figur 4.10**), men hadde store skader og påføring av mer last kunne ikke gjøres.

Ved et tilfelle ble det observert en stor sprekke (**Figur 4.9**) som gikk på langs av prismet. Sprekken oppsto 10-15 sekunder før prøven med 0 % fiberinnhold gikk til brudd. På grunn av sikkerheten fikk vi ikke mulighet til å studere prøvene nærmere under testing.



Figur 4.9: Sekunder før brudd



Figur 4.10: Bruddform for 0 % t.v. og 1 % fiberinnhold t.h.

På **Figur 4.11** er det bilde av bruddflaten til normalbetong med 0 % fiberinnhold. Man kan se at bruddlinjen går rundt tilslaget. I bruddlinjen med fiberinnhold (**Figur 4.12**) på 0,5 % eller 1 % fiberinnhold ser man at fibre har dannet en bro over risset, og at flere av fibre har røket eller opplevd pull out.

Figur 4.10 viser bruddlinjen til normalbetong-prisme med fiber. På figuren ser man at bruddlinjen i endesonen går skrått fra hjørnet av prismet inn mot sentrum. I midtsonen av prøvestykket er det en vertikalbruddlinje. Denne bruddlinje oppførselen er gjentakende i flertallet av prismene.



Figur 4.11: Bruddflaten til normalbetong med 0%fiberinnhold

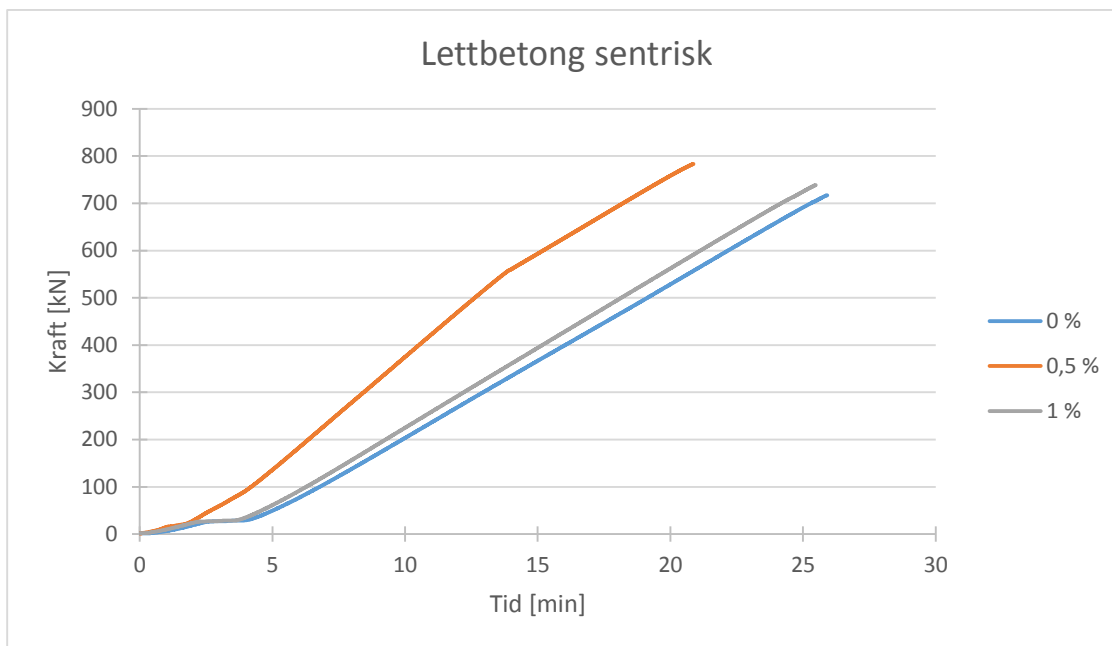


Figur 4.12: Bruddflate til normalbetong med 1% fiberinnhold

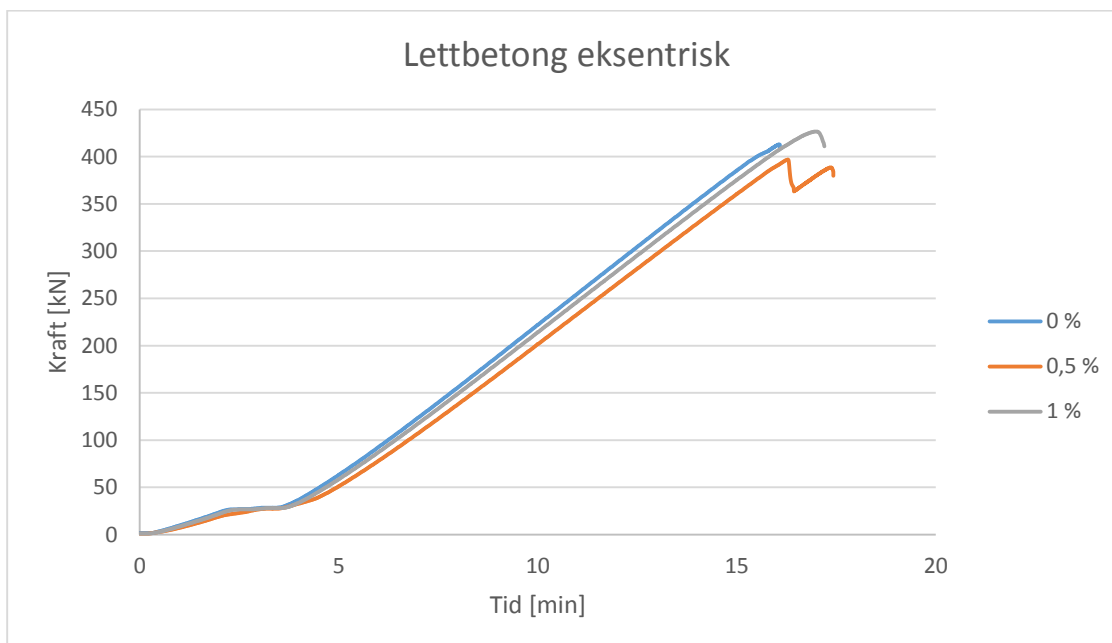
5 Sammenstilling av resultater

I dette kapitlet vil alle resultatene fra den fullstendige prismetestingen presenteres i sammen. Dataene fra masteroppgaven til Jettli og Sæther [20] har blitt brukt til å lage grafer fra testingen normalbetong med eksentrisk trykk og lettbetong med sentrisk og eksentrisk trykk. Hver kurve representerer et gjennomsnitt av to separate trykktestinger.

5.1 Kraft – Tid

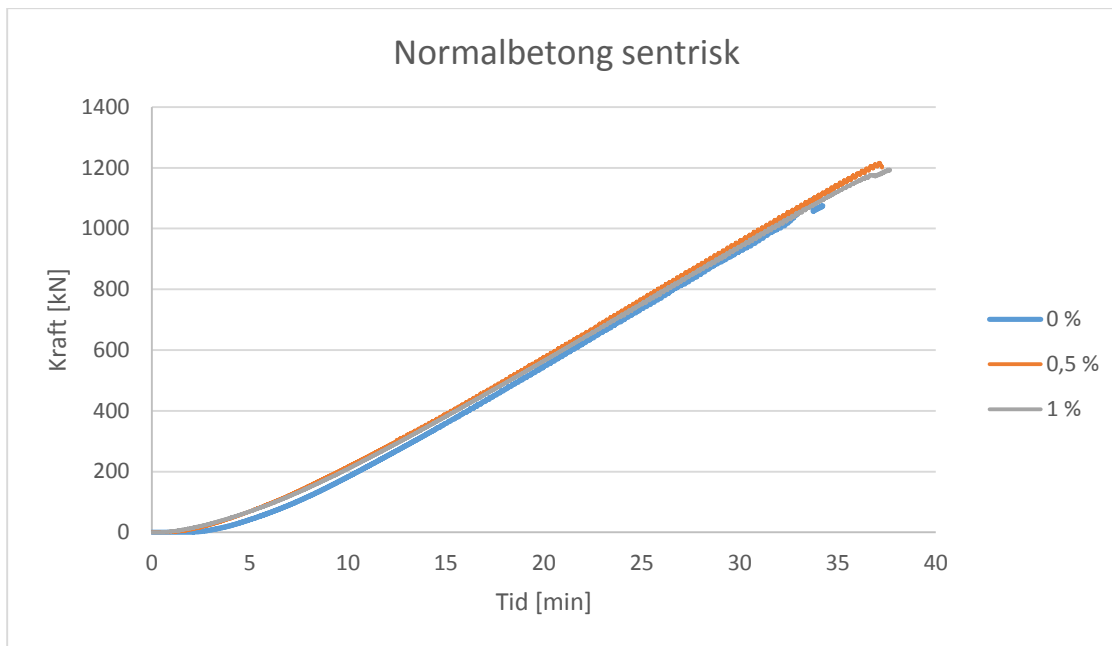


Figur 5.1: Kraft – Tid, lettbetong sentrisk

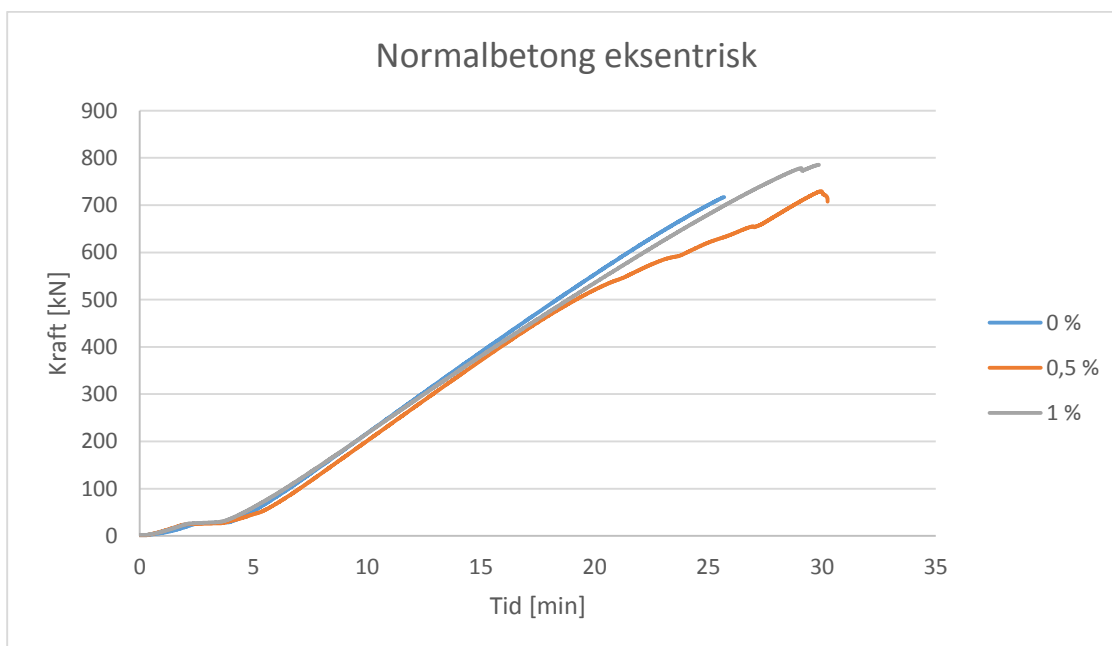


Figur 5.2: Kraft – Tid, lettbetong eksentrisk

For den sentriske testen gikk lettbetong-prismene med 0,5 % fiber til brudd tidligere enn de andre prismene. Bruddlasten var likevel høyere. For de eksentriske testene viste prismene med fiberinnhold tegn til duktil oppførsel, mens 0 % hadde sprøtt brudd.



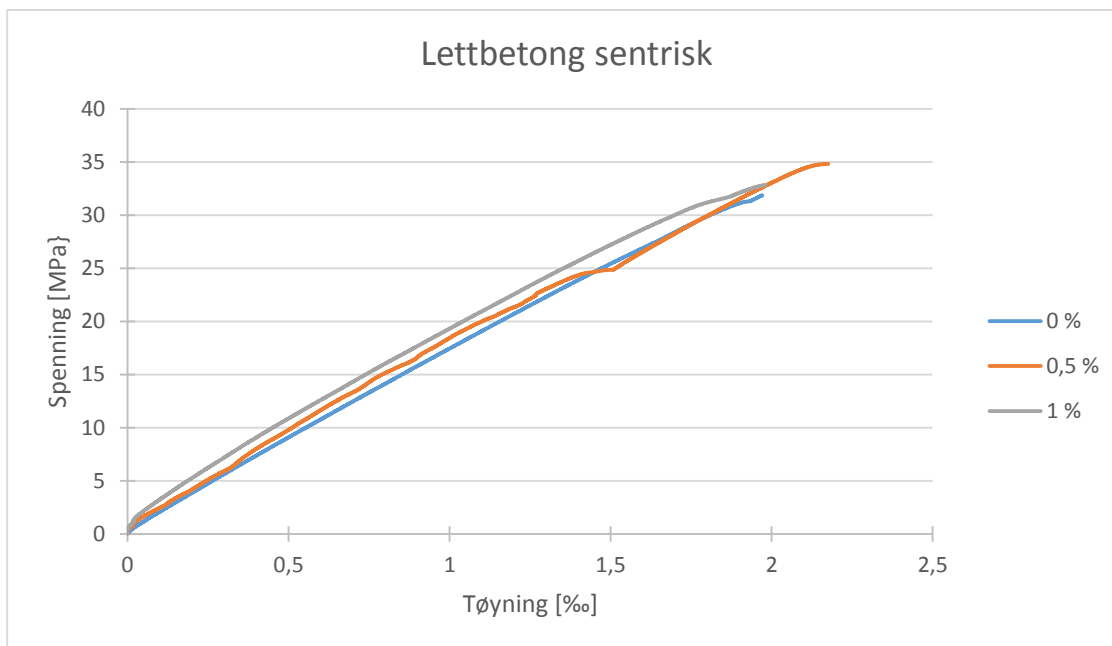
Figur 5.3: Kraft – Tid, normalbetong sentrisk



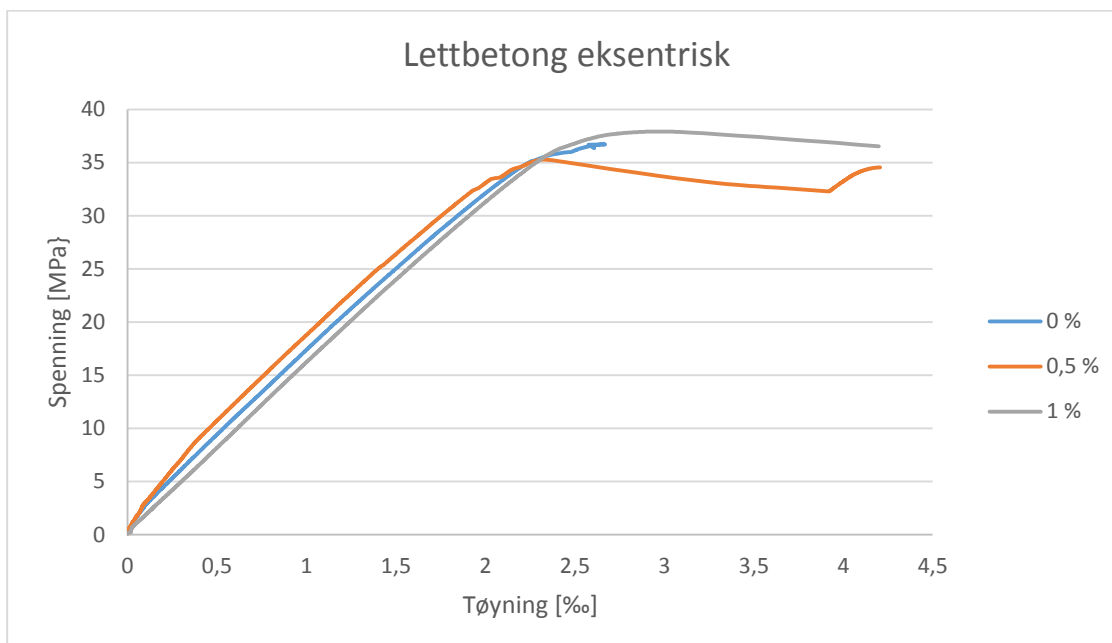
Figur 5.4: Kraft – Tid, normalbetong eksentrisk

Sentrisk testing viste ingen forskjeller i forholdet mellom påsatt kraft og tid, bortsett fra at prismene uten fiber gikk til brudd ved noe lavere bruddlast enn prismene med fiber. Ved eksentrisk testing viste prismene med fiber tegn til duktil oppførsel, mens prismene uten fiber hadde sprøe brudd.

5.2 Spenning – Tøyning

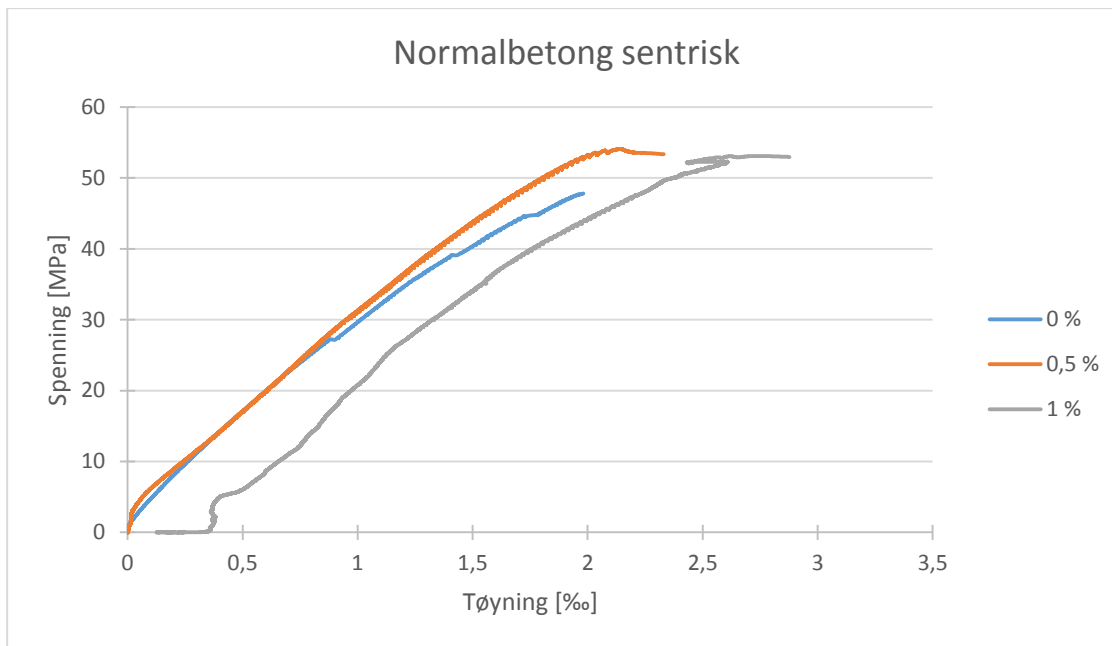


Figur 5.5: Spenning – Tøyning, lettbetong sentrisk

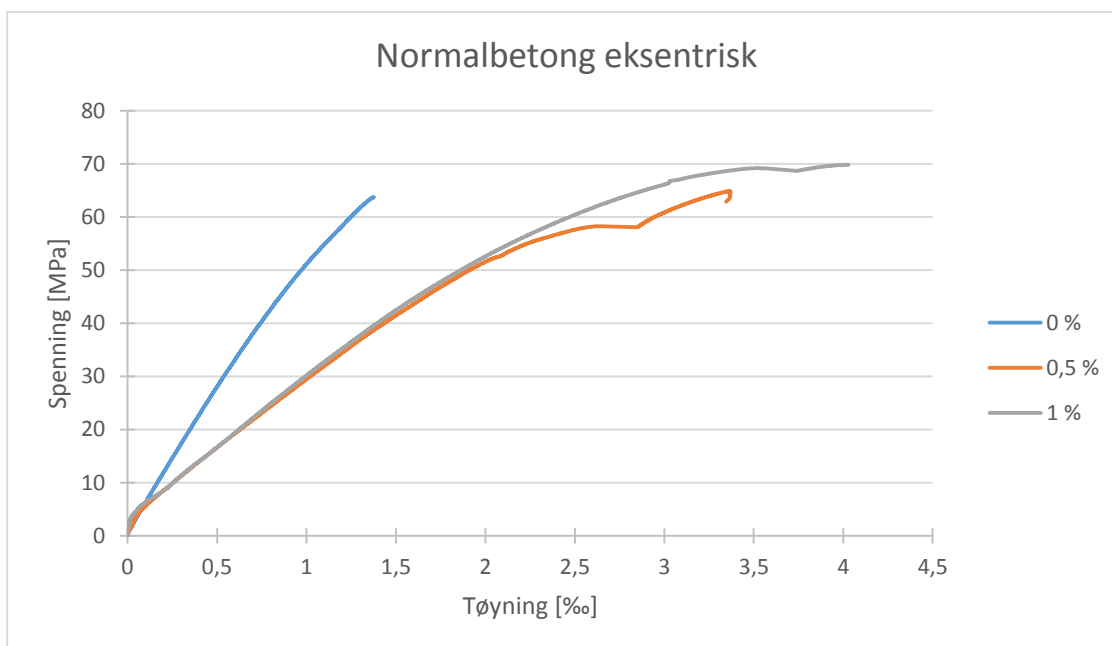


Figur 5.6 Spenning – Tøyning, lettbetong eksentrisk

Arbeidsdiagrammet for lettbetong med sentrisk trykk viser ingen tydelige forskjeller mellom de ulike fiberprosentene. For eksentrisk trykk derimot, viser arbeidsdiagrammet at prismene med fiber får en veldig duktil oppførsel med langsgående tøyninger på over 4 ‰ før testen ble avsluttet. Bruddspenningene er jevnt over like for de ulike fibervolumene, men de eksentriske prøvene har en økning av bruddspenning på 10 - 15 %.



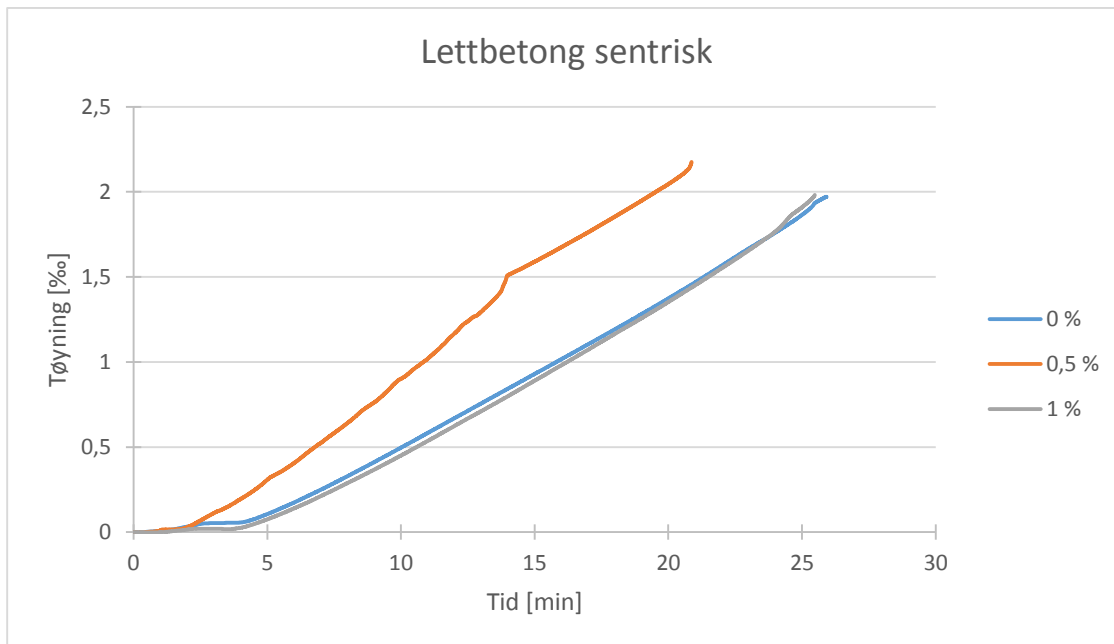
Figur 5.7: Spenning – Tøyning, normalbetong sentrisk



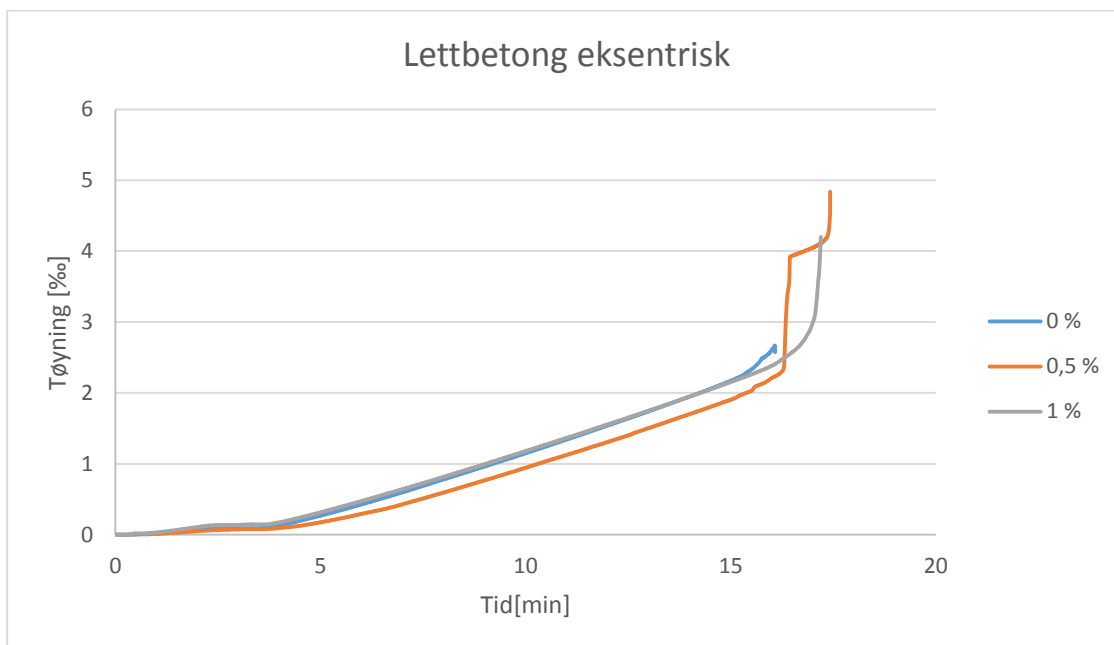
Figur 5.8 Spenning – Tøyning, normalbetong eksentrisk

Arbeidsdiagrammet til sentrisk normalbetong viser at fiber gir prismene en svak duktil oppførsel. Fiberløse normalbetongprismer hadde sprøe og svært eksplosive brudd. Kurvene til prismene med eksentrisk trykk slaker mer ut ved tilsatt fiber. Uten fiber gikk prismet til sprøtt, svært eksplosivt brudd. Bruddspenningen for de eksentriske prismene er 20 – 30 % høyere enn for de sentriske prismene.

