

Duktilitet av fiberarmert lettbetong under trykk

Daniel Jettli
Gøran Sæther

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)
Innlevert: mai 2014
Hovedveileder: Jan Arve Øverli, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



Institutt for konstruksjonsteknikk
Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi
NTNU- Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet

TILGJENGELIGHET
ÅPEN

MASTEROPPGAVE 2013

FAGOMRÅDE: Konstruksjonsteknikk	DATO: 30.Mai 2014	ANTALL SIDER: 77+86 (vedlegg)
------------------------------------	----------------------	----------------------------------

TITTEL:

Duktilitet av fiberarmert lettbetong under trykk

Ductility of fiber reinforced lightweight aggregate concrete under compression

UTFØRT AV: Daniel J. Jettli
Gøran Sæther



SAMMENDRAG:

Denne oppgaven tar for seg hvordan fiberarmert lettbetong oppfører seg under trykk, med fokus på duktilitet. Lettbetong har generelt en sprø bruddoppførsel, som ikke er ønskelig ettersom sprø brudd gir liten til ingen forvarsel på kollaps av en konstruksjon. Hovedmålsetningen med oppgaven blir derfor å studere effekten av tilsetning av stålfiber i lettbetong belastet i trykk, og hvilken effekt fiberen har på betongens duktilitet.

For å undersøke dette ble 24 betongprismer produsert og trykktestet. Det ble testet normalbetong og lettbetong med en varierende fiberandel på henholdsvis 0,0%, 0,5% og 1,0%. Fiberen brukt var Dramix 65/60. Prismene ble belastet sentrisk og eksentrisk. Eksentrisiteten ble satt til $b/6$, som ved lineærelastisk oppførsel ikke skal gi strekkspenninger på minst belastet side. Dette ble gjort for å simulere trykksonen i en bjelke. Normalbetongen og lettbetongen ble prosjektert til en forventet trykkfasthet på 40 MPa og en romdensitet på 2300 kg/m³ (NDC) og 1800 kg/m³ (LWC).

Ved testing fikk alle prøvestykkene eksplosive brudd som førte til at måling av data etter bruddlast (post-peak) ikke ble mulig. Duktilitet karakteriseres ofte som tøyingsområdet etter bruddlast og fram til kollaps. Denne rapporten inneholder som følge av bruddoppførselen ingen direkte data på duktilitet i post peak området, derfor fokuseres det på oppførsel opp til brudd (pre-peak).

Testresultatene viser at fiberen hadde en høyere effekt på de eksentrisk belastede prismenes tøyning i forhold til de sentrisk belastede prismene. Testene ga større tøyning ved brudd ved økende andel fiberprosent. Testresultater indikerer da en mer duktil oppførsel før brudd ved tilførsel av fiber i betongen. Resultatene indikerer at tøyingsgradienten aktiviserte fiberen slik at prøvestykkene tålte større tøyninger og spenninger ved økende fiberprosent før prismene gikk til brudd. For videre arbeid anbefales det et testoppsett som muliggjør målinger av tøyninger etter bruddlast, slik at man kan danne ett bilde av duktiliteten post peak.

FAGLÆRER: Jan Arve Øverli

VEILEDER: Jan Arve Øverli

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU

0.1 Forord

Denne rapporten er det avsluttende arbeidet for to studenter ved det to-årige masterprogrammet Bygg og Miljøteknikk ved NTNU. Selve oppgaven er skrevet for institutt for konstruksjonsteknikk. Oppgaven har bestått av å støpe samt teste ett gitt antall prøvestykker med forskjellig prosentandel fiber. Dette ble gjort for å undersøke hvordan fiberarmert lettbetong oppfører seg under trykk, med særskilt fokus på duktilitet samt eventuelle forbedringer av lettbetongens sprø oppførsel ved brudd.

Begge har gått samme studieretning og valgt hovedprofil innen prosjektering av konstruksjoner. Vi har vært i samarbeid med mange personer gjennom semesteret, og oppgaven har bydd på både teoretiske og praktiske utfordringer. Samarbeidet med Sintef har vært veldig spennende og lærerikt. I laboratoriet samarbeidet vi med medstudent Tor Jørgen Larsen, og takker han for et godt samarbeid.

Opgaven er i tillegg del av ett pågående forskningsprosjekt i regi av COIN (senter for forskningsbasert innovasjon innen betong), som følge av dette har det vært en rekke personer involvert i utformingen av oppgaven. Med dette vil vi takke alle som har bidratt til utformingen, diskusjoner og veiledning underveis. En spesiell takk rettes til veileder Jan Arve Øverli for veiledning gjennom semesteret og Håvard Nedrelid for verdifull input. Videre rettes det takk til Gunrid Kjellmark for bestemmelse av betongresepter og personellet i betonglaboratoriet ved Ove Loraas, Steinar Seehuus og Gøran Loraas for all hjelp med forskaling, støping og testing.

Alle figurer, grafer og bilder i rapporten som ikke har oppgitt kilde er produsert av oss.

Daniel J. Jettli

Daniel J. Jettli
Signatur

30.05.2014
Dato

Gøran Sæther

Gøran Sæther
Signatur

30.05.2014
Dato

0.2 Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg hvordan fiberarmert lettbetong oppfører seg under trykk, med fokus på duktilitet. Lettbetong har generelt en sprø bruddoppførsel, som ikke er ønskelig ettersom sprø brudd gir liten til ingen forvarsel på kollaps av en konstruksjon. Hovedmålsetningen med oppgaven blir derfor å studere effekten av tilsetning av stålfiber i lettbetong belastet i trykk, og hvilken effekt fiberen har på betongens duktilitet.

For å undersøke dette ble 24 betongprismer produsert og trykktestet. Det ble testet normalbetong og lettbetong med en varierende fiberandel på henholdsvis 0,0%, 0,5% og 1,0%. Fiberen brukt var Dramix 65/60. Prismene ble belastet sentrisk og eksentrisk. Eksentrisiteten ble satt til $b/6$, som ved lineærelastisk oppførsel ikke skal gi strekkspenninger på minst belastet side. Dette ble gjort for å simulere trykksonen i en bjelke. Normalbetongen og lettbetongen ble prosjektert til en forventet trykkfasthet på 40 MPa og en romdensitet på 2300kg/m^3 (NDC) og 1800kg/m^3 (LWC).

Ved testing fikk alle prøvestykkene eksplosive brudd som førte til at måling av data etter bruddlast (post-peak) ikke ble mulig. Duktilitet karakteriseres ofte som tøyingsområdet etter bruddlast og fram til kollaps. Denne rapporten inneholder som følge av bruddoppførselen ingen direkte data på duktilitet i post peak området, derfor fokuseres det på oppførsel opp til brudd (pre-peak).

Testresultatene viser at fiberen hadde en høyere effekt på de eksentrisk belastede prismenes tøyning i forhold til de sentrisk belastede prismene. Testene ga større tøyning ved brudd ved økende andel fiberprosent. Testresultater indikerer da en mer duktil oppførsel før brudd ved tilførsel av fiber i betongen. Resultatene indikerer at tøyingsgradienten aktiviserte fiberen slik at prøvestykkene tålte større tøyninger og spenninger ved økende fiberprosent før prismene gikk til brudd. For videre arbeid anbefales det et testoppsett som muliggjør målinger av tøyninger etter bruddlast, slik at man kan danne ett bilde av duktiliteten post peak.

0.3 Summary

This thesis is studying fiberreinforced lightweight aggregate concrete(LWC) and its behaviour under compression, with main focus on ductility. Lightweight concrete generally has a brittle fracture behavior which is not desirable because the brittle fracture provides little to no forewarning of the collapse of a structure. The main objective of the thesis is therefore to study the effect of the addition of steel fiber in lightweight concrete under compression, and the effect this has on the concrete ductility.

To investigate this, 24 concrete prisms were produced and tested under compression. Normal density concrete(NDC) and lightweight concrete(LWC) with a varying fiber percentage of respectively 0.0 %, 0.5 % and 1.0 % was tested, the fiber used was Dramix 65/60. The prisms were loaded centric and eccentric. The eccentricity was set to $b/6$, with linear elastic behavior this should not give tensile stresses on the least loaded side. This was done to simulate the compression zone in a beam. Normal concrete and lightweight concrete was projected to an expected compressive strength of 40 MPa and bulk density of $2300\text{kg}/\text{m}^3$ (NDC) and $1800\text{kg}/\text{m}^3$ (LWC).

All specimens had brittle failures. The brittle failures made it impossible to measure data after peak load (post-peak). Ductility is often characterized as the area under the stress-strain graph between strain at peak load to strain at collapse. This report contains no direct data on ductility and focuses on behavior up to peak load (pre-peak).

The test results show that the fiber had a higher effect on the strain of the eccentrically loaded prisms compared to the centric loaded prisms. The tests gave greater strain at peak load with increasing fiber percentage. The test results then indicate a more ductile behavior before peak load with the addition of fibre reinforcement. The results indicate that the strain gradient activated the fiber so that the specimens could tolerate higher stresses and strains with increasing fiber percentage before the prisms failed. For further research a test procedure that allows measurement of post peak strains should be implemented, this to get an image of the ductility post peak.

Innhold

0.1	Forord	I
0.2	Sammendrag	III
0.3	Summary	V
0.4	Symboloversikt	IX
1	Innledning	1
2	Litteraturstudium	3
2.1	Lettbetong	3
2.1.1	Historie	3
2.1.2	Sammensetning	4
2.1.3	Egenskaper	6
2.2	Fiberarmert betong	7
2.2.1	Historie	8
2.2.2	Egenskaper	8
2.3	Regelverk	9
2.3.1	Betong og lettbetong	9
2.3.2	Regler Fiberarmert betong	9
2.4	Duktilitet	10
2.4.1	Om Slutningseffekten	11
2.4.2	Betong og lettbetong, etter EC2.	14
2.5	Jordskjelv	17
2.5.1	Prosjektering etter seismiske laster [22, 9]	17
3	Laboratorium	18
3.1	Størrelse prismer	18
3.2	Prøveserie	19
3.3	Forskaling	20
3.4	Støping	21
3.4.1	Forberedelser før støping	21
3.4.2	Utstøping	23
3.5	Test av prismene	25
3.5.1	Instrumentering av prismene	26
3.5.2	Opplagerbetingelser	28
3.6	Test av sylindre og bjelker	30
3.7	Forsinkelser/avvik	31
3.8	Behandling av data	32

4	Resultater	34
4.1	Resultat sylindertester	34
4.2	Resultater prismer	35
4.2.1	Bruddform	37
4.2.2	Diverse kommentarer	40
4.2.3	Kraft-Tid	41
4.2.4	Spenning-Tøyning	45
4.2.5	Tøyning-Tid	49
4.2.6	Normalisert spenning-tøyning	52
4.2.7	Tverrtøyning - Tid	55
5	Vurdering av testresultater	59
5.1	Trykkapasitet	59
5.2	Bruddlinje	60
5.3	Bruddoppførsel	60
5.4	Effekten av fiber i betong	62
5.4.1	Langsgående tøyning	62
5.4.2	Tverrtøyning	64
5.5	Effekten av tøyninggradient	65
5.6	Effekten type betongmatrise	66
6	Feilkilder	67
7	Konklusjon	68
7.1	Forslag til videre arbeid	71
8	Figur- og tabelliste	74
9	Vedlegg	77

0.4 Symboloversikt

NDC = Normal density concrete

LWC = Lightweight aggregate concrete

S_{X_i} = Standardavvik

S_{X90} = Standardavvik på langsgående tøyninger ved 90% av bruddlast.

S_{X60} = Standardavvik på langsgående tøyninger ved 60% av bruddlast.

$\varepsilon_{br,tverr}$ = tverrtøyning ved bruddlast.

$\varepsilon_{br,langs}$ = langsgående tøyning ved bruddlast.

$\varepsilon_{br,90l}$ = langsgående tøyning ved 90% av bruddlast.

$\varepsilon_{br,60l}$ = langsgående tøyning ved 60% av bruddlast.

$\varepsilon_{br,60t}$ = tverrtøyning ved 60% av bruddlast.

ν_{br} = Poissons ratio ved bruddlast

$\nu_{br,60}$ = Poissons ratio ved 60% av bruddlast

x_k = Estimert karakteristisk verdi.

μ_i = Middelerverdi.

ε_{c2} = Tillatt tøyning ved oppnådd maksspenning etter fig. 3.3 i EC2

ε_{lc2} = Tillatt tøyning for lettbetong ved oppnådd maksspenning etter fig. 3.3 i EC2

ε_{cu2} = Tøyningsgrense i bruddtøyning etter fig. 3.3 i EC2

ε_{cu2} = Tøyningsgrense for lettbetong i bruddtøyning etter fig. 3.3 i EC2

ε_c = Trykktøyning i betong.

ε_{c1} = Tillatt tøyning ved oppnådd maksspenning etter fig. 3.2 i EC2

ε_{lc1} = Tillatt tøyning for lettbetong ved oppnådd maksspenning etter fig. 3.2 i EC2

ε_{cu1} = Tøyningsgrense i bruddtøyning etter fig. 3.2 i EC2

ε_{lcu1} = Tøyningsgrense for lettbetong i bruddtøyning etter fig. 3.2 i EC2

f_{ck} = Karakteristisk trykkfasthet for betong.

f_{cd} = Dimensjonerende trykkfasthet for betong.

σ_c = Spenning i betong.

σ_a = Enaksiell spenning.

Kapittel 1

Innledning

Bakgrunn

Grunnet lettbetongens lave densitet er den et godt egnet materiale i tilfeller der lange spennvidder, dårlige fundamenteringsforhold eller krav til oppdrift er aktuelt. Sammenlignet med normal betong har lettbetong en sprøere bruddoppførsel under trykk. Lettbetong har en lavere E-modul og et raskt spenningsfall etter at trykkapasiteten er nådd. Disse egenskapene fører til at lettbetong er lite egnet i jordskjelvutsatte områder hvor konstruksjonens dissipasjon av energi er sentralt, ettersom materialets evne til energiopptak henger sammen med materialets duktilitet.

Ved å hindre utvidelsen på tvers av hovedtrykkretningen kan økt duktilitet oppnås. Dette gjøres ved fysisk fastholdelse, som ofte er komplisert og upraktisk, eller ved bruk av armering. Ved bruk av armering forsøkes det derfor på om bruk av fiber i betongblandingen kan hindre tverrekspansjon, og gi økt duktilitet.

Tilsetningen av stålfibre forbedrer mange av de tekniske egenskaper av mørtel og betong, særlig slagfasthet og seighet. Bøyestyrke, strekkfasthet, evne til å motstå sprekke dannelse og avskalling blir også forbedret. Under trykk vil et betongelement ekspandere, og fiberen vil da holde igjen denne ekspansjonen og skape en omslutningseffekt. For å designe og analysere strukturer ved hjelp av stålfiberarmert betong for trykk, er arbeidsdiagrammet essensielt for å vurdere duktiliteten til materialet.

Formål/målsetting

Ved NTNU sin deltagelse i prosjektet COIN (Concrete innovation centre), er denne rapporten er engasjert av sistnevnte. COIN har som mål å skape mer attraktive betongkonstruksjoner, og har tre fokusområder; miljøvennlige betongkonstruksjoner, konkurransedyktige konstruksjoner og teknisk ytelse. Mer konkret hører denne rapporten innen fokusområde 3.3 strukturell ytelse. COIN er finansiert av Norges forskningsråd og har vertsinstitusjon ved SINTEF byggforsk. COIN har flere forskningspartnere, hvor NTNU er en av dem. Som nevnt er denne oppgaven skrevet i regi av COIN og derfor har SINTEF tatt avgjørelser angående betongresepter, utforming av prøvestykker og testoppsett.

Dette er en videreføring av tidligere masteroppgaver ved NTNU. Tidligere er det

utført en forsøksserie av lettbetongbjelker. Fokuset var å se på duktiliteten i trykksonen på bjelkene, og bjelkene ble overarmert slik at trykkbrudd oppsto. Resultatene indikerer at fiber gir en økt duktilitet for overarmerte bjelker som utsettes for momentbrudd.

I denne rapporten ble 24 betongprismer trykktestet til brudd. Det ble testet normalbetong og lettbetong med variert fiberinnhold. Prismene ble belastet sentrisk og eksentrisk. Eksentrisiteten settes lik $b/6$ som ved lineærelastisk oppførsel ikke gir strekkspenninger i prøvestykket. Dette for å simulere trykksonen i en bjelke. Normalbetongen og lettbetongen har en forventet lik trykkfasthet på 40 MPa og en romdensitet på 2300kg/m^3 (NDC) og 1800kg/m^3 (LWC).

Hovedmålsetningen med rapporten er å etablere ytteligere grunnlagsmateriale på effekten av tilsetning av fiber på lettbetongs duktilitet i trykk. Dette gjøres ved å teste LWC og NDC sentrisk og eksentrisk, for og så sammenligne resultatene.

Kapittel 2

Litteraturstudium

2.1 Lettbetong

Betong er ett av de mest brukte bygningsmaterialene vi har i dag. Betong er et komposittmateriale som består av sement, vann, tilslag og andre tilsetningsstoffer. Bare i Norge blir det årlig brukt rundt 1.5 millioner tonn sement og på verdensbasis blir det årlig produsert et betongvolum som tilsvarer en kube med 1x1 km grunnflate og en høyde lik Mount Everest[15, 18].

Generelt har betong høy trykkfasthet og lav strekkfasthet, derfor støpes det inn armeringsjern som skal ta opp strekkrefter i betongkonstruksjoner. Armeringsstålet tåler store strekkpåkjenninger, armert betong vil derfor være godt egnet til å ta opp strekkrefter [24].

LWC er ifølge NS-EN 206-1 [21] definert som betong med en densitet fra $800\text{kg}/\text{m}^3$ opp til $2000\text{kg}/\text{m}^3$, dette er betydelig lavere enn NDC som har en densitet mellom 2100 – $2600\text{kg}/\text{m}^3$. Den lavere egenvekten oppnås ved å benytte tilslag med lavere densitet enn tilslagene som blir benyttet i NDC. Med en lavere egenvekt kan man få lengre spenn, mindre bjelker og mindre fundamenter ettersom konstruksjonen får lavere belastning fra egenvekten. Målet er å skape en konstruksjon med så lav egenvekt som mulig, uten en betydelig reduksjon i de konstruksjonsmessige egenskapene.

Hvilket tilslag som blir brukt varierer ettersom hvor i verden man befinner seg, eksempelvis brukes det mest LECA i Danmark, Norge og Sverige mens i England brukes det mest Perlitt og Lytag. Disse forskjellene kommer av diversiteten som eksisterer når det kommer til hvilke naturressurser som er tilgjengelige i de forskjellige geografiske regionene. [11]

2.1.1 Historie

Historisk sett har betong lange tradisjoner. Egypterne benyttet gips som binde-middel i pyramidene samt romerne og grekerne brukte brent kalk for å fremstille murmørtel. Det eksisterer spor som tilsier at lettbetong har vært i bruk så tidlig som 3000 år før Kristus i form av byene Mohenjo-Daro og Harappa som ble bygd av Induskulturen. Lettbetong ble også tatt i bruk av romerne for ca. 2000 år siden

da de bygde pantheon, Colosseum og akveduktene [11]. I Pantheonkuppelen er det benyttet vulkansk tilslag som ble fordelt slik at egenvekten på tilslaget avtar med økende høyde i kuppelen. [1, 18]

Bruk av lettbetong i større skala kom først på begynnelsen av 1900-tallet, da Stephen J. Hayde, også kjent som lettbetongens far, begynte å eksperimentere med å benytte avfallsprodukter fra teglproduksjon som tilslag i betong. En patent på produksjon av lettbetong ble i 1918 utstedt i Haydes navn. I 1922 ble Westport High school i Kansas City det første fullskala byggeprosjektet med lettbetong. I nyere tid er lettbetong oftest brukt i broer, f.eks Stolmasundet bro i Austervoll kommune, og andre konstruksjoner hvor egenvekten til normalbetong er problematisk[18]. Denne typen konstruksjoner var også pådriveren for å utføre videre forskning på lettbetong på 1990-tallet. [15]

2.1.2 Sammensetning

Betong produseres ved å blande tilslag(pukk, sand eller singel), vann, sement og andre tilsetningsstoffer (eks. superplastiserende stoffer). Sementen fungerer som et bindemateriale, og tilsatt vann vil den herde og betongen oppnår sin karakteristiske trykkfasthet.

En betongblanding består av om lag 70 prosent tilslag, de resterende 30 prosentene er vann og sement, også kalt sementpasta. Egenskapene til LWC bestemmes hovedsakelig av hvilket tilslag som blir brukt og forholdet mellom vekten av vann og sement, kalt betongens v/c -tall. Med lavt v/c -tall vil det være mye sement i blandingen, og betongen vil få en høyere fasthet enn betong med høyt v/c -tall. Betongen kan altså dimensjoneres etter hvilken belastning den er tiltenkt bære. [15]

Tilslaget i lettbetong blir som oftest delt opp i to hovedkategorier [11]:

1. Naturlige tilslag, tilslag av vulkansk opprinnelse f.eks. pimpstein som har blitt bearbeidet mekanisk. Dog ikke brukt i kommersiell sammenheng er det fullt mulig å bruke organiske tilslag som f.eks. palmeoljeskall.
2. Syntetiske tilslag, produsert ved å varmebehandle materialer med ekspansive egenskaper eksempelvis leire, perlitt, glass og industrielle biprodukter som flygeaske.

Grunnen til den store variasjonen i egenskapene til lettbetong kommer av at egenskapene til tilslagene varierer mye selv innenfor de to hovedkategoriene. Eksempelvis er styrken til en LWC blanding avhengig av densiteten på tilslaget [13], ved så å se på utdraget av densiteter presentert i tabell 2.1 kommer det klart frem at densiteten for lett tilslag varierer sterkt.