5.3 Tøyning – Tid

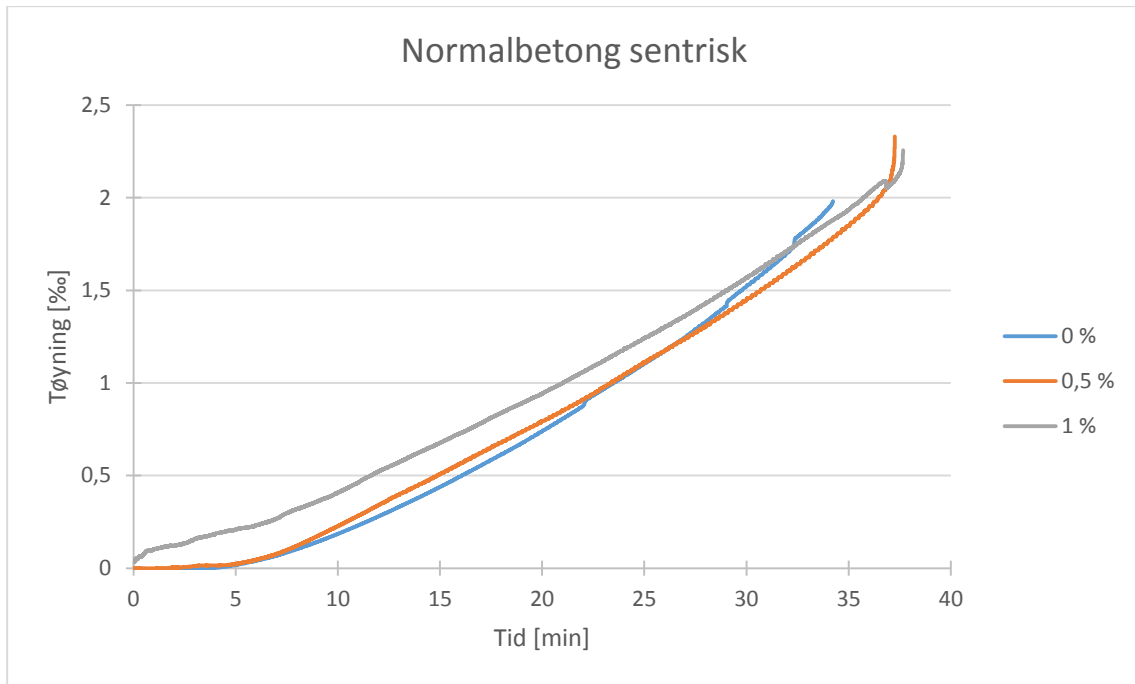


Figur 5.9: Tøyning – Tid, lettbetong sentrisk

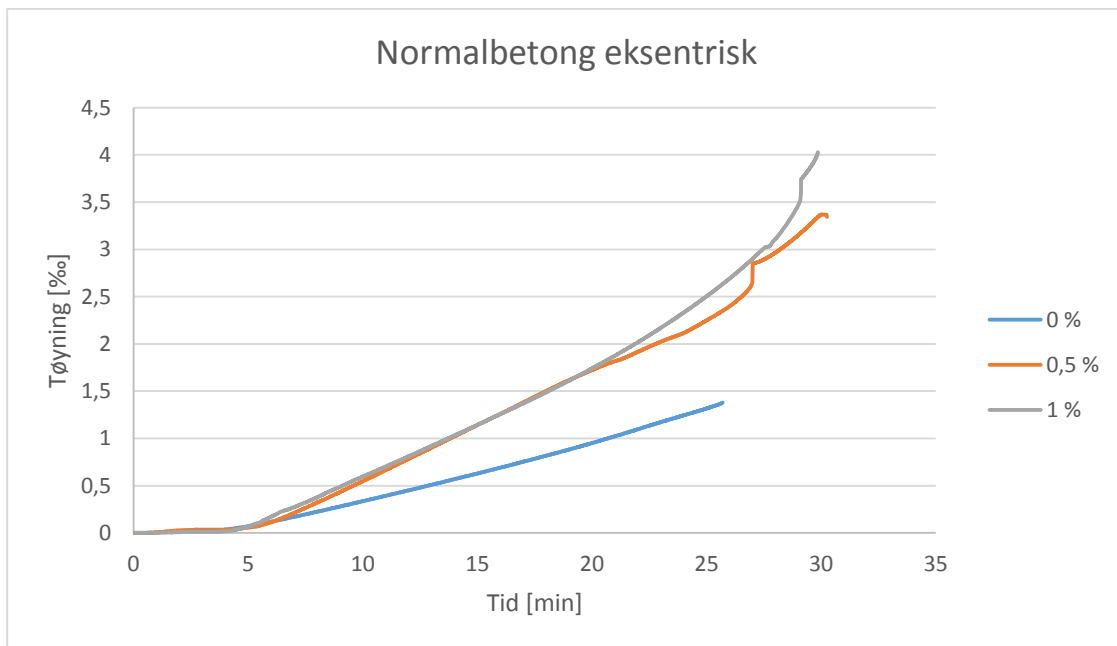


Figur 5.10: Tøyning – Tid, lettbetong eksentrisk

Sentrisk testing viste få forskjeller for de ulike blandinger, med unntak av 0,5 %-prismene som hadde et annet tidsforløp enn de andre (som nevnt i kap. 5.1). Disse prismene gikk gjennomsnittlig til brudd 5 min før de andre. For eksentrisk testing viser prismene med fiber at tøyningene øker mye like før testingen avsluttet.



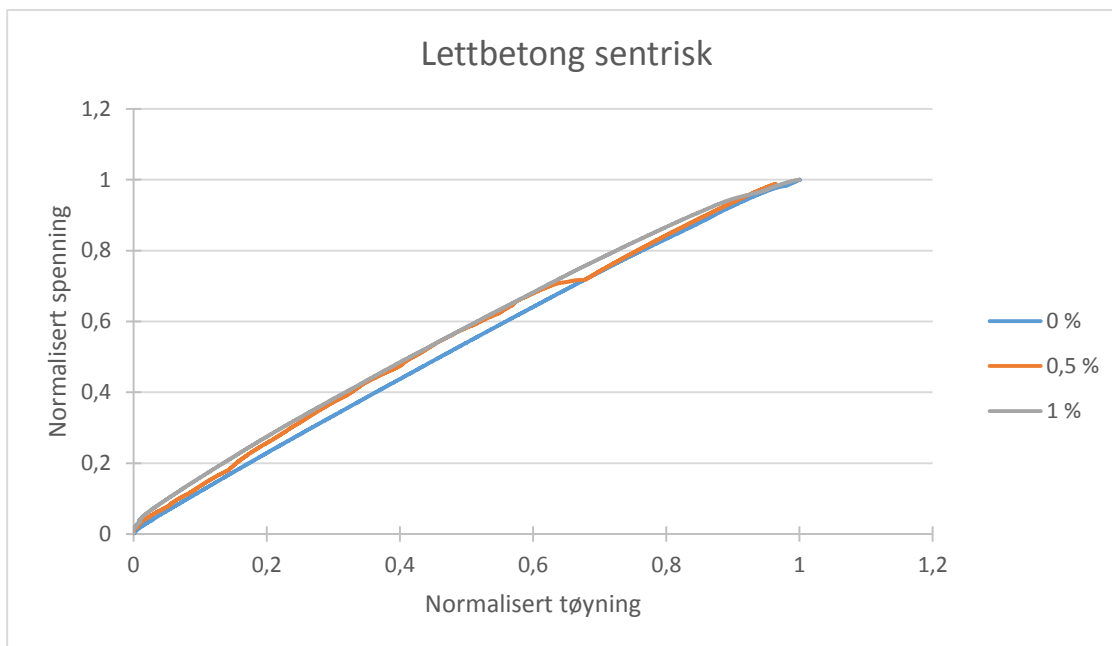
Figur 5.11: Tøyning – Tid, normalbetong sentrisk



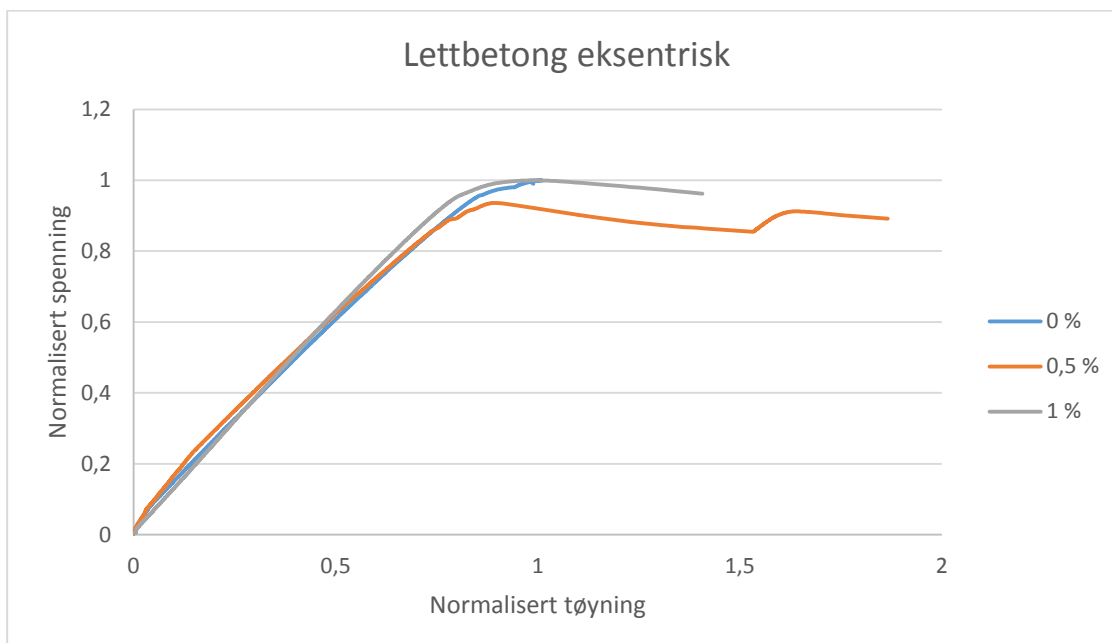
Figur 5.12: Tøyning – Tid, normalbetong eksentrisk

Ved sentrisk belastet normalbetong har prismene med fiber en viss økning i den langsgående tøyningen like før testingen avsluttes. Eksentrisk testing gir prismene en noe slakere tøyningsokning før testingen avsluttes. Fiberløs betong hadde sprøe, eksplosive brudd.

5.4 Normalisert spenning – tøyning

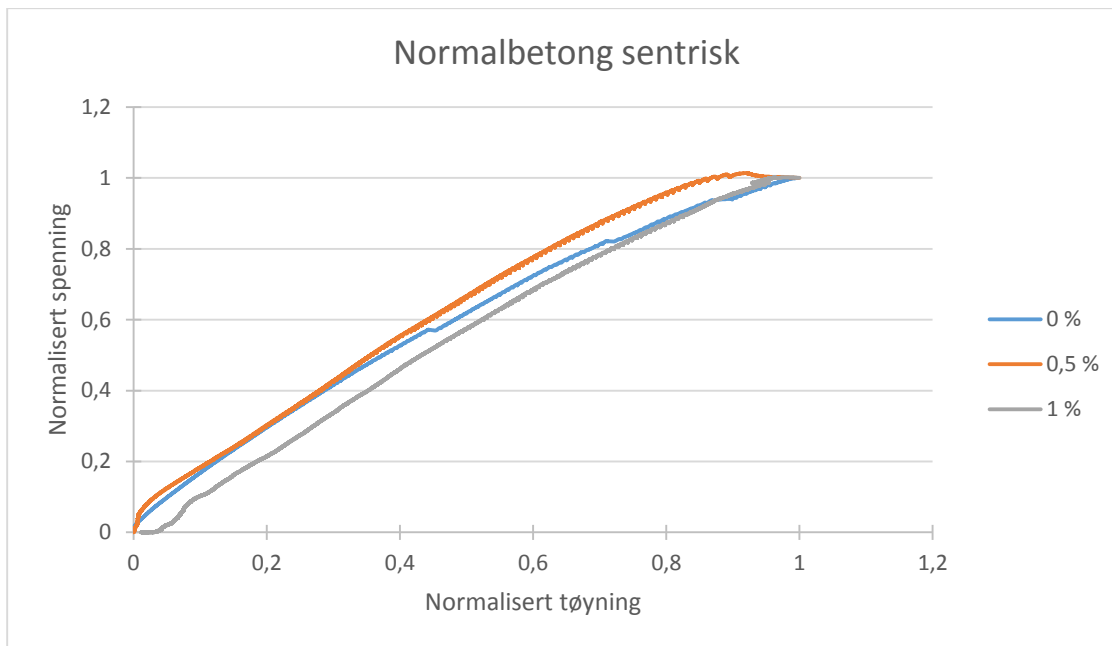


Figur 5.13: Normalisert Tøyning – Tid, lettbetong sentrisk

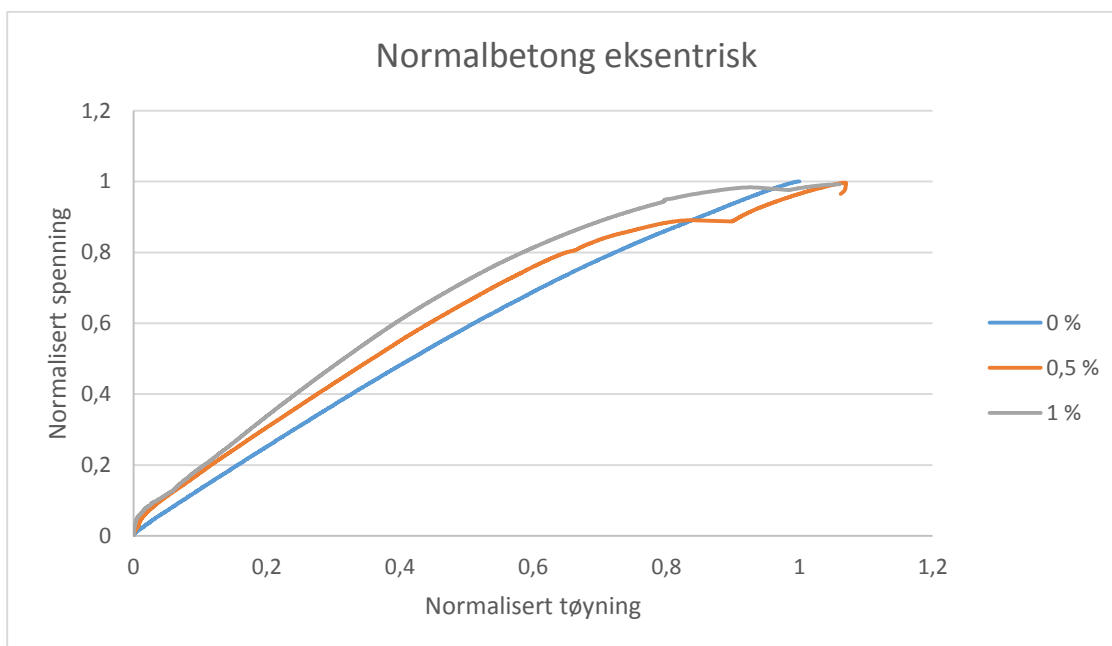


Figur 5.14: Normalisert Tøyning – Tid, lettbetong eksentrisk

Sentrisk belastet lettbetong oppfører seg likt for samtlige fiberblandinger. Ved eksentrisk belastning fikk prismene med 1 % fiber tøyning 1,4 ganger bruddtøyningen, mens 0,5 % fiber hadde over 1,8 ganger bruddtøyningen. Fiberløs betong hadde sprøtt brudd.



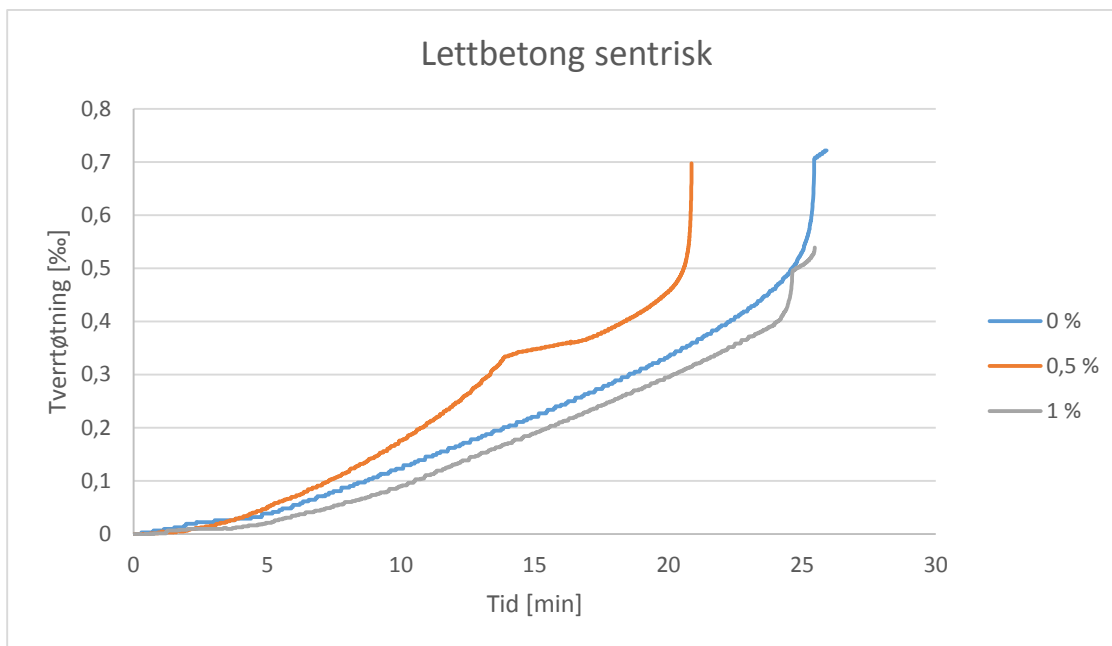
Figur 5.15: Normalisert Tøyning – Tid, normalbetong sentrisk



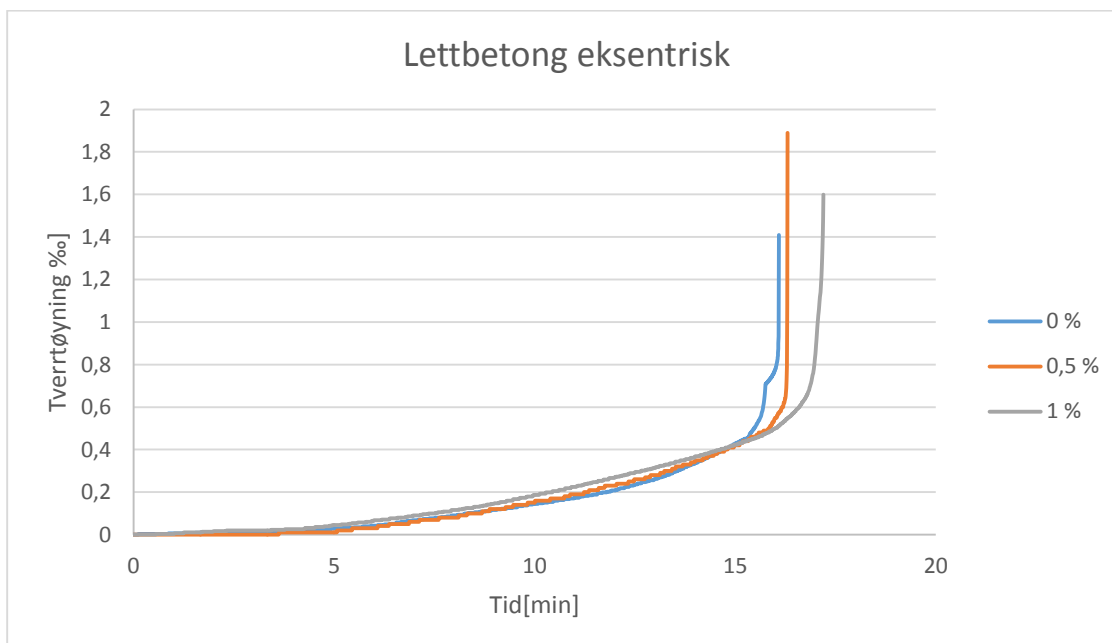
Figur 5.16: Normalisert Tøyning – Tid, normalbetong eksentrisk

Ingen av de sentriske prismene fikk tøyninger som overskred bruddtøyningen. For de eksentrisk belastede prismene hadde fiberløs betong en lineær økning av spenning over tøyning. Med fiber økte spenningen noe for tøyninger lavere enn bruddtøyningen. Prismene med fiber fikk en maksimal tøyning rundt 10 % større enn bruddtøyningen.

5.5 Tverrtøyning – tid

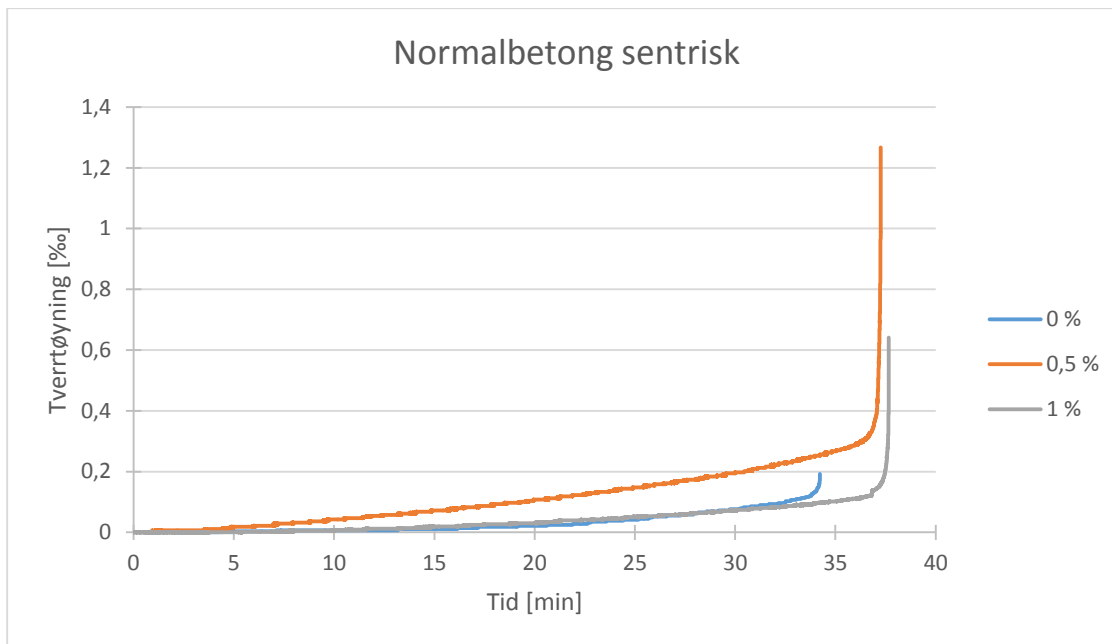


Figur 5.17: Tverrtøyning – Tid, lettbetong sentrisk

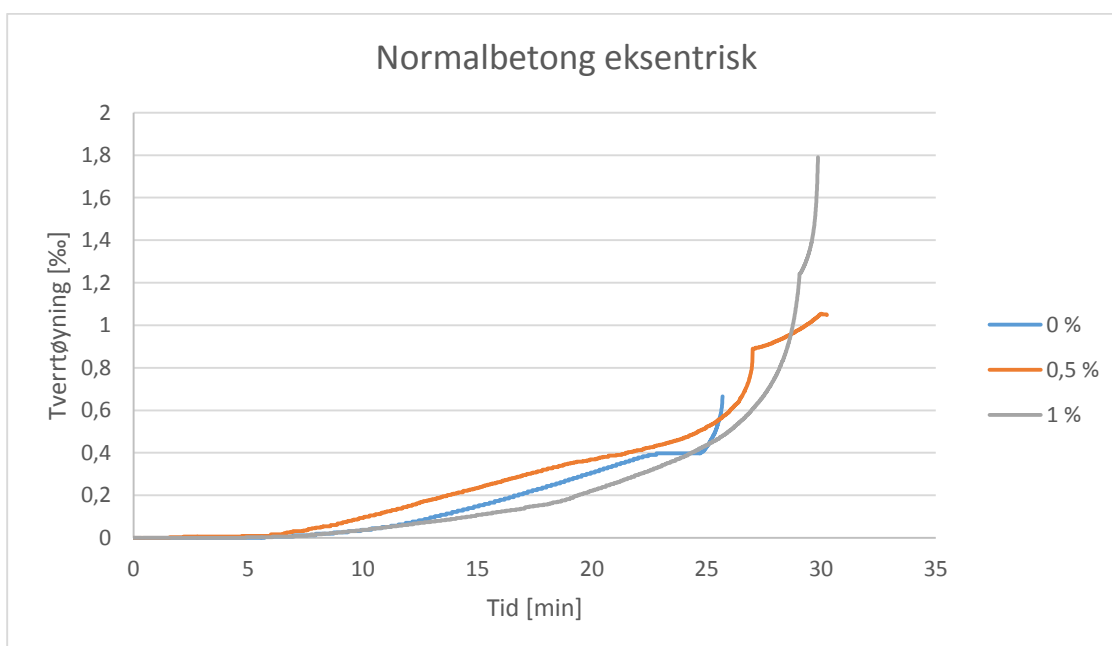


Figur 5.18: Tverrtøyning – Tid, lettbetong eksentrisk

Sentrisk 0,5 % lettbetong skiller seg igjen ut over tidsforløpet. Verdien på tverrtøyningen skiller seg lite ut med hensyn på fibervolum. Tverrtøyningen skiller seg riktignok veldig ut på type belastning, da eksentrisk belastning dobler verdien på tverrtøyningen. Eksponentiell økning på tverrtøyning indikerer at brudd er nært forestående.



Figur 5.19: Tverrtøyning – Tid, normalbetong sentrisk



Figur 5.20: Tverrtøyning – Tid, normalbetong eksentrisk

Resultatene fra sentrisk normalbetong viser at prismene med fiber fikk større tverrtøyninger før brudd. Særlig 0,5 % fiber tålte store tøyninger. De eksentriske resultatene viser også at fiberarmering øker tverrtøyningen. For disse resultatene er det 1 % fiber som skiller seg ut med å tåle store tøyninger, helt opp mot 2,5 %.

5.6 Bruddtøyning

Tabell 5.1 viser bruddtøyningene til prismene. Disse verdiene vil bli brukt til å finne tøyingsgradienten for prismene, og sammenligne disse gradientene med observert duktilitet fra arbeidsdiagrammene i neste kapittel, analyse av resultater.

Tabell 5.1: Tøyning ved brudd for prismene

		ϵ_{langs} nord	ϵ_{langs} sør	ϵ_{tverr} nord	ϵ_{tverr} sør
Lettbetong sentrisk	LA1	1,89	1,80	*	0,43
	LA2	2,33	1,87	1,02	0,24
	LB1	1,70	1,12	1,07	0,55
	LB2	2,31	1,84	0,88	0,84
	LC1	1,70	2,27	0,53	0,48
	LC2	2,05	1,90	0,45	0,70
Lettbetong eksentrisk	LA3	2,73	-0,26	0,97	-0,02
	LA4	2,55	-0,34	0,61	0,01
	LB3	2,49	-0,36	0,67	-0,04
	LB4	2,74	-0,38	*	-0,03
	LC3	2,93	-0,38	0,78	-0,08
	LC4	3,02	-0,47	1,01	0,01
Normalbetong sentrisk	NA1	2,29	1,84	0,27	0,11
	NA2	2,03	1,77	*	*
	NB1	1,51	3,15	0,11	2,42
	-	-	-	-	-
	NC1	2,29	3,46	0,38	2,03
	NC2	1,17	2,10	-0,03	0,19
Normalbetong eksentrisk	NA3	1,38	-0,32	0,67	0,02
	-	-	-	-	-
	NB3	3,06	-0,42	0,76	-0,05
	NB4	3,23	-0,58	1,15	0,04
	NC3	3,86	-0,73	1,86	0,09
	NC4	3,72	-0,55	1,76	0,64

6 Tidligere masteroppgaver duktilitet lettbetong

6.1 Oppsummering master 2012

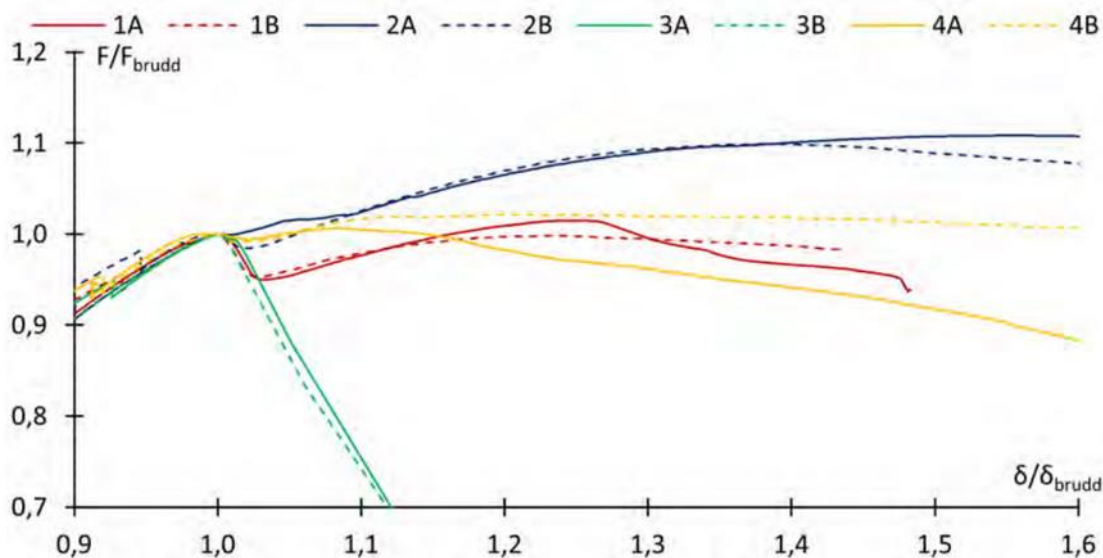
Fredrik Tørud Lang og Øystein Rønningen skrev i 2012 masteroppgaven «Duktilitet av Lettbetong.» [24] Det ble gjennomført firepunkts bøyetester på 8 overarmerte lettbetongbjelker for å studere duktiliteten av lettbetong i trykksonen.

Hovedmålet med oppgaven var å undersøke effekten av to ulike tiltak for å øke duktiliteten: fiberarmering og tett bølgearmering. Det ble testet bjelker med kun bølgearmering og med kombinasjon av bølgearmering og fiber. Det ble laget 4 ulike bjelketyper med to tvillingbjelker hver, se **Tabell 6.1**. Bjelkene hadde følgende dimensjoner: L: 4200mm, b:400mm og h: 350mm.

Tabell 6.1: Bjelkedata for de ulike bjelkekonfigurasjonene

Bjelketype (A og B)	Senteravstand mellom bøylere	Fiberarmering
1	100mm	nei
2	100mm	ja
3	270mm	nei
4	270mm	ja

Bjelketype 1 og 2 hadde senteravstand 100 mm mellom bøylene langs hele bjelken. Bjelketype 3 og 4 hadde senteravstand 270 mm mellom bøylene i sonen mellom punktlastene. I resten av bjelken var senteravstanden mellom bøylene 100 mm. Bjelketype 1 og 3 var uten fiberarmering, mens bjelketype 2 og 4 var med fiberarmering.



Figur 6.1. Utsnitt av normalisert last - forskyvning for alle bjelker

Figur 6.1 viser last-forskyvningsforløp til de 8 bjelkene. Figuren viser at det er lite spredning i oppførsel frem til brudd. Etter brudd er oppførselen til de forskjellige bjelkene store. Bjelketype 3 (færre bøyer, uten fiberarmering) mister umiddelbart mye av kapasiteten og tverrsnittet blir ineffektivt. Bjelketype 1 (med bøyer, uten fiber) og bjelketype 4 (færre bøyer, med fiberarmering) beholder gode lastbæringsevner ved store deformasjoner, mens bjelketype 1 (med bøyer og fiberarmering) øker kapasiteten etter brudd og får en meget duktil oppførsel.

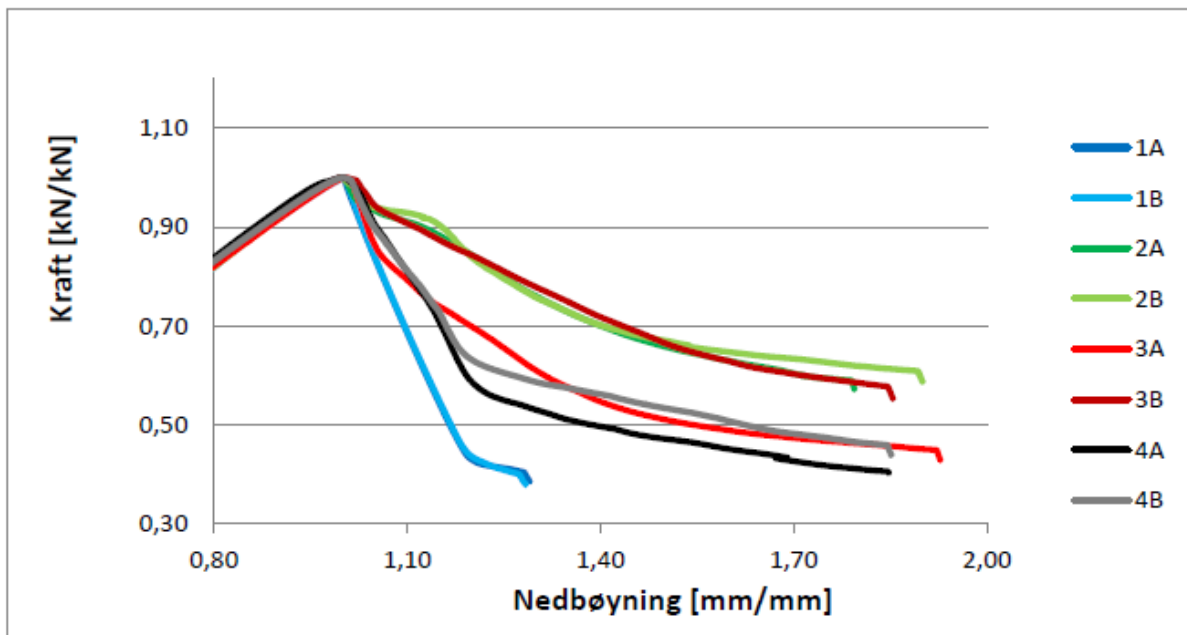
Etter testing av hovedbjelkene var konklusjonen at både bruk av bøyler- og fiberarmering hadde positiv effekt på duktiliteten. Effekten var størst for tilfellet der tiltakene ble kombinert, der spesielt gode egenskaper ble observert etter at brudd var inntruffet. Den duktile effekten var også betydelig hver for seg, sammenlignet med bjelketype 3 (uten fiber og lang bøyelavstand). Globalt viste bjelkene med tett bøylearmering uten fiber også grad av duktilitet, men selve bruddoppførselen fremstår som sprø. Fiberarmering medførte at selve bruddoppførselen ble seigere, og bidro til å ivareta den strukturelle integriteten lenge etter at brudd inntraff.

6.2 Oppsummering master 2013

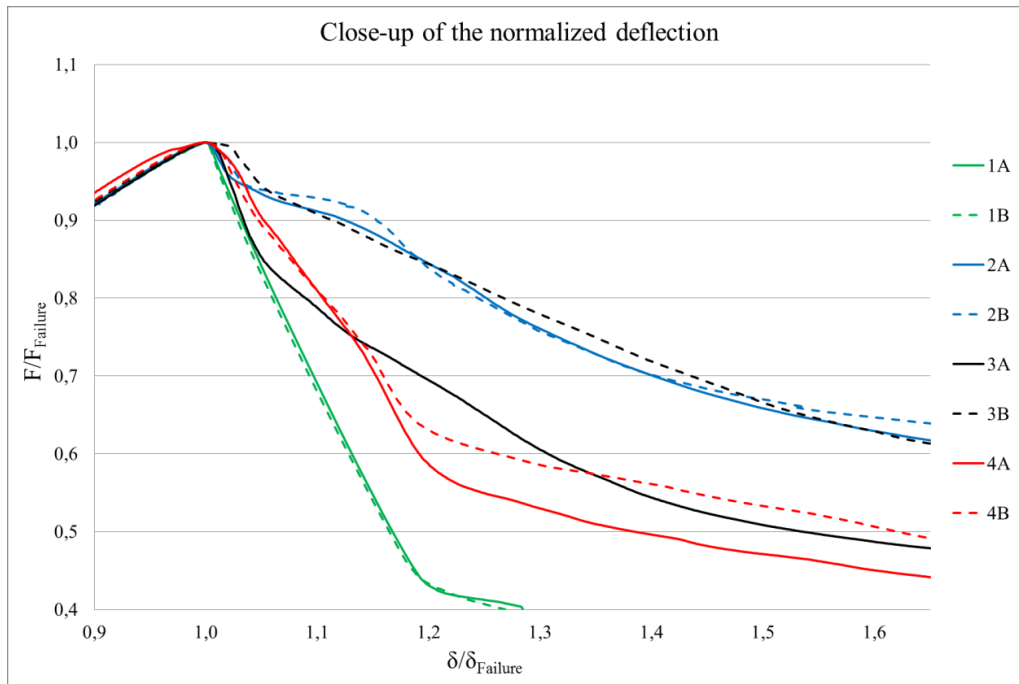
I 2013 ble det skrevet to masteroppgaver om duktilitet av lettbetong, den ene av Johann Helgi Oskarsson [25] og den andre av Stian Hoff og Torgeir Steen [26]. I begge oppgavene ble 8 fullskala lettbetong-bjelker testet i en firepunkts-test, hvor målet var å sammenligne bjelkenes duktilitet i trykk for ulike typer fiberarmering. Bjelkenes lengde var 4,2 m, og tverrsnittsarealet var 0,2 x 0,3 m. Alle bjelkene var av lettbetong med densitet på 1800 kg/m³ og med trykkfasthet på omtrent 40 MPa. Bjelkene var overarmert slik at brudd oppsto i trykksonen av bjelken.

De åtte bjelkene ble testet parvis. Bjelkepar 1 var uten fiber, bjelkepar 2 med Dramix 65/60, bjelkepar 4 med basaltfibre. På bjelkepar 3 brukte Hoff og Steen KrampeHarex 35/0,55H, mens Oskarsson brukte Dramix 65/35. Alle fibermengder var 1,0 volumprosent.

Figur 6.2 og **Figur 6.3** viser de normaliserte nedbøyningsdiagrammene for de ulike bjelkene for henholdsvis Hoff & Steen og Oskarsson.



Figur 6.2: Normalisert nedbøyning [26]



Figur 6.3: Normalisert nedbøyning [25]

Resultatene viser en økt duktil oppførsel for bjelkene med fiberarmering. Stålfiber har større positiv innvirkning på duktiliteten enn basaltfiber, og særlig Dramix 65/60 viser gode resultater. I begge masteroppgavene var det et problem at bjelkepar 3 hadde for store avvik. Begge oppgavene peker på ujevn fibermengde i bruddsonen som følge av uforsiktig støping som årsak til avviket på dette bjelkeparet. For pålitelige resultater må tvillingparene oppføre seg likt, resultatene fra bjelkepar 3 vil derfor brukes kritisk i den videre resultatdiskusjonen.

7 Analyse/diskusjon av resultater

I følgende avsnitt vil resultatene fra de tidligere masteroppgavene sammen med våre egne resultater brukes til å diskutere effekten av fiber, tøyninggradient og omslutningseffekt for duktilitet av lettbetong. Masteroppgavene fra 2012 og 2013 som omhandler bjelker har benyttet nedbøyning som parameter for deformasjonsendring ved vurdering av duktilitet. For å kunne sammenligne med resultatene fra prismetestingen, er det i dette avsnittet fokusert på tøyningverdiene til bjelkene og prismene. De to masteroppgavene i 2013 testet samme type bjelker, med unntak av bjelkepar 3, som besto av fiber av type Krampe Harex 35/0,55 H og Dramix 65/35. I vurderingen av resultatene fra 2013 vil resultatene fra oppgaven til Oskarsson bli brukt. Dette fordi Oskarsson testet bjelker med Dramix 65/35, hvilket åpner for en sammenligning med Dramix 65/60, og en vurdering av fiberlengde som parameter for duktilitet. For de andre bjelkene var testingen og resultatene til de to masteroppgavene samsvarende.

7.1 Sammenligning av duktilitet bjelker og prismer

Tabell 7.1 inneholder data om tøyninggradient, normalisert kraft og normalisert tøyning for bjelkene testet i 2012 og 2013, samt prismene testet i 2014 og 2015. Tøyninggradienten, ϕ , er bestemt ut fra følgende formel:

$$\phi = \frac{\varepsilon_{\text{overkant}} + \varepsilon_{\text{underkant}}}{h} = \frac{\varepsilon_{\text{nord}} + \varepsilon_{\text{sør}}}{b}$$

Der

h = bjelkehøyden

b = prismebredden

ε = målt tøyning fra testing.

Ettersom duktilitet defineres som et materiales evne til å tåle store deformasjonsendringer uten å miste nevneverdig lastkapasitet, har hvert prøvestykkets normaliserte tøyning ved testavslutning ($\varepsilon/\varepsilon_{\text{brudd}}$) blitt multiplisert med prøvestykkets normaliserte kraft ved testavslutning (F/F_{brudd}) for å finne sammenlignbare verdier for prøvenes duktilitet. Fra verdiene i **Tabell 5.1** og fra verdier fra masteroppgavene i 2012 og 2013 kan følgende tabell settes opp:

Tabell 7.1: Nøkkelverdien for prøvene

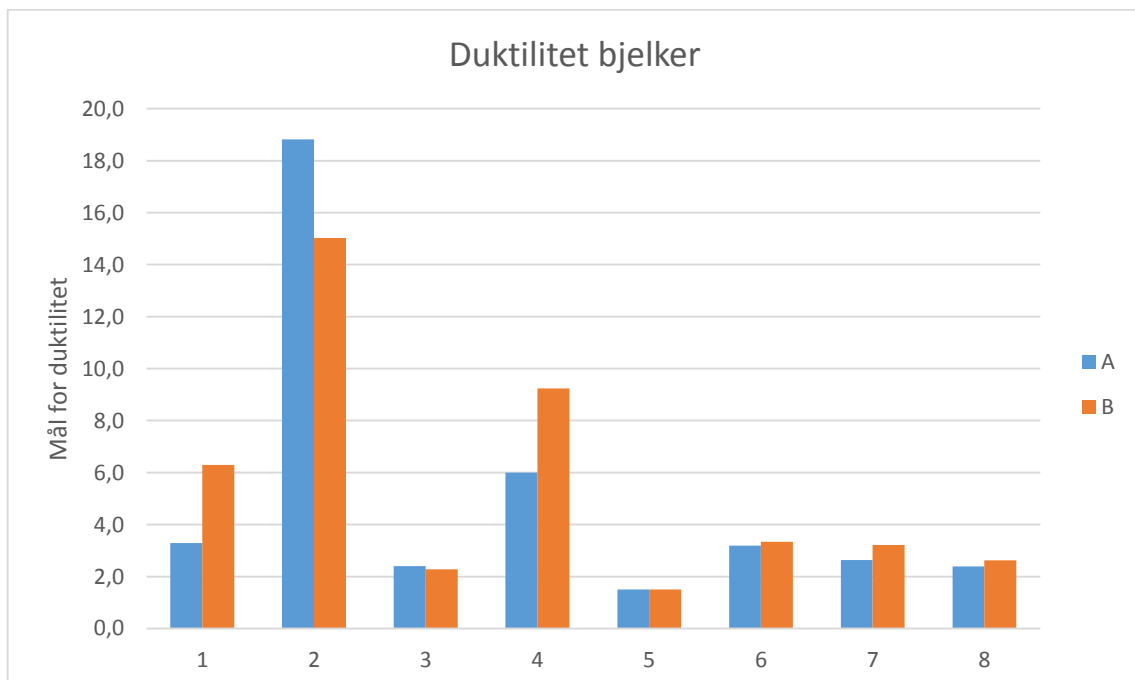
			Φ , brudd [10 ⁻³]	Φ , avslutning [10 ⁻³]	$\epsilon/\epsilon_{brudd}$ (1)	F/F _{brudd} (2)	Mål for duktilitet (1x2)
Prismer	LB sentrisk	LA1	0,7	0,7	1	1	1,00
		LA2	2,7	2,7	1	1	1,00
		LB1	4,0	4	1,02	1	1,02
		LB2	3,3	3,3	1	1	1,00
		LC1	3,3	3,3	1	1	1,00
		LC2	1,3	1,3	1	1	1,00
	LB eksentrisk	LA3	20,0	20	1	0,98	0,98
		LA4	19,3	19,3	1,01	1	1,01
		LB3	19,3	51,9	2,27	0,82	1,86
		LB4	20,7	32,0	1,45	0,96	1,39
		LC3	22,0	38,7	1,72	0,68	1,17
		LC4	23,3	25,7	1,1	0,99	1,09
	NB sentrisk	NA1	3,3	3,3	1	1	1,00
		NA2	1,3	1,3	1	1	1,00
		NB1	11,3	11,3	1	1	1,00
		-	-	-	-	-	-
		NC1	8,0	8	1	1	1,00
		NC2	6,0	6	1	1	1,00
	NB eksentrisk	NA3	11,3	11,3	1	1	1,00
		-	-	-	-	-	-
		NB3	22,7	22,7	1	0,95	0,95
		NB4	25,3	28,8	1,14	0,99	1,13
		NC3	30,0	35,2	1,12	0,98	1,10
		NC4	28,0	28	1	1	1,00
Bjelker	2012	1A	15,5	42,2	3,51	0,94	3,3
		1B	15,2	88,2	7,89	0,80	6,3
		2A	14,6	212,9	20,28	0,93	18,8
		2B	15,9	205,7	17,99	0,84	15,0
		3A	16,5	72,4	5,81	0,41	2,4
		3B	16,6	63,6	5,51	0,41	2,3
		4A	16,4	101,2	9,10	0,66	6,0
		4B	16,0	146,5	13,75	0,67	9,2
	2013	5A	16,8	52,3	3,85	0,39	1,5
		5B	15,9	46,0	3,86	0,39	1,5
		6A	18,6	79,0	5,59	0,57	3,2
		6B	17,1	76,7	5,74	0,58	3,3
		7A	17,1	81,3	6,10	0,43	2,6
		7B	17,1	75,0	5,75	0,56	3,2
		8A	18,8	88,3	6,07	0,39	2,4
		8B	18,1	81,3	5,91	0,44	2,6

For å forhindre misforståelser har bjelkene fra 2013 fått nye navn; bjelke 1A har blitt til 5A, 2A til 6A etc. Verdiene merket med gult stammer fra verdier hentet fra grafer, og er derfor ikke nøyaktige på desimalnivå. Målet med tabellen er å få en kjapp oversikt over hvert prøvestykkets duktilitet, og vurdere duktiliteten mot tøyingsgradient for å se om det finnes en sammenheng mellom tøyingsgradienten og duktiliteten.

Fra **Tabell 7.1** observeres det at forskjellen mellom bjelkene og prismene er stor. Bjelken med størst verdi for duktilitet (bjelke 2A) har en verdi på 18,8, mens prismet med høyest verdi (prisme LB3) har verdi på 1,9. Det er derfor hensiktsmessig å presentere prismenes og bjelkenes duktilitet i to ulike diagrammer, som gjort i **Figur 7.1** og **Figur 7.7**. De sentrisk belastede prismene viser ingen tegn til duktil oppførsel, og ettersom samtlige prismer har verdi på $1,00 \pm 0,02$, vil de bli ignorert i diagramskisseringen av duktiliteten.

7.2 Bjelkenes duktilitet

Figur 7.1 viser søylediagram viser sammenlignbare resultat for duktiliteten etter tidligere bestemt definisjon.



Figur 7.1: Normalisert tøyning multiplisert med normalisert kraft for bjelker ved testavslutning

Tabell 7.2: Bjelkeoversikt

Bjelkepar	Bøyler	Fiber (1 vol-%)
1	100 mm	-
2	100 mm	Dramix 65/60
3	270 mm	-
4	270 mm	Dramix 65/60
5	-	-
6	-	Dramix 65/60
7	-	Dramix 65/35
8	-	Basaltfiber (gen. 2, 45 mm)

Fra kan det gjøres følgende bemerkninger med hensyn på duktilitet:

- Tette bøyler (100 mm) har bedre effekt enn kun fiberarmering (1 vol-%)
- Det er liten forskjell på de ulike fibertypene
- Tette bøyler + fiberarmering gir klart best resultat
- Bøyler med senteravstand 270 mm har litt svakere effekt enn kun fiberarmering (1 %).

Disse bemerkningene observeres også ved å studere grafen som viser F/F_{brudd} mot $\delta/\delta_{\text{brudd}}$, og avhenger derfor ikke av forenklet definisjon for duktilitet bestemt i kap. 7.2. Bjelkene med tett bøylearmering og fiberarmering stilte i en egen klasse når det gjelder duktil oppførsel. Testingen av disse to bjelkene ble avsluttet 72 og 63 minutter etter brudd, og i løpet av denne tiden ble også deformasjonshastigheten doblet for å få fortgang i testingen. Til sammenligning ble testing av bjelkepar 3 avsluttet 5 og 7 minutter etter brudd. En viktig forskjell mellom bjelkepar 1-4 og 5-8 er at tverrsnittet varierer fra 400x350 mm og 200x300 mm respektivt.

7.3 Alternativ fremstilling av bjelkenes duktilitet

I arbeidet med å tolke dataene fra **Figur 6.1** og **Error! Reference source not found.** ble det oppdaget at bjelkepar 1 oppførte seg ulikt i de to figurene. I **Figur 7.1** observeres det et stort avvik i målet på den duktile oppførselen, mens **Figur 6.1** viser at bjelkeparet oppfører seg relativt likt. Forskjellen på de to fremstillingene er at **Figur 7.1** tar utgangspunkt i normalisert tøyning, mens **Figur 6.1** tar utgangspunkt i normalisert nedbøyning. Resultatene fra disse to fremstillingene hører til å vise det samme, og årsaken til avviket ble funnet å være at givene som målte nedbøyning ble koblet av før testslutt for bjelke 1B for å hindre skade på

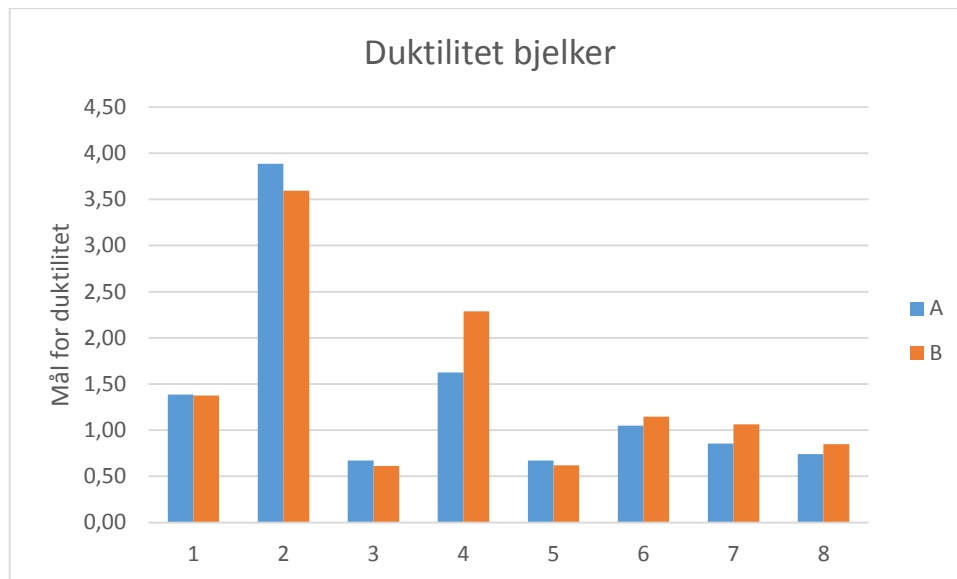
måleutstyret. Da givene ble koblet av var kraften lik 270 kN, som tilsvarer F/F_{brudd} lik 0.97. Ved videre testing ble kraften redusert til 222 kN, dvs. F/F_{brudd} lik 0.80. Tøyningene langs bjelkelengden ble logget under hele testen, hvilket gir sammenligningsgrunnlag for normalisert kraft mot normalisert tøyning for hele testforløpet. Å bruke dataene fra 2012 og 2013 til å lage grafer for normalisert kraft mot normalisert tøyning vil derfor være interessant for videre arbeid om duktilitet av lettbetongbjelker. For bjelkepar 1 ville denne metoden gitt et større datagrunnlag ved at lastkapasitet for større deformasjoner kunne blitt registrert.

Hensikten med å fremstille duktiliteten med hensyn på normalisert tøyning var å sammenligne bjelkene med prismene. Den tar også kun utgangspunkt i verdiene oppnådd ved testslutt, og kan derfor ikke brukes ukritisk. Det er snarere et verktøy for å sammenligne duktilitetet på en enkel måte. For den videre vurderingen av de ulike bjelketypene vil det derfor tas utgangspunkt i normalisert kraft mot normalisert nedbøyning, som tilsvarer metoden brukt i de foregående masteroppgavene om bjelkene, og som inkluderer grafer som viser sammenhengen mellom kraft og nedbøyning under hele testforløpet. For sammenligning med søylediagrammet i **Figur 7.1**, er det presentert tilsvarende søylediagram i **Figur 7.2**, som viser mål av duktilitet ved siste loggede måling av nedbøyning. Søylediagrammet tar utgangspunkt i verdiene listet opp i **Tabell 7.3**.

Tabell 7.3: Data for duktilitet mhp. normalisert nedbøyning

			F/F_{brudd}	δ/δ_{brudd}	Duktilitet
Bjelker	2012	1A	0,94	1,48	1,39
		1B	0,97	1,42	1,38
		2A	0,93	4,18	3,88
		2B	0,86	4,16	3,59
		3A	0,41	1,62	0,67
		3B	0,41	1,49	0,61
		4A	0,66	2,46	1,62
		4B	0,67	3,41	2,29
	2013	5A	0,60	1,12	0,67
		5B	0,53	1,18	0,62
		6A	0,59	1,76	1,05
		6B	0,61	1,88	1,14
		7A	0,45	1,90	0,85
		7B	0,58	1,84	1,06
		8A	0,40	1,84	0,74
		8B	0,46	1,84	0,85

Gule celler indikerer at dataverdiene stammer fra avlesning av grafer.

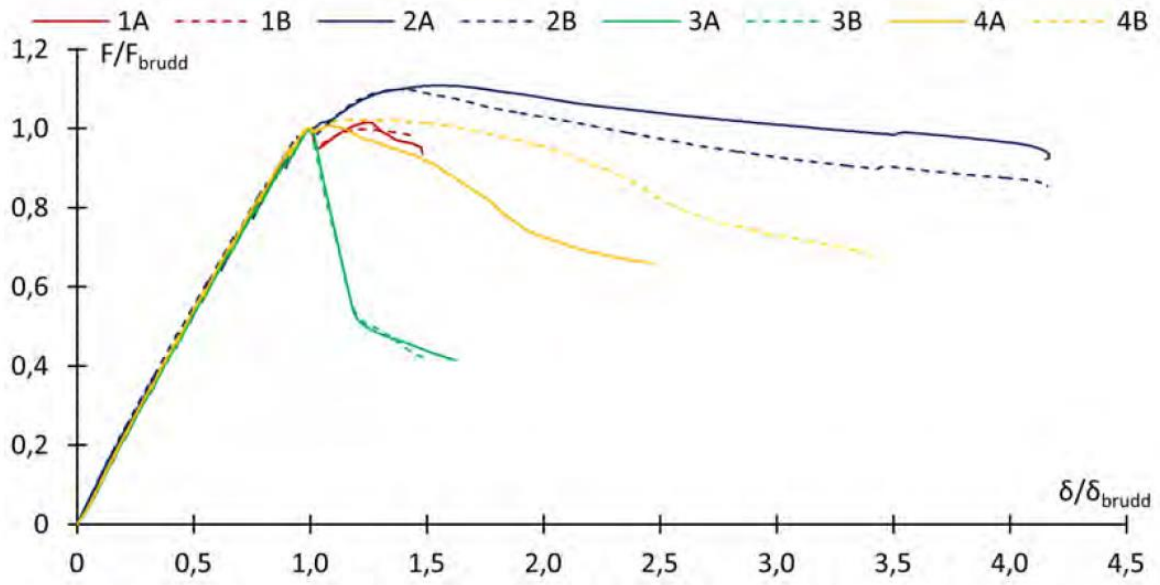


Figur 7.2: Mål for duktilitet med utgangspunkt i normalisert nedbøyning

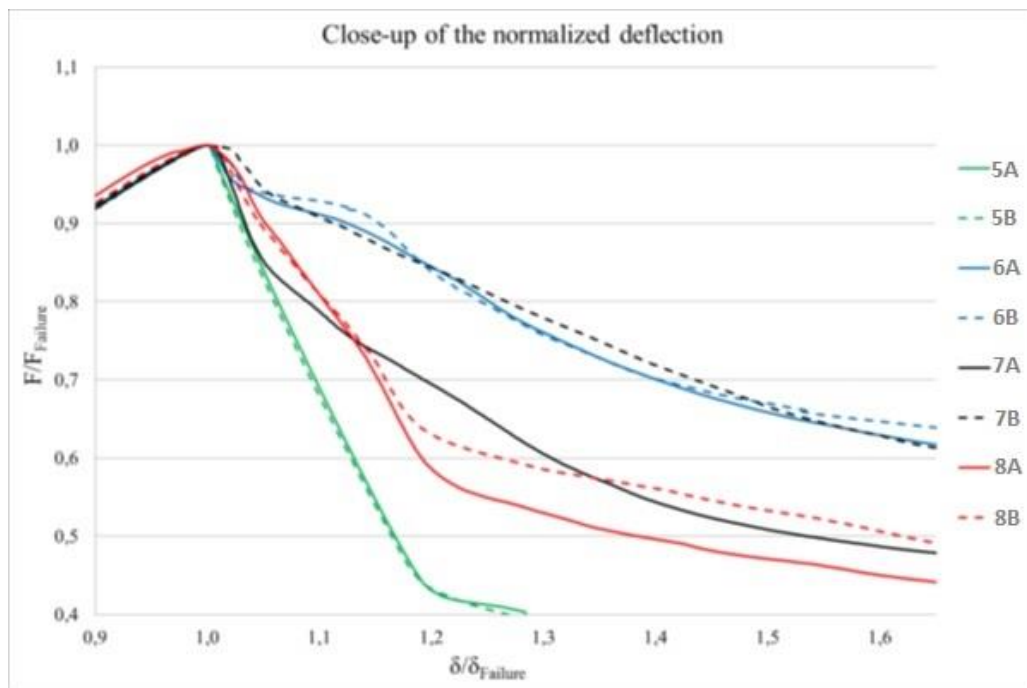
Det nye søylediagrammet viser samme trend som for duktilitet med hensyn på normalisert tøyning. Eneste forskjell er at bjelkepar 1 ikke har noe avvik, og dette resultatet samsvarer med kurven observert for kurven for normalisert kraft mot normalisert tøyning som vist i **Figur 6.1**.