Tabell 2.1: Eksempler på lette tilslag med tilhørende densitet [11]

Materiale	Produksjon	Densitet kg/m^3
Ekspandert perlitt	Roterovn	30-240
Ekspandert vermikulitt	Roterovn	60-190
Ekspandert leire	Roterovn	477-950
Sintret flyveaske	Sintring/Palletisering	750-1100
Ekspandert slagg	Palletisering/roterovn	600-800

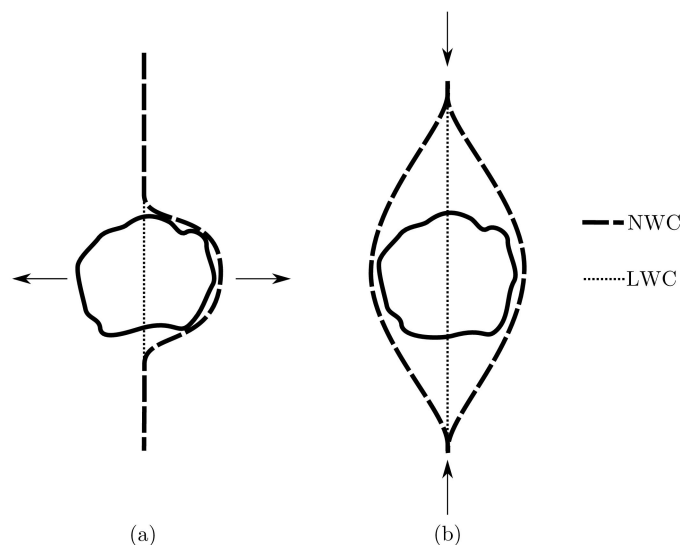
2.1.3 Egenskaper

Sammenlignet med normalbetong, har lettbetong følgende egenskaper[13]:

Egenskaper	Normalbetong	Lettbetong
Densitet, kg/m^3	2100-2500	300-2000
Kube styrke, N/mm^2	15-100	1-60
Termisk konduktivitet, W/mK	1.6-1.9	0.2-1.0

Oppførsel ved brudd

Forsøk viser at LWC har en sprøere bruddoppførsel enn NWC, årsaken er at styrke- og stivhetsegenskapene i det lette tilslaget og mørtelen er relativt like, noe som ikke er tilfelle for NDC. Dette vil føre til en jevnere spenningsfordeling i mørtelen og tilslaget, som fører til at kontaktsonen mellom tilslag og mørtel blir mindre kritisk. Mikrosprekker vil da oppstå ved generelt høyere spenninger enn i NDC, kombinert med at det lette tilslaget ikke er like godt egnet til å arrestere videreutvikling av disse, blir lettbetongens evne til å omfordele krefter mindre. Dette fører til at brudd oppstår plutselig samt bruddlinjen har en tendens til å gå gjennom både tilslaget og mørtelen [13, 3]. Dette er illustrert i figur 2.1 både for strekk (a) og trykk (b)



Figur 2.1: Bruddlinje for LWC versus NWC [13]

Branntotstand

Forsøk viser at LWC har bedre tekniske egenskaper enn NDC utsatt for branner som karakteriseres av langsomme temperaturøkninger [11]. Karakteriseres brannen derimot av høye temperaturer med rask temperaturstigning viser forsøk at lettbetong har en tendens til å få problemer med avskalling. [11] Dette problemet kan forklares med at det oppstår damptrykk i det absorberte vannet til det lette tilslaget. Dette kommer av den lave permeabiliteten til LWC som fører til at dampen ikke får mulighet til å transporteres ut via det naturlige poresystemet. [13] Betongen vil etter hvert skalle av som følge av det innvendige trykket fra dampen når den blir forhindret fra å ekspandere fritt.

Bearbeidbarhet

Bearbeidbarhet, grunnet større absorberingsevne i tilslaget vil LWC ha noe dårligere bearbeidbarhet forhold til NDC. Dette problemet er ofte løst i praksis ved å tilsette superplastiserende stoffer før støping [15]. Testing av bearbeidbarhet utføres normalt med en slump test, men helst en "Flow table test" da slump testen ofte underestimerer den dynamiske bearbeidbarheten til blandingen [11].

2.2 Fiberarmert betong

Bruken av fibre for å bedre egenskapene til betongmatrisen er ett eldgammelt konsept. For eksempel ble fiber laget av strå eller hestehår brukt for å forbedre egenskapene til murstein i årtusener. Det er stor variasjon i type fibre, for å holde oversikt er de oftest delt inn i fire kategorier[5]:

1. Metalliske fibre, enten stål eller rustfritt stål.
2. Polymeriske fibre, er laget av enten akryl, aramid, karbon, nylon, polyester, polyetylen eller polypropylen.
3. Mineralfibre, glassfiber er den dominante typen mineralfiber som brukes i dag.
4. Naturlige fibre, forskjellige typer organiske/uorganiske naturlige fibre f.eks. cellulose.

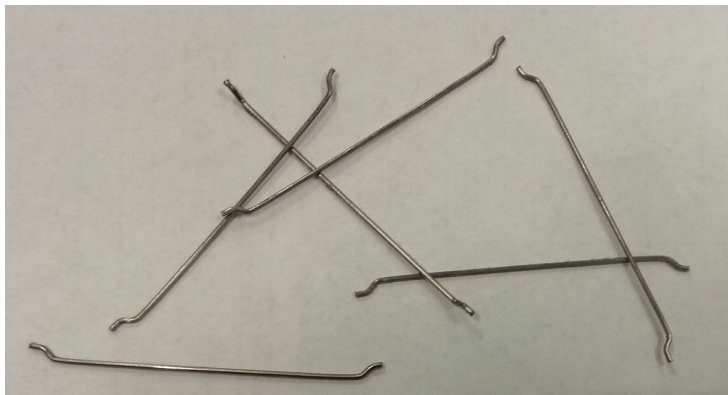
All fiber må være godkjent etter tilhørende standarder, EN-14889-1 for stålfiber og EN-14889-2 for polymerfibre, andre materialer må deklarerer etter samme prinsipper.

2.2.1 Historie

Som sagt er armering med fiber ett eldgammelt konsept, dog startet ikke den moderne bruken av fiber før tidlig på 1960-tallet. I begynnelsen ble det kun brukt rette fibre. Bruken av disse førte til store forbedringer i egenskaper som duktilitet og bruddseighet, det ble også rapportert tilfeller av økt bøyestyrke. For rette stålfibre var det primært volumfraksjonen og størrelsesforholdet lengde/diameter som styrte egenskapene til betongen. Når fiberarmering først ble tatt i bruk oppdaget man at fibre hadde en tendens til å klumpe seg sammen, dette problemet oppstår oftere ved bruk av lange fibre. Etterhvert ble det utviklet fibre med krokede ender som var limt sammen side om side med ett vannløselig lim. Dette resulterte i at klumpingen ble mer eller mindre eliminert. [5]

2.2.2 Egenskaper

Ved tilsetning av fiber i betong vil man forbedre materialegenskapene til betongen. I Kanstad et. al. [16] nevnes det at de forbedrede egenskapene er eksempelvis strekkstyrke, rissforsterkning, risskontroll, bestandighet, utmattingsstyrke, støtmotstand, slitasjemotstand, robusthet mot svinn- og temperaturriss og brannmotstand. I tillegg vil fiberarmering øke duktiliteten til betongen ved brudd da den hjelper å omfordele lasten jevnere ved brudd. Dette vil føre til en minimering av eventuell sprø oppførsel.



Figur 2.2: Bilde av fiber

2.3 Regelverk

2.3.1 Betong og lettbetong

For dimensjonering av betongkonstruksjoner er det Eurocode 2 [8] med nasjonalt tillegg som er gjeldende i Norge, forkortet kalt EC2. EC2 har detaljerte konstruksjonsregler for de fleste dimensjoneringsstilfeller. I de tilfellene som ikke står beskrevet er det oppgitt hvilke dimensjoneringsprinsipp som skal følges.

LWC følger de samme dimensjoneringsreglene som er beskrevet for NDC i EC2, men med enkelte modifiserte variabler. Hvilke variabler som skal modifiseres og hvordan dette skal gjøres finnes i EC2 kap. 11. Tabell 3.1 i EC2 gir fasthet og deformasjonsegenskaper for NDC, tabell 11.3.1 gir tilsvarende informasjon for LWC. Tabellen bruker mange av de samme verdiene som for NDC multiplisert med en korreksjonsfaktor. Ved korreksjon av verdier tilknyttet strekkfasthet benyttes formel (2.1), ved korreksjon av verdier tilknyttet til elastisk deformasjon gjelder formel (2.2).

$$\eta_1 = 0,40 + \frac{0,60\rho}{2200} \quad (2.1)$$

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 \quad (2.2)$$

Betong med densitet under $2200\text{kg}/\text{m}^3$ får en reduksjon i visse materialegenskaper.

2.3.2 Regler Fiberarmert betong

Siden eurokoden ikke dekker fiberarmert betong (FRC) jobbes det mot en internasjonal overensstemmelse når det kommer til kontroll- og dimensjoneringsregler ved bruk av FRC i lastbærende konstruksjoner. I Europa er det spesifikt to publikasjoner som har blitt publisert som omfatter bruk av FRC, FIBs "First complete draft Model code (2010)" [12] og "DAfStbs recommendations for steel fibre concrete (2008)". I "Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner" [16] argumenteres det for at disse ikke kan anvendes direkte som regelverk for utførelse og kontroll i Norge da Model code kun dekker dimensjonering og det tyske regelverket kun gjelder tradisjonelt utstøpt stålfiberarmert betong (SFRC) med et svært begrenset fasthetsområde.

I Norge har FRC blitt mest brukt i gulv støpt direkte på grunn og sprøytebetong i form av bergsikring. Til disse formålene har Norsk betongforening (NB) utviklet og publisert henholdsvis "NB publikasjon nr. 15 Gulv på grunn" (under revisjon) [2] og "NB publikasjon nr. 7 sprøytebetong til bergsikring" [4], veiledningene dekker alt fra dimensjonering til utførelse og kontroll av slike konstruksjoner.

Ved lastbærende konstruksjoner eksisterer det som nevnt ingen regelverk i Norge for øyeblikket, dog har det blitt utviklet utkast til retningslinjer for hvordan slike konstruksjoner skal dimensjoneres og kvalitetssikres. I 2006 ble "Stålfiberarmering i

betong. Veiledning for prosjektering, utførelse og kontroll, høringsutkast” [26] presentert for NB, grunnet mangler og usikkerhet rundt temaene utførelse og kontroll ble ikke denne rapporten videreført som en egen publikasjon.

I 2011 ble ”Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner” [16] utgitt i regi av COIN, denne rapporten er basert på eller i samsvar med flere internasjonale retningslinjer og rapporter i tillegg til rapporten nevnt i forrige avsnitt. Veiledningen dekker alt fra materialdokumentasjon til utførelse, kontroll og dimensjonering av fiberarmerte konstruksjoner med lastbærende effekt.

2.4 Duktilitet

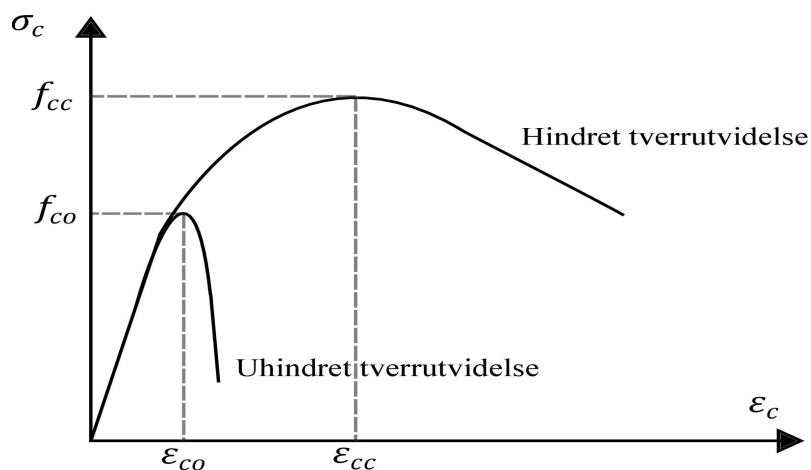
Duktilitet er evnen et materiale har til å deformere seg uten å miste store deler av sin bæreevne. Et duktilt materiale kan ta opp store tøyninger før det kollapser, materialet har altså en seig oppførsel. En konstruksjon med lav duktilitet kan gi ett sprøtt brudd. Sprøe brudd karakteriseres ved at konstruksjonen kollapser uten forvarsel, mens ved seige brudd vil konstruksjonen få betydelige nedbøyninger/tøyninger før den kollapser. Betong er ett sprøtt materiale, og i armerte betongkonstruksjoner er det derfor armeringen som styrer duktiliteten. Ved en kollaps er det ønskelig at armeringsstålet er det svakeste materialet, slik at stålet når flytning før det endelige sammenbruddet kommer. En duktil konstruksjon gir indikasjoner på at den kan kollapse, og personer får tid til å komme seg i sikkerhet.

Et spenning-tøyningsdiagram(også kalt arbeidsdiagram) viser forholdet mellom spenninger og tøyninger for et materiale, og markerer elastiske og plastiske områder. I det elastiske området øker spenningene og tøyningene lineært. I det elastiske området er tøyningene midlertidige, elementet får ingen varige deformasjoner hvis spenningen avlastes. Når materialet har nådd sin trykk/strekkapasitet går materialet over til plastisk oppførsel, som gir varige deformasjoner. Området før materialet har nådd sin trykk/strekkapasitet kalles pre peak load, altså før maks last (bruddlast). Området etter maks last kalles post peak. Det duktile området for tøyningene defineres fra maks last frem til kollaps.

2.4.1 Omslutningseffekten

Et element som utsettes for enaksielt trykk vil utvide seg i alle retninger på tvers av kraften, og utsettes for interne strekkrefter. Dersom denne tverrutvidelsen blir forhindret vil elementet kunne tåle en høyere trykkspenning, og bruddet vil være mer duktilt. Det skapes med andre ord en treaksiell spenningstilstand som motvirker tverrutvidelser, denne effekten kalles omslutningseffekten (engelsk, confinement). Ifølge EC2 skapes denne effekten ved bruk av lukkede bøyler eller kroker som kan nå plastisk tilstand på grunn av betongens tverrutvidelse.

Denne effekten kan også oppstå under trykktesting av betongelementer [27]. Når elementet trykktestes blir det lagt mellom to stålplater for å sikre en jevn lastoverføring. Mellom stålplatene og betongen skapes det friksjonskrefter som videre skaper treksielle fastholdingskrefter i topp og bunn av elementet. Disse friksjonskreftene motvirker tverrutvidelse og gir en økt trykkapasitet og tøyning før elementet når brudd.



Figur 2.3: Fremstilling av omslutningseffekten [17]

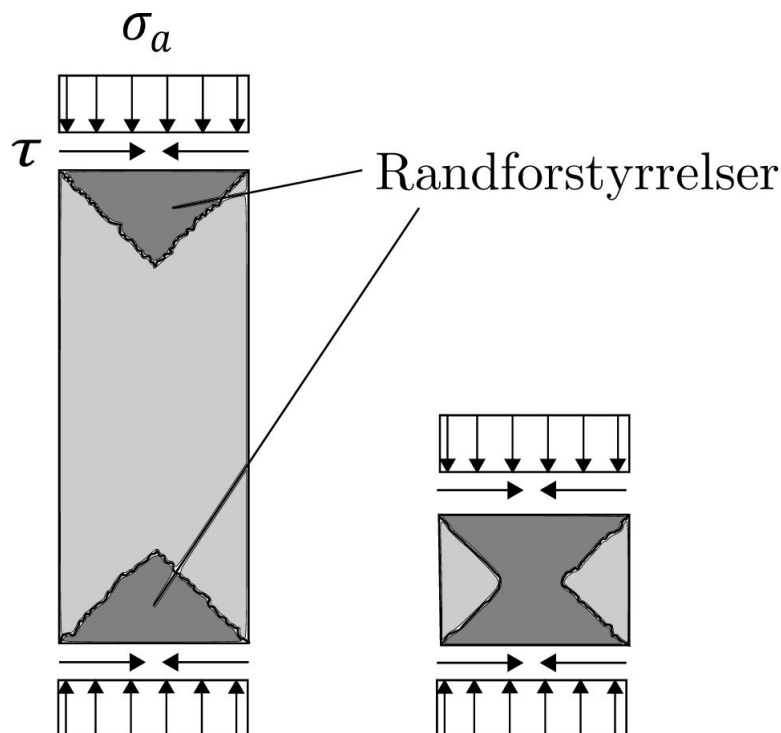
Strain softening

Etter materialet har nådd sin maksimale bruddspenning i arbeidsdiagrammet, får den en synkende kurve kalt strain-softening-kurven. Ett bratt fall på kurven indikerer et sprøtt materiale, se figur 2.3. For konstruksjonsanalyse er det viktig å kjenne til arbeidsdiagrammet under enaksjelt trykk og den synkende kurven etter maks belastning, ettersom trykkfastheten benyttes til styrkeberegningen av strukturelle komponenter og arbeidsdiagrammet trengs for å evaluere duktiliteten.[14]

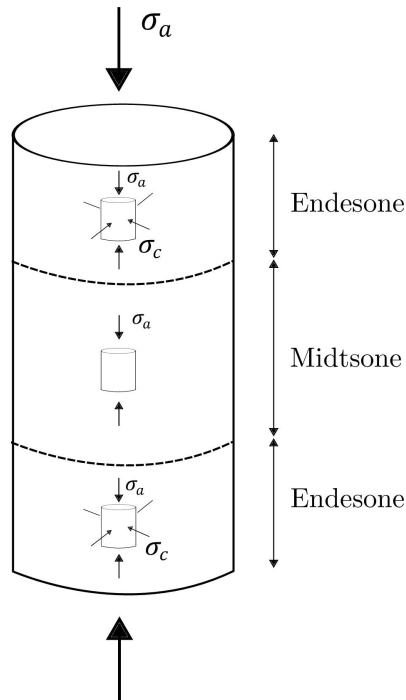
Under måling av strain-softeningen for betong under enaksjelt trykk er det flere faktorer som kan påvirke resultatet. Som nevnt skaper friksjonen mellom stålplaten og prøvestykket en treksiell tilstand ved randen på elementene. Platerotasjon, stivhet til platene har også en effekt på tverrutvidelsen til endeforholdene. [25]

For å unngå påvirkning fra fastholdningskreftene som oppstår under trykktestingen kan man teste slanke elementer, slik at midtsonen er upåvirket, se figur 2.4. Generelt øker trykkfastheten til betong når slankheten på elementene reduseres. [27]

Prøvestykker med liten slankhet vil altså få en treksiell spenningstilstand og dermed tåle en større spenning og tøyning[25, 27]. Flere forsøk viser at enaksjell trykkfasthet for elementer med en slankhet på 2,5 er upåvirket av friksjonskreftene på den belastede overflaten [25, 27]. Trykkbruddet vil da skje i midtsonen, ettersom endesonene er forsterket. Ved for stor slankhet vil elementene knekke ut som søyler.



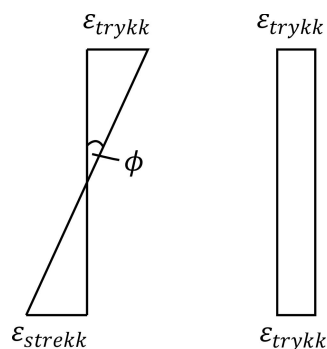
Figur 2.4: Områder med treksiell spenningstilstand grunnet friksjonskrefter ved randen [27]



Figur 2.5: Randforstyrrelser grunnet friskjonskrefter i endesonene [19]

Tøyningsgradient

Effekten av tøyningsgradient på spenning-tøyningsforholdet er todelt ettersom den påvirker både styrken og duktiliteten. I begge tilfeller er det forskjell i deformasjon mellom fibre som er viktigst. Tverrutvidelsen av den mest påkjente fibre blir motvirket av de mindre påkjente fibre. Dette leder til treaksiell spenningstilstand i de mest belastede fibre og en korresponderende økning i maks spenning. Økningen i maks spenning kan være 10-30%. Denne effekten er avhengig av forholdet mellom bredden og dybden på trykksone, når denne ratioen øker, øker kapasiteten proporsjonalt. Den vertikale deformasjonen av de mest påkjente fibre kan ikke utvikle seg fritt men er heller styrt av en uniform deformasjon av de underliggende mindre påkjente fibre. Så snart en lokalisering begynner å utvikle seg på et punkt vil påkjenningen minke på det punktet og bli delvis tatt over av de underliggende fibre. [20]

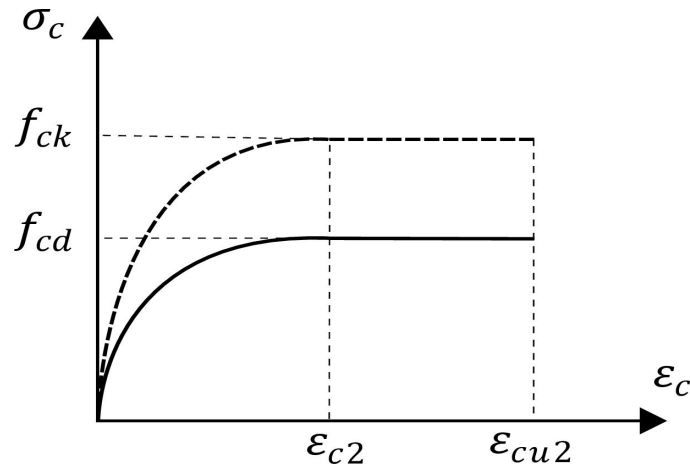


Figur 2.6: Illustrasjon av tøyningsgradient

2.4.2 Betong og lettbetong, etter EC2.

Tøyninger

Som nevnt har betong en lav strekkfasthet i forhold til trykkfasthet. Den tåler små tøyninger før den går til brudd, og er av den grunn ett sprøtt materiale. For dimensjonering av tverrsnitt skal følgende spennings-tøyningsammenheng benyttes:



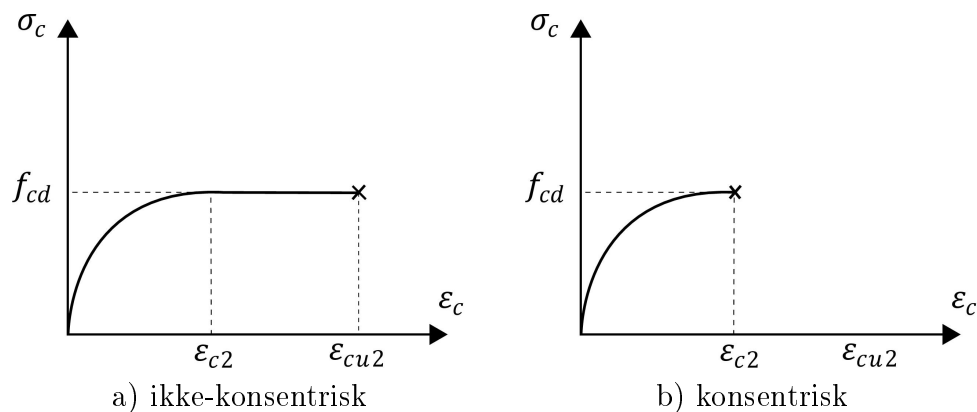
Figur 2.7: Parabel-rektangel diagram for betong under trykk etter EC2

I figur 2.7 er trykktøyning vist som positiv. ϵ_{c2} er tøyningen ved bruddlast og ϵ_{cu2} er tøyningen ved kollaps. Etter betongen har nådd sin maksimale spenning, vil den fortsette å tøyes til den når brudd ifølge figur 2.7. Duktiliteten til materialet er som nevnt tøyingsområdet etter maksimal spenning.

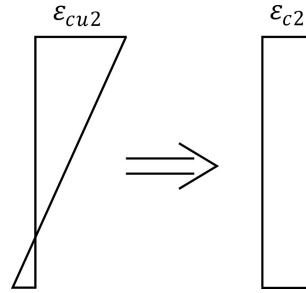
Kapittel 6.1(4) i EC2 forteller:

”I deler av tverrsnitt med tilnærmet konsentrisk belastning ($e_d/h < 0,1$), f.eks. trykkflenser i kassetverrsnitt, bør middeltrykktøyningen i denne delen av tverrsnittet berignes til ϵ_{c2} .”

Betong med tilnærmet rent trykk (konsentrisk trykk) skal dermed ikke ha en større middeltøyning enn ϵ_{c2} , se figur 2.8 og 2.9. Betong med tøyingsgradient har ingen begrensninger for midlere fasthet etter EC2.