For begge metodene observeres det at bjelkepar 4 har avvik i duktilitet. **Figur 7.3** viser at det ved δ/δ_{brudd} lik 2,5 er et avvik på 16 % av bruddlast for de to identiske bjelkene. Trolig er fibrene til bjelke 4A dårlig fordelt, hvilket gir denne bjelken en raskere nedgang i lastkapasitet ved videre nedbøyning sammenlignet med bjelke 4B.

I den videre vurderingen av bjelkenes duktilitet vil **Figur 7.3** og **Figur 7.4** bli brukt.



Figur 7.3: Normalisert - last forskyvningsforløp for bjelkepar 1-4

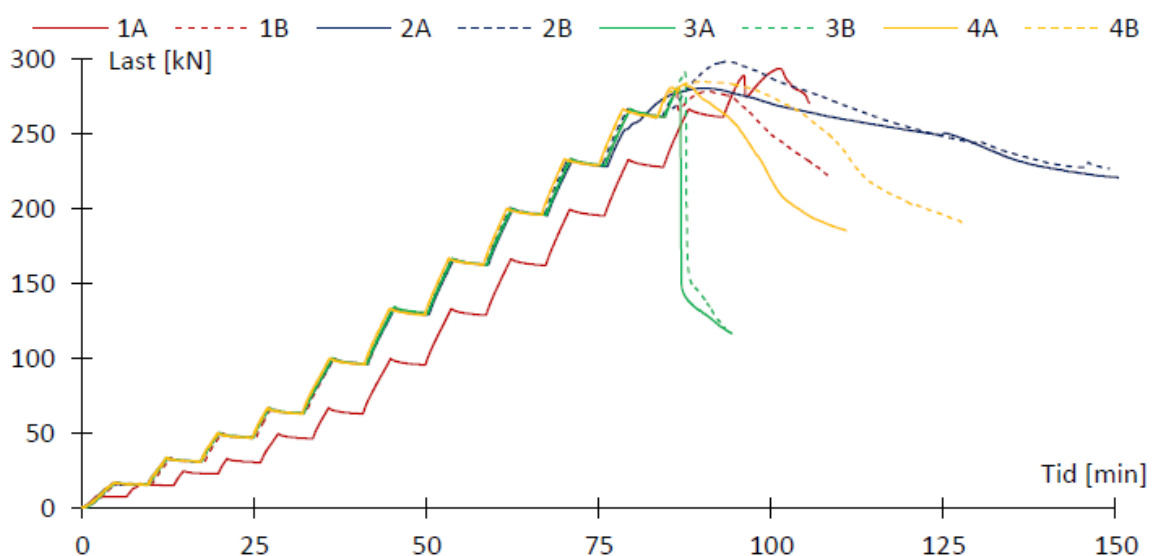


Figur 7.4: Normalisert - last forskyvningsforløp for bjelkepar 5-8

7.3.1 Bøyler og omslutningseffekt

Bjelkene som kun hadde bøylearmering med senteravstand 270 mm (par 3), hadde en svak økning av duktiliteten sammenlignet med bjelker uten verken bøyler eller fiber (par 5). Opprettholdelsen av lastmotstanden var like dårlig for begge bjelketypene, men med bøyler økte tøyningene noe. **Figur 7.3** viser at resttverrsnittet i bjelken effektiviseres når lasten er 50 % av bruddlast og tøyningen overstiger bruddtøyningen med 25 %.

Med tett bøylearmering (bjelkepar 1) ser det ut til at bjelkene får en markant økning av duktilitet. **Figur 7.3** viser at bjelkene med tette bøyler får en tydelig reduksjon i lastkapasitet per nedbøyning like etter brudd, før lastkapasiteten ved videre nedbøyning tar seg opp og til og med overstiger bruddlasten. Figuren viser ikke hvordan duktiliteten opprettholdes for større deformasjoner. Som tidligere nevnt var det et problem at bjelkepar 1 ikke fikk registrert nok målinger i post-peak-sonen, og dette kan observeres i **Figur 7.3**. **Figur 7.5** viser forløpet mellom kraft og tid for bjelkene, og denne viser at bjelke 1A avsluttet testing for tidlig. 1A avsluttet 10 minutter etter brudd, mens 1B avsluttet 22 minutter etter brudd. En misforståelse i testingen førte til at bjelke 1A ble testet med dobbelt antall lasttrinn frem til lasttrinn 2, som forklarer forskyvningen i x-aksen på diagrammet. Bjelke 1B ble ikke avsluttet for tidlig, men givene som målte nedbøyning ble koblet av før testslutt, og derfor er datagrunnlaget det samme for de to bjelkene.



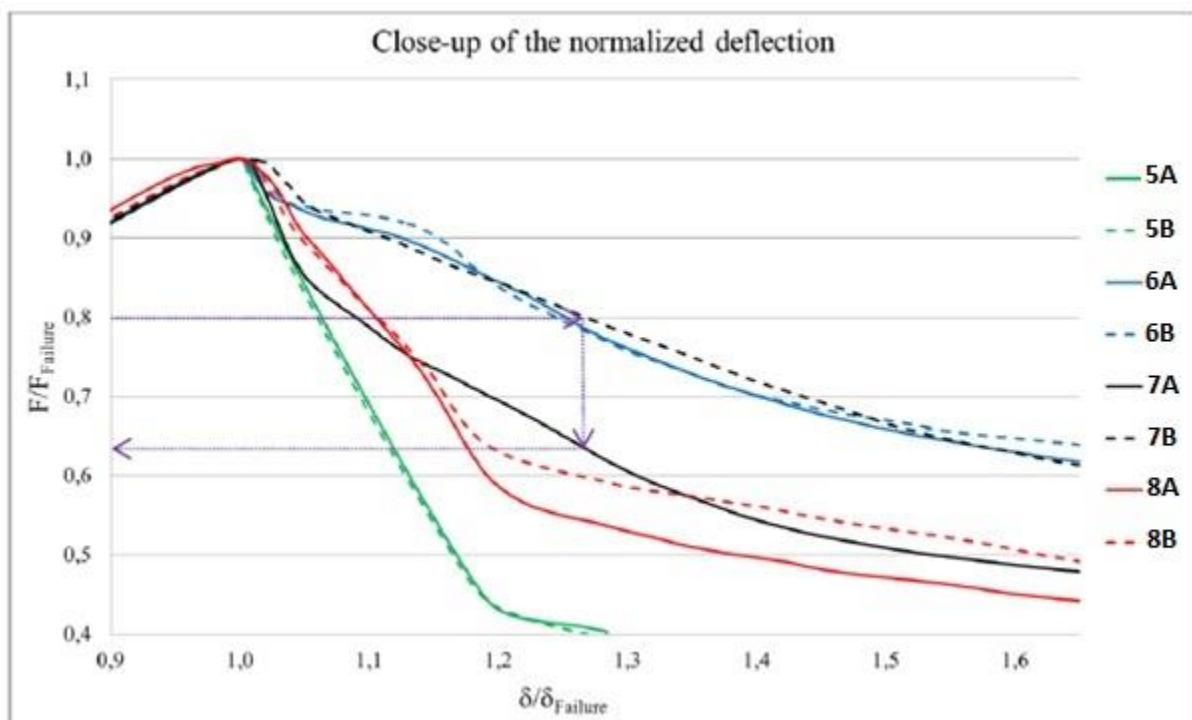
Figur 7.5: Kraft - tid for bjelketesting i 2012

7.3.2 Tolkning av bøyleeffekt

Når overarmerte bjelker uten fiber eller bøylor går til brudd, vil betongen i overkant knuse og skalle av, og trykksonehøyden vil følgelig reduseres. Trykkarmeringen i overkant vil knekke ut og bli ineffektivt, nøytralaksen kryper nedover mot strekkarmeringen før bjelken ikke lenger har kapasitet. Ved bruk av bøylor i disse bjelkene tilføres betongen en passiv omslutningseffekt. Når betongen knuses, vil bøylene hindre at betongen innenfor bøylene skaller av. Restverrsnittet får derfor et større areal, hvilket gir bedre opprettholdelse av lastkapasiteten. **Figur 7.3** bekrefter at tettere bøylor gir bedre effekt som følge av bedre omslutningseffekt. Knekkene i kurvene etter bruddlast sammenfaller med teorien om omslutningseffekt. Bøylene vil ikke utgjøre en forskjell før betongen utenfor bøylene er skallet av. Etter dette punktet vil den passive omslutningseffekten opprettholde restverrsnittet som gjør at kapasiteten forbedres. For bjelkene med tette bøylor skjer dette allerede når kraften er redusert til 95 % av bruddlasten, mens for bjelkene med færre bøylor inntreffer effekten først når lasten er 50 % av bruddlast.

7.3.3 Forskjell på fibertyper

I diskusjonen av forskjellen på fibertyper må det vises hensyn til at bjelkepar 7 (Dramix 65/35) hadde stort avvik i resultatene. Fra **Figur 7.6** observeres det at for samme nedbøyning, er avviket i kraften på de to bjelkene omtrent 17 % av bruddkraften.



Figur 7.6: Illustrasjon av avvik til bjelkepar 7

For å studere forskjellen på duktilitet for de forskjellige fiberbjelkene brukes bjelkeparet med basaltfiber som referanseverdi. **Tabell 7.4** viser hvor mye duktiliteten øker for stålfiberne relativt til basaltfiberne.

Tabell 7.4: Duktilitetsøkning i forhold til basaltfiber

	Duktilitets- økning
Basaltfiber	-
Dramix 65/35	16,9 %*
Dramix 65/60	30,7 %

*Bjelkeparet hadde avvik på 17 % av bruddlast i normalisert kraft per tøyning, se **Figur 7.6**

Fra **Tabell 7.4** kan det slutes at stålfiber har bedre effekt enn basaltfiber. Det er i hovedsak E-modulen som skiller basaltfiberne fra stålfiberne, og dette tyder på at høyere E-modul gir bedre duktilitet for bjelker med fiber. Det er da antatt at heften er lik for de to fibertypene. E-modulen til stålfiberne er lik 210 GPa, mens basaltfiberne har E-modul lik 60 GPa.

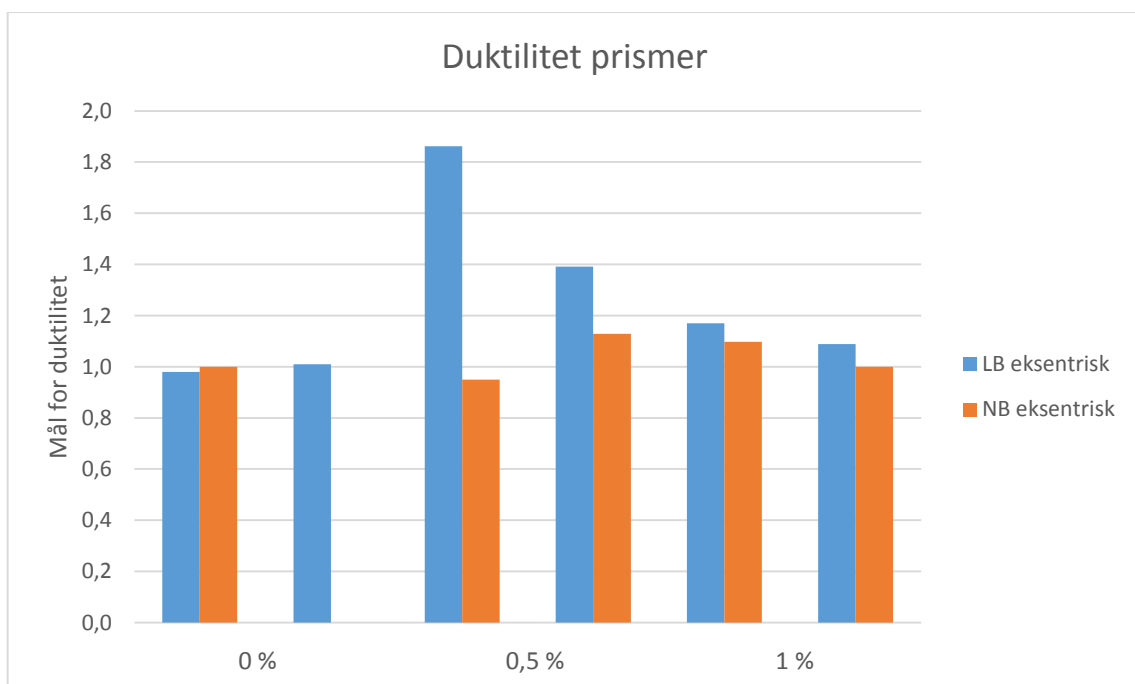
Det mest interessante resultatet fra bjelkene med ulik fiberarmering er at bjelke 3B, som består av 35 mm lange stålfibre, har lik duktil oppførsel som bjelkene med 60 mm lange stålfibre (**Figur 7.6**). Kurven til 3A derimot, får et kraftig knekk like etter brudd, før den senere opprettholder lastkapasitet per tøyning med en ratio tilsvarende bjelke 7B og bjelkepar 6. Denne knekken til kurve 3A minner om knekken som ble observert for bjelker med tette bøylere (bjelkepar 1, **Figur 6.1**). For bøylebjelkene tok det tid før bøylenes passive omslutningseffekt førte til bedre opprettholdelse av bjelkenes kapasitet. Like etter brudd sammenfaller kurven til 7A med kurvene for bjelkene uten verken fiber eller betong. Ved videre nedbøyning forbedres lastkapasiteten til bjelkene, og dette tyder på at fibrene i bjelken ved dette tidspunktet har blitt aktivisert. Litteraturkapittelet beskriver hvordan fibre i trykk med tøyninggradient skaper en passiv omslutningseffekt som forbedrer duktilitet, men det forutsettes jevn fordeling av fibrene over tverrsnittet, hvilket ikke ser ut til å ha vært tilfelle for bjelke 7A.

Masteroppgaven som testet bjelker med Krampe Harex 35 mm opplevde tilsvarende avvik i deres to 35-mm fiberbjelker. Den ene bjelken sammenfalt med bjelkene med 65 mm lange fibre, mens den andre bjelken fulgte kurven til de fiber- og bøyefrie bjelkene frem til last lik 85 % av bruddlast. Da ble fibre aktivisert og lastkapasiteten per nedbøyning ble bedre. For dette bjelkeparet ble det utført en optelling av antall synlige fibre i bruddsonen. Bjelken med dårlig duktilitet hadde 55 synlige fibre, mens den gode bjelken hadde 70 stk.

Resultatene fra masteroppgavene i 2013 tyder på at fibre med lengde på 35 mm vanskeligere lar seg fordeles jevnt over betongvolumet. Resultatene indikerer også at 35 mm lange fibre kan gi tilsvarende effekt som fibre på 65 mm ved jevn fordeling av fibre.

7.4 Prismenes duktilitet

Figur 7.7 viser duktiliteten til de eksentriske prismene etter definisjon bestemt i kap. 7.1. De sentriske prismene er ikke med i figuren ettersom de viste ingen tegn til duktilitet.

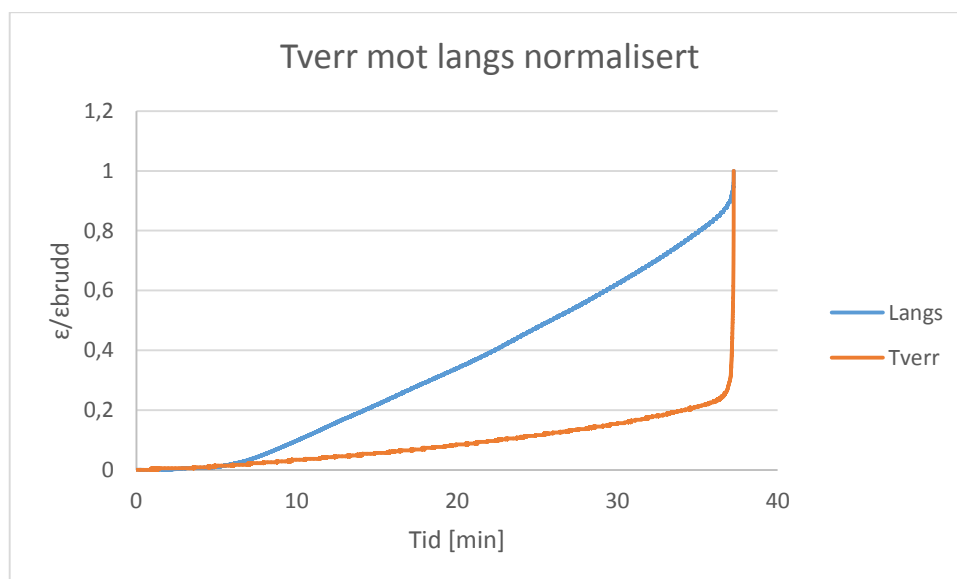


Figur 7.7: Normalisert tøyning multiplisert med normalisert kraft for prismene med eksentrisk belastning

Fra **Figur 7.7** og **Tabell 7.1** kan det gjøres følgende bemerkninger:

- Duktil oppførsel observeres kun når prismene har tøyingsgradient
- Tøyingsgradient impliserer ikke duktil oppførsel
- Stor spredning i resultatene for eksentrisk lettbetong med fiber.
- Sentrisk belastede prizmer har sprø bruddoppførsel.
- Noen av de sentriske prismene med fiber har tøyingsgradient. Dette kan skyldes at fibre ikke er jevnt fordelt, som skaper svake og sterke soner over tverrsnittet.

Generelt viste resultatene fra prismetestingen liten duktilitet, og kan ikke sammenlignes med bjelketestingen fra tidligere år. Oppsettet til de eksentriske testene ble designet for å etterligne bjelketestingen mest mulig, og som tidligere beskrevet var bjelkene overarmert for å sikre trykkbrudd i bjelkene. Prismene kan riktignok ikke sammenlignes med bjelkene som hadde bøylearming, da disse bjelkene får omslutningseffekt som følge av dette. For prismene er det også i hovedsak tverrtøyning som avgjør når prismene går til brudd. Tverrtøyningen økte eksponentielt like før brudd for prismene, som vist i **Figur 7.8**. Figuren viser normalisert tverr- og langsgående tøyning for prisme NB1 over tid, og tilsvarende observasjoner ble gjort for de andre prismene, som vist i vedlegg D. Da bruddet inntraff avsluttet testingen som oftest umiddelbart. Den lengste målingen som ble utført etter brudd var prisme LB4, hvor testen ble avsluttet 8 sekunder etter brudd.



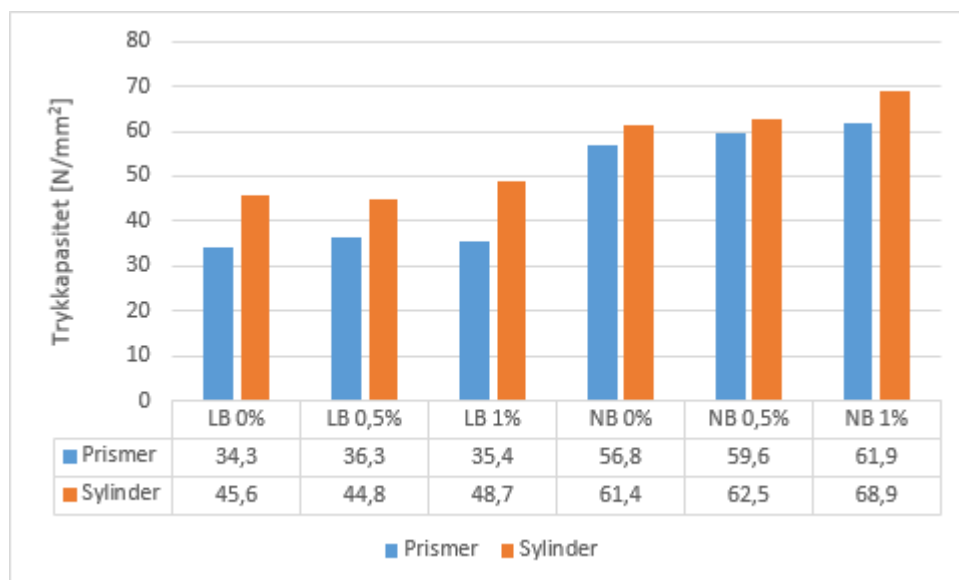
Figur 7.8: Tverr mot langs normalisert

7.4.1 Trykkapasitet

Figur 7.9 viser en sammenligning av bruddkapasitet mellom prismene og sylindrene. Trykkapasiteten for prismene er et gjennomsnitt av kapasiteten registrert ved sentrisk og eksentrisk testing. Figuren er en oppdatert utgave av figuren fra master14, der sentriske tester for normalbetong våren 2015 er tatt med. For lettbetong (LB) viser grafene at sylindrene har en større fasthet enn prismene, dette er også en trend blant normalbetong (NB), men der er ikke forskjellen like stor.

En mulig årsak for høyere trykkapasitet for sylindrene, som også er nevnt i master14, er at sylindrene er så korte at de får en treksiell spenningstilstand på grunn av friksjonskrefter fra stålplatene. Prismene derimot ble designet for å unngå dette slik at midtsonen ble upåvirket.

Forventet trykkapasitet på de to betongblandingene var 40 MPa. **Figur 7.9** viser at prismene med normalbetong hadde fasthet mellom 57-62 MPa, mens lettbetong hadde fasthet i området 34-36 MPa. Forskjellen mellom lett- og normalbetong var altså over 20 MPa.



Figur 7.9: Trykkapasitet sylindere i forhold til prismer

7.4.2 Effekt av betongtype

Fra **Figur 7.7** observeres det at eksentrisk testing med 0,5 % fiber gir klart bedre resultater for lettbetong enn normalbetong. Etersom fastheten til normalbetong var signifikant mye større enn for lettbetong kan ikke lettbetongen og normalbetongen sammenlignes direkte. Dersom fastheten var lik, kunne de to ulike betongblandingene blitt sammenlignet for å studere om fibrene har ulik effekt på de ulike materialene. Det var forventet en sprøere oppførsel for lettbetong enn for normalbetong, men på grunn av normalbetongs høye fasthet ble resultatene motsatt. **Tabell 7.5** viser testresultatene fra sentrisk og eksentrisk testing, og sammenligner lettbetong med normalbetong.

Tabell 7.5: Sammenligning av lett- og normalbetong

	Sentrisk		Eksentrisk	
	Lettbetong	Normalbetong	Lettbetong	Normalbetong
0,0 % Fiber				
F_{maks} [kN]	717,8	1169,7	413,1	717,0
σ_{maks} [N/mm ²]	31,9	52,0	36,8	63,7
$\epsilon_{brudd,tverr}$ [‰]	0,7	0,2	0,8	0,7
$\epsilon_{brudd,langs}$ [‰]	2,0	2,0	2,3	3,1
0,5 % Fiber				
F_{maks} [kN]	783,0	1216,7	424,8	732,0
σ_{maks} [N/mm ²]	34,8	54,1	37,8	65,1
$\epsilon_{brudd,tverr}$ [‰]	1,0	1,3	0,7	1,1
$\epsilon_{brudd,langs}$ [‰]	2,2	2,3	2,6	3,1
1,0 % Fiber				
F_{maks} [kN]	738,0	1238,3	426,7	791,6
σ_{maks} [N/mm ²]	32,8	55,0	37,9	70,4
$\epsilon_{brudd,tverr}$ [‰]	0,5	1,2	0,9	1,8
$\epsilon_{brudd,langs}$ [‰]	2,0	2,3	3,0	3,8

7.4.3 Effekt av tøyingsgradient for prismene

Tabell 7.3 er hentet fra masteroppgaven i 2014, og viser forskjellen mellom sentrisk og eksentrisk testing for lettbetongprismene. På tilsvarende måte er forskjellen mellom sentrisk og eksentrisk testing listet opp for normalbetong i.

Tabell 7.6: Endringer ved eksentrisk testing i forhold til sentrisk testing for lettbetong

	Sentrisk	Eksentrisk	Endring [%]
Lettbetong 0 %			
σ_{maks} [N/mm ²]	31,9	36,8	15,4 %
$\epsilon_{\text{brudd,tverr}}$ [‰]	0,7	0,8	14,3 %
$\epsilon_{\text{brudd,langs}}$ [‰]	2	2,3	15,0 %
Lettbetong 0,5 %			
σ_{maks} [N/mm ²]	34,8	37,8	8,6 %
$\epsilon_{\text{brudd,tverr}}$ [‰]	1	0,7*	-30,0 %*
$\epsilon_{\text{brudd,langs}}$ [‰]	2,2	2,6	18,2 %
Lettbetong 1 %			
σ_{maks} [N/mm ²]	32,8	37,9	15,5 %
$\epsilon_{\text{brudd,tverr}}$ [‰]	0,5	0,9	80,0 %
$\epsilon_{\text{brudd,langs}}$ [‰]	2	3	50,0 %

*Tverrgiver hang seg opp

Tabell 7.7: Endringer ved eksentrisk testing i forhold til sentrisk testing for normalbetong

	Sentrisk	Eksentrisk	Endring [%]
Normalbetong 0%			
σ_{maks} [N/mm ²]	52,0	63,7	22,5 %
$\epsilon_{brudd,tverr}$ [‰]	0,2	0,7	250,0 %
$\epsilon_{brudd,langs}$ [‰]	2,0	3,1	55,0 %
Normalbetong 0,5%			
σ_{maks} [N/mm ²]	54,1	65,1	20,3 %
$\epsilon_{brudd,tverr}$ [‰]	1,3	1,1	-15,4 %
$\epsilon_{brudd,langs}$ [‰]	2,3	3,1	34,8 %
Normalbetong 1%			
σ_{maks} [N/mm ²]	55,0	70,4	28,0 %
$\epsilon_{brudd,tverr}$ [‰]	1,2	1,8	50,0 %
$\epsilon_{brudd,langs}$ [‰]	2,3	3,8	64,8 %

Begge tabellene indikerer en klar økning av bruddtøyning og maksimal spenning for de eksentriske testene. Dette tyder på at tøyingsgradient bidrar til økt duktilitet ved å bidra til spenningsomfordeling som beskrevet i litteraturkapittelet.

7.4.4 Diskusjon av bruddlinje og bruddoppførsel

Bruddlinjen i normalbetong gikk rundt tilslaget, og dette stemmer overens med teorien presentert i litteraturdelen. Overgangen mellom tilslag og matriks er betegnet som den svake sonen i normalbetongen, og det vil derfor mest sannsynlig oppstå en bruddlinje rundt tilslaget. Lettbetong består av porøst tilslag, og dette gjør at sementpastaen penetrerer innsiden av tilslaget under herdeprosessen. Dette bidrar til en god binding mellom de to komponentene, og lettbetong har derfor ingen svak overgangssone. Bruddlinjen går derfor rett gjennom tilslaget, hvilket ble observert fra testingen av lettbetong-prismene i 2014. De største lecaculene hadde absorbert sementpasta som gjorde dem solide, mens de mindre kulene ikke hadde absorbert pasta og fremdeles var porøse.