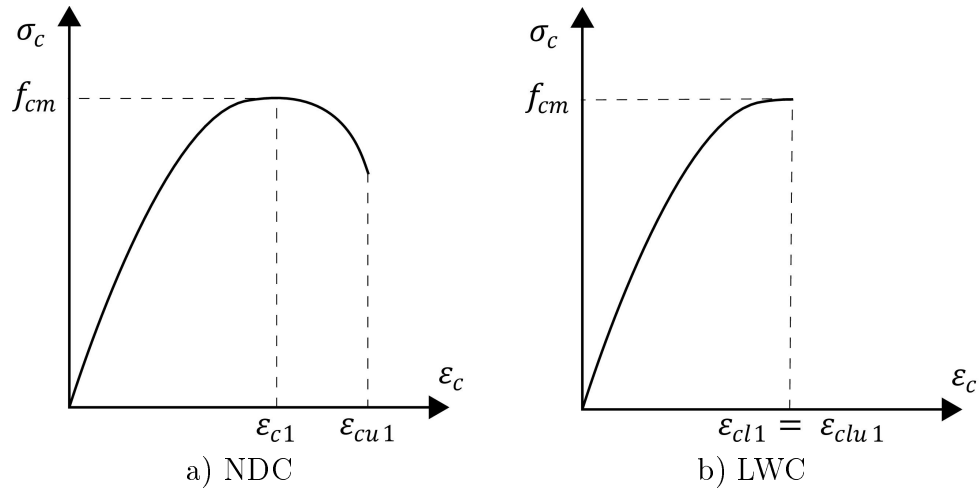
Figur 2.8: Illustrasjon av EC2 pkt 6.1(4)



Figur 2.9: Illustrasjon av middeltøyning

Figur 2.9 viser en illustrasjon av en tilnærmet kosentrisk belastning, gradienten på tøyningen er såpass liten at EC2 legger en begrensning på middeltrykktøyningen.

For spennings-tøyningssammenheng for ikke-lineær konstruksjonsanalyse gir EC2 kap. 3.1.5 følgende fremstilling:

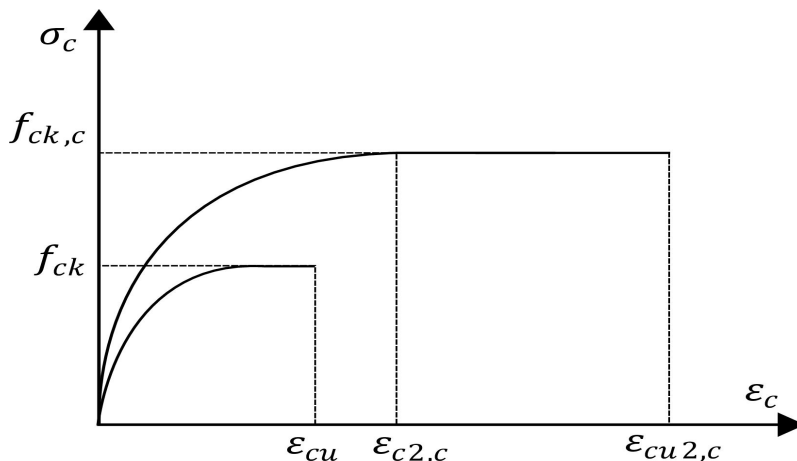


Figur 2.10: Ikke-lineær spenningskrurve etter EC2

For LWC erstattes verdiene ε_{c1} og ε_{cu1} med ε_{lc1} og ε_{lcu1} . Tabell 3.1 og 11.3.1 i EC2 angir spennings - og deformasjonsegenskaper for hennholdsvis NDC og LWC. I tabell 11.3.1 er ε_{lc1} satt lik ε_{lcu1} , hvilket betyr at LWC ikke tillater tøyning etter maksimal spenning er oppnådd, se figur 2.10. Det betyr at LWC går til brudd når maks spenning er oppnådd. Dette da for ikke-lineære analyser.

Omslutningseffekten i EC2

Betong med forhindret tverrutvidelse kan som nevnt tåle større påkjenninger etter som det blir skapt en omslutningseffekt. EC2, kapittel 3.1.9 gir følgende spennings-tøyningssammenheng for betong med forhindret tverrutvidelse (treaksiell trykkspenningstilstand), se figur 2.11 :



Figur 2.11: Illustrasjon av omslutningseffekten etter EC2 [8]

Figur 2.11 viser grafisk hvordan omslutningseffekten påvirker arbeidsdiagrammet. Nedre graf viser betong uten omslutningseffekt. Øvre graf viser betong med omslutningseffekt hvor det tillates en større dimensjonerende trykkfasthet og tøyning.

Økt karakteristisk fasthet og tøyninger beregnes etter følgende formler:

NDC:

$$f_{ck,c} = \begin{cases} f_{ck}(1,000 + 5,0 \cdot \sigma_2/f_{ck}) & \text{hvis } \sigma_2 \leq 0,05f_{ck} \\ f_{ck}(1,125 + 2,50 \cdot \sigma_2/f_{ck}) & \text{hvis } \sigma_2 > 0,05f_{ck} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \cdot (f_{ck,c}/f_{ck})^2 \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \cdot \sigma_2/f_{ck} \quad (2.5)$$

LWC:

$$f_{lck,c} = f_{lck}(1,0 + k \cdot \sigma_2/f_{lck}) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{lc2,c} = \varepsilon_{lc2} \cdot (f_{lck,c}/f_{lck})^2 \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{lcu2,c} = \varepsilon_{lcu2} + 0,2 \cdot \sigma_2/f_{lck} \quad (2.8)$$

$\sigma_2 (= \sigma_3)$ er trykkspenningen i tverretningene i bruddgrensetilstanden grunnet armeringen i betongen. I det nasjonale tillegget settes $k = 1,0$ i ligning 2.6, som vil si at omslutningseffekten for NDC er større enn for LWC. Dette henger sammen med at EC2 tillater mindre tøyninger for LWC enn NDC, som illustrert i figur 2.10 for ikke-lineære beregninger.

2.5 Jordskjelv

Under et jordskjelv vil en konstruksjon bli utsatt for betydelige horisontale krefter. Utgangspunktet for disse kreftene er vibrasjoner fra et jordskjelv som brer seg i berggrunnen og videre i løsmassene som bygningen er fundamentert på. Disse vibrasjonene kan videre sette en konstruksjon i svingninger. Konstruksjonen tar altså opp energi fra jordsvingningene, som igjen setter bygningen i bevegelse. Hvor stor svingningen på bygget blir avhenger av konstruksjonens egensvingeperiode T og svingningen på jordmassene. Dersom disse frekvensen på disse to svingningene er nærme hverandre kan det oppstå resonans, altså en forsterkning av jordskjelvrystelsene. Et stivt bygg gir en kort egenperiode og en økt seismisk belastning. Sørrelsen på de seismiske kreftene avhenger altså av massen og stivheten til bygningen.[22]

2.5.1 Prosjektering etter seismiske laster [22, 9]

NS-EN 1998-1:2004+NA:2008 (EC8) setter krav til prosjektering av konstruksjoner for seismiske påvirkninger. EC8 skiller mellom konstruksjoner med lav (DCL = ductility class low), medium (DCM) og høy (DCH) duktilitet. Til dette knyttes konstruksjonsfaktoren q , som angir evnen et bygg har til å absorbere og omfordele energi, q avhenger altså av duktiliteten til konstruksjonen.

Ett bygg med DLH vil kunne oppta og fordele de seismiske kreftene i større grad enn ved DCL. Fordelen ved å dimensjonere etter lav duktilitet er at prosjekteringen gjøres etter vanlig dimensjonering. Ulempen ved lav duktilitet er at bygget har liten motstandsevne mot horisontalkreftene fra jordskjelvet. Middels og høy duktilitetsklasse krever at en deformasjonsmekanisme for den bærende konstruksjonen er gitt. Dette gjøres ved å dimensjonere konstruksjonen slik at den får stabile mekanismer med stor energiabsorpsjon. Disse mekanismene er plastiske ledd som tåler stor rotasjon, uten tap av bæreevne. Dette gir en større motsandsevne mot jordskjelvskreftene på konstruksjonen, men bygget må detaljprosjekteres for å danne flytemekanismer i bæresystemet.

I områder hvor jordskjelvsbelastning blir dimensjonerende kan det derfor aktuelt å redusere kreftene fra jordskjelvet ved å gi bygget mindre masse samt prosjektere en duktil konstruksjon for å gi større motstandsevne.

Kapittel 3

Laboratorium

Dette kapitlet tar for seg i detalj hvordan prøvestykkene ble produsert, lagret og testet. Det ble utført deformasjonsstyrte trykktester på prizmer med sentrisk og eksentrisk belastninglast. Det ble også støpt standard sylindre og bjelker for å henholdsvis bestemme trykk- og bøyestrekfasthet. Produksjon og testing av elementene ble gjort i betonglaboratoriet til NTNU. Resepten til normalbetongen og lettbetongen ble bestemt av SINTEF. Blandingen, støpingen og testingen av elementene ble gjort av studentene i samarbeid med laboratorieteknikere fra NTNU.

3.1 Størrelse prizmer

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 enaksial spenningstilstand i midten av prøvestykket slik at det kun er fiberarmeringen som bidrar til å forhindre tverrutvidelsen.

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

Dimensjonene på prøvestykkene ble valgt med bakgrunn av dette lik $150\text{mm} \cdot 150\text{mm} \cdot 375\text{mm}$ som gir en slankhet λ som vist i lign (3.1)

$$\lambda = \frac{375\text{mm}}{150\text{mm}} = 2,5 \quad (3.1)$$

Størrelsene på sylindrene og bjelkene er standard størrelser, Sylindre var 200mm høy og hadde en diameter på 100mm. Dimensjonene på bjelkene var $150\text{mm} \cdot 150\text{mm} \cdot 550\text{mm}$.

3.2 Prøveserie

Målsetningen med oppgaven er å bestemme effekten av fiber på lettbetongens duktilitet under trykk. Dette gjøres ved å trykkteste betongprismer med forskjellig prosentandel fiberarmering. Prismene utsettes for sentrisk og eksentrisk trykk inntill brudd oppstår. Det ble benyttet en eksentrisitet $b/6$, som ved en lineærelastisk materialoppførsel ikke gir strekkspenning i betongen. Eksentriske tester av prismer med ingen tøyning på den minst komprimerte siden kan brukes til å simulere trykksonen i en bjelke hvor ingen skjærkraft er tilstede [23]. Eksentrisiten på $b/6$ er identisk en testserie utført i forsøkene til Markeset og Schumacher [20, 23].

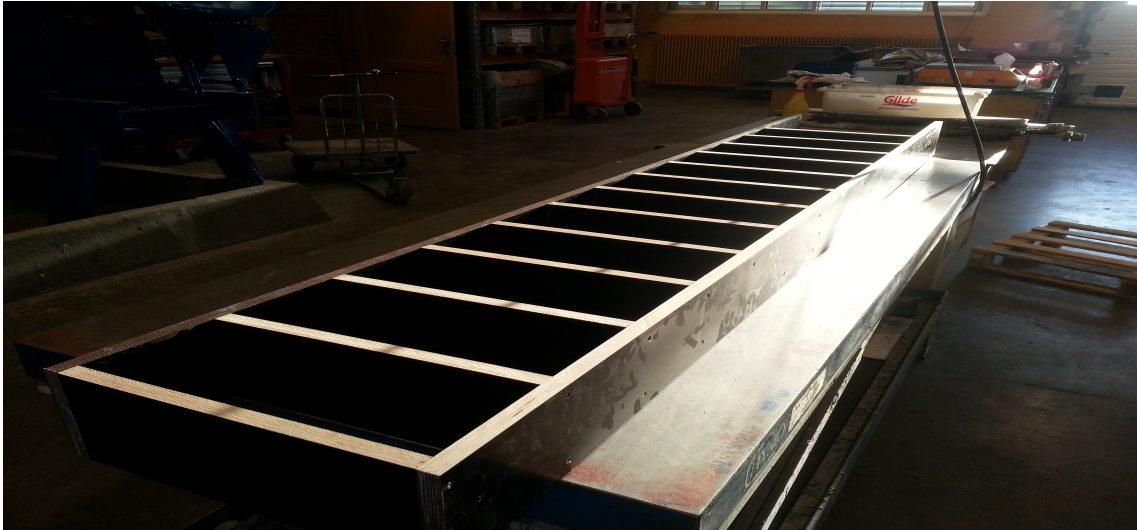
Forsøkene gjøres for NDC- og LWC-betong med forventet lik trykkfasthet på 40 MPa. I tillegg til prismene støpes det sylindere og bjelker for hver blanding. Sylinderene vil gi trykkfastheten til betongen, mens bjelkene gir bøyefastheten. Det knyttes 3 sylindere mot prismene og 3 sylindere mot bjelkene, se tabell 3.1.

Tabell 3.1: Oversikt over prøveserier

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

3.3 Forskaling

Forskaling til sylindrene og bjelkene hadde laboratoriet produsert tidligere, mens forskalingen til prismene ble produsert til forsøkets formål. Finérplater ble kappet og skrudd sammen slik at de innvendige dimensjonene i forskalingen tilsvarer utvendige mål på prismene. Alle forskalingene ble smurt med olje for å forenkle avforming og rengjøring. Prismene ble støpt liggende, for å forsikre plane endeflater.



Figur 3.1: Forskaling til prismene

3.4 Støping

3.4.1 Forberedelser før støping

I forkant av hver støp ble det veid opp gitt antall kilo av hvert tilslag som skulle tilsettes i blandingene. Mengde vann som tilsettes i betongblandingen avhenger av fuktinnholdet og fuktabsorpsjonen i tilslagene. I forkant av støpingen ble det derfor målt fuktinnhold og vannabsorpsjon av Leca-tilslaget, samt fuktinnhold av sanden. Resultatet av disse målingene ble lagt inn i regneark for reseptene, og mengde tilsatt vann i resepten ble justert etter fuktabsorpsjonen og fuktinnholdet.

Fuktinnholdet ble målt i hennhold til Sintef internprosedyre 14-05-05-531. For prosedyre og resultater se vedlegg B.

1-times vannabsorpsjon ble målt i hennhold til Sintef internprosedyre 14-05-05-532. For prosedyre og resultater se vedlegg C.



Figur 3.2: Måling av fuktabsorpsjon og fuktinnhold av tilslagene

Blanding av betong

Følgende støpeprosedyre ble benyttet:

1. Tilsetting av sand
2. Tilsetting av Leca 4-8 mm, hvis aktuelt
3. Tilsetting av Leca 2-4 mm. hvis aktuelt
4. Tilsetting av sement og silika
5. Tørrblanding 1-2 min (etter skjønn)
6. Tilsetting av vann
7. Tilsetting av SP-stoff(dosering etter skjønn)
8. Våtblanding, 2 min
9. Henstilling, 2 min
10. Justering av konsistens med SP
11. Evt. tilsetting av fiber - drysses i

Tabell 3.2: Materialer benyttet i betongblandingene

	NDC	LWC
Sement	Norcem Standard FA (STD FA 10)	Norcem Standard FA
Sand	0-2 mm (A-3726) 0-8 mm (A-3995)	0-2 mm (A-3726) 0-8 mm (A-3995)
Letttilslag		Leca 2-4 mm (A-4048) Leca 800 4-8 mm (A-4048)
Stålfiber	Dramix 65/60 3D	Dramix 65/60 3D
Tilsetningsmaterialer	Elkem Microsilica 940U Flygeaske (A-4076)	Elkem Microsilica 940U Kalksteinsmel
Tilsetningsstoff	Dynamon SX-N Sika demper	Dynamon SX-N

Stålfibrene som ble benyttet har hekta ender. Tabell 3.3 viser egenskapene til stålfiberen[6].

Tabell 3.3: Egenskaper stålfiber

Fiber	Diameter d_f [mm]	l_f/d_f [mm]	Lengde l_f [mm]	Strekfasthet [N/mm^2]
65/60	0.9	65	60	1240

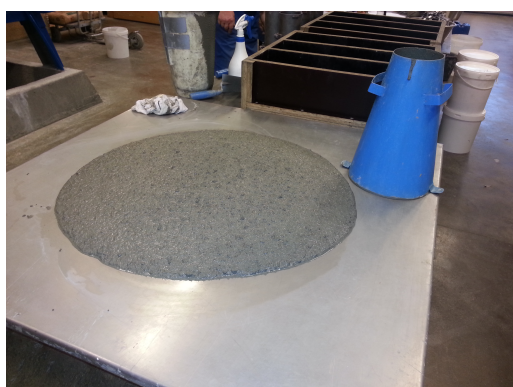
Laborarietekniker Ove Loraas valgte å ikke benytte all superplastifiserende tilsetningsstoffet som beskrevet i resepten for LWC-blandingen, og benyttet mer SP-stoff i NDC-blandingen enn hva resepten ga. Dette ble gjort for å oppnå ønsket konsistens uten at betongen skilte seg. Målingene av synkutbredelse viste at Oves beslutning var korrekt, se tabell 3.5. Endringene av faktisk benyttet SP-stoff i forhold til resepten er dokumentert i vedlegg A.

3.4.2 Utstøping

Støping av normalbetong (NDC) ble gjort 10. februar, og lettbetongelementene (LWC) ble støpt 12. februar. Resepten på betongblandingene ble bestemt av SINTEF, se vedlegg A. Under støpingene ble det foretatt målinger av densitet, luftmetning og synkutbredelse på alle betongblandingene, se tabell 3.5. Grunnet to typer betong som hver har tre forskjellige innhold av fiber, ble det støpt i seks omganger. Prismer, bjelker og sylindre for hver betongblanding ble støpt samtidig. Alle prøvestykkene herdet i ett døgn før de ble avformet og lagret i vann til 9. April. Deretter ble alle prøvestykkene plassert i et klimarom med konstant temperatur og en luftfuktighet på 50% fram til testing. Herding i vannbad forhindrer uttørkning og opprissing av betong under herdeprosessen. Dette vil hindrer at prøvestykkene blir svekket som følge av eventuelle riss. I NDC-blandingene er v/c tallet satt til 0,57 og 0,38 for LWC-blandingene. Betongen ble blandet i en 100 liters betongblander.

Tabell 3.4: Støpetidspunkt

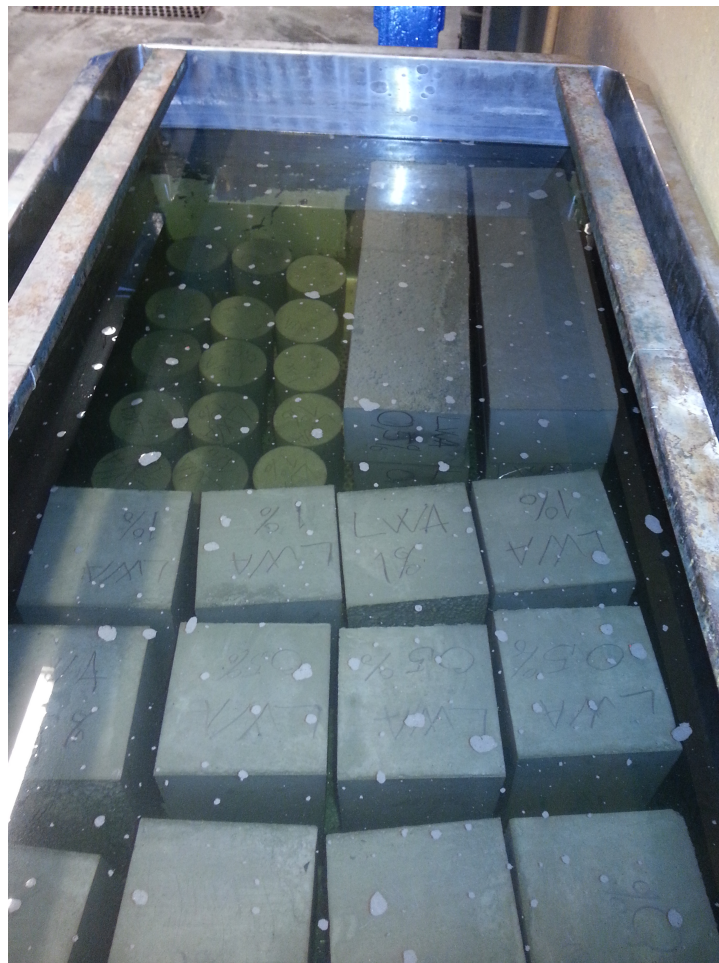
Betongtype	Støpedato
NDC 0% fiber	10.02.2014
NDC 0.5 % fiber	10.02.2014
NDC 1.0 % fiber	10.02.2014
LWC 0% fiber	12.02.2014
LWC 0.5 % fiber	12.02.2014
LWC 1.0 % fiber	12.02.2014



Figur 3.3: Måling av synkutbredelse, luftinnhold og densitet av fersk betong

Tabell 3.5: Målinger av fersk betong

Betongtype	Synkmål T-50 [s]	Utbredelsesmål [mm]	Luftinnhold [%]	Densitet [kg/m^3]
LWC 0%	1,88	590	7,0	1696,7
LWC 0,5%	1,97	570	5,8	1774,9
LWC 1,0%	2,88	560	5,6	1726,0
NDC 0%	4,88	660	3,5	2267,3
NDC 0,5%	5,00	640	2,7	2298,1
NDC 1,0%	7,00	600	2,5	2326,5



Figur 3.4: Lagring av elementene

3.5 Test av prismene

Testriggeren for trykktesting av prismene ble satt opp av laboratoriearbeiderene ved NTNU. Prismene ble testet etter NS-EN 12390-3:2009 - Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet [10]. Prismene belastes til brudd i en trykkmaskin, største målte last registreres og trykkfastheten for betongen beregnes [10]. Maskinen som ble benyttet het *Howden 1000kN*.

Maskinen har egen deformasjonsmåler. Ifølge standarden [10] skal maskinen ha en konstant pålastningshastighet på $0,6 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$. I disse forsøkene er det ikke ønskelig med en konstant pålastningshastighet. Etter brudd på prismene vil motstanden reduseres, maskinen vil da kompensere for dette tapet og momentant knuse prismene. Vi benyttet derfor en deformasjonsstyrt belastning på 0,3 millimeter per min, slik at knusning rett etter maksimal trykkspenning unngås.