Figur 7.9 viser bruddlinjen til et normalbetongprisme med fiber. På figuren ser man at bruddlinjen i endesonen går skrått fra hjørnet av prismet inn mot sentrum. Grunnen for denne bruddoppførselen kan skyldes den treakiselle trykkspenningstilstanden som blir skapt mellom prismet og metallplaten. I midtsonen av prøvestykket er det en vertikal bruddlinje. Denne bruddlinjeoppførselen er gjentakende i flertallet av prismene, og var forventet ut fra teori presentert i litteraturkapittelet. Under testing blir betongprismene trykket sammen, og den naturlige reaksjonen for prismet er å utvide seg i tverretning. Prismene var dimensjonert slik at midtsonen kun var utsatt for enaksiell spenning. Det oppstår derfor først vertikale riss i midtsonen, som vokser mot endesonen. Når risset nærmer seg endesonen, skaper friksjonen fra metallplatene i topp og bunn en treaksiell spenningstilstand som gjør at det vertikale risset går over til å bli et skråriss mot hjørnet av prismet. Bruddtypen til de fleste prismene var derfor en kombinasjon av trykkbrudd og skjærbrudd.

Samtlige normalbetong-prismer både med og uten fiber som ble testet sentrisk opplevde kraftige, eksplosive brudd. Testingen ble utført slik at jekkens deformasjon økte lineært til prøvestykket ble knust. På grunn av normalbetongens høye fasthet var de eksplosive bruddene som forventet.

En av hypotesene ved tilsetning av fiber i betongprismene, var at fibre ville skape et treaksielt spenningsfelt i prismets midtsone, og derfor forbedre prismenes duktilitet. Resultatene viste at flere av prismene med fiber fikk en liten økning av bruddlast, hvilket kan skyldes at fibre har skapt et treaksielt spenningsfelt som forsinker dannelsen av riss i midtsonen. Når rissdannelsen først har skjedd, ser det ikke ut til at fibre med sentrisk trykk evner å omfordele kreftene og forbedre duktiliteten. Ved eksentrisk testing blir fibrenes treaksielle spenningsfelt mer effektivt, som beskrevet i litteraturdelen, og dette vises igjen i resultatene ved at en viss duktilitet ble observert for eksentrisk prismetesting.



Figur 7.9: Prisme etter brudd

8 Konklusjon

I denne oppgaven er data fra firepunkts bøyetester av 16 fullskala lettbetongbjelker og trykktesting av 24 prizmer av lett- og normalbetong blitt behandlet for å sammenligne duktilitet. 6 av prismene ble trykktestet som del av denne oppgaven, de resterende prøvene har blitt testet i masteroppgaver våren 2012 - 2014 ved NTNU.

Bjelkene som ble testet besto av bøylearmering med senteravstand 100 og 270 mm med og uten fiber, bøylefrie bjelker med fiberarmering av 3 ulike fibertyper, samt referansebjelker bestående av hverken bøyler eller fiber. Prismene ble produsert med fiberinnhold på 0.0, 0.5 og 1.0 volumprosent av både lett- og normalbetong. Hver prøvetype ble trykktestet sentrisk og eksentrisk med eksentrisitet lik $b/6$.

Det ble produsert to identiske prøvestykker til hver test. Kun det bøylefrie bjelkeparet med fiberarmering Dramix 65/35 (par 7), og bjelkeparet med få bøyler og fiberarmering (par 4) hadde store avvik i resultatene for duktil oppførsel. Lastkapasitetsavviket ved større nedbøyninger for bjelkepar 4 og 7, var henholdsvis 16 % og 17 % av bruddlast. Ujevn fiberfordeling var den viktigste feilkilden til disse bjelkene.

Resultatene fra bjelketestingen viste at bøyler og fiber hadde positiv effekt på duktiliteten, både hver for seg, men med størst effekt i kombinasjon. Ved bruk av bøyler fikk bjelkene sprø brudd, men ved videre nedbøyning ble lastkapasiteten til bjelkene med tette bøyler opprettholdt. Resultatene viste også at bruk av stålfiber gir bedre duktilitet enn basaltfiber. Store avvik i testing med 35 mm stålfiber hindrer sammenligning med stålfiber på 60 mm.

Ved prismetestingen avsluttet testen ved brudd for de fleste prismene, og tegn til duktilitet ble kun observert ved eksentrisk testing av lettbetong med fiber. Flere av de sentrisk belastede prismene fikk eksplosive, sprø brudd. Fastheten til normalbetong var rundt 20 MPa høyere enn for lettbetong, som gjorde at normalbetongen var sprøere enn lettbetongen.

9 Forslag til videre arbeid

I det videre arbeidet anbefales det å undersøke fibrenes effekt på betongprismer og –bjelker med forskjellige tverrsnittstørrelser for å se om økt ratio mellom bredde og dybde på trykksonehøyden vil forbedre duktiliteten. Det anbefales også å undersøke om fiberlengde på 35 mm har lik effekt som fiberlengde på 60 mm, eller om dette resultatet skyldes at bjelkene i testingen i 2013 hadde lite tverrsnitt. Å utføre tester med større datagrunnlag, og ta røntgen av prøvene med fiber for å undersøke fiberfordelingens virkning på duktiliteten anbefales.

I bøyetestingen i 2012 ble givene som målte nedbøyning koblet av før testslutt for å hindre skade på utstyret. Å utføre bjelketester med langsgående tøyning som parameter for deformasjon kan bidra til tester med større datagrunnlag for duktilitet, og anbefales derfor i det videre arbeidet.

For prismetesting anbefales det å utføre tester med lett- og normalbetong med lik trykkfasthet, for å undersøke forskjellen i materialenes duktile oppførsel.

10 Feilkilder

- Normalbetongprismene som ble testet sentrisk hadde herdetid på over 1 år
- Giverne ble utsatt for store smeller som følge av eksplosive brudd. Det førte til at noen av testene ble utført uten at skruene var strammet godt nok.
- Kun to identiske prøver til hver test.
- Ujevn fiberfordeling i prismer og bjelker
- Bjelkene fra 2012 som har blitt sammenlignet med bjelkene fra 2013 har ulike tverrsnitt (400x350 mm og 200x300 mm).
- Formfeil og avvik på prøvestykkene

11 Bibliography

- [1] CEN, NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008, Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger, Standard Norge, 2008.
- [2] J. V. Thue, «Store Norske leksikon,» 2011. [Internett]. Available: <https://snl.no/betong>.
- [3] S. Chandra og L. Berntsson, *Lightweight Aggregate Concrete, Technology and Applications*, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2007.
- [4] Publikasjon nr.23:Lettbetong prosjektsveiledning, Norsk Betongforening, 1999.
- [5] *Second International Symposium On Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Kristiansand, 2000.
- [6] T. M. Jensen og J. A. Øverli, *Experimental study on flexural ductility in over-reinforced Lightweight aggregate concrete beams*, SINTEF, 2013.
- [7] *Byggeteknisk forskrift med veiledning(Tek10)*, Direktoratet for Byggkvalitet, 2011.
- [8] H. Nedrelid, *Towards a better understanding of the ultimate behaviour of lightweight aggregate concrete on compression and bending*, Doctoral thesis at NTNU, 2012.
- [9] A. A. Griffith, «The phenomena of rupture and flow in solids,» *The Royal Society*, vol. 221, nr. 582-593, 1921.
- [10] J. Cook, J. E. Gordon, C. C. Evens og D. M. Marsh, «A Mechanism for the Control of Crack Propagation in All-Brittle Systems,» *The Royal Society*, vol. 282, nr. 1391, 1964.
- [11] J. G. v. Mier, *Concrete Fracture: A Multiscale Approach*, CRC press Taylor and Francis group, 2012.
- [12] D. Krajcinovic og J. van Mier, *Damage and Fracture of Disordered Materials*, Wien: Springer-verlag Wien gmbH, 2000.

- [13] M. Raab, E. Schulz og M. Sova , «The Cook-Gordon Mechanism in,» *National Research Institute of Materials*, vol. 33, nr. 22, 1993.
- [14] A. Bentur og S. Mindness, *Fibre Reinforced cementitious composites*, E and F spon, 1990.
- [15] A. e. Naaman, «Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites,» *Journal of advanced concrete technology* , vol. 1, nr. 3, 2003.
- [16] T. Kanstad, «Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner,» *SINTEF building and Infrastructure* , 2011.
- [17] M. Trüb, *Numerical modeling of high performance fiber reinforced cementitious composites*, ETH , 2011.
- [18] C. O. Sørensen, S. E. Petter og A. Østvold , «Factors Affecting Fiber Distribution in concrete and the Efficiency of Fibers on crack Reduction,» *Institute of Mathematics and Technology*, nr. 47, 2012.
- [19] A. Bentur og S. Mindness, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Taylor&Francis, 2007.
- [20] D. Jettli og S. Gøran , *Duktilitet av fiberarmert lettbetong under trykk*, Trondheim: NTNU , 2014.
- [21] CEN, *Ns-en 12390-3:2009 Prøving av herdnet betong - DEl 3: Prøvelegemers trykkfasthet*, Standard Norge , 2009.
- [22] M. Sensors, «<http://www.macrosensors.com>,» 2014. [Internett]. Available: <http://www.macrosensors.com/downloads/misc/LVDT-Basics.pdf>.
- [23] CEN, *Ns-en 14651:2005 + a1:2007 - Prøvingsmetode for betong med metalliske fibre - Måling av bøyestrekfasthet(proporsjonalitetsgrense og restfastheter)*, Standard Norge, 2007.
- [24] Ø. Rønningen og F. T. Lang, *Duktilitet av lettbetong*, NTNU, 2012.
- [25] J. H. Oskarsson, *The Effect of Fibres on the Compressive*, NTNU, 2013.

[26] S. Hoff og T. Steen, Duktilitet av lettbetong, NTNU, 2013.

[27] J. L. Clarke, Structural lightweight aggregate concrete, Blackie academic professional , 1993.

[28] G. Markset, Failure Of Concrete Under Compressive Strain Gradients, Trondheim: NTH, 1993.

12 Vedlegg

Innhold

A. Resepter betongblanding.....	A—1
B. Resultat sylindere.....	B—1
C. Resultat bjelker	C—1
D. Resultat prizmer	D—1
Normalbetong 0.0 % prøve 1/2	D—1
Normalbetong 0.0 % prøve 2/2	D—4
Sammenligning av normalbetong 0.0 % fiber.....	D—6
Normalbetong 0.5 % fiber prøve 1/1	D—8
Normalbetong sentrisk 1.0 % prøve ½.....	D—11
Sentrisk normalbetong 0.0 % prøve 2/2.....	D—14
E. Tabell for standard normalfordeling.....	E—1
F. Utregning av karakteristisk verdi til sylindrene	F—1
G. Fiberdata	G—1

A. Resepter betongblanding

	Opprinnelig mengde [L]	Faktisk mengde [L]	Resultant [L]
LWC 0,0%	0,818	-0,254	0,564
LWC 0,5%	0,818	-0,368	0,450
LWC 1,0%	0,819	-0,315	0,504
NDC 0,0%	0,453	0,23	0,683
NDC 0,5%	0,452	0,33	0,782
NDC 1,0%	0,453	0,33	0,783

Prosj./id.:	NDC 0% Dramix 65/60 3D				
Blandevolum:		100	liter		
Dato:					
Tidspunkt for vanntilsetning					
Ansvarlig:					
Utført av:					

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Standard FA (STD FA	302,0	30,200			30,200	
Elkem Microsilica 940 U (A-40	30,2	3,020	0	0,000	3,020	
Fly ash (A-4076)	45,3	4,530	0	0,000	4,530	
Fritt vann	206,6	20,657		-3,849	16,808	17,476
Absorbert vann	6,7	0,668			0,668	
Årdal 0-2 mm (A-3726)_vaske	593,3	59,329	1	0,593	59,922	
Årdal 0-8 mm (A-3995)	1098,5	109,853	2,6	2,856	112,709	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	4,5	0,453	81,5	0,369	0,683	
	0	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Sika demper	0,3	0,030	100	0,030	0,030	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Dramix 65/60 3D	0,0	0,000			0,000	
	0	0,0	0,000		0,000	

*Se fotnote på delark "Proporsjonering ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	T-50	4,88	s		
Utbredelsesmål		660	mm		
Luft		3,5	%		
Densitet		2267,3	kg/m ³		

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					
150x150x550 prismer					

Prosj./id.: NDC 0,5% Dramix 65/60 3D					
Blandevolum:		100	liter		
Dato:					
Tidspunkt for vanntilsetning					
Ansvarlig:					
Utført av:					
Materialer	Resept	Sats	Fukt*	Korr.	Oppveid**
	kg/m3	kg	%	kg	kg
Norcem Standard FA (STD FA 10	301,6	30,155			30,155
Elkem Microsilica 940 U (A-4066	30,2	3,016	0	0,000	3,016
Fly ash (A-4076)	45,2	4,523	0	0,000	4,523
Fritt vann	206,3	20,626		-3,824	16,802
Absorbert vann	6,6	0,663			0,663
Årdal 0-2 mm (A-3726)_vasket r	589,1	58,912	1,0	0,589	59,501
Årdal 0-8 mm (A-3995)	1090,8	109,081	2,6	2,836	111,917
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	4,5	0,452	81,5	0,369	0,782
	0	0,0	0,000	0	0,000
Sika demper	0,3	0,030	100	0,030	0,030
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Dramix 65/60 3D	39,0	3,900			3,900
	0	0,0	0,000		0,000
*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere					
Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	T-50		5 s		
Utbredelsesmål			640 mm		
Luft			2,7 %		
Densitet			2298,1 kg/m^3		
Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					
150x150x550 prismer					

Prosj./id.: NDC 1% Dramix 65/60 3D					
Blandevolum:		100	liter		
Dato:					
Tidspunkt for vanntilsetning					
Ansvarlig:					
Utført av:					
Materialer	Resept	Sats	Fukt*	Korr.	Oppveid**
	kg/m ³	kg	%	kg	kg
Norcem Standard FA (STD FA 1	302,0	30,200			30,200
Elkem Microsilica 940 U (A-406	30,2	3,020	0	0,000	3,020
Fly ash (A-4076)	45,3	4,530	0	0,000	4,530
Fritt vann	206,6	20,657		-3,795	16,862
Absorbert vann	6,6	0,657			0,657
Årdal 0-2 mm (A-3726)_vasket	584,0	58,399	1,0	0,584	58,983
Årdal 0-8 mm (A-3995)	1081,3	108,132	2,6	2,811	110,944
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	4,5	0,453	81,5	0,369	0,783
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Sika demper	0,3	0,030	100	0,030	0,030
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Dramix 65/60 3D	78,0	7,800			7,800
	0,0	0,000			0,000
*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere					
Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	T-50		7 s		
Utbredelsesmål			600 mm		
Luft			2,5 %		
Densitet			2326,5 kg/m ³		
Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindere					
100x200 sylindere					
150x150x550 prismer					

Prosj./id.: LWC 1800 0% Dramix 65/60 3D					
Blandevolum:	100 liter				
Dato:					
Tidspunkt for vanntilsetning					
Ansvarlig:					
Utført av:					
Materialer					
	Resept kg/m3	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Standard	454,4	45,444			45,444
Elkem Microsilica 940U (A-40	45,4	4,544	0	0	4,544
Kalksteinsmel	4,5	0,454	0	0	0,454
Fritt vann	207,2	20,722		-2,058	18,665
Absorbert vann	30,7	3,066			3,066
Leca 2-4 mm (A-4048)	119,2	11,923	0	0	11,923
Leca 800 4-8 mm (A-4048)	230,7	23,072	0	0	23,072
0/8mm NSBR (A-3995)	431,3	43,129	2,6	1,121	44,250
0/2mm vasket maskin (A-372	269,6	26,955	1	0,270	27,225
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
Dynamon SX-N	8,2	0,818	81,5	0,667	0,564
	0	0	100	0	0
	0	0	100	0	0
	0	0	100	0	0
Dramix 65/60 3D	0	0			0
	0	0			0
*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere					
Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	T-50	1,88	s		
Utbredelsesmål		590	mm		
Luft		7	%		
Densitet		1696,65	kg/m ³		
Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					
100x200 sylindre					
Totalt tilsatt SP					

Prosj./id.: LWC 1800 0,5% Dramix 65/60 3D						
Blandevolum:		100	liter			
Dato:						
Tidspunkt for vanntilsetning						
Ansvarlig:						
Utført av:						
Materialer						
	Resept	Sats	Fukt*	Korr.	Oppveid**	
	kg/m ³	kg	%	kg	kg	
Norcem Standard	454,7	45,470			45,470	
Elkem Microsilica 940U (A-4066)	45,5	4,547	0	0,000	4,547	
Kalksteinsmel	4,5	0,455	0	0,000	0,455	
Fritt vann	207,3	20,734		-2,046	18,688	21,728
Absorbent vann	30,4	3,039			3,039	
Leca 2-4 mm (A-4048)	118,2	11,821	0	0,000	11,821	
Leca 800 4-8 mm (A-4048)	228,7	22,873	0	0,000	22,873	
0/8mm NSBR (A-3995)	427,6	42,757	2,6	1,112	43,868	
0/2mm vasket maskin (A-3726)	267,2	26,723	1,0	0,267	26,990	
0	0,0	0	0	0,000	0,000	
	0,0	0	0	0,000	0,000	
	0,0	0	0	0,000	0,000	
	0,0	0	0	0,000	0,000	
	0,0	0	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	8,2	0,818	81,5	0,667	0,450	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Dramix 65/60 3D	39,0	3,900			3,900	
0	0,0	0,000			0,000	
*Se fotnote på delark "Proporsjonering"		** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere				
Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	T-50	1,97	s			
Utbredelsesmål		570	mm			
Luft		5,8	%			
Densitet		1774,9	kg/m ³			
Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt						
Terninger						
150x300 sylindre						
100x200 sylindre						
100x200 sylindre						

Prosj./id.: LWC 1800 1,0% Dramix 65/60 3D					
Blandevolum:		100	liter		
Dato:					
Tidspunkt for vanntilsetning					
Ansvarlig:					
Utført av:					
Materialer					
	Resept	Sats	Fukt*	Korr.	Oppveid**
	kg/m ³	kg	%	kg	kg
Norcem Standard	455,0	45,496			45,496
Elkem Microsilica 940U (A-400)	45,5	4,550	0	0,000	4,550
Kalksteinsmel	4,5	0,455	0	0,000	0,455
Fritt vann	207,5	20,746		-2,034	18,712
Absorbert vann	30,1	3,013			3,013
Leca 2-4 mm (A-4048)	117,2	11,718	0	0,000	11,718
Leca 800 4-8 mm (A-4048)	226,7	22,674	0	0,000	22,674
0/8mm NSBR (A-3995)	423,9	42,385	2,6	1,102	43,487
0/2mm vasket maskin (A-372)	264,9	26,491	1,0	0,265	26,756
	0	0,0	0	0,000	0,000
		0,0	0	0,000	0,000
		0,0	0	0,000	0,000
		0,0	0	0,000	0,000
		0,0	0	0,000	0,000
		0,0	0	0,000	0,000
		0,0	0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	8,2	0,819	81,5	0,667	0,504
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Dramix 65/60 3D	78,0	7,800			7,800
	0	0,0	0	0,000	0,000
*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere					
Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	T-50	2,88	s		
Utbredelsesmål		560	mm		
Luft		5,6	s		
Densitet		1726	kg/m ³		
Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					
100x200 sylindre					
Totalt tilsatt SP					

B. Resultat sylindere

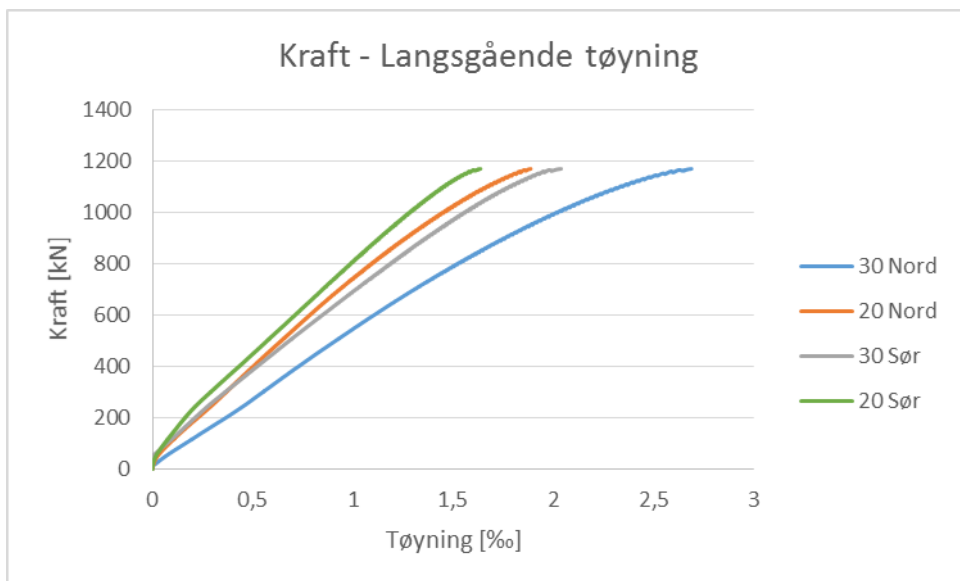
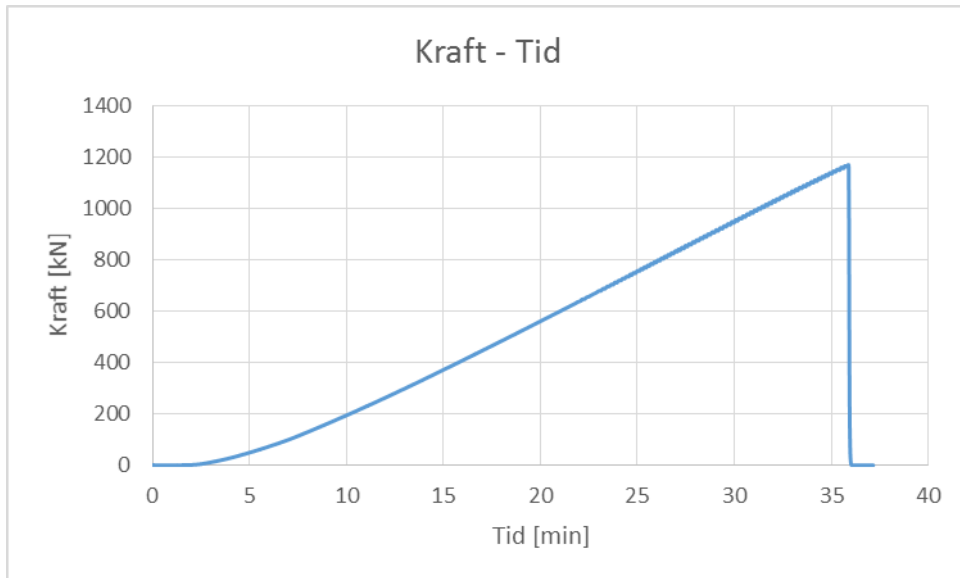
Lettbetong										
Syl.nr	Fiber %	Vekt [g]	$f_{ck,s}$ [N/mm ²]	X_{fck}	μ_{fck}	S_{fck}	ρ [Kg/m ³]	X_p	μ_p	S_p
4	0,5 %	2808,9	47,84				1789,1			
5	0,5 %	2730,4	46,45	46,0	47,1	0,7	1739,1	1721,8	1762,9	25,1
6	0,5 %	2764,1	47,08				1760,6			
4	1 %	2712,5	42,61				1727,7			
5	1 %	3113,2	56,58	35,5	47,9	7,6	1982,9	1563,8	1809,8	150,0
6	1 %	2698,5	44,51				1718,8			
Normalbetong										
4	0.5%	3543,1	70,52				2256,8			
5	0.5%	3602,9	75,95	65,7	71,8	3,7	2294,8	2219,7	2264,5	27,3
6	0.5%	3519,8	68,90				2241,9			
4	1 %	3596,1	78,88				2290,5			
5	1 %	3719,3	75,51	74,3	77,1	1,7	2369,0	2267,3	2345,1	47,4
6	1 %	3730,2	76,96				2375,9			

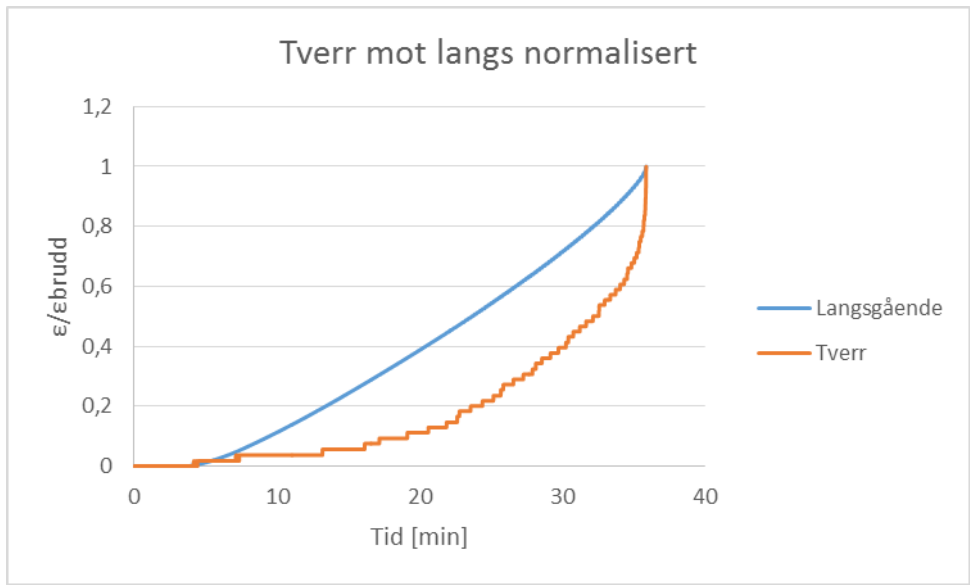
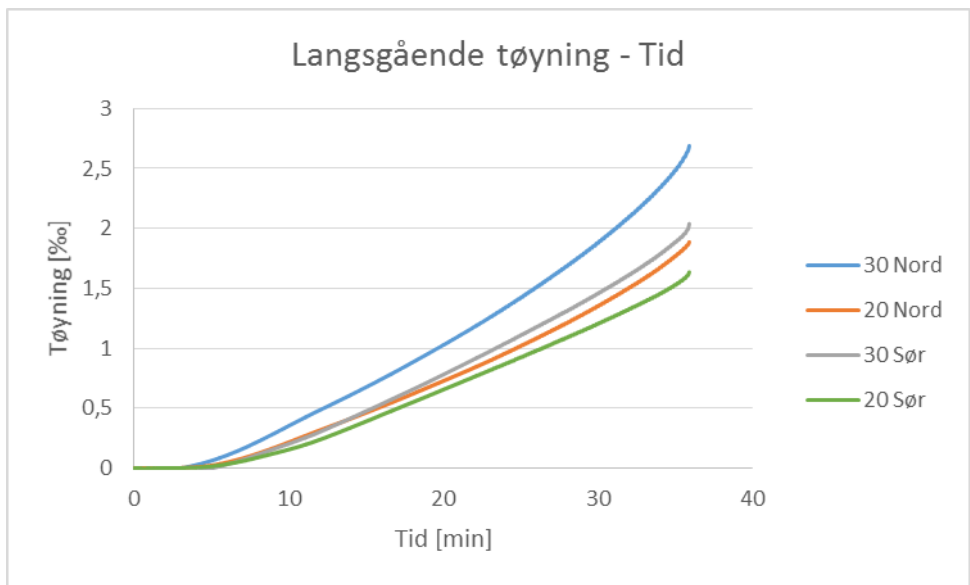
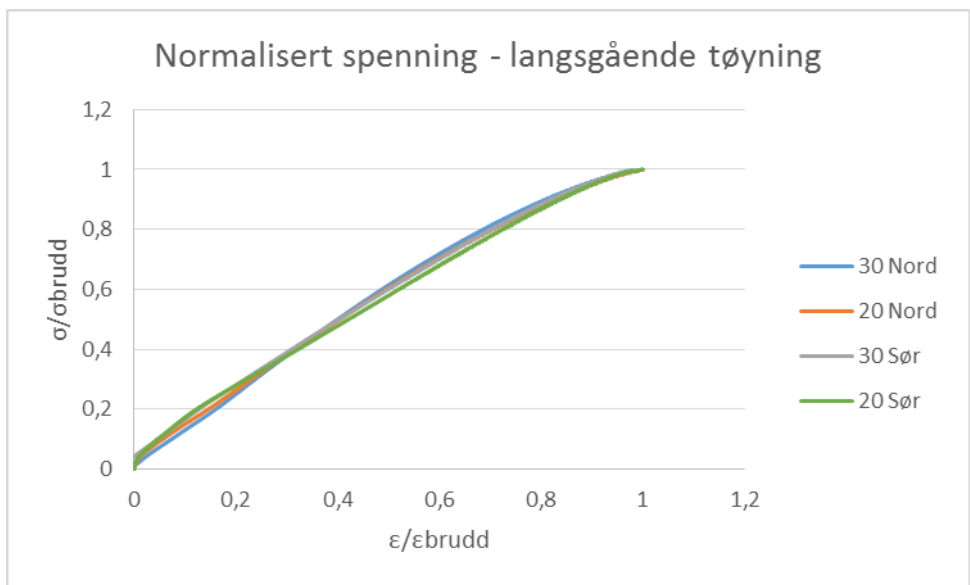
C. Resultat bjelker