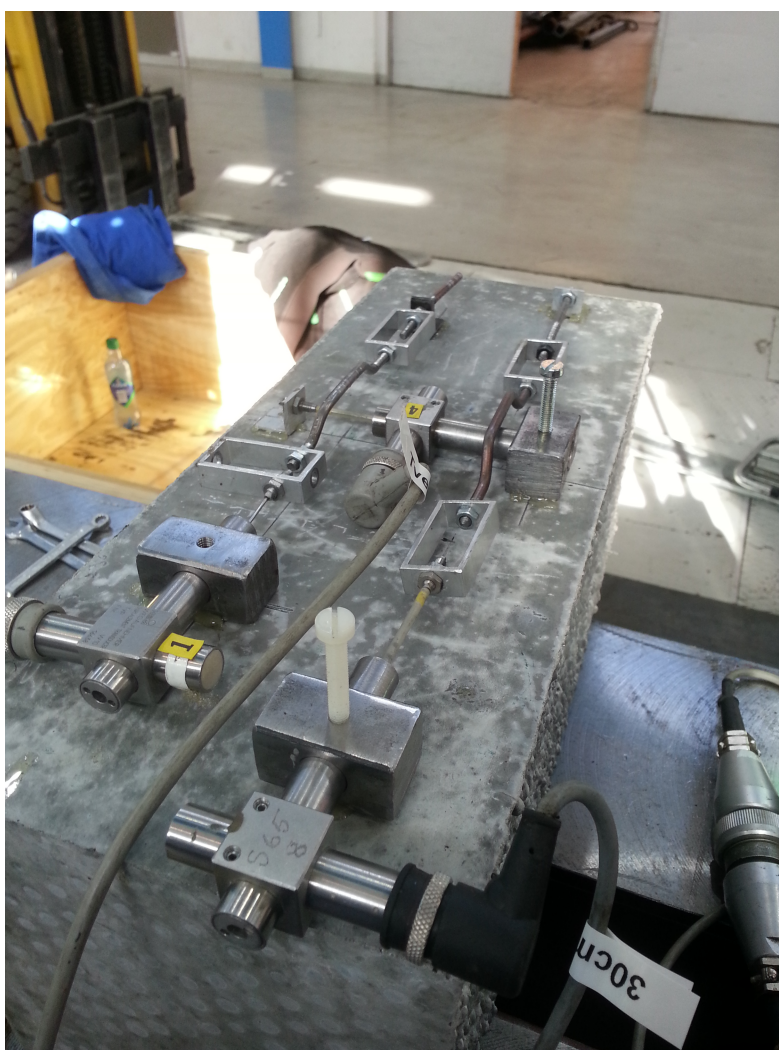


Figur 3.5: Testriggeren

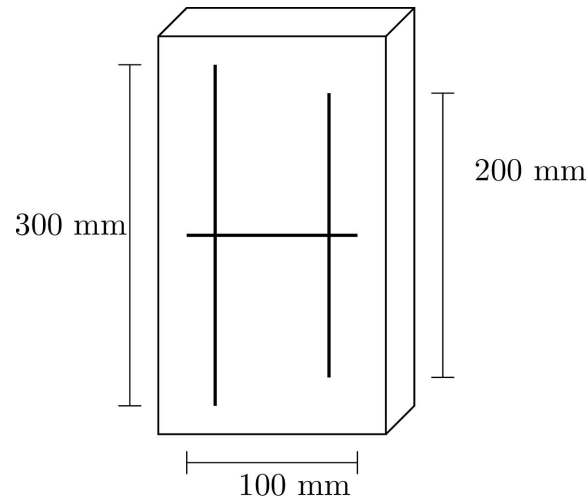
3.5.1 Instrumentering av prismene

Får å måle deformasjonen på prismene ble det benyttet LDVT type induktiv halvbro model W10(Linear variable differential transformer) som er en type elektrisk transformator som måler forskyvninger. En stålpinne ligger inne i en sylinder med et magnetfelt, når pinnen beveger seg blir dette registrert. LDVTene ble bygd sammen av flere mindre komponenter for å oppnå ønsket lengde. LDVTene limes i begge ender, det er da viktig at limet er sterkt nok og at mekanismen er stiv, slik at ikke tøyningmålingene forstyrres. Se figur 3.6

Før hver test ble det limt på 6 LVDT målere på prismene, 3 på hver side som pekte mot nord og sør, hvor to av disse målte langsgående tøyning og en tverrekspsjonen. Prismene ble alltid orientert slik at støpeoverflate var vendt mot øst. En LDVT på 100 mm er limt på tvers av elementet for å måle tverrtøyning, og på 200 mm og 300 mm på langs for å måle langsgående tøyning, se figur 3.6 og 3.7. Under eksentrisk last ble prøvestykket plassert slik at siden som pekte mot Nord fikk mest trykkpåkjenning.

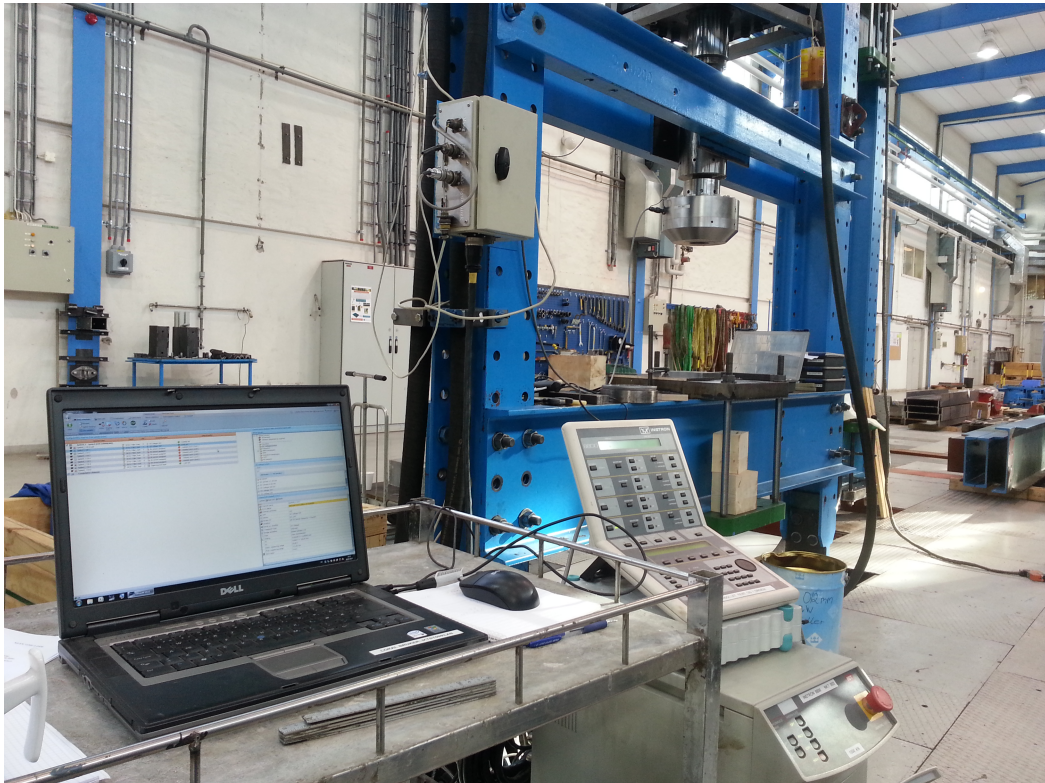


Figur 3.6: Pålimt LVDT på prismene



Figur 3.7: Pålimt LVDT på nord og sørsiden av prismene

LDVT-ene ble koblet til en HBM Spider8 som videre ble koblet til en bærbar PC som kjørte programvaren CatmanAP V3.2.2. Dataen som styrer riggen var en Instron 8800, som også ble koblet til spideren så den bærbare PC-en fikk registrert data på deformasjoner og last fra riggen, se figur 3.8.



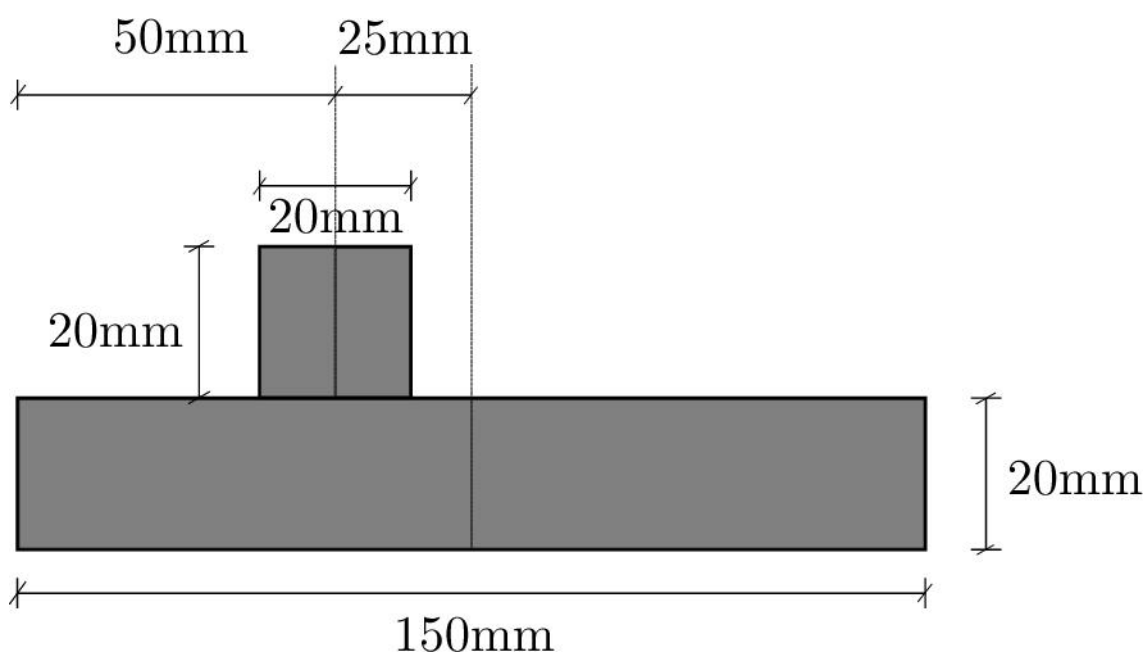
Figur 3.8: Oppsett måledata

3.5.2 Opplagerbetingelser

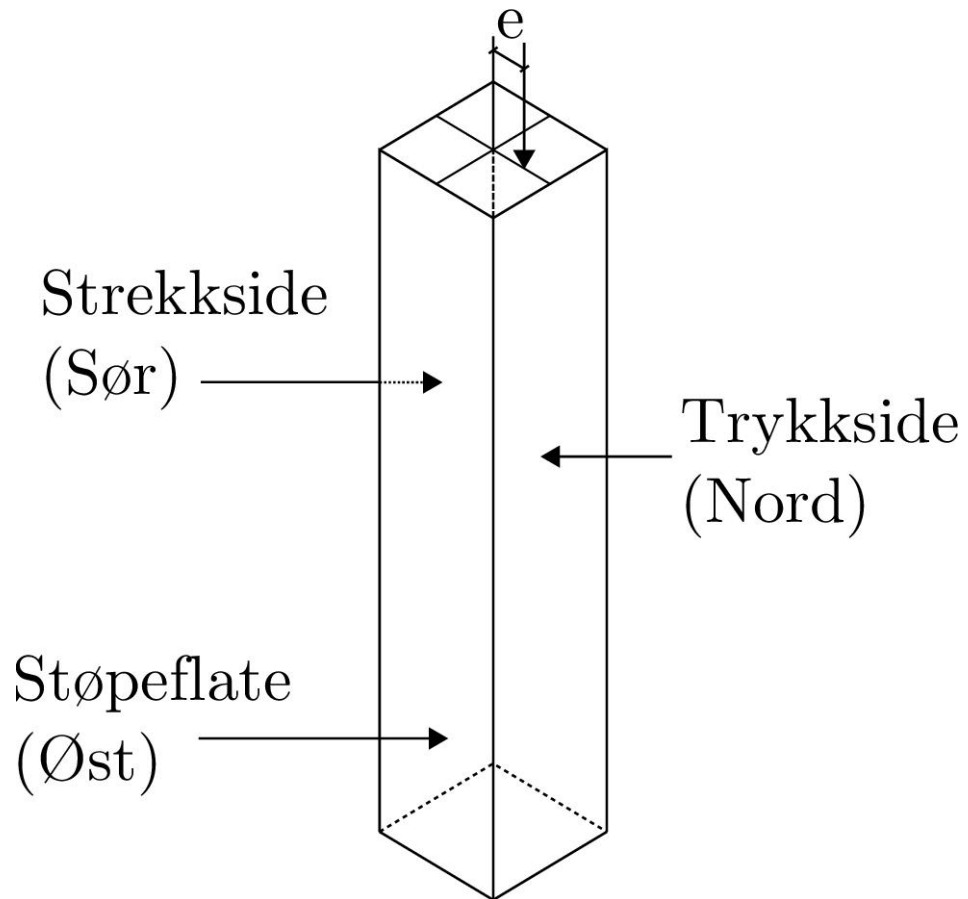
Prismene ble plassert mellom to 25mm tykke metallplater for hver prøve. Under de eksentriske testene ble det i tillegg lagt to plater med påsveist profil. Dette sørger for at lasten angriper prismet langs denne kanten. For dimensjoner og utførelse se bilde 3.10, 3.9 og 3.11



Figur 3.9: Oppsett av eksentrisk(venstre) og sentrisk(høyre) belastning



Figur 3.10: Dimensjoner på eksentrisk lastplate



Figur 3.11: Navn på sideflater

3.6 Test av sylindre og bjelker

Sylindrene ble trykktestet etter NS-EN 12390-3:2009 - Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet [10]. Formålet med å teste sylindrene er å bestemme trykkfastheten og romdensiteten. Sylindrene ble slipt før testing for å gi plane overflater under trykktesten. Trykkmaskinen het Tonitechnic og var koblet til en bærbar som kjørte programvaren Testxpert.

Bjerkene vil bli testet etter NS-EN 14651:2005+A1:2007 - Prøvingsmetode for betong med metalliske fibre. [7]. Se kap. 2.8.



Figur 3.12: Testtrigg sylinder

Tabell 3.6: Oversikt over ID på alle prøvestykker

Betongtype	SerieID	Prismer		Sylindere	Bjelker
		Sentrisk	eksentrisk		
LWC 0 %	LA	LA1-LA2	LA3-LA4	D1-D3 Ingen	Ingen
LWC 0.5 %	LB	LB1-LB2	LB3-LB4	E1-E3 E4-E6	LBX1-LBX3
LWC 1.0 %	LC	LC1-LC2	LC3-LC4	F1-F3 F4-F6	LCX1-LFC3
NDC 0 %	NA	NA1-NA2	NA3-NA4	A1-A3 Ingen	Ingen
NDC 0.5 %	NB	NB1-NB2	NB3-NB-4	B1-B3 B4-B6	NBX1-NBX3
NDC 1.0 %	NC	NC1-NC2	NC3-NC4	C1-C3 C4-C6	NCX1-NCX3

3.7 Forsinkelser/avvik

20. januar 2014 ble det avtalt med laboratoriet at testing skulle starte 10. mars slik at elementene fikk herde i 28 døgn. Det skulle benyttes en maskin som har en trykkapasitet på 10 000 kN. Grunnet flere forsinkelser og feilbestillinger av nytt utstyr til testriggen, er ikke maskinen operativ før høsten 2014. Av den grunn testet vi fastheten til to sylindere for å undersøke om vi kunne benytte en maskin som har en trykkapasitet på 1000 kN. En sylinder for LWC 0,5% fiber og NDC 0,5% fiber ble testet, som ga en trykkfasthet på henholdsvis 44,72 MPa og 58,29 MPa.

For sentrisk belastning må riggen derfor ha en trykkapasitet på:

$$F = 150\text{mm} \cdot 150\text{mm} \cdot 44,72\text{N/mm}^2 = 1006,2\text{kN}$$

$$F = 150\text{mm} \cdot 150\text{mm} \cdot 58,29\text{N/mm}^2 = 1311,5\text{kN}$$

Noe avvik på prismene kan forventes (støperegir og andre svakheter). Alle testene på LWC kunne gjennomføres på 1000 kN, mens kun eksentrisk belastning kunne gjennomføres på NDC, ettersom eksentrisiteten skaper ekstra trykkpåkjenninger. NDC prismene som skal belastes sentrisk testes derfor høsten 2014.

Bjelkene var planlagt å testes samditig med sylindrerne og prismene. Grunnet utsettelsene ble ikke bjelkene testet. De skal testes samtidig som de resterende prismene høsten 2014. 3 sylindere per blanding står også igjen som er knyttet til bjelkene.

Støpetidspunkt, testdato og antall herdedager for alle elementene er illustrert i tabell 3.13.

Figur 3.13: Oversikt over testdato og herding

Betongtype	Belastning	Støpedato	Testdato	Antall herdedager
LWC 0%	Sentrisk	12. Feb.	9. April	56
	Eksentrisk	12. Feb.	11. April	58
LWC 0,5%	Sentrisk	12. Feb.	8-9. April	55-56
	Eksentrisk	12. Feb.	10. April	57
LWC 1,0%	Sentrisk	12. Feb.	9-10. April	56-57
	Eksentrisk	12. Feb.	10. April	57
NDC 0%	Sentrisk	10. Feb.	Høst 2014	-
	Eksentrisk	10. Feb.	23. April	74
NDC 0,5%	Sentrisk	10. Feb.	Høst 2014	-
	Eksentrisk	10. Feb.	22-24. April	73-75
NDC 1,0%	Sentrisk	10. Feb.	Høst 2014	-
	Eksentrisk	10. Feb.	23. April	75

3.8 Behandling av data

Tøyning

Tøyning er definert som endring av lengde dividert på opprinnelig lengde se ligning 3.2:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.2)$$

LVDTene med ulik lengde blir derfor dividert på sin totale opprinnelige lengde (300mm, 200mm og 100mm) for å finne tøyningen.

Tverrkontraksjonstallet (poissons ratio) er tverrgående tøyning dividert på aksial tøyning. For de aksiale tøyningene er LVDT-en på 200mm benyttet ettersom disse i mindre grad er påvirket av randforstyrrelser.

Spenning

For de sentriskt belastede prismene er spenningene beregnet fra kraft dividert på arealet til prismet. For trykkspenningen på de eksentriske testene må spenningen fra momentet adderes:

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} \quad (3.3)$$

Momentet M skapes av eksentrisiteten $F \cdot e$ og W er motstandsmomentet, som for et kvadratisk tverrsnitt er $\frac{1}{6} \cdot b^3$. Trykkspenningene på nordsiden blir derfor:

$$\sigma = \frac{F}{b^2} \cdot \left(1 + 6 \cdot \frac{e}{b}\right) \quad (3.4)$$

Under de eksentriske testene er maksimal trykkspenning på nordsiden plottet mot tøyningene på sørsiden. Det er altså ikke trykkspenninger på sørsiden. Dette ble gjort for å sammenligne strekktøyningene mot trykktøyningene på nordsiden. På sørsiden skal det teoretisk ved lineær oppførsel ikke være spenninger, men ved testing viste det seg at det var noe strekktøyning se vedlegg F.

Definisjon av bruddlast og kjørelengde av testene

Lasten økte lineært gjennom hele forsøket. Bruddlast er maksimal påført kraft og etter bruddlasten vil kraften på prismene normalt avta til prismet kollapser. Hvor lenge forsøket ble kjørt avhenger av utviklingen av kraft, tøyninger og riss på prøvestykket. Ved store hopp i tøyninger eller rask avlastning av kraften ble forsøket stoppet. Eksempelvis oppnådde flere prismene en tøyning på 10-12 promille, men dette skjedde ofte på få sekunder og velger derfor å se bort fra disse målingene.

Ofte eksploderte prismene ved bruddlasten slik at videre registrering av tøyninger ikke var mulig.

Standardavvik

Middelverdi og standardavvik på prøvene er beregnet etter følgende formler

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.5)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2} \quad (3.6)$$

Estimering av karakteristisk verdi foregår etter formelen vist i ligning 3.7

$$x_k = \mu_x + \Phi^{-1}(p_k) \cdot S_x \quad (3.7)$$

Karakteristisk verdi baseres på 5% fraktilen til standard normal fordelingen $\Phi^{-1}(0,05) = -1,64$ se vedlegg D for normalfordelingstabell.

Kapittel 4

Resultater

4.1 Resultat sylindertester

Tabell 4.1 viser gjennomsnittlig trykkapasitet og romdensitet med tilhørende standardavvik. For detaljerte resultater for hver sylinderprøve se vedlegg E. Generelt øker trykkapasiteten med økende romdensitet. Trykkfastheten til LWC ligger på størrelsesorden 45-49 N/mm^2 , mens NDC ligger på størrelsesorden 61-69 N/mm^2 . LWC 1,0% har et større standardavvik enn de andre grunnet store variasjoner innad i prøveserien, støperekir i syl. 2 og at syl. 1 hadde høyere densitet enn forventet se vedlegg E.

Spenningene er beregnet på en diameter på 100mm og høyde på 200mm i programvaren til prøveapparatet. Målene på høyden av sylindrene vil variere noe se vedlegg E. Denne variasjonen påvirker trykkapasiteten i så liten grad at den blir neglisjert.

Tabell 4.1: Resultater sylindertesting

LWC				
Fiber %	$\mu_{fck}[N/mm^2]$	$S_{fck}[N/mm^2]$	$\mu_\rho[kg/m^3]$	$S_\rho[kg/m^3]$
0	45,6	1,7	1738,2	11,6
0,5	44,8	0,3	1749,6	0,2
1	48,7	11,8	1856,5	142,4
NDC				
0	61,4	1,2	2199,5	20,2
0,5	62,5	3,8	2259,9	29,9
1	68,9	0,5	2288,0	16,5

4.2 Resultater prismer

I dette kapitlet presenteres testresultater fra trykkprøvingen av prismene, hovedresultatene er presentert i tabell 4.3. Tabell 4.3 viser maksimal last, spenning, langsgående- og tverrtøyning for hvert prisme. Tabellen viser også langsgående tøyning ved 90% og 60% av bruddtøyningene, med tilhørende standardavvik.

Årsaken til at standardavvik kun er regnet ut for de sentrisk belastede prøvestykkene er at det kun var to målere på trykksiden på de eksentriske prøvestykkene. Standardavviket vil på to målinger være i samme størrelsesorden som målingene i seg selv, tilsier dette at de eksentriske målingene sett hver for seg er veldig usikre. Grunnen til at det ikke er beregnet standardavvik for tverrtøyningen er at ofte bare en måler ble representativ.

Grafene presentert i dette kapitlet inneholder testresultatene fra alle prøvestykkene innenfor samme betongblanding med identisk fiberprosent. Grafer for hver enkelt giver på prøvestykkene er presentert i vedlegg F.

Tabell 4.2 viser ID-nummer til de ulike prøvestykkene. Disse vil være nødvendig for å lese av tabell 4.3 korrekt.

Tabell 4.2: Oversikt over navn på elementene

Betongtype	SerieID	Prismer	
		Sentrisk	eksentrisk
LWC 0 %	LA	LA1-LA2	LA3-LA4
LWC 0.5 %	LB	LB1-LB2	LB3-LB4
LWC 1.0 %	LC	LC1-LC2	LC3-LC4
NDC 0 %	NA	NA1-NA2	NA3-NA4
NDC 0.5 %	NB	NB1-NB2	NB3-NB4
NDC 1.0 %	NC	NC1-NC2	NC3-NC4

Tabell 4.3: Nøkkeltall resultater av prismetesting

Prøvestykke	F_{maks} [kN]	σ_{maks} [N/mm ²]	$\epsilon_{br, tverr}$ [%]	$\epsilon_{br, langs}$ [%]	S_X	$\epsilon_{br, 90}$ [%]	S_{X90}	$\epsilon_{br, 60}$ [%]	S_{X60}	$\epsilon_{br, 60f}$ [%]
LA1	718,6	31,9	0,4	1,8	0,19	1,6	0,21	1,1	0,15	0,21
LA2	715,7	31,8	1,0	2,1	0,35	1,8	0,23	1,1	0,13	0,32
LA3	416,1	37,0	1,0	2,1		2,1		1,3		0,31
LA4	410,2	36,5	0,6	2,5		2,0		1,3		0,03
LB1	773,2	34,4	1,1	2,3	0,54	1,9	0,31	1,2	0,18	0,24
LB2	793,2	35,3	0,9	2,1	0,29	1,7	0,26	1,1	0,17	0,18
LB3	411,8	36,6	0,7	2,5		2,0		0,6		0,19
LB4	437,8	38,9	N/A	2,7		2,2		0,6		0,01
LC1	753,4	33,5	0,5	2,0	0,41	1,7	0,37	1,0	0,34	0,23
LC2	724,3	32,2	0,5	2,0	0,12	1,7	0,11	1,0	0,06	0,21
LC3	424,0	37,7	0,8	3,0		2,2		0,7		0,28
LC4	429,4	38,2	1,0	3,0		2,3		0,7		0,20
NA4	717,0	63,7	0,7	3,1		2,5		0,7		0,19
NB1 *	1164,6	51,8	1,6	2,6	0,36	1,9	0,27	1,1	0,18	0,18
NB3 **	699,9	62,2	0,8	3,1		2,5		0,7		0,29
NB4	764,1	67,9	1,5	3,2		2,4		0,7		0,30
NC3	777,3	69,1	1,9	3,9		2,8		0,7		0,28
NC4	805,8	71,6	1,8	3,7		2,7		0,8		0,03

Se symboloversikt for tegnforklaring. *Def.hastighet ikke opprettholdt ved brudd,

**Gikk ikke til brudd.

4.2.1 Bruddform

Generelt da prøvestykkene nådde sin trykkapasitet fikk de eksplosive brudd, noe som førte til at målerne falt av prøvestykket og videre logging av informasjon ble umulig. Lasten økte lineært, helt til prøvestykket ble knust. Derfor blir ofte maksimal trykktøyning lik bruddtøyning for prismene, ε_{c2} ble lik ε_{cu2} . Samtlige prizmer fikk brudd som vist på bilde 4.1 og 4.2. I vedlegg F er det lagt ved ett bilde av hvert prøvestykke etter brudd.