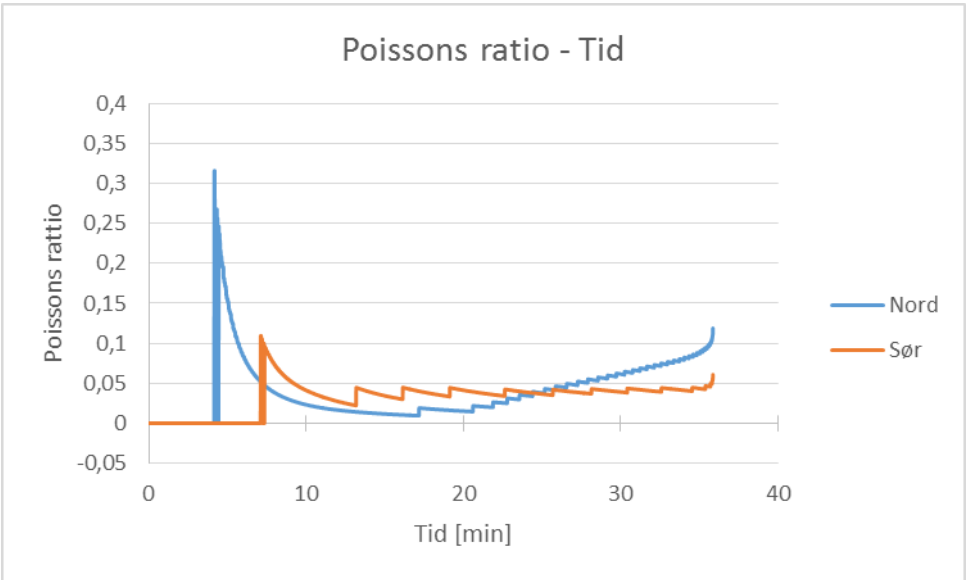
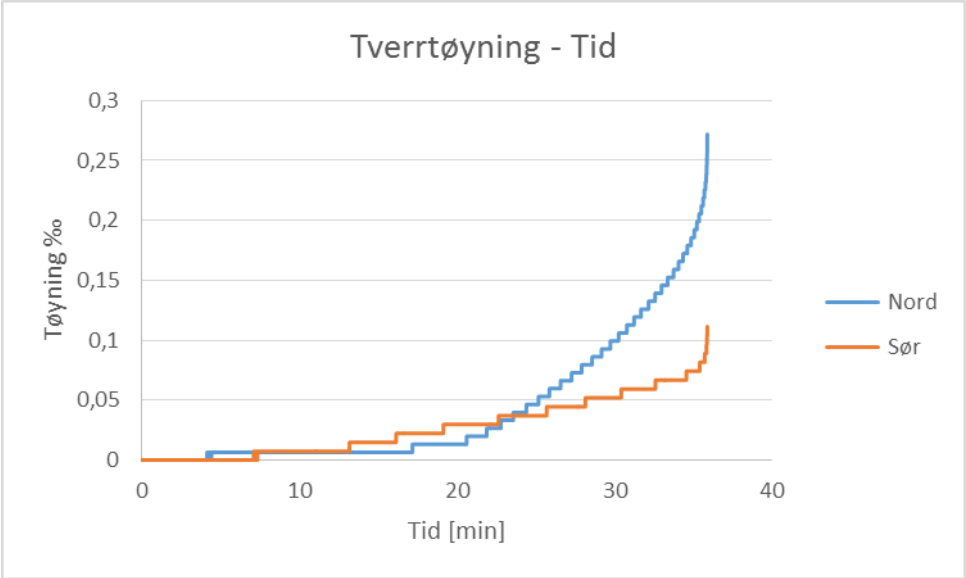
Lettbetong										
bjelke nr	Fiber %	N snitt	N høy	N ven	Kraft [kN]	σ [N/mm ²]	X_{σ} [N/mm ²]	μ_{σ} [N/mm ²]	S_{σ} [N/mm ²]	
B1	0,5	125,5	125,4	125,7	15,7	5,0				
B2	0,5	125,0	125,0	125,0	16,9	5,4	4,8	5,2	0,2	
B3	0,5	125,5	125,6	125,5	16,4	5,2				
B4	1	125,76	125,8	125,72	16,9	5,3				
B5	1	125,90	126,1	125,73	8,6	2,7	2,0	4,3	1,4	
B6	1	126,30	126,5	126,09	15,3	4,8				
Normalbetong										
B7	0,5	125,1	125,4	124,8	23,75	7,6				
B8	0,5	126,3	126,2	126,4	22,32	7,0	4,9	6,7	1,1	
B9	0,5	126,3	126,6	126,1	17,38	5,4				
B10	1	126,1	126,1	126,2	25,47	8,0				
B11	1	125,9	125,9	126,0	24,73	7,8	5,0	7,1	1,3	
B12	1	125,8	125,3	126,3	17,84	5,6				

D. Resultat prismer

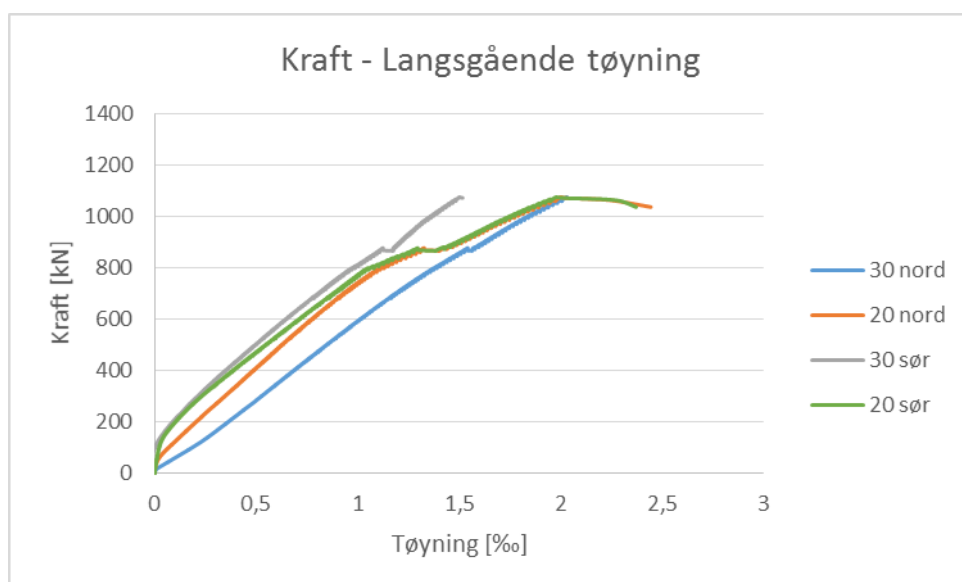
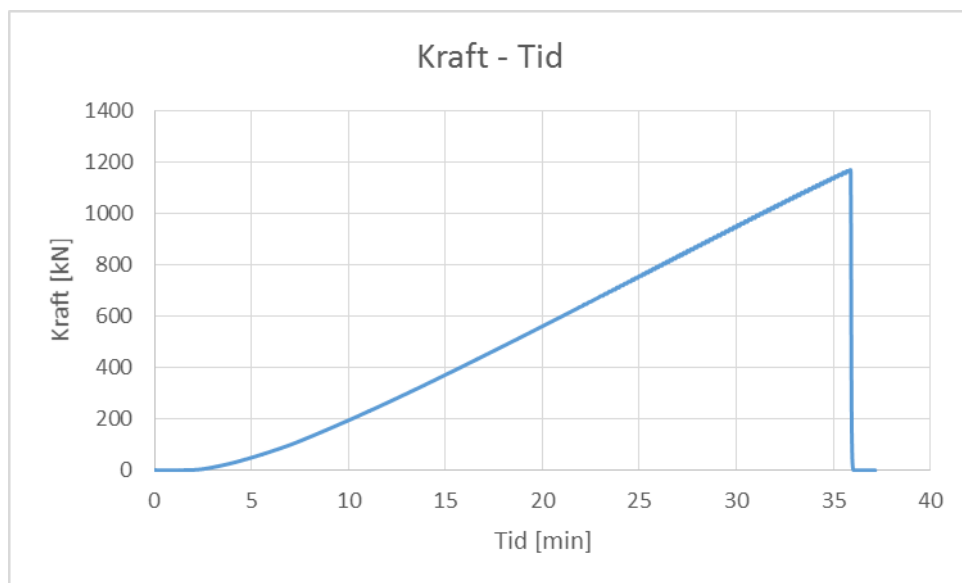
Normalbetong 0.0 % prøve 1/2

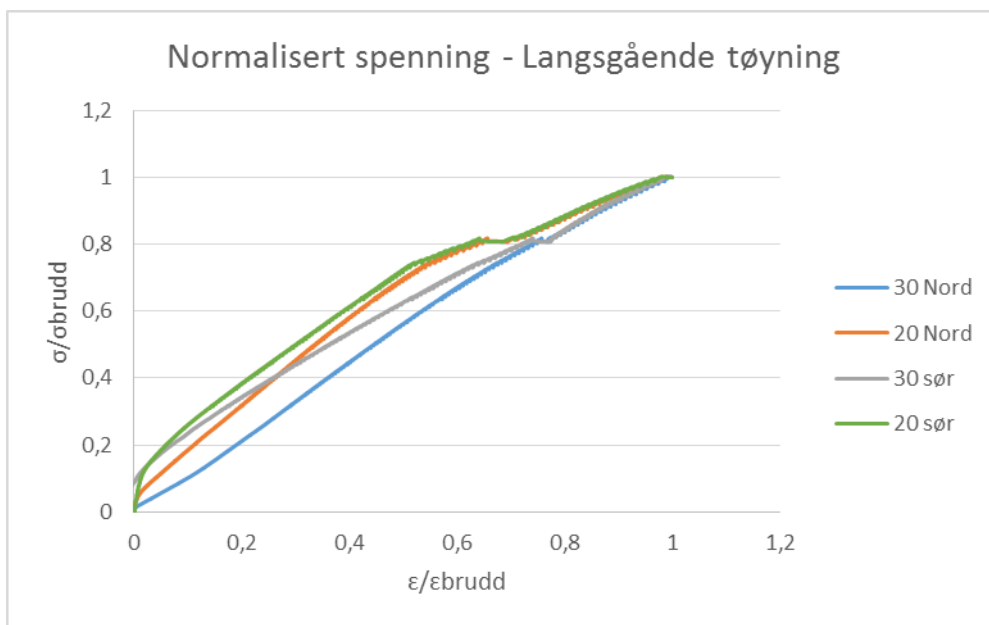
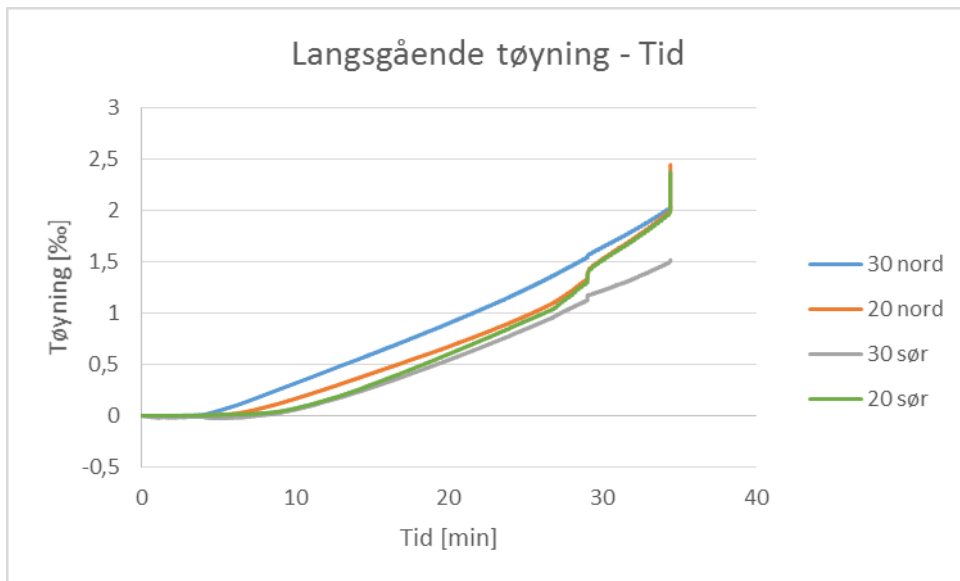






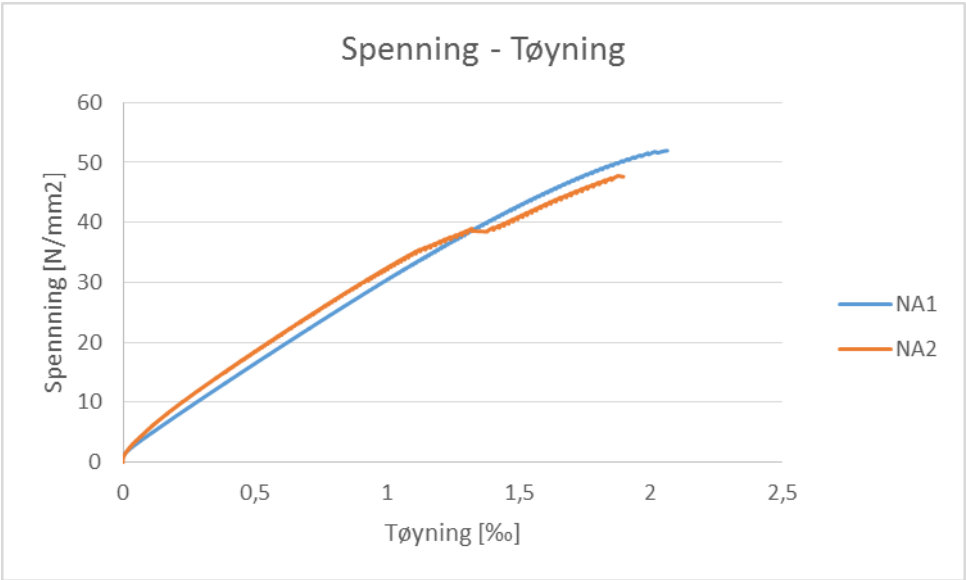
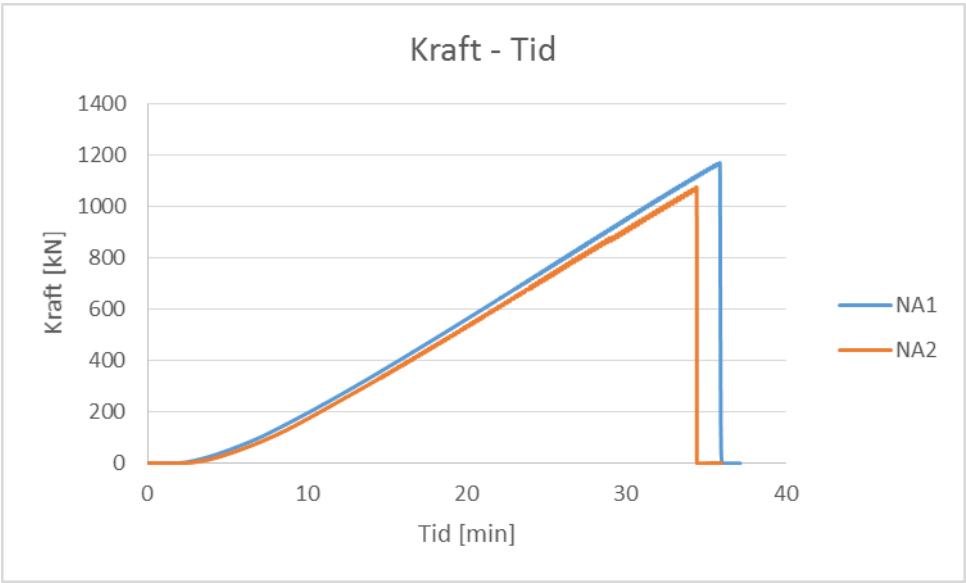
Normalbetong 0.0 % prøve 2/2

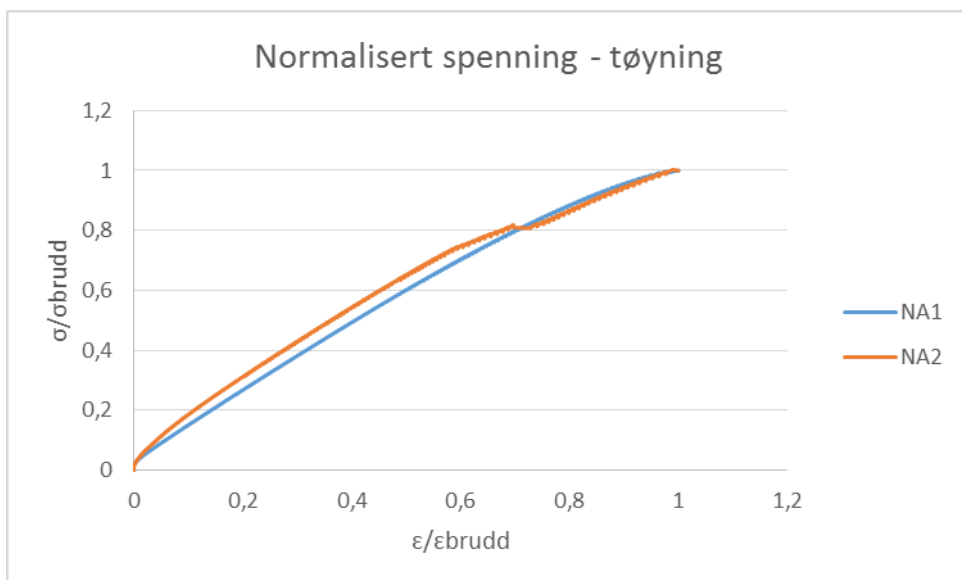
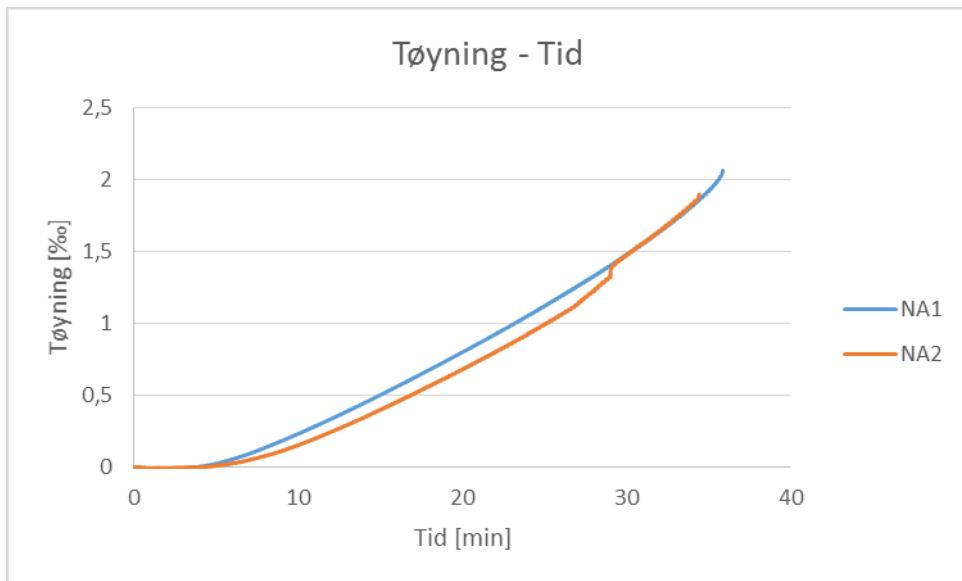




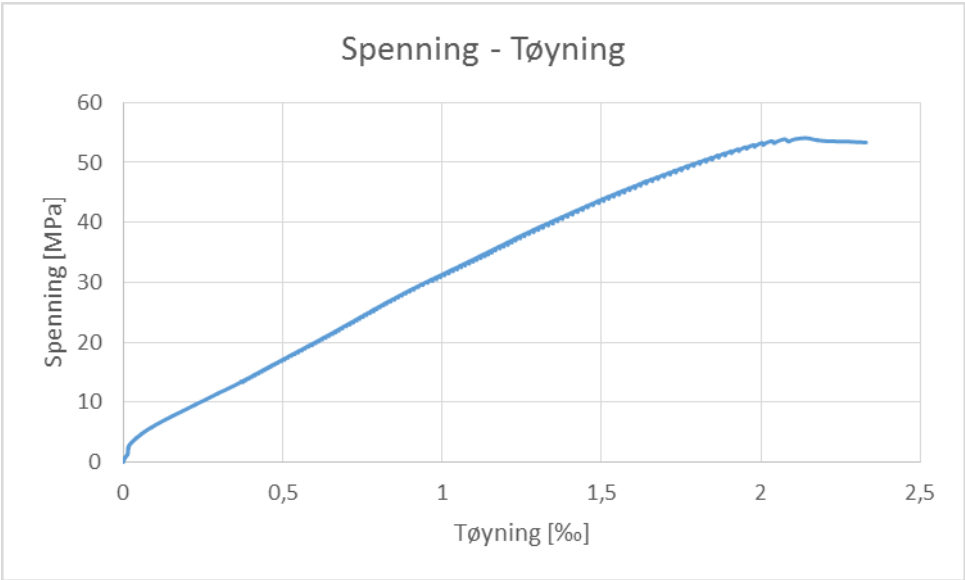
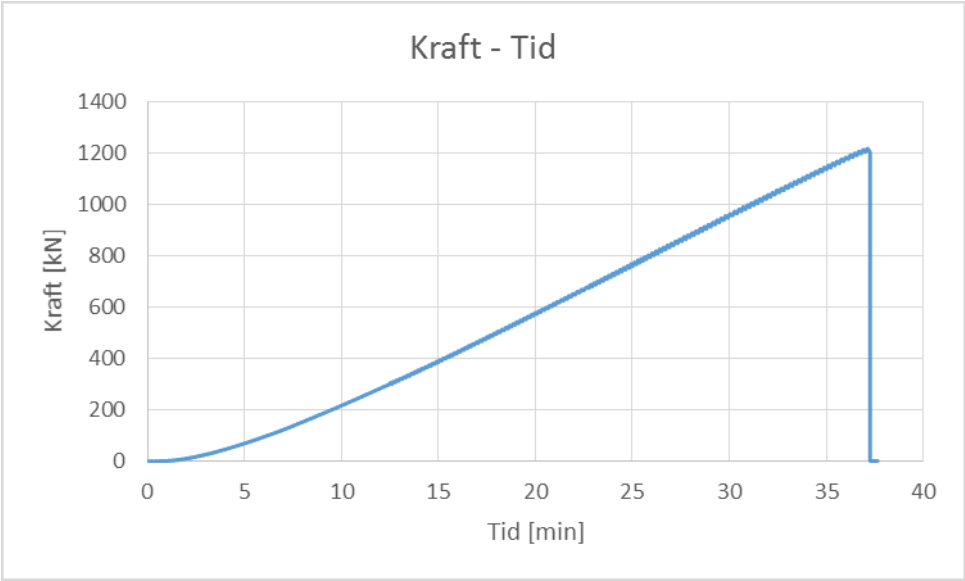
Tverrgående spenning hang seg opp, ingen grafer fra logging av tverrtøying.

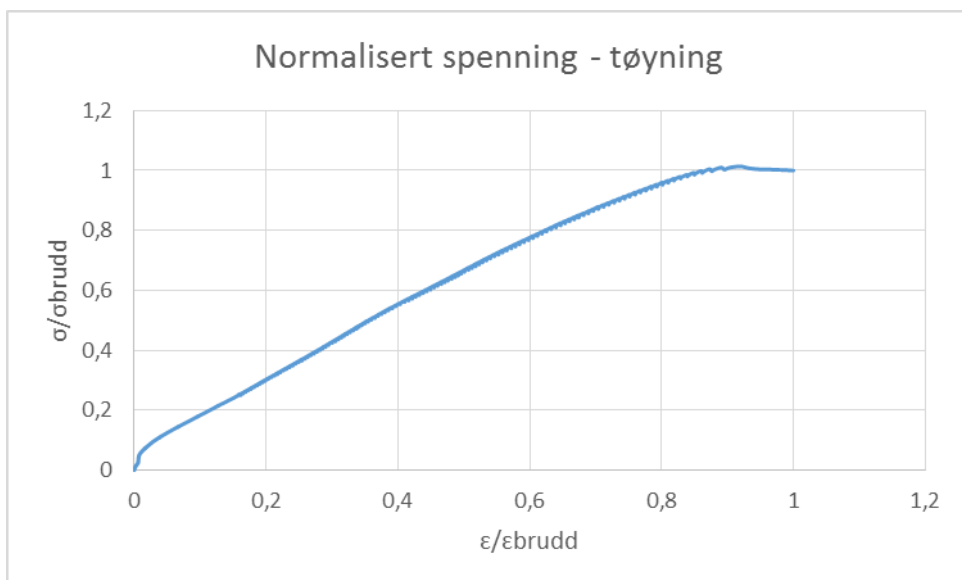
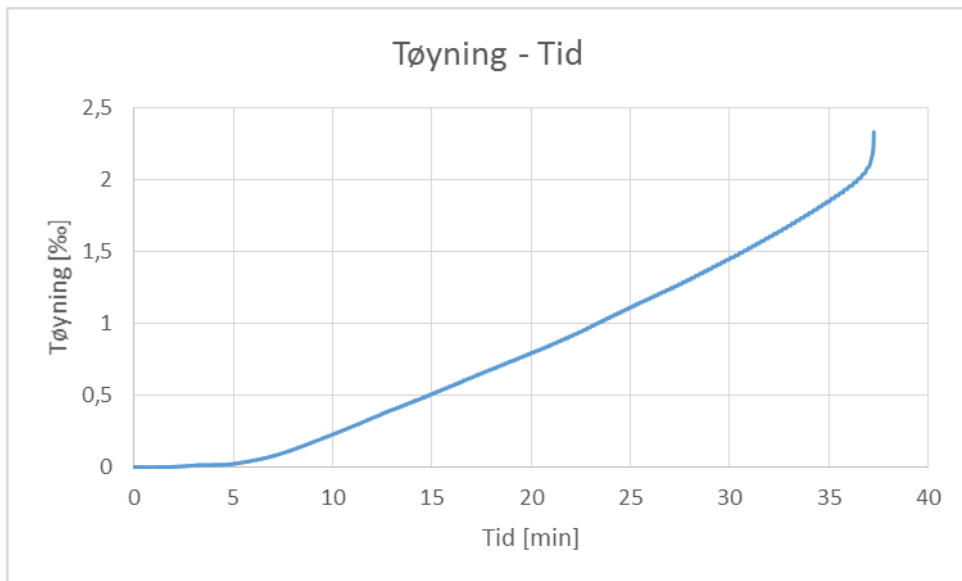
Sammenligning av normalbetong 0.0 % fiber