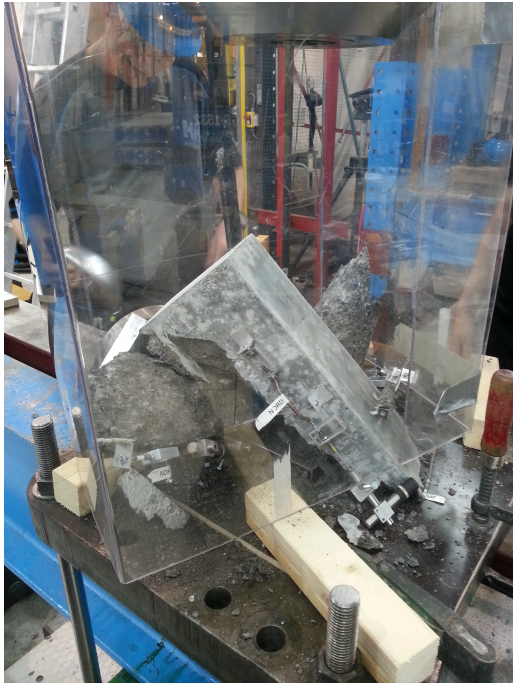


LB1



LB2

Figur 4.1: Eksempel på bruddform



LA2



LA4



LB4



LC1

Figur 4.2: Eksempel på bruddform

Bruddlinje

Figur 4.3 viser tydelig at bruddlinjen går gjennom tilslaget for LWC og rundt tilslaget for NDC. I bruddflaten til LWC ser en at de største Lecakulene har absorbert sement som gjorde dem solide, mens de små lecakulene ikke hadde absorbert sement og fremdeles var porøse.



Figur 4.3: Bruddflate for prøvestykker NDC t.v. og LWC t.h.

4.2.2 Diverse kommentarer

Som beskrevet i laboratoriekapittelet hadde ikke testmaskinen (Howden 1000kN) kapasitet til å teste NDC sentrisk. Med et økt oljetrykk kunne testapparatet oppnå trykkraft på ca 10-20 prosent over 1000kN. Derfor ville laboratorieteknikker Steinar Seehus prøve en NDC sentrisk for å undersøke om maskinen faktisk hadde kapasitet nok. Trykklasten økte lineært til 1164,6 kN, som viste seg å være maksimal lastkapasitet for riggen. Prismet fikk fortsatt deformasjoner, men lastpåføringshastigheten ble ikke opprettholdt.

NDC 0%(NA4) eksentrisk fikk den et voldsomt eksplosivt brudd, og av sikkerhetsmessige hensyn ble ikke NA3 testet.

Resultatene fra NB3 er ikke representative for testseriene våre da den ikke ble kjørt til brudd grunnet at den spratt ut av maskinen og bøyde støttebjelkene til stemplet. Årsaken til dette kan være en ujevn sentrering av prismet. Derfor viser grafene til NB3 en unormal oppførsel i forhold til de andre prøvestykkene.

Generelt har målingene av tverrtøyningene en del støy og feil. Måler på tverr sør hadde ofte problemer og det ble byttet kabel uten hell.

Generelt har alle prøvestykkene tilnærmet lineær oppførsel fram til bruddlast.

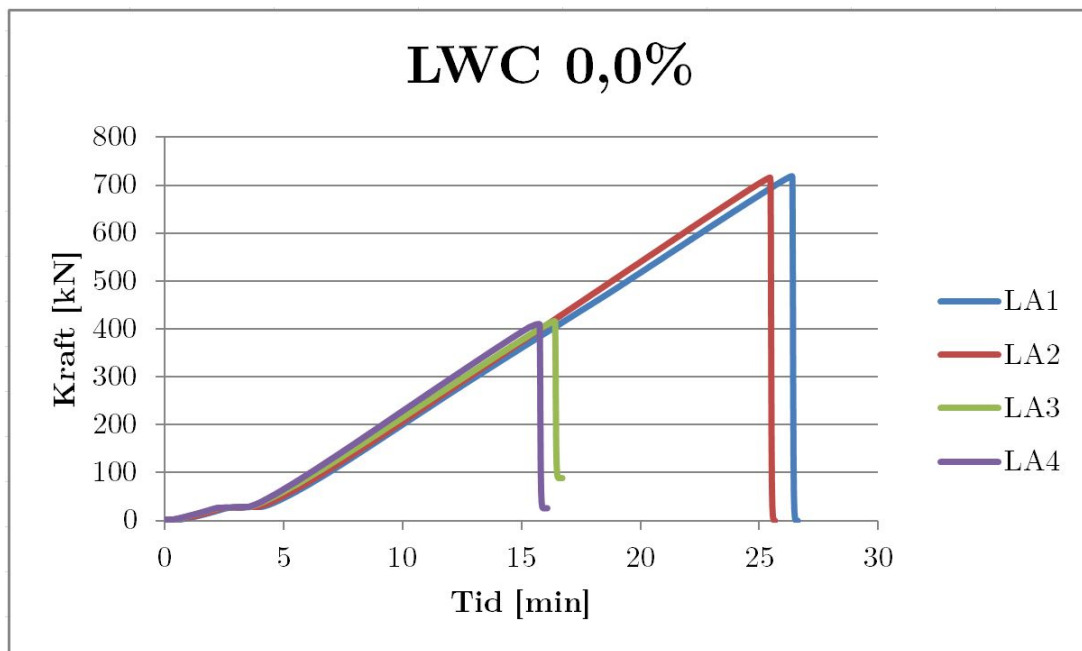
Første prøvestykke som ble kjørt var LB1, grunnet et eksplosivt brudd ble deformasjonshastigheten halvert ved påfølgende tester. Altså fra $0,6\text{mm}/\text{min}$ til $0,3\text{mm}/\text{min}$. Dette førte ikke til noen betydelige endringer i prøvestykkenes oppførsel under testing.

4.2.3 Kraft-Tid

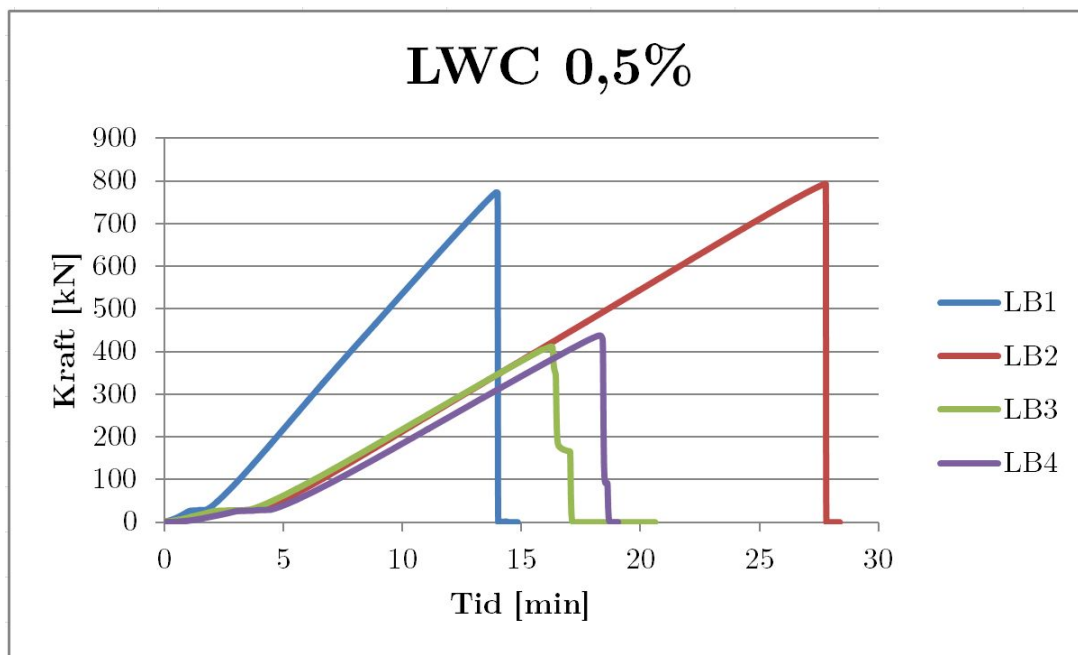
Her presenteres påført kraft på prismene mot tid. I grafene er resultatene for betong med samme densitet og prosentandel fiber er presentert sammen. Grafene viser at ved eksentrisk belastning tålte prøvestykkene mindre kraft enn ved sentrisk belastning. Grunnen til dette er at eksentrisiteten skaper ekstra trykkspenning i prismene. Tabell 4.4 viser makslast for hvert prøvestykke.

Tabell 4.4: Bruddlast

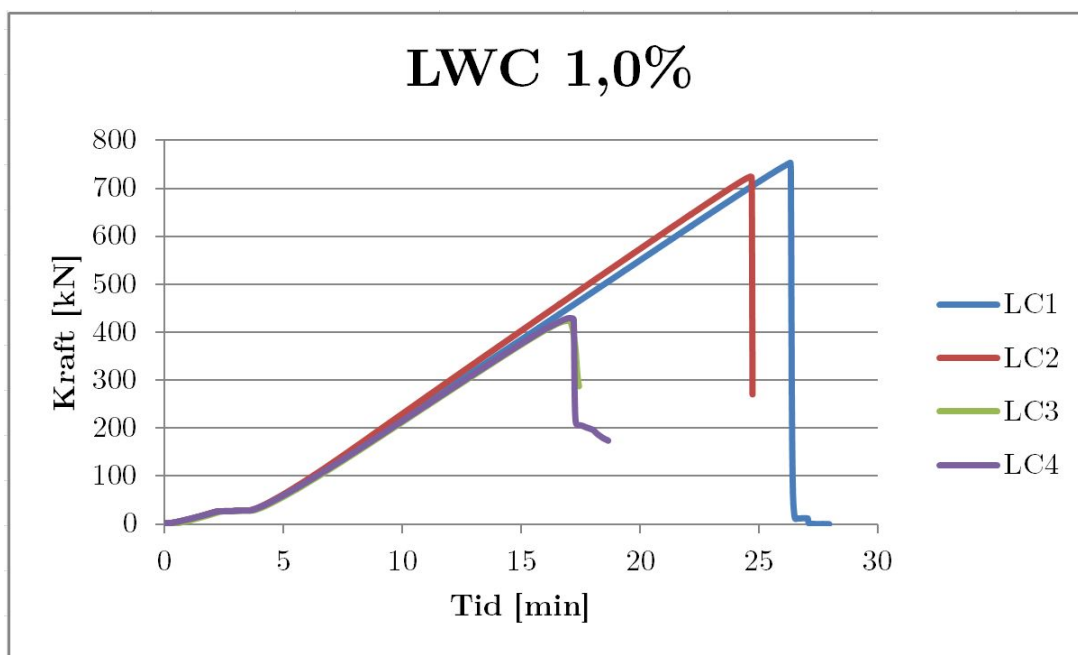
ID	LA1	LA2	LA3	LA4	LB1	LB2	LB3	LB4	LC1
Bruddlast [kN]	718,6	715,7	416,1	410,2	773,2	793,2	411,8	437,8	753,4
ID	LC2	LC3	LC4	NA4	NB1	NB3	NB4	NC3	NC4
Bruddlast [kN]	724,3	424	429,4	717	1164,6	699,9	764,1	777,3	805,8



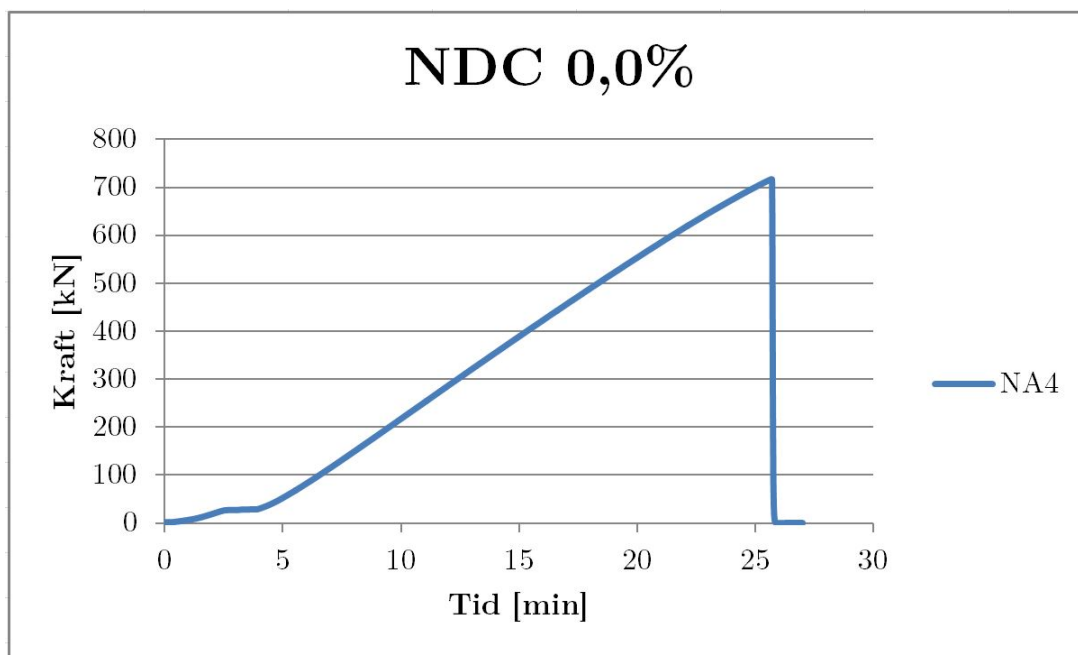
Figur 4.4: Kraft tid for prizmer med 0.0% fiberinnhold



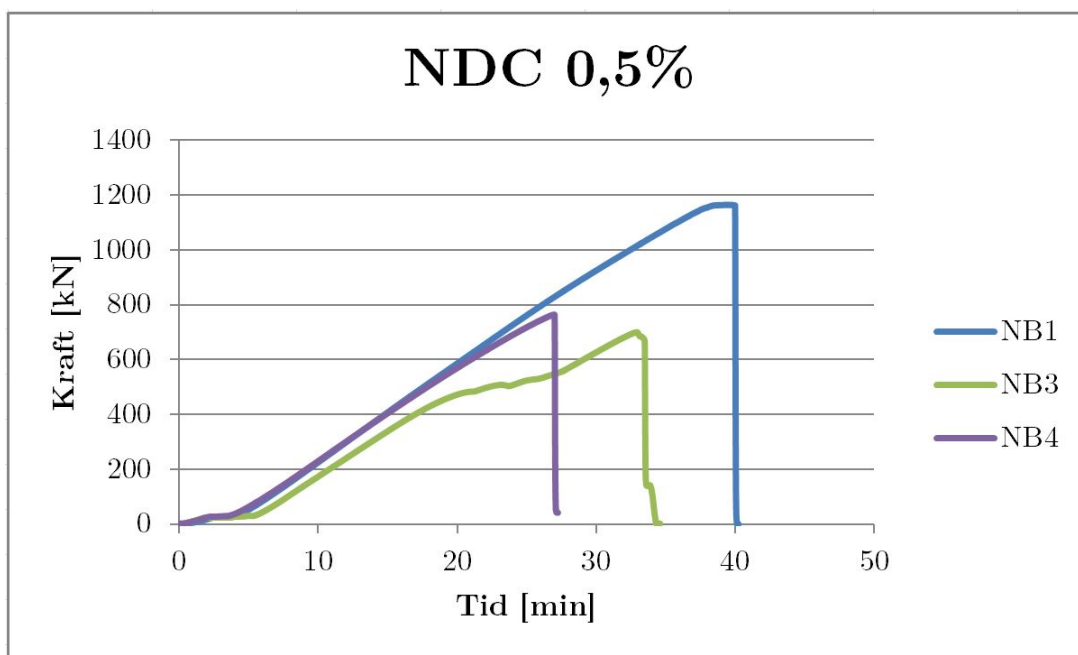
Figur 4.5: Kraft tid for prismer med 0.5% fiberinnhold



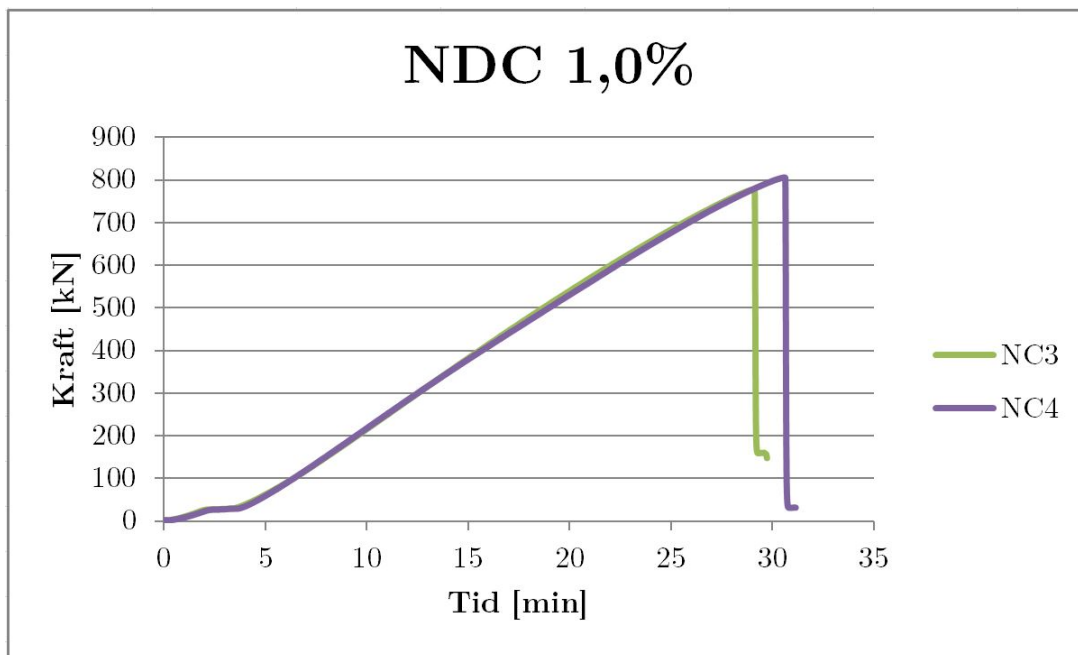
Figur 4.6: Kraft tid dfor prismer med 1.0% fiberinnhold



Figur 4.7: Kraft tid for prismer med 0.0% fiberinnhold



Figur 4.8: Kraft tid for prismer med 0.5% fiberinnhold



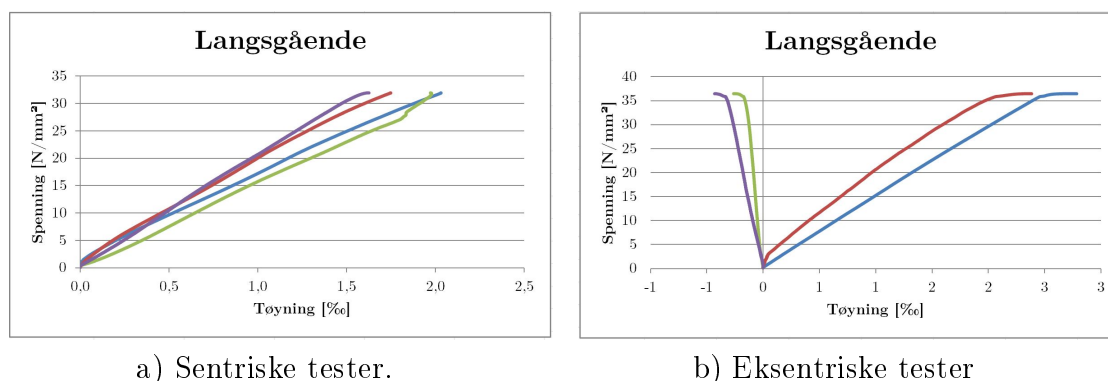
Figur 4.9: Kraft tid for prismer med 1.0% fiberinnhold

4.2.4 Spenning-Tøyning

Her presenteres arbeidsdiagrammene for hver betongblanding med lik fiberprosent, basert på de testede prismene innenfor gitt blanding.

For de eksentriske testene fikk prismene strekk-tøyninger på sørsiden. Da formålet med rapporten er å se på effekten av tilsetning av fiber på lettbetongs duktilitet i trykk, blir kun resultater som angår trykk presentert i dette kapitlet. Strekk-tøyningene er av liten størrelsesorden i forhold til trykktøyningene, se figur 4.10b). Eventuelle strekk-tøyninger er presentert i vedlegg F.

Spenningene er beregnet og beskrevet i vedlegg G. For de sentriske testene er tøyningene gjennomsnittet av de fire langsgående LVDT-ene (20,30 Nord og 20,30 Sør), ettersom alle er i trykk. For eksentriske derimot er det snitt av de to givene på trykksiden(20 nord og 30 nord).



a) Sentriske tester.

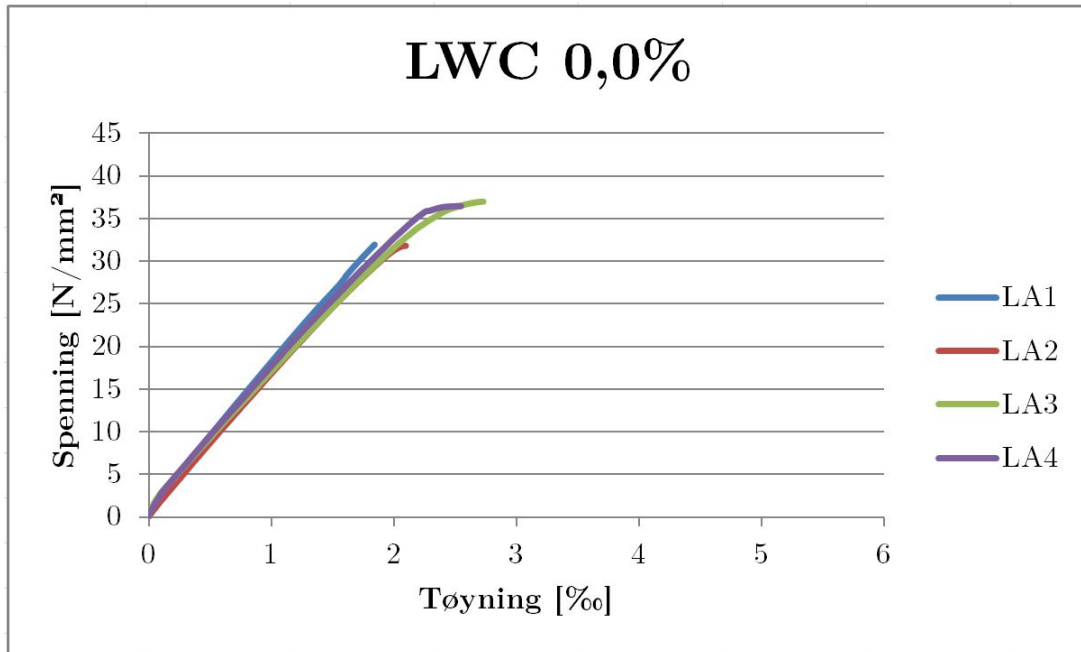
b) Eksentriske tester

Figur 4.10: Trend tøyninger for sentriske og eksentriske tester

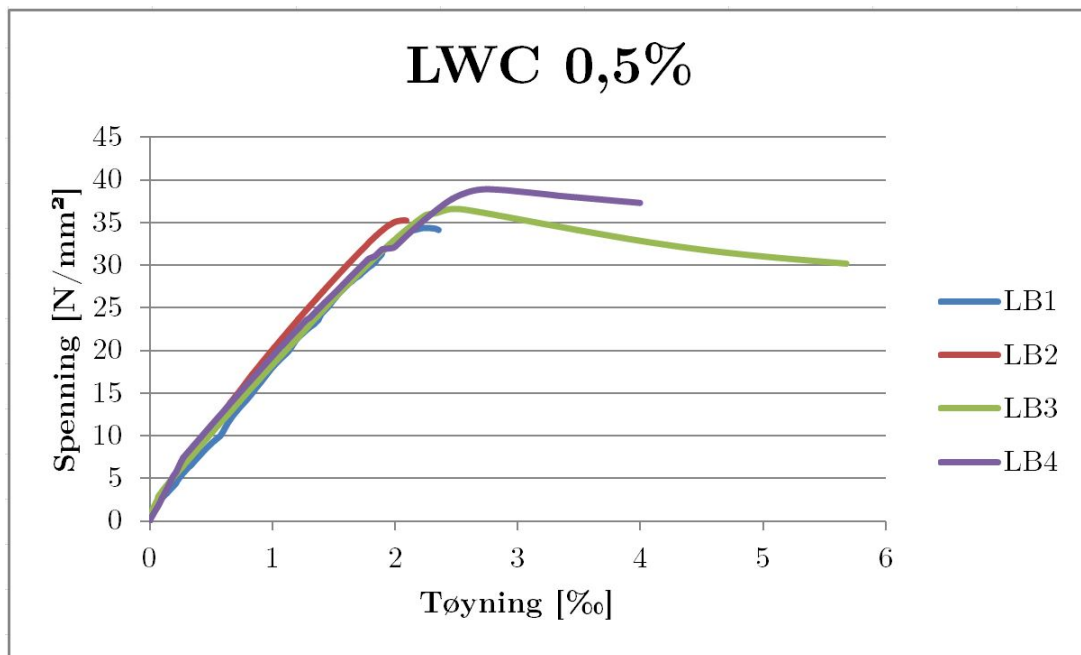
Tabell 4.5 viser maksimal spenning og langsgående tøyning for hvert enkelt prøvestykke. For grafisk illustrasjon av tøyningsforløpet til hvert prøvestykke se vedlegg F.

Tabell 4.5: Maksimal spenning og maksimal langsgående tøyning

	LA1	LA2	LA3	LA4	LB1	LB2	LB3	LB4	LC1
Spenning [N/mm^2]	31,9	31,8	37,0	36,5	34,4	35,3	36,6	38,9	33,5
Tøyning [%]	1,8	2,1	2,1	2,5	2,3	2,1	2,5	2,7	2,0
	LC2	LC3	LC4	NA4	NB1	NB3	NB4	NC3	NC4
Spenning [N/mm^2]	32,2	37,7	38,2	63,7	51,8	62,2	67,9	69,1	71,6
Tøyning [%]	2,0	3,0	3,0	3,1	2,6	3,1	3,2	3,9	3,7

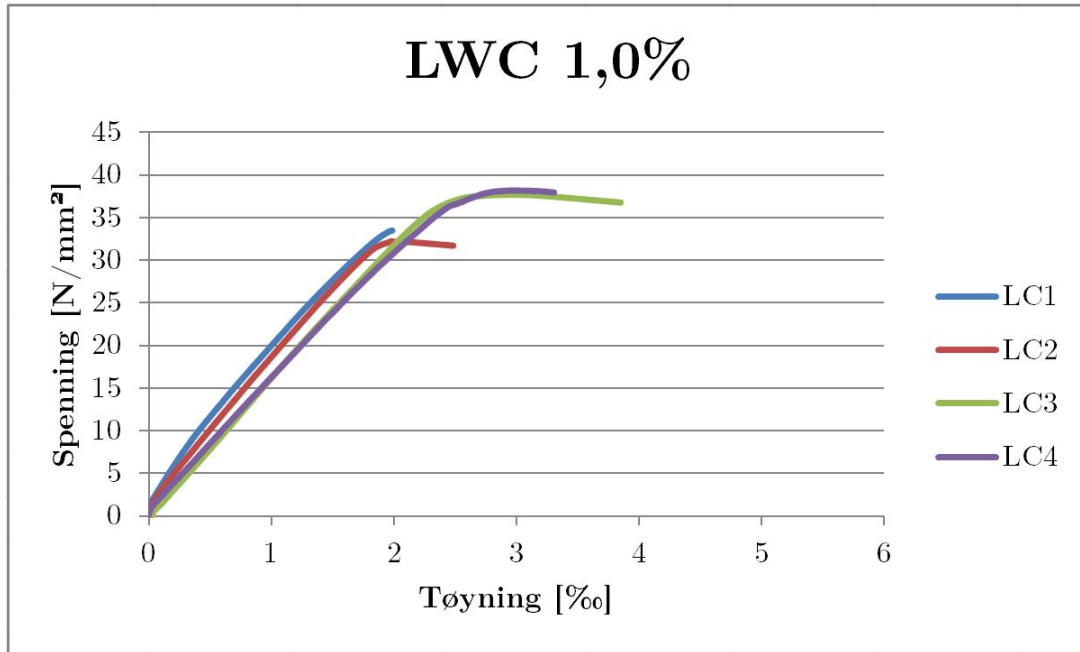


Figur 4.11: Spenning - tøyning for prismer med 0.0% fiberinnhold

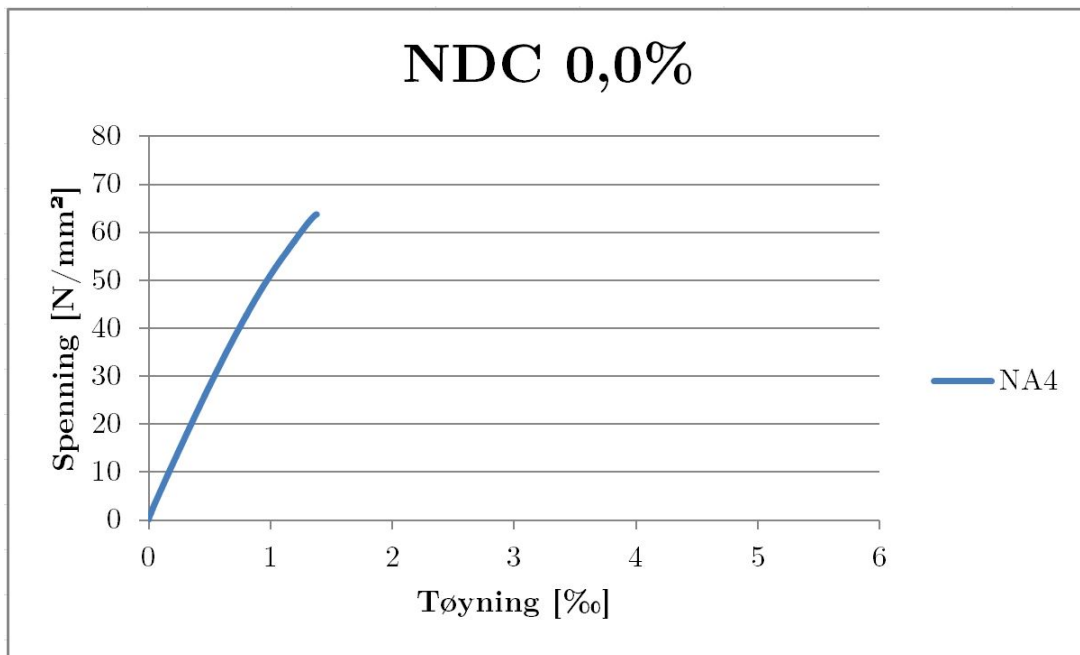


Figur 4.12: Spenning - tøyning for prismer med 0.5% fiberinnhold

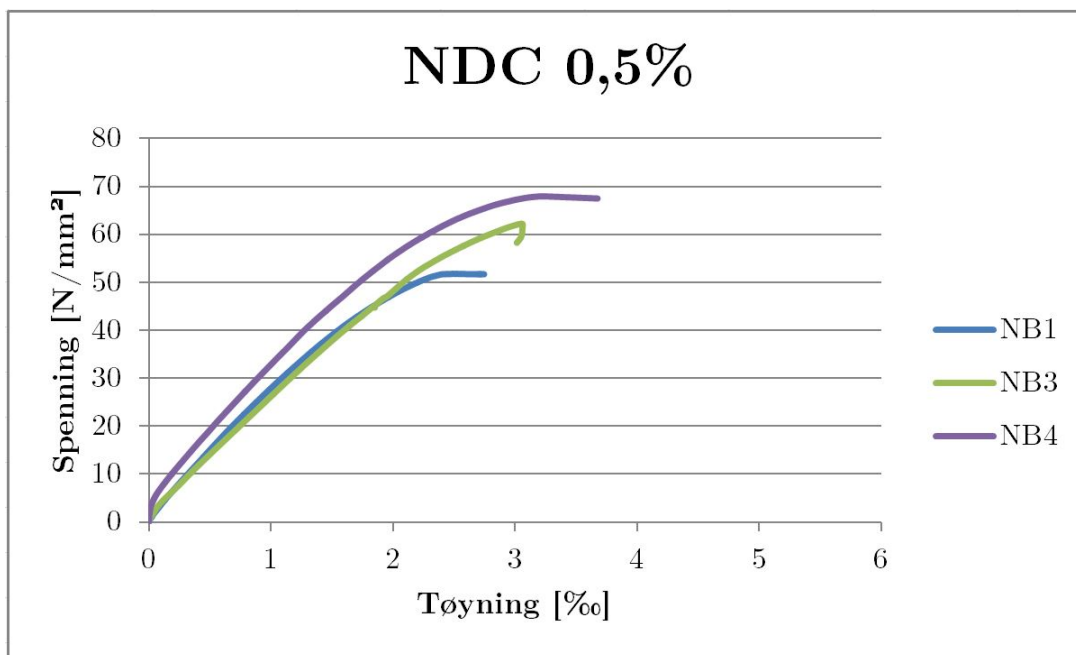
Figur 4.12 viser duktil oppførsel, figur 4.18 viser klart at den store tøyningen oppstår etter brudd og over ett kort tidsrom.



Figur 4.13: Spenning - tøyning for prismer med 1.0% fiberinnhold

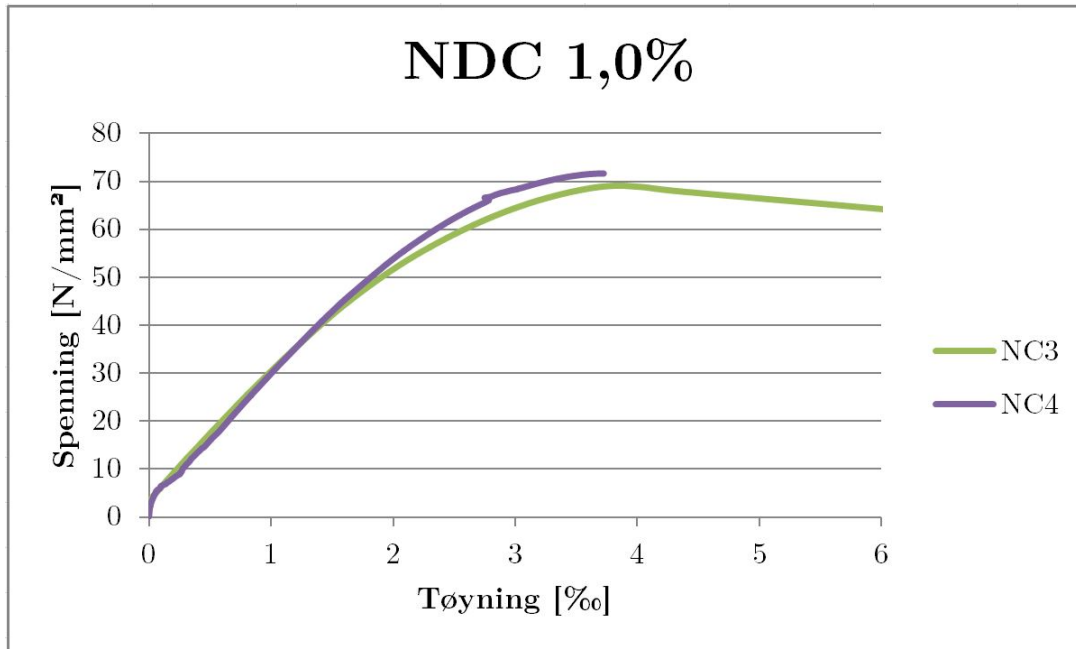


Figur 4.14: Spenning - tøyning for prismer med 0.0% fiberinnhold



Figur 4.15: Spenning - tøyning for prismer med 0.5% fiberinnhold

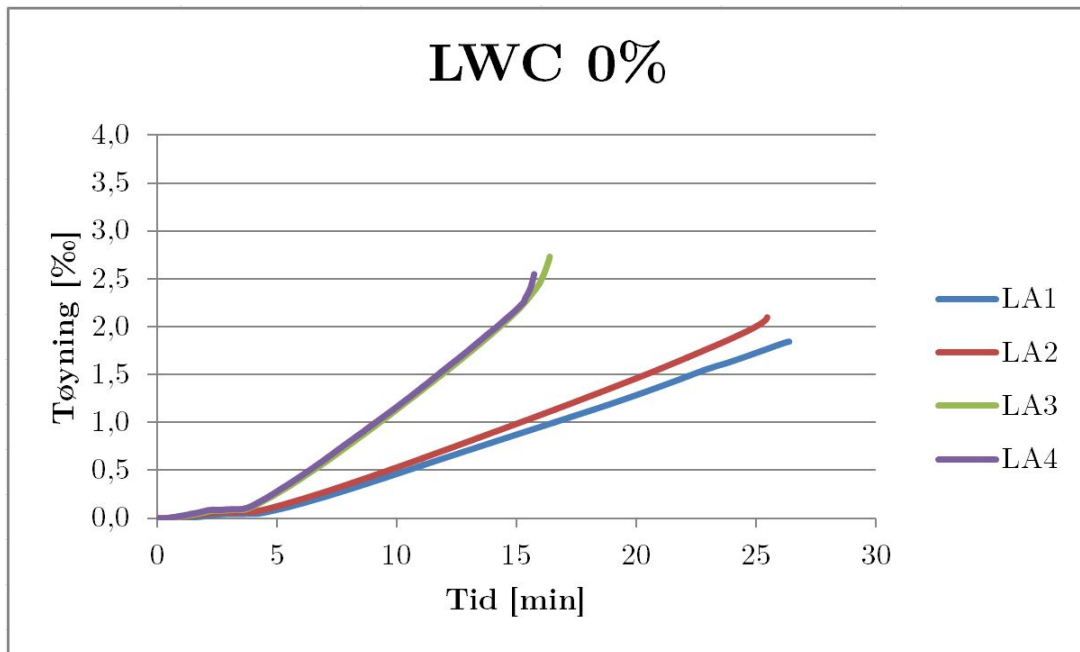
NB1 i figur 4.15 er ikke representativ hvor grafen flater ut da lastpåføringshastighe-
ten her ikke ble opprettholdt. NB3 er heller ikke representativ da den vippet ut av
testapparatet.



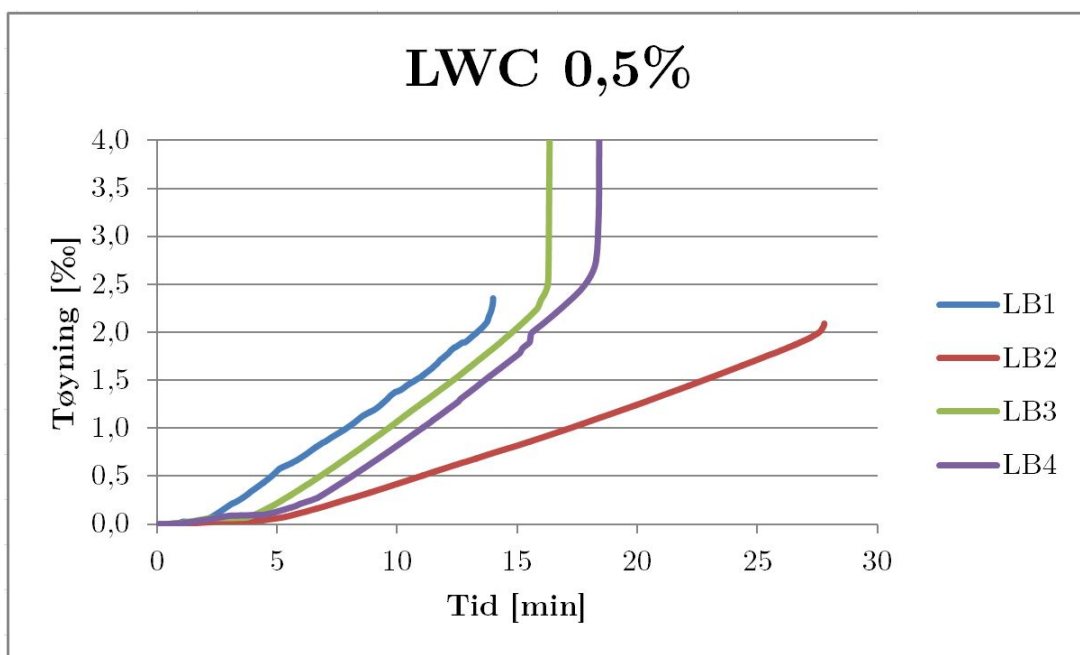
Figur 4.16: Spenning - tøyning for prismer med 1.0% fiberinnhold

4.2.5 Tøyning-Tid

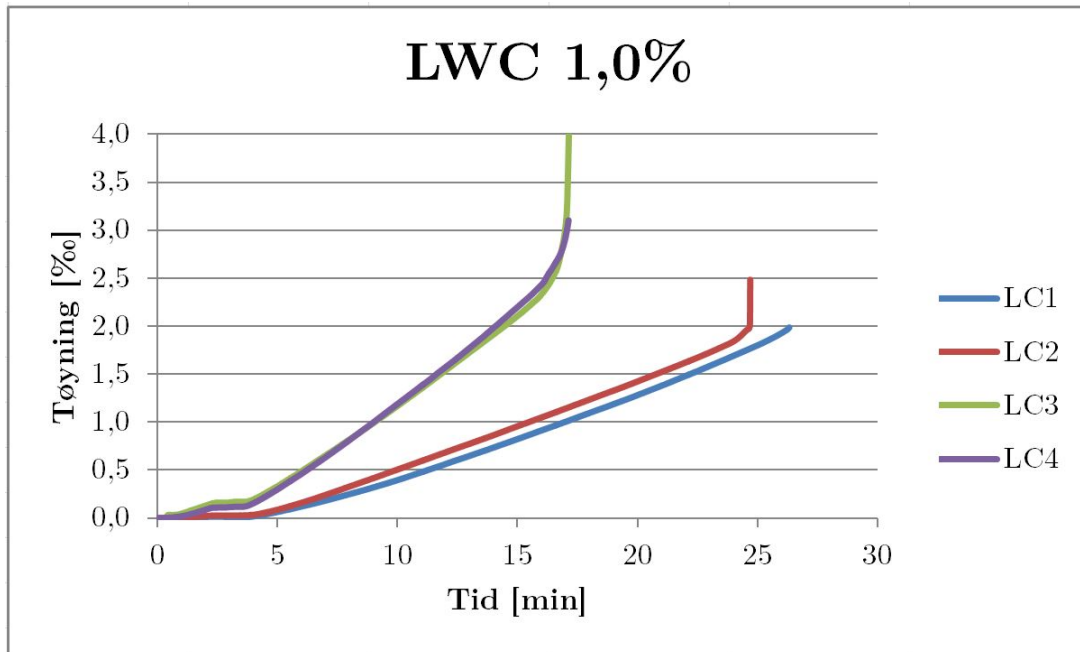
Her presenteres tøyning tid diagrammene for alle prøvestykkene, den generelle trenden for alle testene var at når prøven oppnådde bruddlast fikk man store tøyninger over ett kort tidsintervall. Dvs maksimal trykktøyning ble lik bruddtøyning $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu2}$. Grafene er basert på trykktøyningene fra testene, dvs snitt av 20 Nord og 30 Nord på de eksentriske testene og 20,30 Sør og 20,30 Nord på de sentriske testene som vist i fig 4.10.