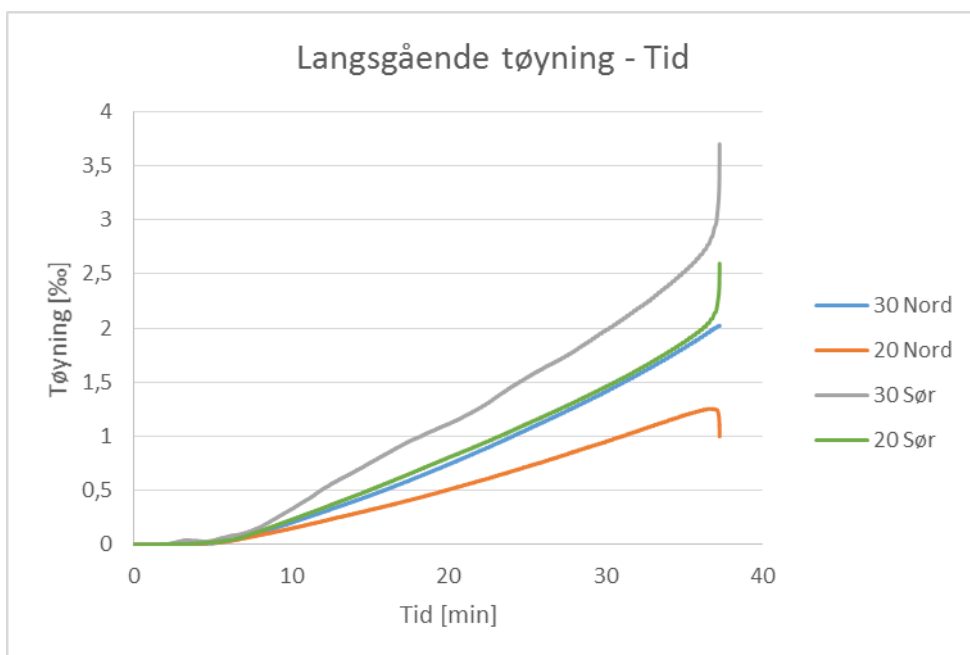
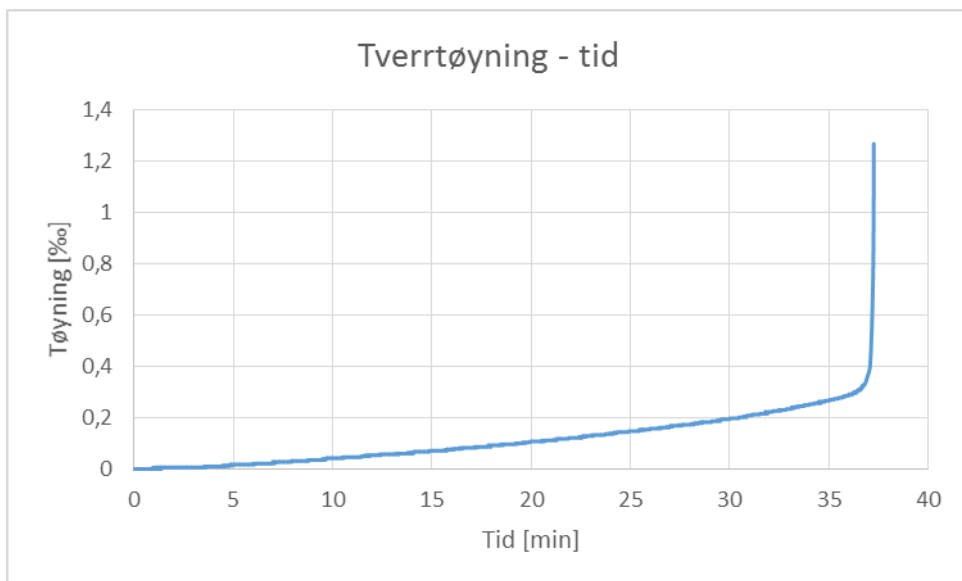




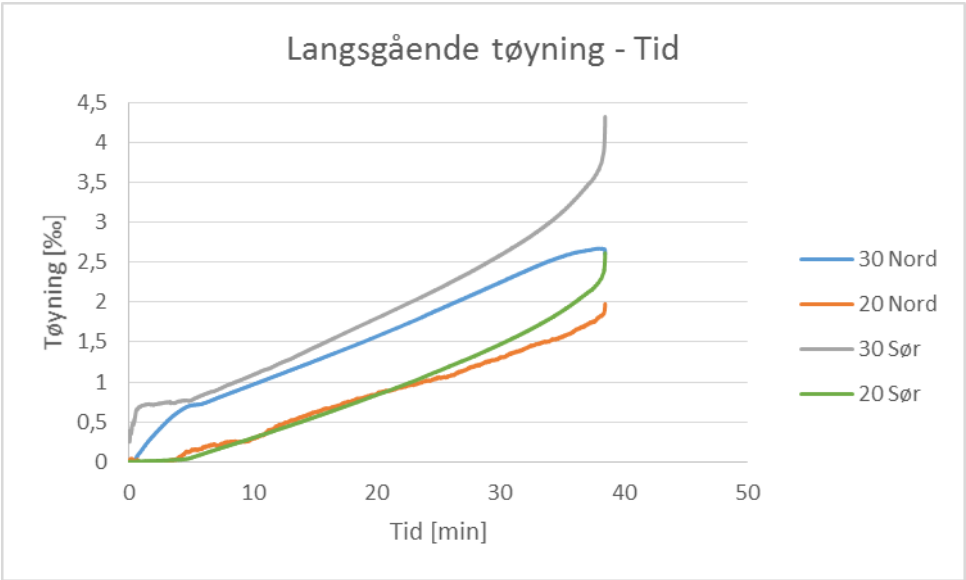
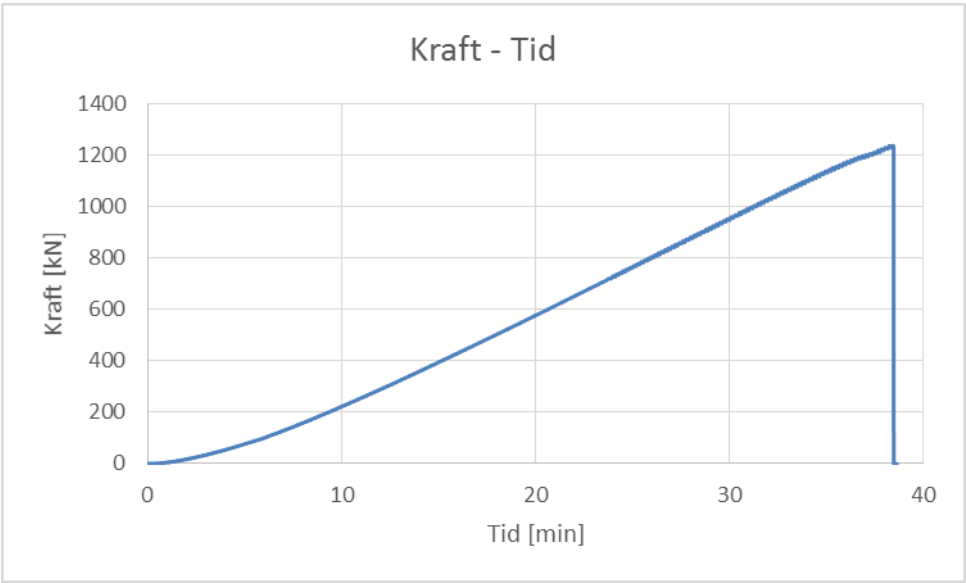
Normalbetong 0.5 % fiber prøve 1/1

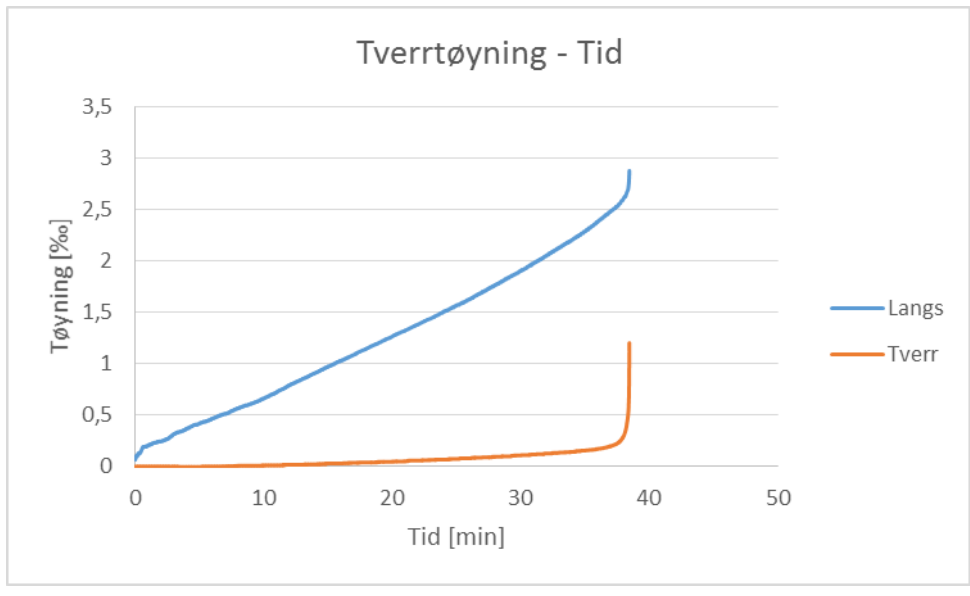
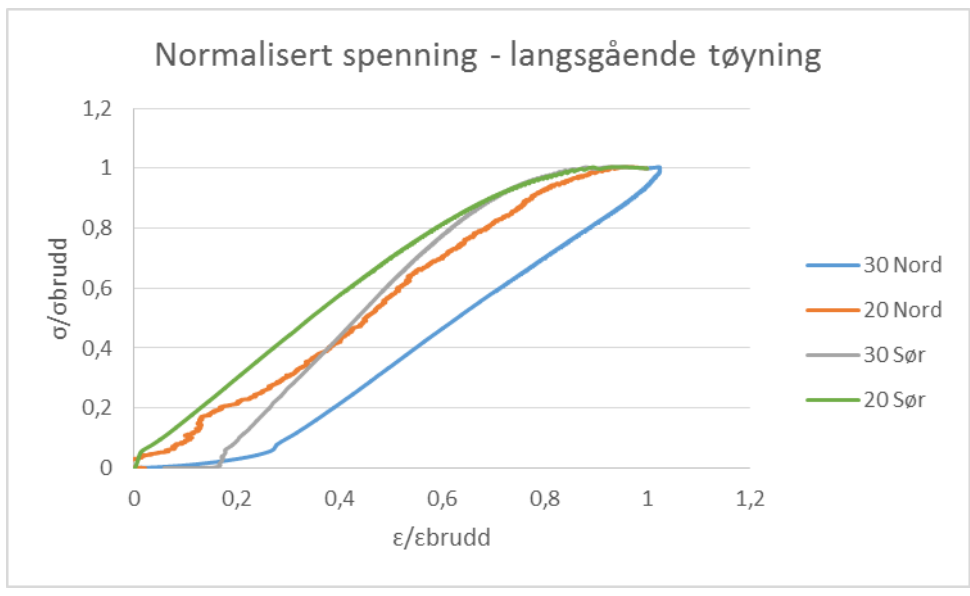
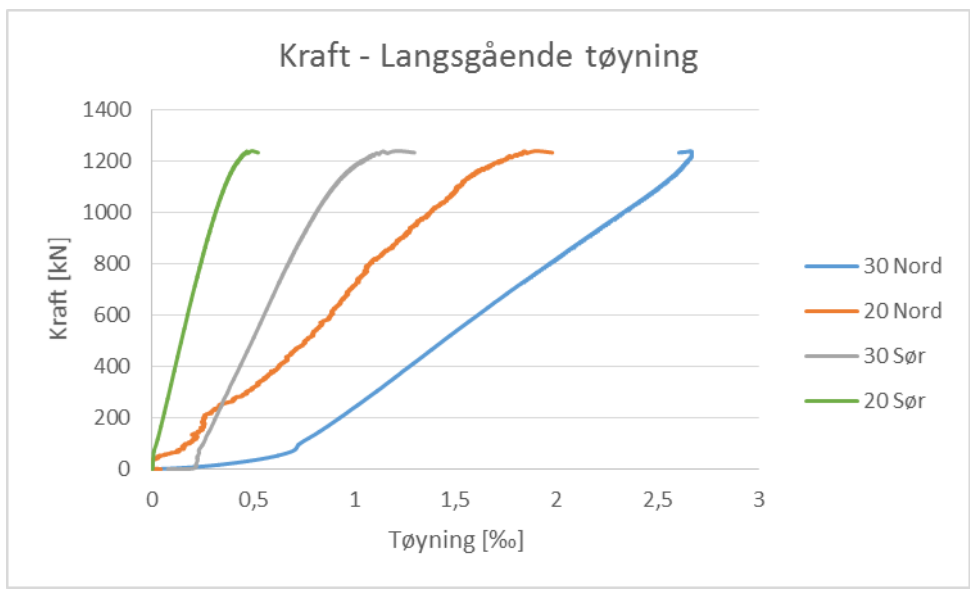


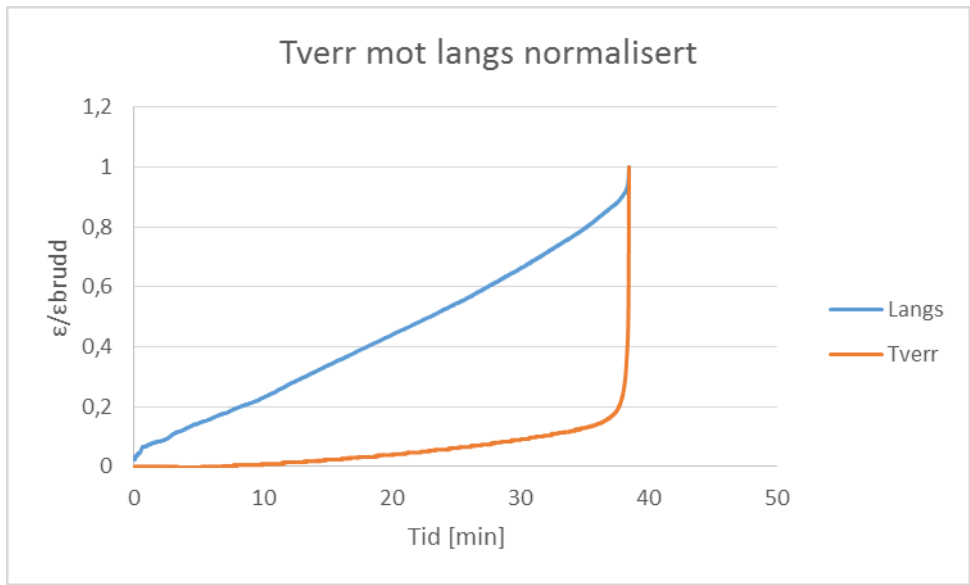
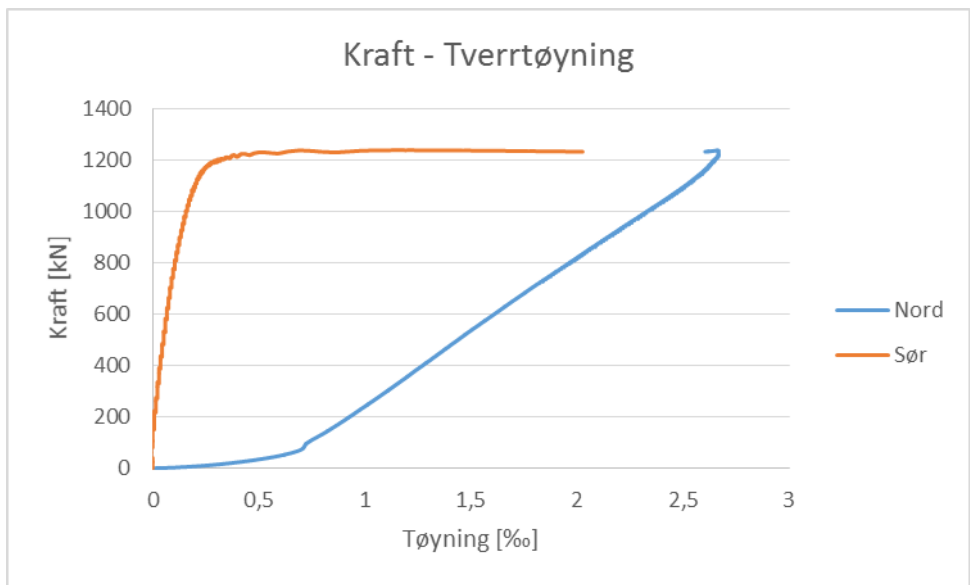
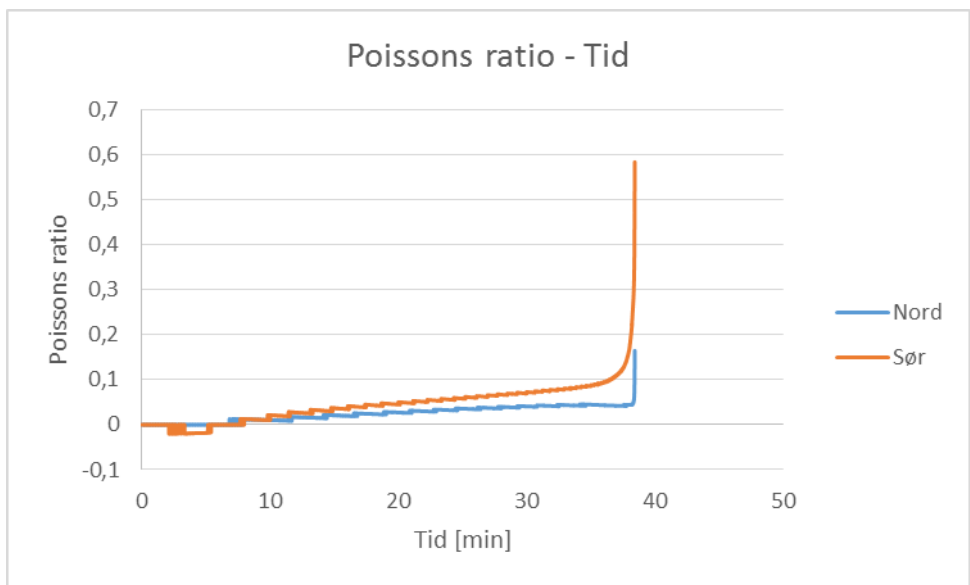




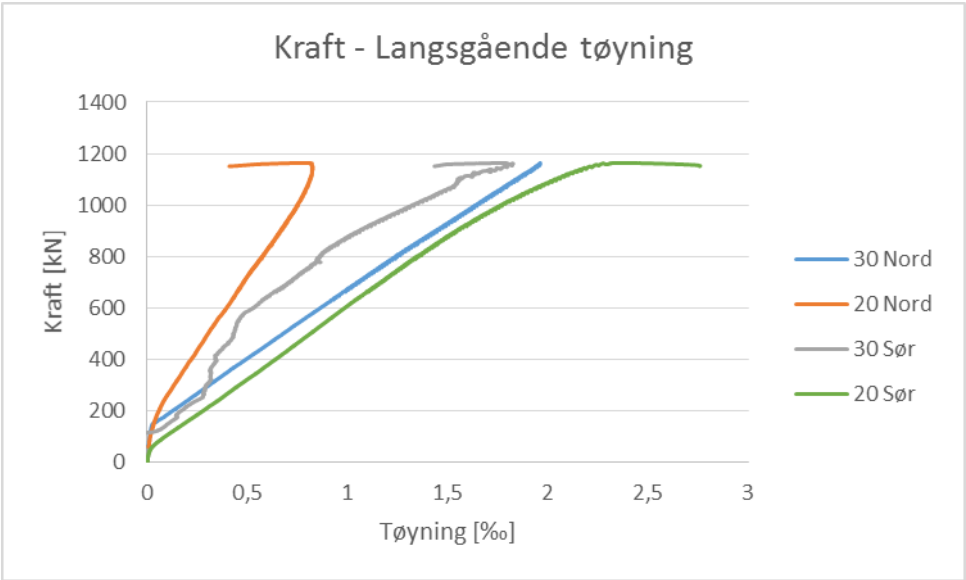
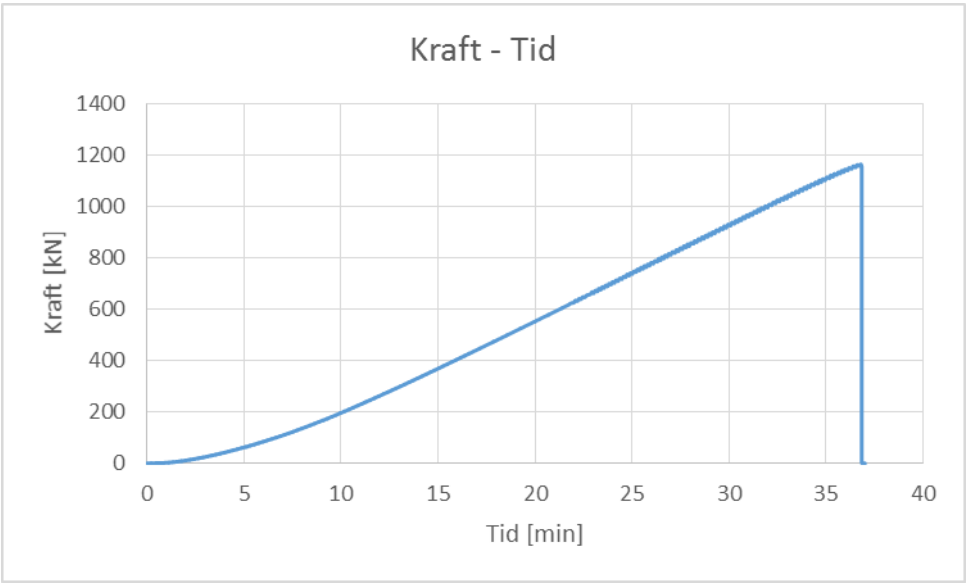
Normalbetong sentrisk 1.0 % prøve ½

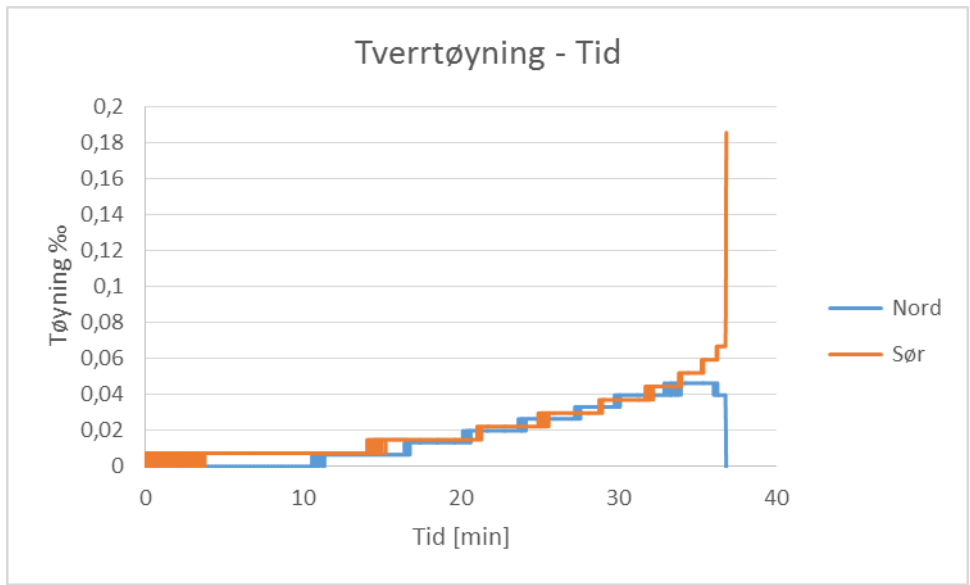
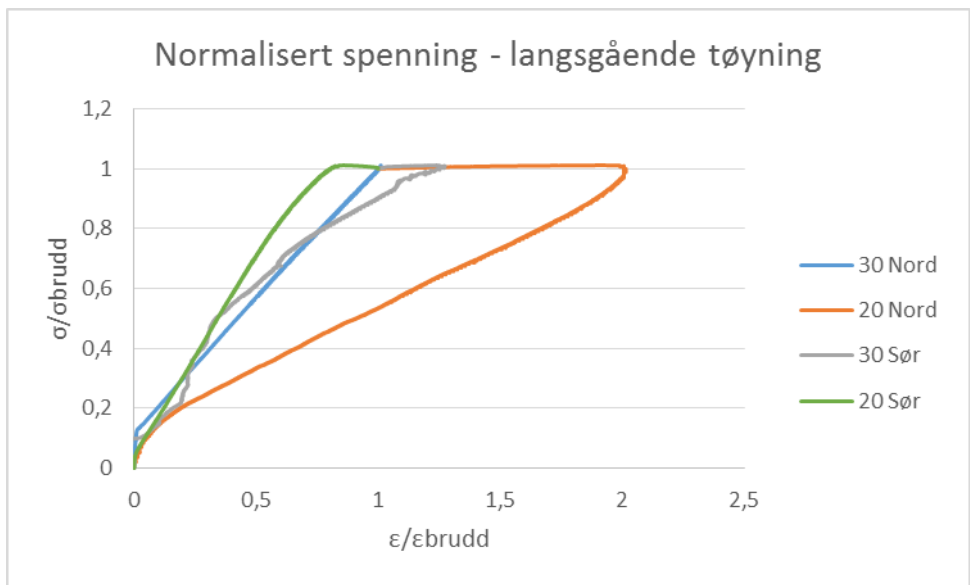
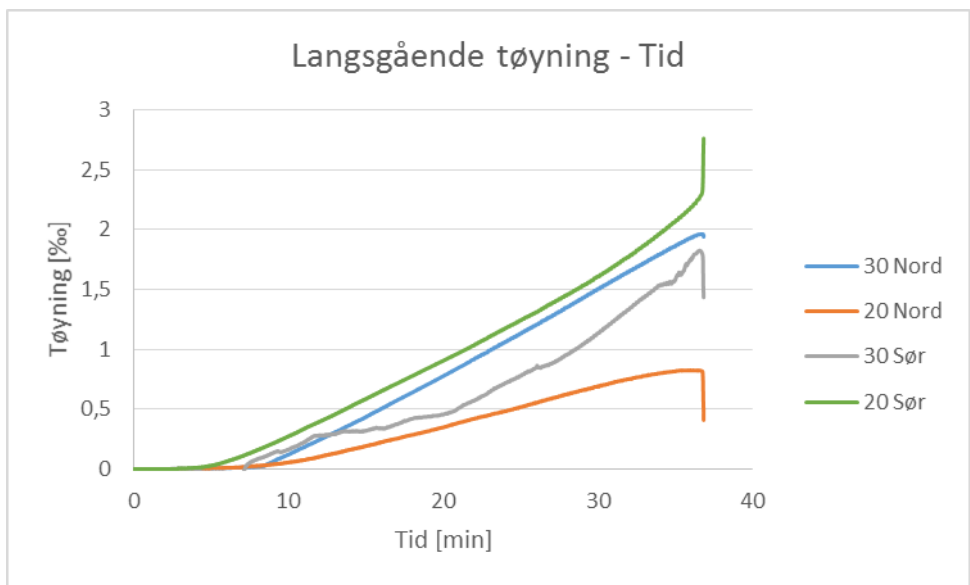


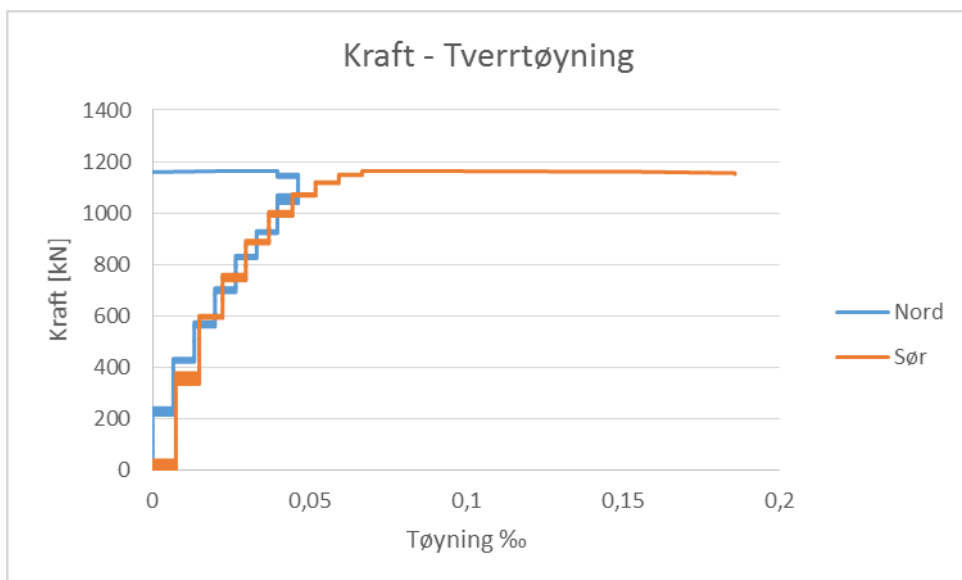
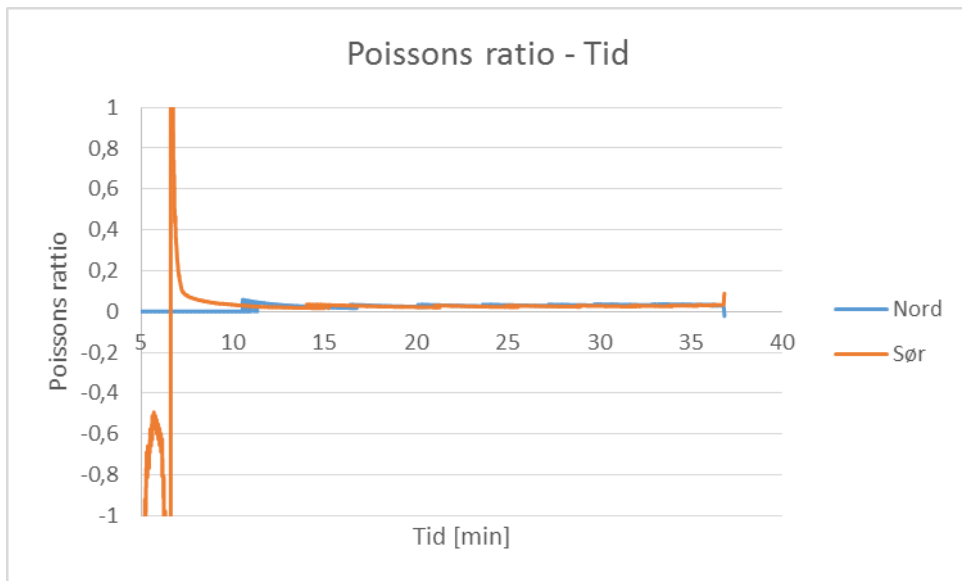