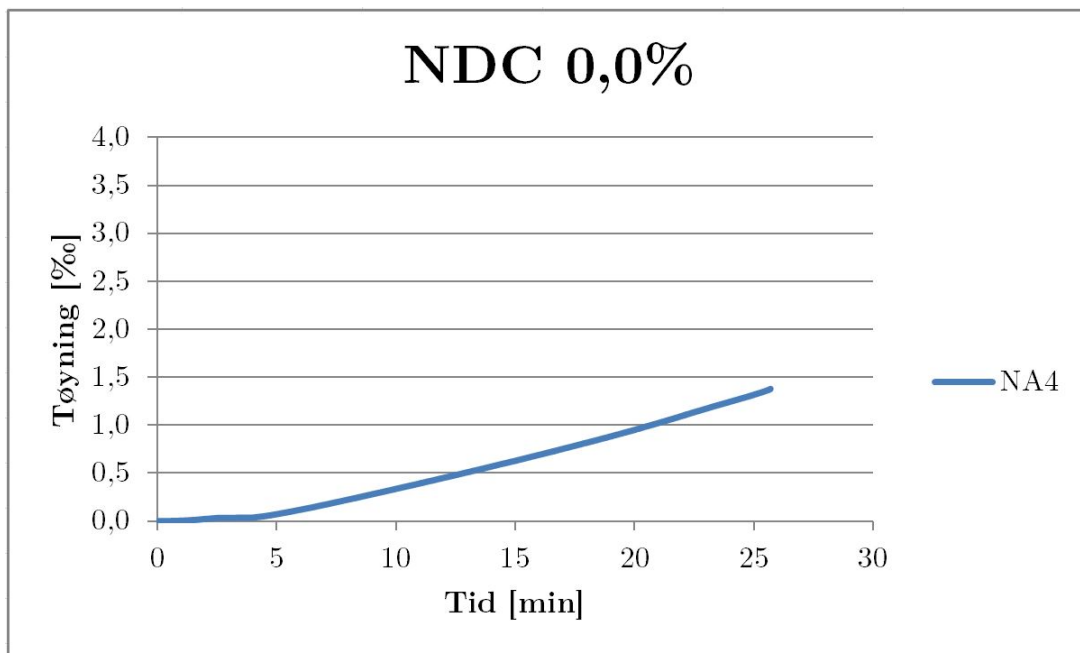
Figur 4.17: Tøyning - tid for prismer med 0.0% fiberinnhold



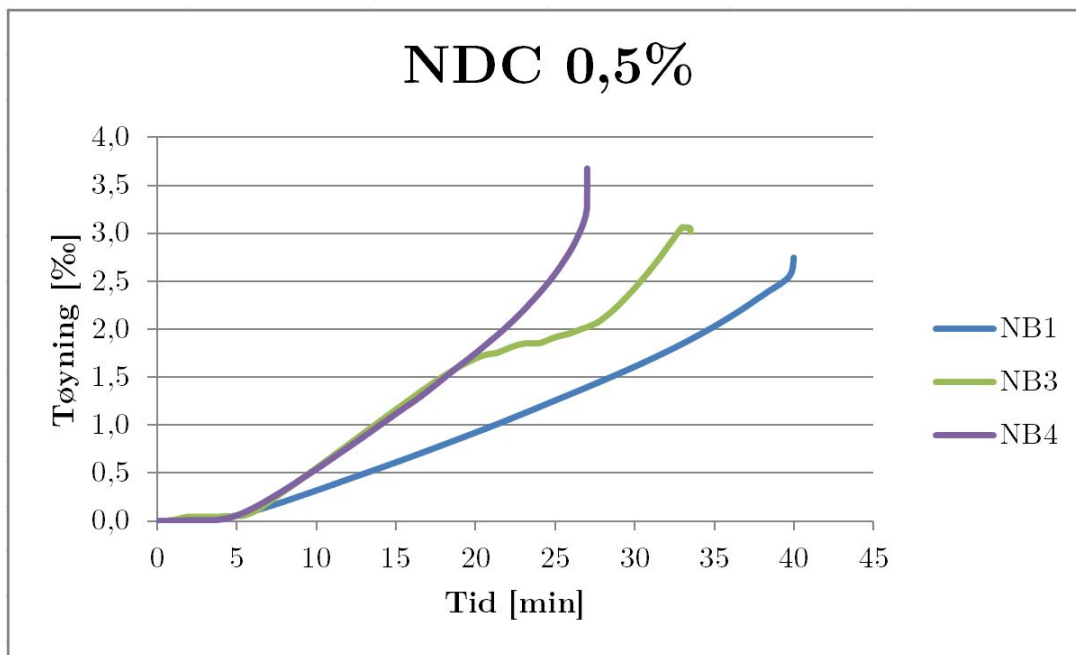
Figur 4.18: Tøyning - tid for prismer med 0.5% fiberinnhold



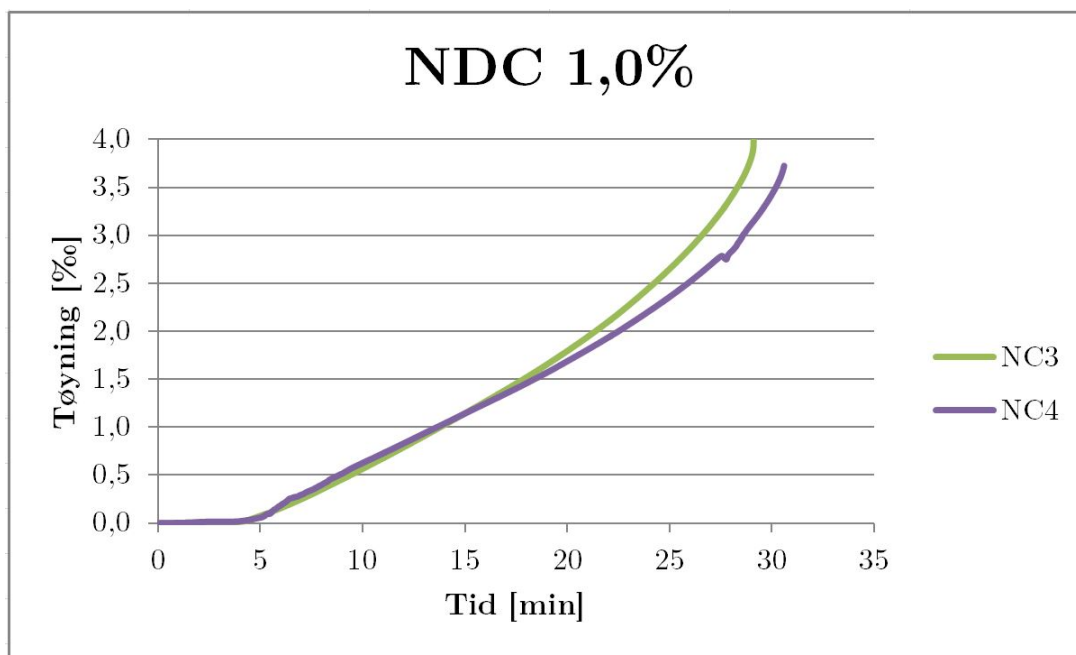
Figur 4.19: Tøyning - tid for prismer med 1.0% fiberinnhold



Figur 4.20: Tøyning - tid for prismer med 0.0% fiberinnhold



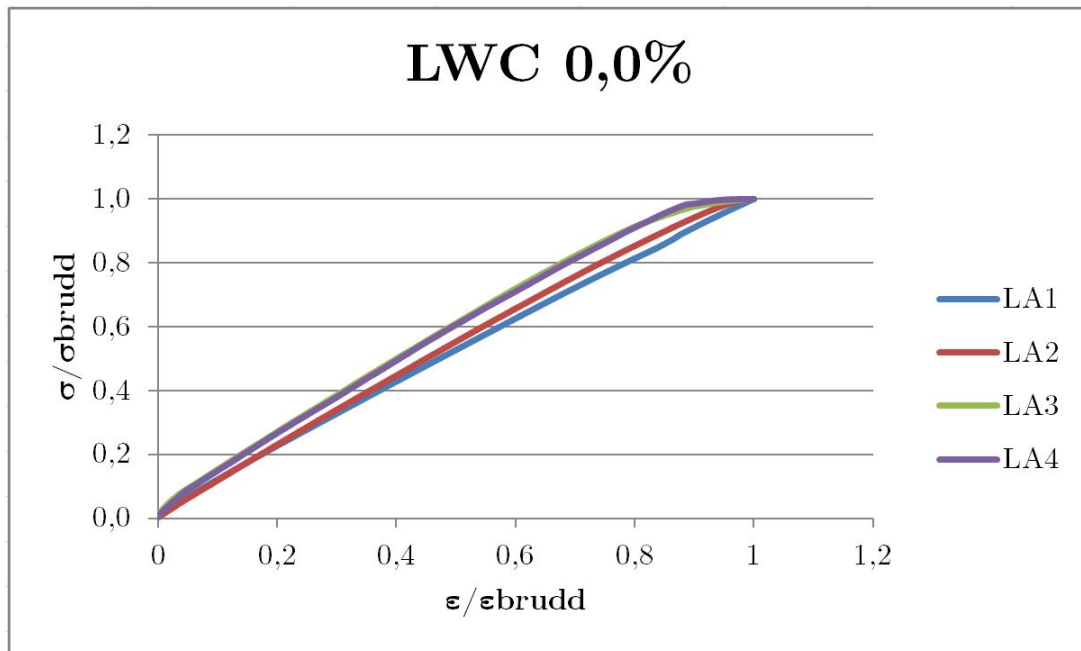
Figur 4.21: Tøyning - tid for prismer med 0.5% fiberinnhold



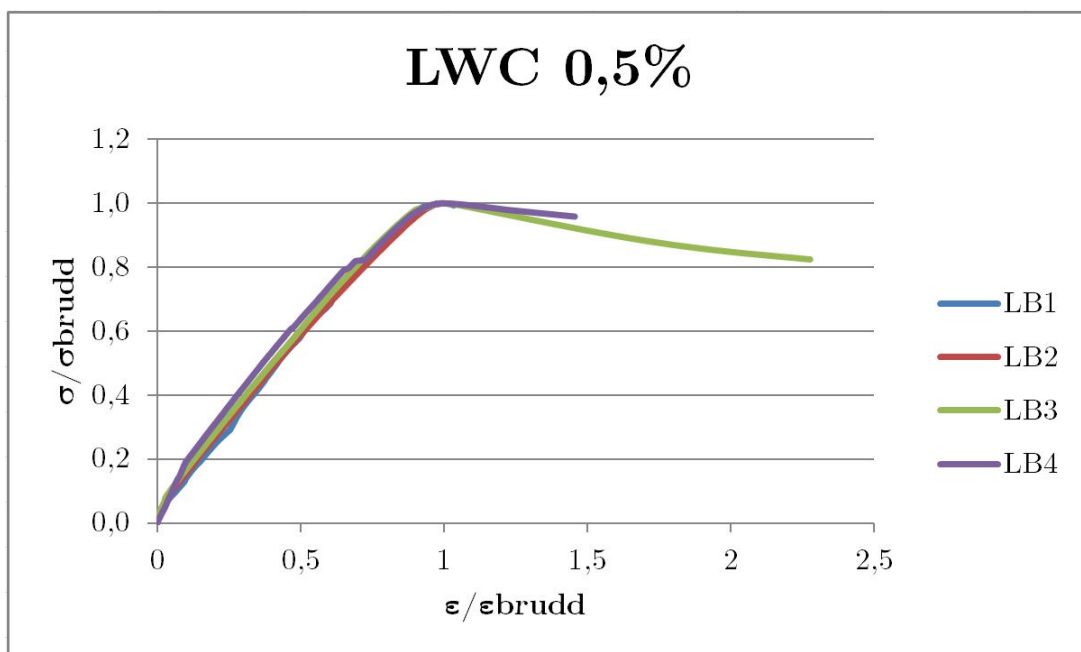
Figur 4.22: Tøyning - tid for prismer med 1.0% fiberinnhold

4.2.6 Normalisert spenning-tøyning

Her presenteres den normaliserte spenningen opp mot den normaliserte tøyningen. Den generelle trenden til alle testene var at etter bruddspenning ble oppnådd gikk prøven til ett eksplosivt brudd som gjorde videre målinger umulige.

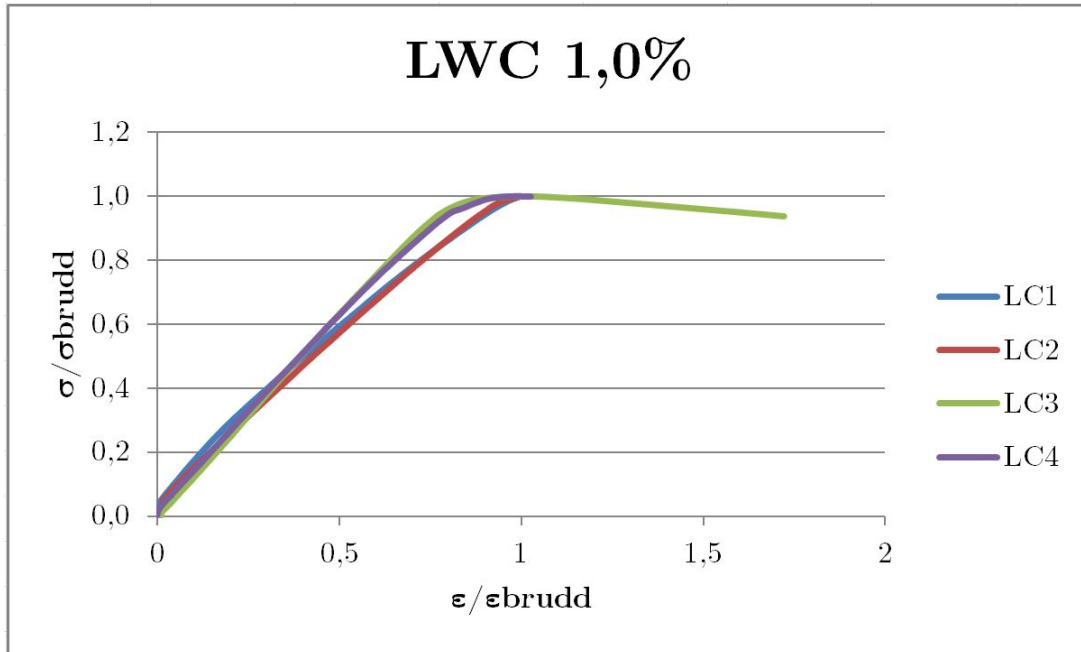


Figur 4.23: Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.0% fiberinnhold



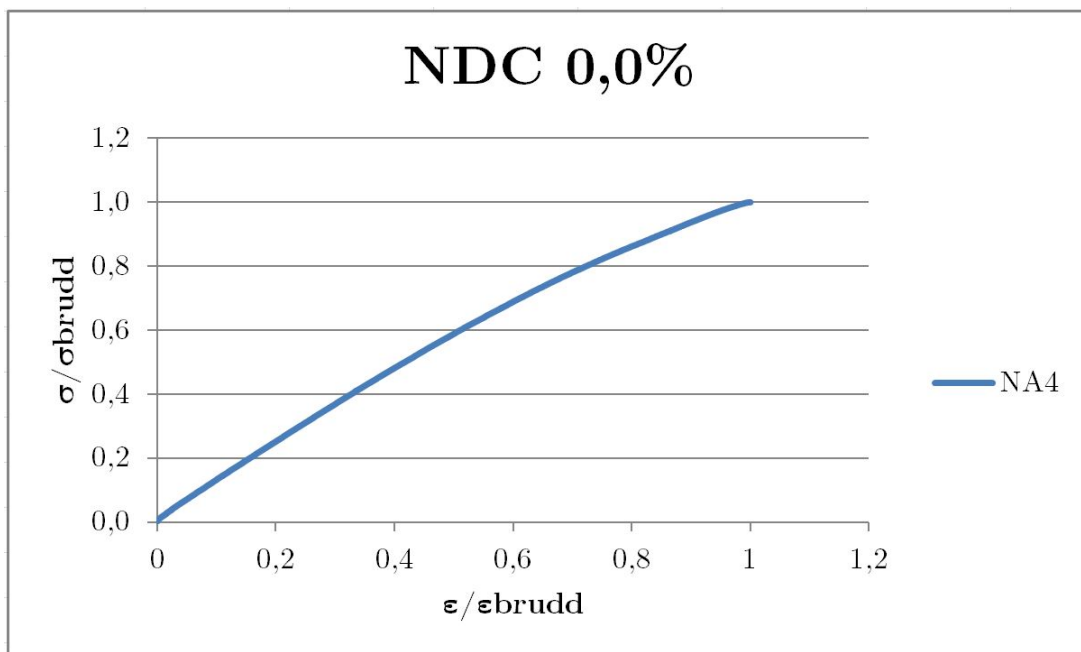
Figur 4.24: Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.5% fiberinnhold

LB3 har her oppnådd en tøyning som er ca.2 ganger større enn maks bruddtøyning, figur 4.18 viser at dette sker over ett kort tidsintervall (11 sekunder).

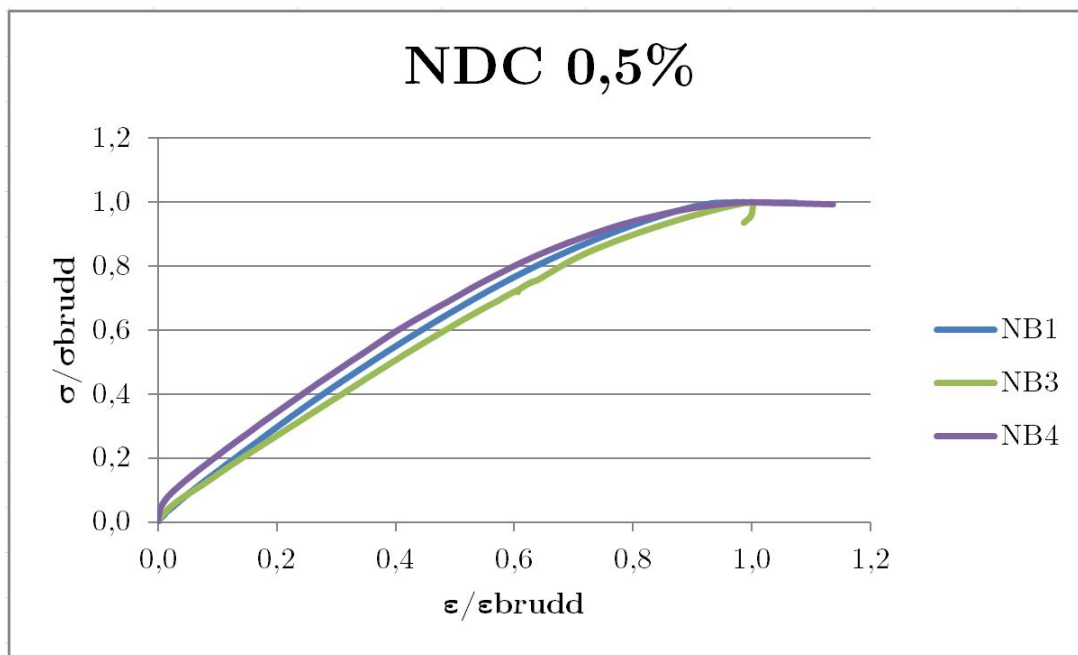


Figur 4.25: Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 1.0% fiberinnhold

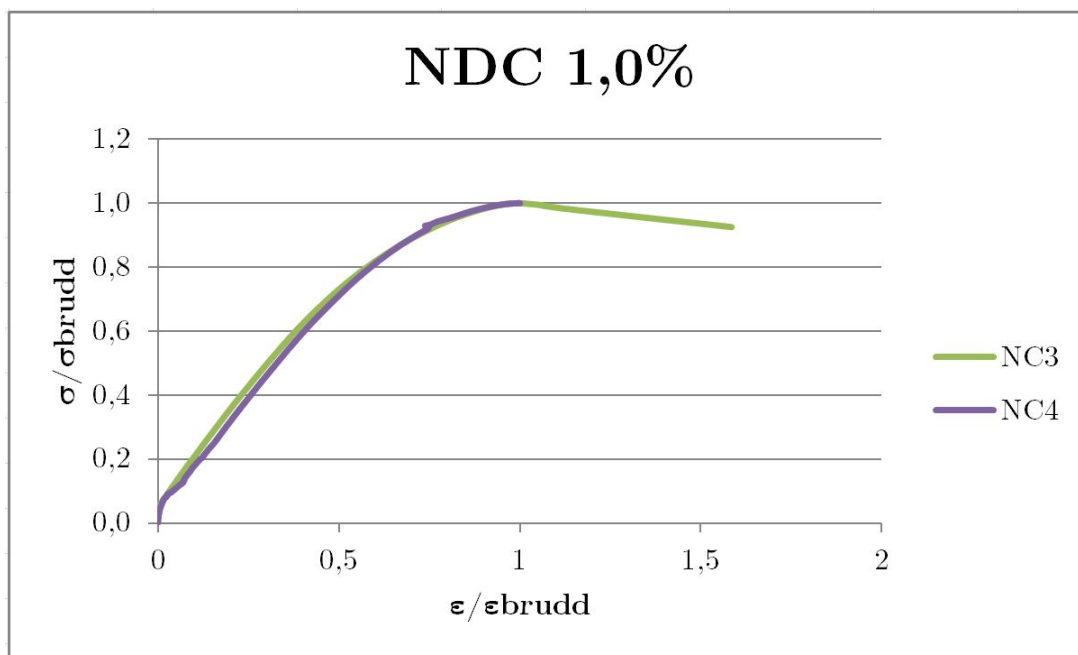
LC3 har her oppnådd en tøyning som er ca.1.7 ganger større enn maks bruddtøyning, 4.19 viser at dette skjer over ett kort tidsintervall (8 sekunder).



Figur 4.26: Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.0% fiberinnhold



Figur 4.27: Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.5% fiberinnhold



Figur 4.28: Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 1.0% fiberinnhold

NC3 har her oppnådd en tøyning som er ca.1.5 ganger større enn maks bruddtøyning, 4.22 viser at dette sker over ett kort tidsintervall (4 sekunder).

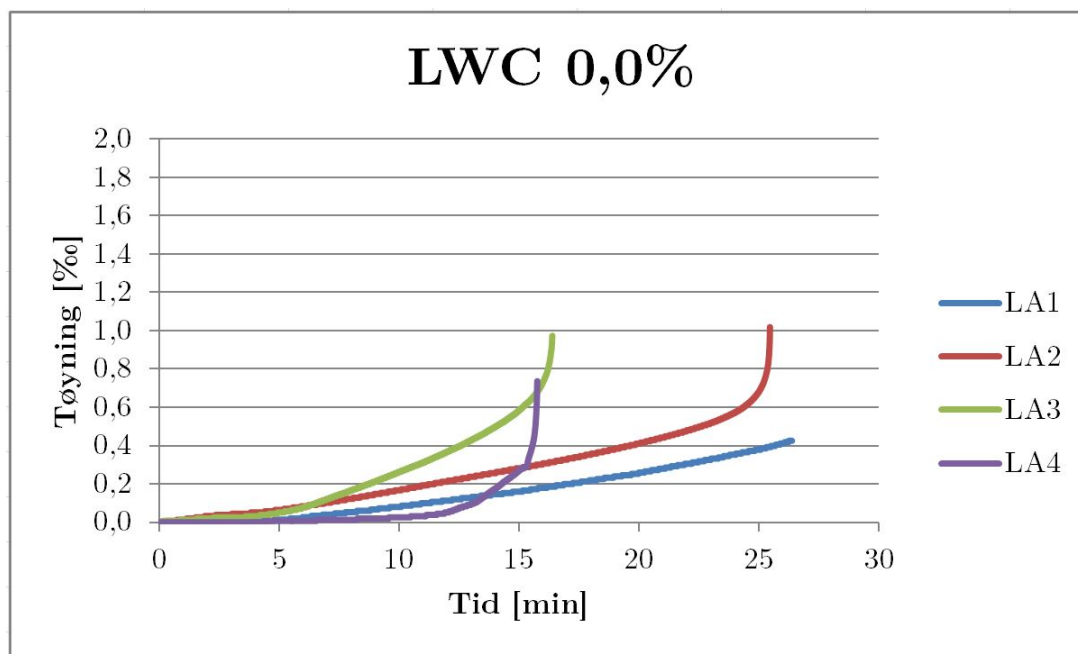
4.2.7 Tverrtøyning - Tid

Her presenteres den horisontale tøyningen av prismene. Under testing ble det klart at når tverrtøyningen startet å utvide seg eksponensielt var det ikke lenge før prøven gikk til brudd. Det er kun tverrkontraksjonen på trykksiden som er vist på grafene. Grunnet problemer med forstyrrelser på tverrmålere under testing er det blitt valgt ut de målingene med minst forstyrrelser på de sentriske prøvene. På de eksentriske prøvene var det bare en måler på trykksiden(nord) så her er denne blitt benyttet.