Sentrisk normalbetong 0.0 % prøve 2/2



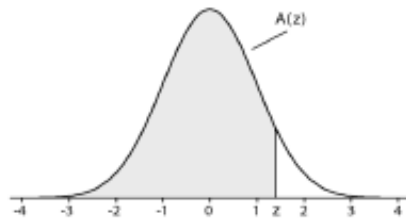




E. Tabell for standard normalfordeling

Standard Normal Distribution

$$A(z) = \Pr(Z \leq z) = \Phi(z)$$



z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-7.9	1.39E-15	1.29E-15	1.19E-15	1.10E-15	1.01E-15	9.33E-16	8.60E-16	7.93E-16	7.32E-16	6.75E-16
-7.8	1.10E-15	2.86E-15	2.64E-15	2.44E-15	2.25E-15	2.08E-15	1.93E-15	1.77E-15	1.64E-15	1.51E-15
-7.7	6.80E-15	6.29E-15	5.82E-15	5.38E-15	4.97E-15	4.59E-15	4.25E-15	3.93E-15	3.63E-15	3.35E-15
-7.6	1.40E-14	1.37E-14	1.27E-14	1.17E-14	1.09E-14	1.02E-14	9.30E-15	8.60E-15	7.95E-15	7.36E-15
-7.5	1.19E-14	2.95E-14	2.74E-14	2.54E-14	2.35E-14	2.18E-14	2.02E-14	1.87E-14	1.73E-14	1.60E-14
-7.4	6.81E-14	6.31E-14	5.86E-14	5.43E-14	5.03E-14	4.67E-14	4.33E-14	4.01E-14	3.72E-14	3.44E-14
-7.3	1.44E-13	1.34E-13	1.24E-13	1.15E-13	1.07E-13	9.91E-14	9.20E-14	8.53E-14	7.91E-14	7.34E-14
-7.2	3.01E-13	2.80E-13	2.60E-13	2.41E-13	2.24E-13	2.08E-13	1.94E-13	1.80E-13	1.67E-13	1.55E-13
-7.1	6.24E-13	5.80E-13	5.40E-13	5.02E-13	4.67E-13	4.34E-13	4.03E-13	3.75E-13	3.49E-13	3.24E-13
-7	1.28E-12	1.19E-12	1.11E-12	1.03E-12	9.61E-13	8.95E-13	8.33E-13	7.75E-13	7.21E-13	6.71E-13
-6.9	2.60E-12	2.42E-12	2.26E-12	2.10E-12	1.96E-12	1.83E-12	1.70E-12	1.58E-12	1.46E-12	1.37E-12
-6.8	5.23E-12	4.88E-12	4.55E-12	4.25E-12	3.96E-12	3.69E-12	3.44E-12	3.21E-12	2.99E-12	2.79E-12
-6.7	1.04E-11	9.73E-12	9.09E-12	8.48E-12	7.92E-12	7.39E-12	6.90E-12	6.44E-12	6.01E-12	5.61E-12
-6.6	2.06E-11	1.92E-11	1.80E-11	1.68E-11	1.57E-11	1.47E-11	1.37E-11	1.28E-11	1.19E-11	1.12E-11
-6.5	4.02E-11	3.75E-11	3.52E-11	3.29E-11	3.08E-11	2.88E-11	2.69E-11	2.52E-11	2.35E-11	2.20E-11
-6.4	7.77E-11	7.28E-11	6.81E-11	6.38E-11	5.97E-11	5.59E-11	5.24E-11	4.90E-11	4.58E-11	4.29E-11
-6.3	1.49E-10	1.40E-10	1.31E-10	1.23E-10	1.15E-10	1.08E-10	1.01E-10	9.45E-11	8.85E-11	8.29E-11
-6.2	2.82E-10	2.65E-10	2.49E-10	2.33E-10	2.19E-10	2.05E-10	1.92E-10	1.81E-10	1.69E-10	1.59E-10
-6.1	5.30E-10	4.98E-10	4.68E-10	4.39E-10	4.13E-10	3.87E-10	3.64E-10	3.41E-10	3.21E-10	3.01E-10
-6	9.87E-10	9.28E-10	8.72E-10	8.20E-10	7.71E-10	7.24E-10	6.81E-10	6.40E-10	6.01E-10	5.65E-10
-5.9	1.82E-09	1.71E-09	1.61E-09	1.51E-09	1.43E-09	1.34E-09	1.26E-09	1.19E-09	1.12E-09	1.05E-09
-5.8	3.32E-09	3.12E-09	2.94E-09	2.77E-09	2.61E-09	2.46E-09	2.31E-09	2.18E-09	2.05E-09	1.93E-09
-5.7	5.99E-09	5.65E-09	5.33E-09	5.02E-09	4.73E-09	4.46E-09	4.21E-09	3.96E-09	3.74E-09	3.52E-09
-5.6	1.07E-08	1.01E-08	9.55E-09	9.01E-09	8.50E-09	8.02E-09	7.57E-09	7.14E-09	6.73E-09	6.34E-09
-5.5	1.90E-08	1.79E-08	1.69E-08	1.60E-08	1.51E-08	1.43E-08	1.35E-08	1.27E-08	1.20E-08	1.14E-08
-5.4	3.33E-08	3.15E-08	2.98E-08	2.82E-08	2.66E-08	2.52E-08	2.38E-08	2.25E-08	2.13E-08	2.01E-08
-5.3	5.79E-08	5.48E-08	5.19E-08	4.91E-08	4.65E-08	4.40E-08	4.16E-08	3.94E-08	3.72E-08	3.52E-08
-5.2	9.96E-08	9.44E-08	8.95E-08	8.48E-08	8.03E-08	7.60E-08	7.20E-08	6.82E-08	6.46E-08	6.12E-08
-5.1	1.70E-07	1.61E-07	1.53E-07	1.45E-07	1.37E-07	1.30E-07	1.23E-07	1.17E-07	1.11E-07	1.05E-07
-5	2.87E-07	2.72E-07	2.58E-07	2.45E-07	2.33E-07	2.21E-07	2.10E-07	1.99E-07	1.89E-07	1.79E-07
-4.9	4.79E-07	4.55E-07	4.33E-07	4.11E-07	3.91E-07	3.71E-07	3.52E-07	3.35E-07	3.18E-07	3.02E-07
-4.8	7.53E-07	7.25E-07	7.18E-07	6.83E-07	6.49E-07	6.17E-07	5.87E-07	5.58E-07	5.30E-07	5.04E-07
-4.7	1.20E-06	1.24E-06	1.18E-06	1.12E-06	1.07E-06	1.02E-06	9.68E-07	9.21E-07	8.76E-07	8.34E-07
-4.6	2.11E-06	2.01E-06	1.92E-06	1.83E-06	1.74E-06	1.66E-06	1.58E-06	1.51E-06	1.43E-06	1.37E-06
-4.5	3.40E-06	3.24E-06	3.09E-06	2.95E-06	2.81E-06	2.68E-06	2.56E-06	2.44E-06	2.32E-06	2.22E-06
-4.4	5.41E-06	5.17E-06	4.94E-06	4.71E-06	4.50E-06	4.29E-06	4.10E-06	3.91E-06	3.73E-06	3.56E-06
-4.3	8.54E-06	8.25E-06	7.88E-06	7.46E-06	7.12E-06	6.81E-06	6.50E-06	6.21E-06	5.93E-06	5.67E-06
-4.2	1.33E-05	1.28E-05	1.22E-05	1.17E-05	1.12E-05	1.07E-05	1.02E-05	9.77E-06	9.34E-06	8.93E-06
-4.1	2.07E-05	1.98E-05	1.89E-05	1.81E-05	1.74E-05	1.66E-05	1.59E-05	1.52E-05	1.46E-05	1.39E-05
-4	3.17E-05	3.04E-05	2.91E-05	2.79E-05	2.67E-05	2.56E-05	2.45E-05	2.35E-05	2.25E-05	2.16E-05
-3.9	4.81E-05	4.61E-05	4.43E-05	4.25E-05	4.07E-05	3.91E-05	3.75E-05	3.59E-05	3.45E-05	3.30E-05
-3.8	7.23E-05	6.95E-05	6.67E-05	6.41E-05	6.15E-05	5.91E-05	5.67E-05	5.44E-05	5.22E-05	5.01E-05
-3.7	1.08E-04	1.04E-04	9.96E-05	9.57E-05	9.20E-05	8.84E-05	8.50E-05	8.16E-05	7.84E-05	7.53E-05
-3.6	1.59E-04	1.53E-04	1.47E-04	1.42E-04	1.36E-04	1.31E-04	1.26E-04	1.21E-04	1.17E-04	1.12E-04
-3.5	2.33E-04	2.24E-04	2.16E-04	2.08E-04	2.00E-04	1.93E-04	1.85E-04	1.78E-04	1.72E-04	1.65E-04
-3.4	3.37E-04	3.25E-04	3.13E-04	3.02E-04	2.91E-04	2.80E-04	2.70E-04	2.60E-04	2.51E-04	2.42E-04
-3.3	4.83E-04	4.65E-04	4.50E-04	4.34E-04	4.19E-04	4.04E-04	3.90E-04	3.76E-04	3.62E-04	3.49E-04
-3.2	6.87E-04	6.64E-04	6.41E-04	6.19E-04	5.98E-04	5.77E-04	5.57E-04	5.38E-04	5.19E-04	5.01E-04
-3.1	9.68E-04	9.35E-04	9.04E-04	8.74E-04	8.45E-04	8.16E-04	7.89E-04	7.63E-04	7.38E-04	7.13E-04
-3	1.35E-03	1.31E-03	1.26E-03	1.22E-03	1.18E-03	1.14E-03	1.11E-03	1.07E-03	1.04E-03	1.00E-03
-2.9	1.87E-03	1.81E-03	1.75E-03	1.69E-03	1.64E-03	1.59E-03	1.54E-03	1.49E-03	1.44E-03	1.39E-03
-2.8	2.56E-03	2.48E-03	2.40E-03	2.33E-03	2.26E-03	2.19E-03	2.12E-03	2.05E-03	1.99E-03	1.93E-03
-2.7	3.47E-03	3.35E-03	3.26E-03	3.17E-03	3.07E-03	2.98E-03	2.89E-03	2.80E-03	2.72E-03	2.64E-03
-2.6	4.66E-03	4.53E-03	4.40E-03	4.27E-03	4.15E-03	4.02E-03	3.91E-03	3.79E-03	3.68E-03	3.57E-03
-2.5	6.21E-03	6.04E-03	5.87E-03	5.70E-03	5.54E-03	5.39E-03	5.23E-03	5.08E-03	4.94E-03	4.80E-03
-2.4	8.20E-03	7.98E-03	7.76E-03	7.55E-03	7.34E-03	7.14E-03	6.95E-03	6.76E-03	6.57E-03	6.39E-03
-2.3	1.07E-02	1.04E-02	1.02E-02	9.90E-03	9.64E-03	9.39E-03	9.14E-03	8.89E-03	8.65E-03	8.42E-03
-2.2	1.39E-02	1.34E-02	1.32E-02	1.29E-02	1.25E-02	1.22E-02	1.19E-02	1.16E-02	1.13E-02	1.10E-02
-2.1	1.79E-02	1.74E-02	1.70E-02	1.66E-02	1.62E-02	1.58E-02	1.54E-02	1.50E-02	1.46E-02	1.43E-02
-2	2.28E-02	2.22E-02	2.17E-02	2.12E-02	2.07E-02	2.02E-02	1.97E-02	1.92E-02	1.88E-02	1.83E-02
-1.9	2.87E-02	2.81E-02	2.74E-02	2.68E-02	2.62E-02	2.56E-02	2.50E-02	2.44E-02	2.39E-02	2.33E-02
-1.8	3.59E-02	3.51E-02	3.44E-02	3.36E-02	3.29E-02	3.22E-02	3.14E-02	3.07E-02	3.01E-02	2.94E-02
-1.7	4.46E-02	4.36E-02	4.27E-02	4.18E-02	4.09E-02	4.01E-02	3.92E-02	3.84E-02	3.75E-02	3.67E-02
-1.6	5.48E-02	5.37E-02	5.26E-02	5.16E-02	5.05E-02	4.95E-02	4.85E-02	4.75E-02	4.65E-02	4.55E-02
-1.5	6.68E-02	6.55E-02	6.43E-02	6.30E-02	6.18E-02	6.06E-02	5.94E-02	5.82E-02	5.71E-02	5.59E-02
-1.4	8.08E-02	7.93E-02	7.78E-02	7.64E-02	7.49E-02	7.35E-02	7.21E-02	7.08E-02	6.94E-02	6.81E-02
-1.3	9.68E-02	9.51E-02	9.34E-02	9.18E-02	9.01E-02	8.85E-02	8.69E-02	8.53E-02	8.38E-02	8.23E-02
-1.2	1.15E-01	1.13E-01	1.11E-01	1.09E-01	1.07E-01	1.05E-01	1.04E-01	1.02E-01	1.00E-01	9.85E-02
-1.1	1.36E-01	1.33E-01	1.31E-01	1.29E-01	1.27E-01	1.25E-01	1.23E-01	1.21E-01	1.19E-01	1.17E-01
-1	1.59E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.49E-01	1.47E-01	1.45E-01	1.43E-01	1.40E-01	1.38E-01
-0.9	1.84E-01	1.81E-01	1.79E-01	1.76E-01	1.74E-01	1.71E-01	1.69E-01	1.66E-01	1.64E-01	1.61E-01
-0.8	2.12E-01	2.09E-01	2.06E-01	2.03E-01	2.00E-01	1.98E-01	1.95E-01	1.93E-01	1.89E-01	1.87E-01
-0.7	2.42E-01	2.39E-01	2.36E-01	2.33E-01	2.30E-01	2.27E-01	2.24E-01	2.21E-01	2.18E-01	2.15E-01
-0.6	2.74E-01	2.71E-01	2.68E-01	2.64E-01	2.61E-01	2.58E-01	2.55E-01	2.51E-01	2.48E-01	2.45E-01
-0.5	3.09E-01	3.05E-01	3.02E-01	2.98E-01	2.95E-01	2.91E-01	2.88E-01	2.84E-01	2.81E-01	2.78E-01
-0.4	3.45E-01	3.41E-01	3.37E-01	3.34E-01	3.30E-01	3.26E-01	3.23E-01	3.19E-01	3.16E-01	3.12E-01
-0.3	3.82E-01	3.78E-01	3.74E-01	3.71E-01	3.67E-01	3.63E-01	3.59E-01	3.56E-01	3.52E-01	3.48E-01
-0.2	4.21E-01	4.17E-01	4.13E-01	4.09E-01	4.05E-01	4.01E-01	3.97E-01	3.94E-01	3.90E-01	3.86E-01
-0.1	4.60E-01	4.56E-01	4.52E-01	4.48E-01	4.44E-01	4.40E-01	4.36E-01	4.33E-01	4.29E-01	4.25E-01
0	5.00E-01	4.96E-01	4.92E-01	4.88E-01	4.84E-01	4.80E-01	4.76E-01	4.72E-01	4.68E-01	4.64E-01

F. Utregning av karakteristisk verdi til sylindrene

a) Innsamlet data satt opp i tabell

n	x_i	$(x_i - m_x)^2$
1		
2		
3		

- n – prøvenummer
- x_i - prøveresultat på prøve n
- $(x_i - m_x)^2$ prøveresultat på prøve n minus middelveien opphøyd i andre, denne verdien blir bukt til å finne standardavvik.

b) Middelvei og standardavvik

$$U_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Her finner vi middelveien som er summen av prøveresultatene dividert med antall prøver.

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}$$

- Her finner vi standard avvik som er et mål for spredningen av verdiene i innsamlet data.

c) Karakteristisk verdi

$$x_k = m_x + \Phi^{-1}_{(pk)} \cdot S_x$$

- $\Phi^{-1}_{(pk)}$ – Vi antar at verdiene X_I følger en normal distribusjon og henter $\Phi^{-1}_{(pk)}$ fra normalfordelingstabellen
- pk Betongtrykkfasthet må være representert ved en 5% -fraktil verdi, $pk = 0,05$
- $\Phi^{-1}_{(0,05)} = -1,64$

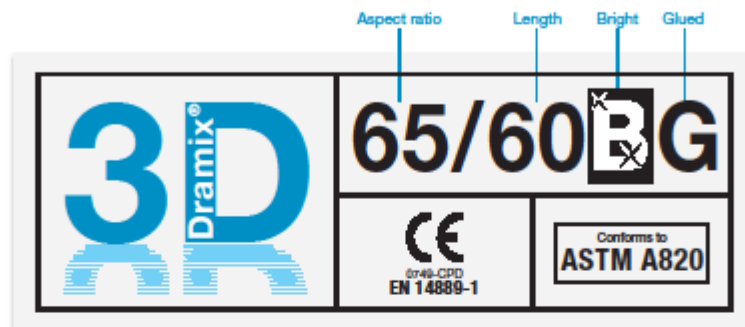
G. Fiberdata

Dramix®

BEKAERT

better together

Data Sheet



DRAMIX® 3D



Dramix® 3D is the reference in steel fibre reinforcement. Combining high performance, durability and ease-of-use, 3D provides you with a time-saving and cost-efficient solution for most common applications.

- > original anchorage
- > standard tensile strength

Dramix® 3D is a cost efficient solution for

- > flooring
- > tunnel applications
- > precast
- > residential applications

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support.

Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only. For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{m,mean} : 1.160 \text{ N/mm}^2$
Tolerances: $\pm 7,5\% \text{ Avg}$
Young's Modulus: $\pm 210.000 \text{ N/mm}^2$

Geometry

Fibre family	3D	
Length (l)	60 mm	
Diameter (d)	0,90 mm	
Aspect ratio (l/d)	65	

Fibre network

3,0 km per m³ (for 15 kg/m³)
3.183 fibres/kg
Minimum dosage:
15 kg per m³ (according to CE)

Dramix® range

	5R	4R	3D
Tensile strength			
Wire ductility			
Anchorage strength			

PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BAGS 20 kg

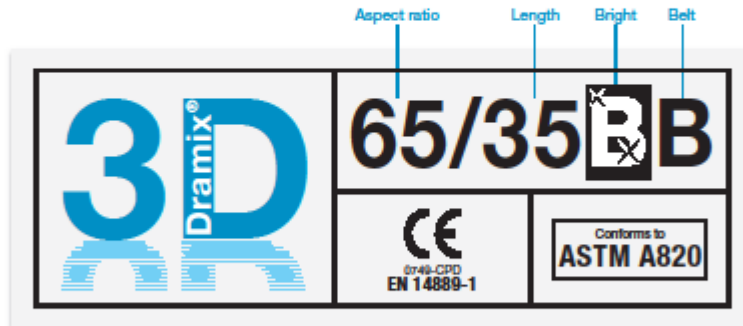
BIG BAG 1100 kg

STORAGE



71.02.05 - 0M/012

Data Sheet



DRAMIX® 3D



Dramix® 3D is the reference in steel fibre reinforcement. Combining high performance, durability and ease-of-use, 3D provides you with a time-saving and cost-efficient solution for most common applications.

- > original anchorage
- > standard tensile strength

Dramix® 3D is a cost efficient solution for

- > flooring
- > tunnel applications
- > precast
- > residential applications

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support.

Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only.
For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{m, \text{tensile}}$: 1.345 N/mm²
Tolerances: ± 7,5% Avg
Young's Modulus: ± 210.000 N/mm²

Geometry

Fibre family

Length (l) 35 mm

Diameter (d) 0,55 mm

Aspect ratio (l/d) 65

Fibre network

8,0 km per m³ (for 15 kg/m³)
14.531 fibres/kg

Dramix® range

	5R	4R	3D
Tensile strength	■	■	■
Wire ductility	■	■	■
Anchorage strength	■	■	■

PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BELT
(paper bags 250 gr)

STORAGE



FL 13.05 - 09/2012



PRODUCT DESCRIPTION

ReforceTech Basalt Fiber Reinforced Polymer BFRP MiniBars™ are an engineered macro fiber reinforcement designed to improve concrete structural strength through uniform distribution throughout the concrete matrix.

Concrete reinforced with RFT MiniBars™ has demonstrated very good flexural toughness and energy absorption capability after cracking when tested using ASTM C78 and C1399 and EN16451.

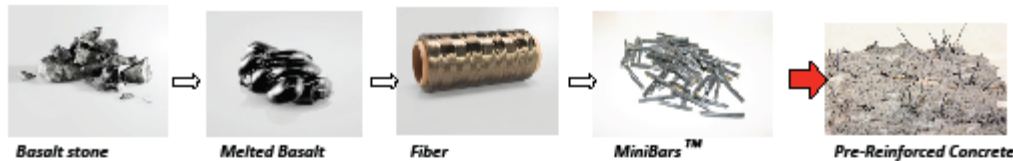
Testing demonstrates that MiniBars™ satisfy the relevant residual strength requirements based on ASTM C1609 tests (as specified in ACI 318-08 for steel fiber reinforced concrete) using MiniBars™ as shear reinforcement in reinforced concrete slabs and beams.

ReforceTech BFRP MiniBars™ are engineered to deliver high flexural toughness and energy absorption in concrete in conjunction with a proven alkali resistance and bond strength.

Det Norske Veritas (DNV) testing has demonstrated that the unique ReforceTech process delivers a strong bond between the concrete and the BFRP bars. Further testing with the University of Akron demonstrated results of Flexural Tensile Strength (ASTM C78-07) enabling the increase from 4.5 MPa (653 psi) for normal concrete up to 17 MPa (2465 psi) depending on volume fraction of MiniBars™. Testing Average Residual Strength (ASTM C1399) has developed ARS from zero in normal concrete up to over 15 MPa (2175 psi) depending on the volume fraction of MiniBars™ and the mix design.

From volcanic basalt stone thin basalt fibers are combined in ReforceTech's patented process to create unique and strong MiniBars™. The MiniBars™ are engineered to create the optimal mechanical bond and cut to the prescribed length 30 to 60 mm (1.18" to 2.36") to achieve the desired concrete products performance.

FROM BASALT TO STRUCTURAL PRE-REINFORCED CONCRETE



UNIQUE ENABLING FEATURES TO REDUCE PROJECT COSTS

- Corrosion Free allows thinner structures
- Zero Conductivity, eliminates galvanic corrosion
- Greatly Improved Flexural and Average Residual Strength of Concrete allowing design freedom, elimination or reduction of normal reinforcement
- Compatible Specific Gravity – 1.9 g/cm³ means uniform distribution, MiniBars™ do not settle or float and are easily mixed. Due to the large surface area, some large aggregate may need to be reduced or fine aggregates increased.
- No bars protrude from Concrete; no MiniBars™ are visible on the surface.
- Excellent distribution in mixing, suitable for on site mixing, pre-caster and use in dry concrete
- Longer lifetime, lower life cycle costs
- Improved freeze thaw resistance
- Increased chemical resistance with reduction of shrinkage cracks
- Diameter – 0.5 to 10mm (0.02" to 0.39")
- Length – 20 to 200mm (0.79" to 7.87")
- Savings of labor costs and faster construction
- Improved abrasion resistance
- Improves safety on site by eliminating handling of traditional steel reinforcement
- Uniform distribution
- Eliminates concerns related to proper position of reinforcement and thickness of concrete for flow of concrete

ReforceTech AS
Luftveien 4
3440 Røyken
Norway
Phone: +47 66 76 77 80
www.reforcetech.com

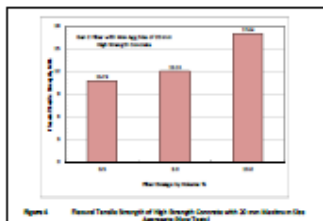
ReforceTech Qatar
P.O.Box 3889,
Doha
Qatar
Phone +974 77 44 7732
www.reforcetech.com

Basalt Products Group LLC
2285 Botanica Circle
Melbourne, FL 32904-7340
USA
Phone +321 537 1810
www.basaltproducts.com

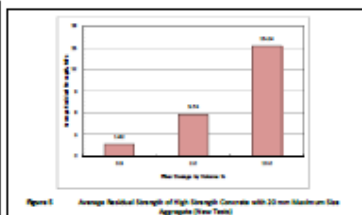


IMPROVED CONCRETE PROPERTIES

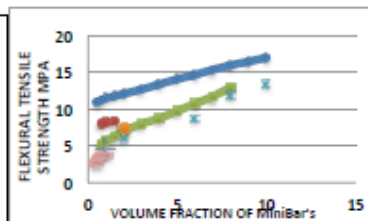
**Flexural Strength
ASTM C78-07**



**Average Residual Strength
ASTM C1399**



**FTS vs VF%
ASTM C78**



Cost Summary	Min Reinforcement		
	Steel Nets	MiniBars	
Reinforcement	100	10% higher	
Form Work	100	100	Same
Bar or Net Fixing	100	100% saved	Eliminated
Stool or Chair Fixing	100	100% saved	Eliminated plus no visible marks
Concrete	100	20% saved	Thinner walls
Comparative Costs	100	67	
Total		33% Savings	

APPLICATIONS

- Greatly increases the toughness and strength of concrete
- Enables thinner sections, lower weight products, easier installation and transportation
- Suitable for aggressive chloride environments
- Acts as minimum reinforcement to lower cost
- Transforms concrete from a brittle material requiring steel reinforcement to a ductile concrete with tensile strength capacity
- Enables innovative applications to take advantage of the Basalt MiniBars to reduce cost

MiniBars Properties	Gen1	Gen2
Diameter	2.1	1.1
Core Thread	4800BF	1200BF
Helix Thread	Poly	200BF
BF %	70	76 to 80
Specific Gravity	1.9	1.9
Water Absorption	None	None
E modulus	45GPa	60GPa
Tensile Strength	1000	1100
Melting Point BF deg C	1000	1000
HDT VE Deg C	115	115
Alkaline Resistance	Excellent	Excellent
VF Range	1.5 to 8 %	0.5 to 10%

- Thinner Precast Facades Elements
- Submersed Concrete
- Low Cost Structural Slab on Grade
- Lower Cost Inner walls
- Highway Slabs & Bridge Decks
- Floating Infrastructure
- Agricultural Products
- Drainage systems
- Grout Systems

DOSAGE AND MIX DESIGN

- Specific applications can be developed as a custom engineered solution
- Up to 10 % by volume mixes well in concrete. Engineering reports available.

The information shown here inclusive of all drawings and tables is for informational purposes only. Details are subject to change, every effort has been made to ensure accuracy. The user shall ensure the appropriate guidelines and building codes are followed. ReforceTech has no control over the use of their products and assumes no responsibility for the end products or uses of our materials.

ReforceTech AS
Luftveien 4
3440 Røyken
Norway
Phone: +47 66 76 77 80
www.reforce.tech.com

ReforceTech Qatar
P.O.Box 3889,
Doha
Qatar
Phone +974 77 44 7732
www.reforce.tech.com

Basalt Products Group LLC
2285 Botanica Circle
Melbourne, FL 32904-7340
USA
Phone +321 537 1810
www.basaltproducts.com