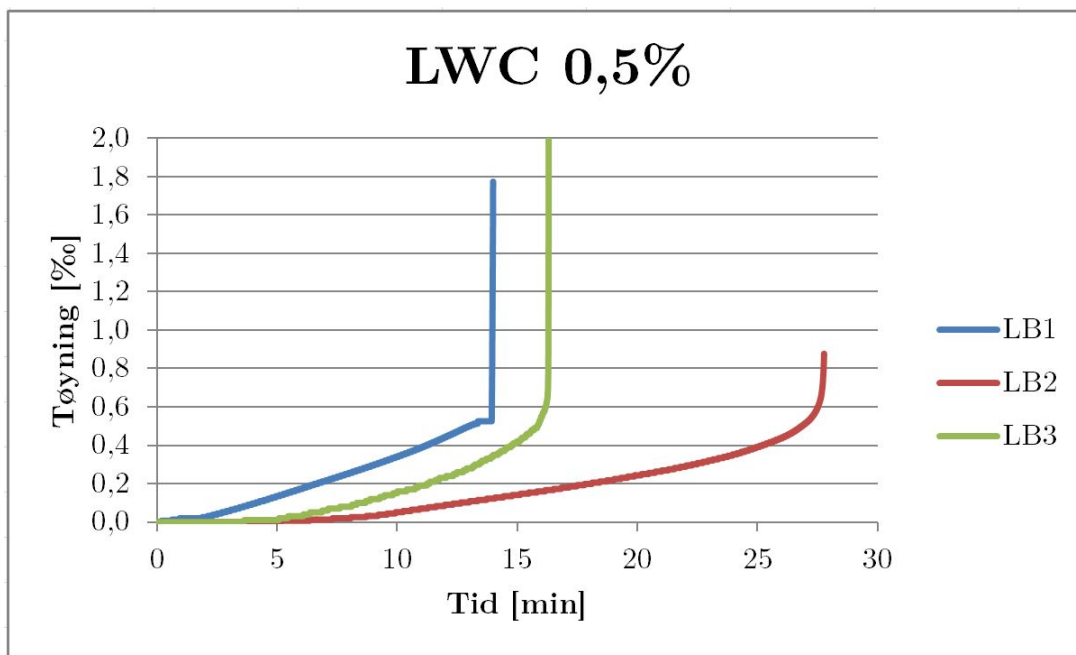
Tabell 4.6 viser maksimal tøyning på tverretningen av prismene. Prisme LB4 er ikke med grunnet store forstyrrelser på målingene.

Tabell 4.6: Maksimal tverr bruddtøyning

Tøyning [%]	LA1	LA2	LA3	LA4	LB1	LB2	LB3	LB4	LC1
	0,4	1,0	1,0	0,6	1,1	0,9	0,7	N/A	0,5
Tøyning [%]	LC2	LC3	LC4	NA4	NB1	NB3	NB4	NC3	NC4
	0,5	0,8	1,0	0,7	1,6	0,8	1,5	1,9	1,8

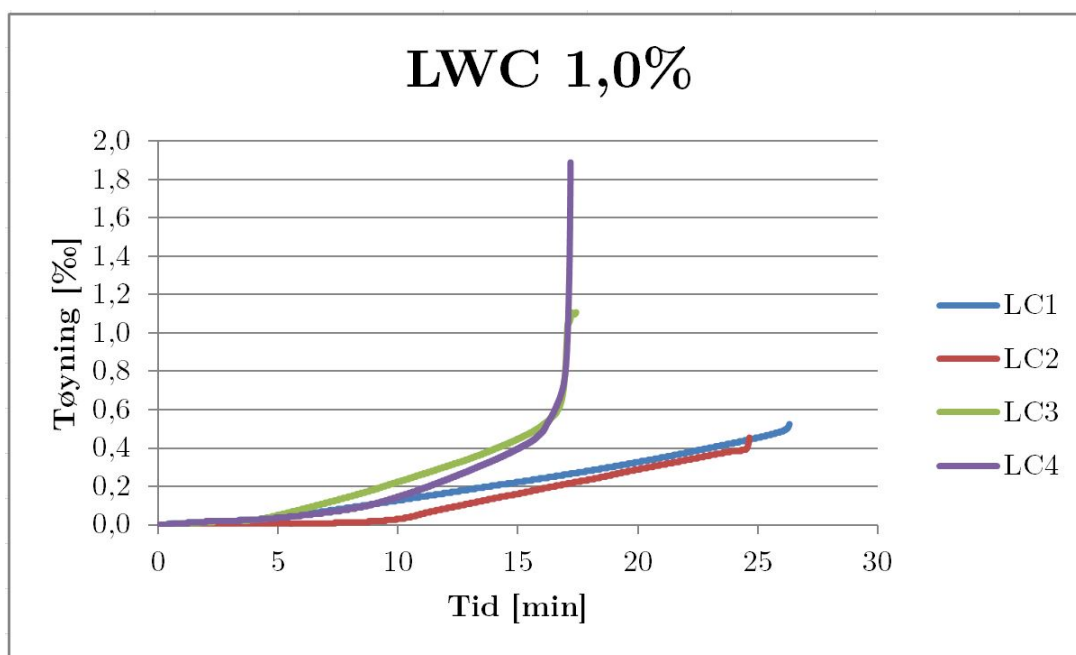


Figur 4.29: Tverrtøyning - tid 0.0% fiberinnhold

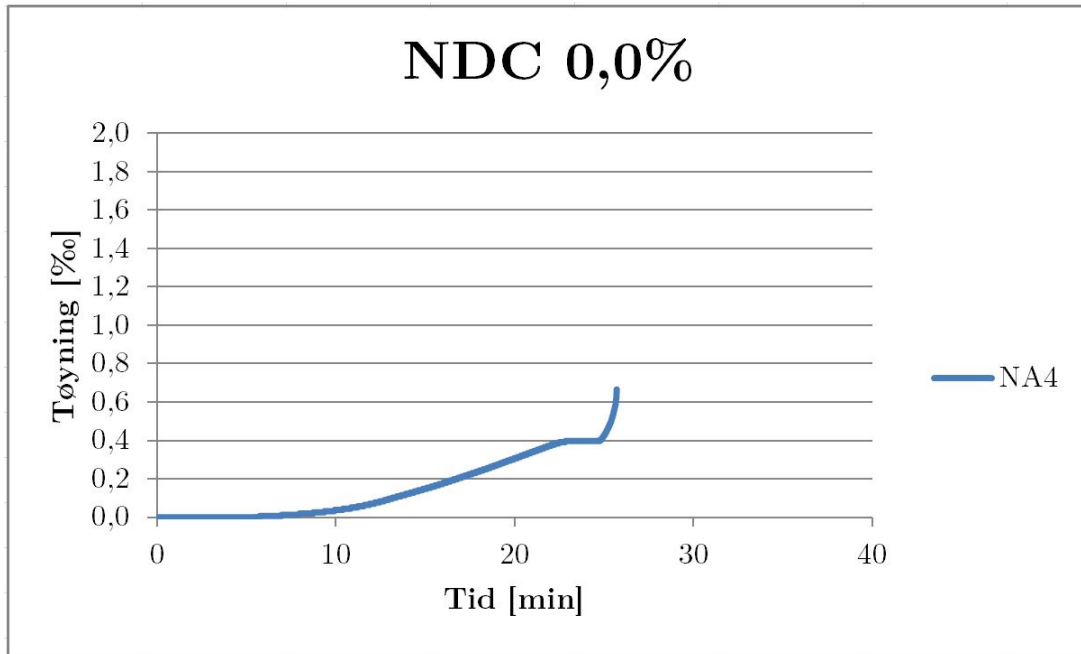


Figur 4.30: Tverrtøyning - tid 0.5% fiberinnhold

LB4 er ikke med grunnet store forstyrrelser på målingene.

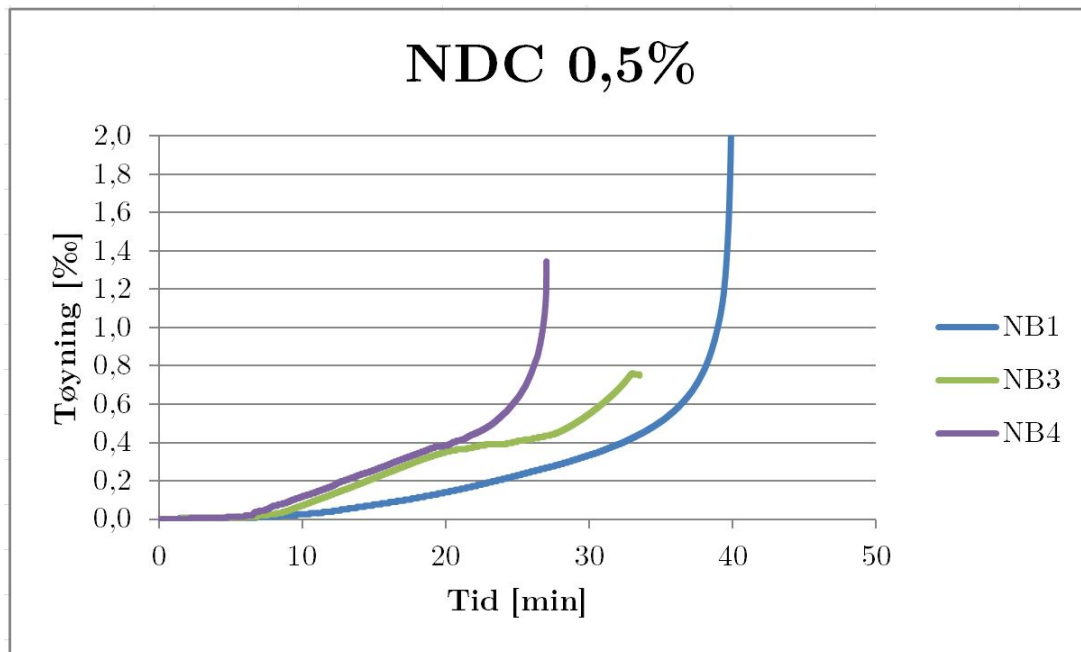


Figur 4.31: Tverrtøyning - tid 1.0% fiberinnhold

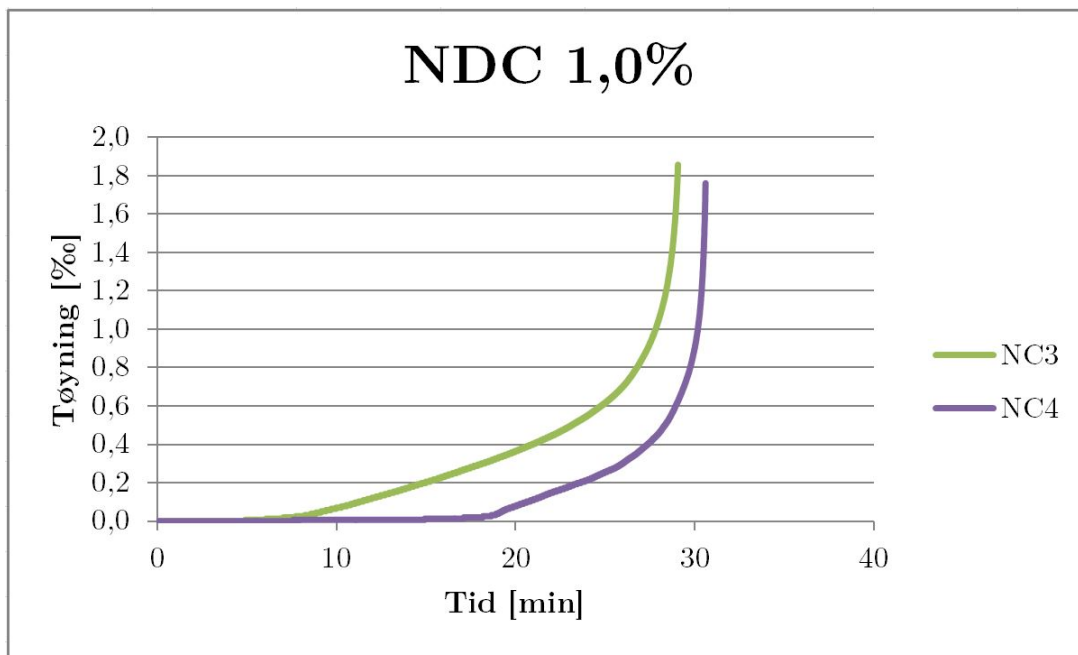


Figur 4.32: Tverrtøyning - tid 0.0% fiberinnhold

Friksjon i måler for NA4 er en mulig årsak til platå ved ca. 25min.



Figur 4.33: Tverrtøyning - tid 0.5% fiberinnhold



Figur 4.34: Tverrtøyning - tid 1.0% fiberinnhold

Kapittel 5

Vurdering av testresultater

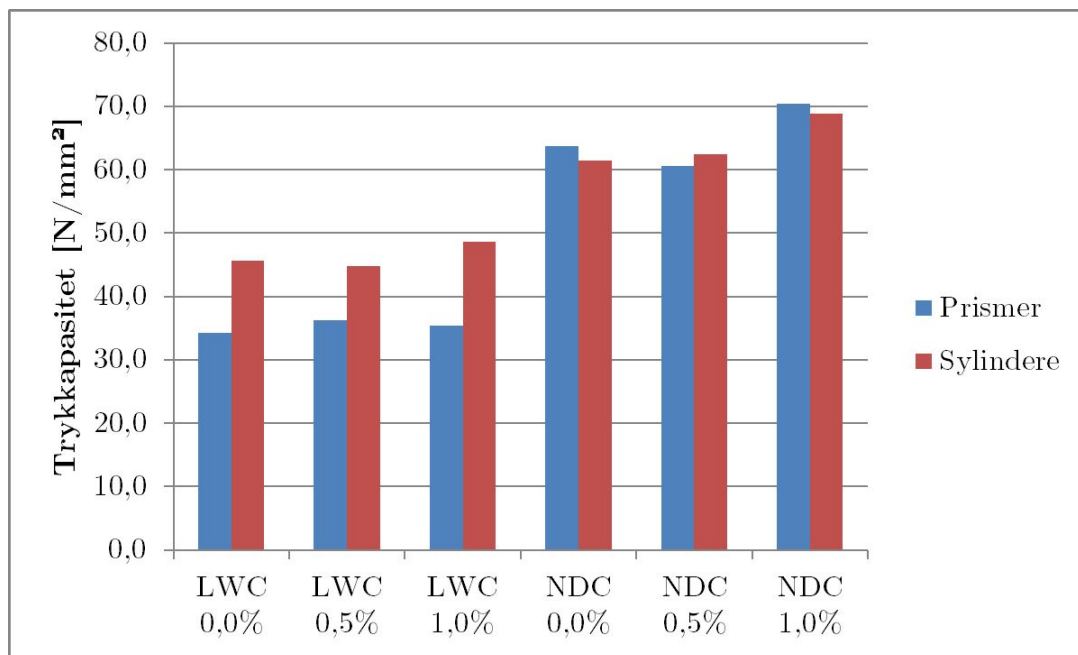
Som nevnt ble ikke testene gjennomført som planlagt grunnet komplikasjoner med laboratoriet som førte til at NDC sentrisk ikke ble testet. Prøveoppsettet og betongtype førte til eksplosive brudd, slik at post peak målinger ikke ble registrert, og en eventuell strain-softening/hardening effekt på prismene ble ikke målt. Dette samsvarer med arbeidet til Markeset og Scumacher[20, 23], som testet flere typer lettbetong, og konkluderte med at lettbetong med leca-tilslag får eksplosive brudd. Derfor blir ofte maksimal trykktøyning lik bruddtøyning for prismene, ε_{c2} ble lik ε_{cu2} . Analysen vil derfor i hovedsak se på variasjoner i pre peak oppørsel.

5.1 Trykkapasitet

Figur 5.1 viser bruddkapasiteten til prismene og sylindrene. For testene på lettbetong viser grafen at sylindrene generelt har en større fasthet enn prismene. Årsaken er at det er en større grad av randforstyrrelser på sylindertestene enn prismetestene. Sylindrene er så kort at hele pøvestykket får en treaksiell spenningstilstand grunnet friksjonskrefter, som illustrert i figur 2.4. Sylindrene har med andre ord ingen upåvirket midtsone, som illustrert i figur 2.5.

Differansen mellom trykkfastheten på prismer og sylindrene for NDC kan skyldes at det mangler testdata fra sentriske tester. For LWC fikk de sentriske testene en lavere maksspenning enn de eksentriske, som er med på å senke gjennomsnittsverdien for trykkapasiteten. Se tabell 4.3.

Forventet trykkapasitet på betongblandingen var på 40 MPa. For LWC benyttet SINTEF en resept med tidligere erfaringer, sylindertestene viste at denne stemte bra. Den store variasjonen på sylindrefastheten på LWC 1,0% skyldes støpereir i sylindere 2 samt sylindere 1 var ca. 400g tyngre enn de to andre testobjektene. Fastheten for NDC ble derimot for høy som sylindertestene indikerer. Det er vanskelig å treffe helt på styrke når man skal lage to så forskjellige blandinger, uten en prøveblanding.



Figur 5.1: Trykkkapasitet sylindere i forhold til prismer

5.2 Bruddlinje

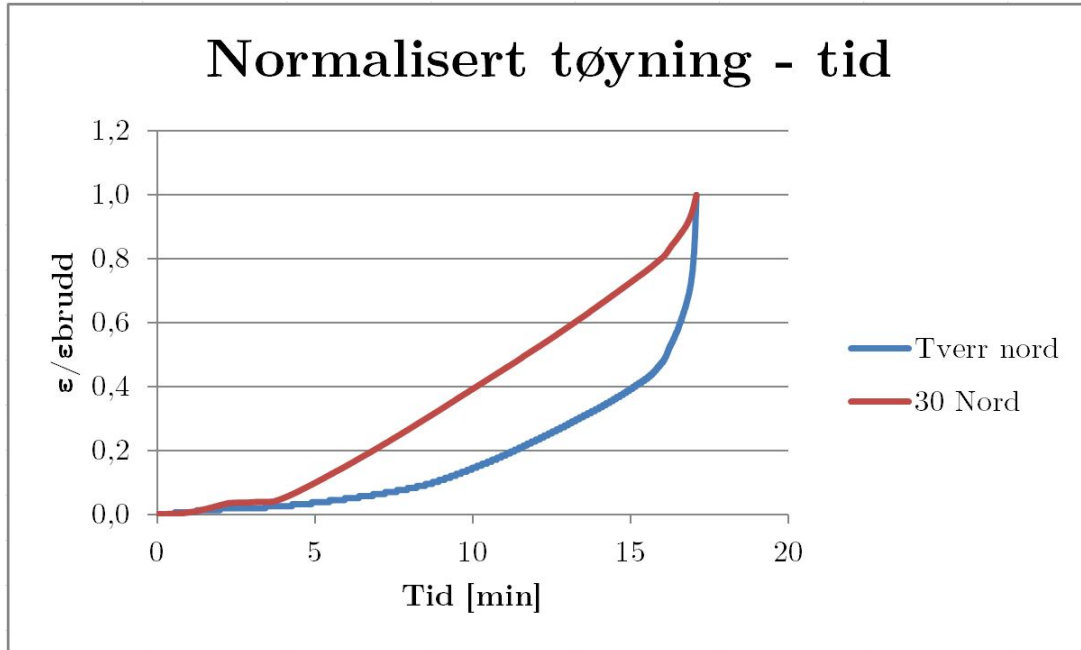
Bruddlinje gikk gjennom lett tilslag i LWC og rundt tilslaget for NDC. Figur 4.3 viser tydelig at bruddlinjen går gjennom tilslaget for LWC og rundt tilslaget for NDC. Dette stemmer overens med teorien presentert i litteraturkapittelet. I bruddflaten til LWC ser en at de største Lecakulene har absorbert sement som gjorde dem solide, mens de små lecakulene ikke hadde absorbert sement og fremdeles var porøse.

Vedlegg C viser at Leca 2-4 hadde en vannabsorpsjon på ca. 17%, mens Leca 4-8 hadde en vannabsorpsjon på ca. 2,5%. Dette tilsier at Leca 2-4 skulle i større grad trekke til seg matriks enn Leca 4-8. Dette har da ikke skjedd, mulige årsaker kan være at luften i Leca 2-4 ikke hadde mulighet å bli presset ut av tilslaget, forskjell på porestruktur mellom Leca 2-4 og Leca 4-8 kan også være en årsak.

5.3 Bruddoppførsel

Som nevnt i resultatene fikk prøvestykkene eksplosive brudd både for LWC og NDC. Lasten økte lineært, helt til prøvestykket ble knust. Årsaken til dette kan være at trykkbrudd generelt er eksplosive. For de fleste prismer ble et diagonalt langsgående skjærbrudd langs hele prøvestykke dominerende. Under eksentriske tester var det enten trykkbrudd, skjærbrudd eller en kombinasjon av disse som var opptredende bruddform. Skjærbruddet oppstår pga. en kombinasjon av vertikale riss i midtsonen og skråriss i endesonen grunnet resultanten av treaksiell spenningstilstand.

Under testing ble det klart at utviklingen av tverrtøyningen indikerte når prøvestykket gikk til brudd. Dette vises i figur 5.2, hvor det kommer frem at tverrtøyningen starter å utvikle seg eksponentielt før den langsgående tøyningen går over til å utvikle seg eksponentielt. Denne oppførselen ble observert i majoriteten av prøvestykkene som ble testet. Se vedlegg F.



Figur 5.2: Trend tøyning tverr og langs

5.4 Effekten av fiber i betong

5.4.1 Langsgående tøyning

Tabell 5.1 viser hvilke tøyninger som er tillatt for betongen brukt i forsøkene. Verdiene er regnet ut etter formlene i tabell 3.1 (NDC) og tabell 11.3.1 (LWC) i EC2. Materialeegenskapene brukt i formlene er basert på resultatene fra sylindertestene. For oversikt over formler og utregning se vedlegg G.

Tabell 5.1: Tillatte tøyninger regnet ut fra materialdata

	$x_k [N/mm^2]$	$\varepsilon_{lc2} [\%]$	$\varepsilon_{lcu2} [\%]$	$\varepsilon_{lc1} [\%]$	$\varepsilon_{lcu1} [\%]$
LWC 0,0%	42,9	2,0	3,1	2,3	2,3
LWC 0,5%	44,3	2,0	3,1	2,3	2,3
LWC 1,0% *	29,3	2,0	3,2	1,6	1,6
	$x_k [N/mm^2]$	$\varepsilon_{c2} [\%]$	$\varepsilon_{cu2} [\%]$	$\varepsilon_{c1} [\%]$	$\varepsilon_{cu1} [\%]$
NDC 0,0%	59,5	2,3	2,9	2,6	3,4
NDC 0,5%	56,2	2,2	3,1	2,5	3,6
NDC 1,0%	68,1	2,4	2,7	2,7	3,0

*Store variasjoner i testresultater for sylindere se vedlegg E.

Sentrisk

Ved kosentriske prøver er middeltrykktøyningen begrenset til $\varepsilon_{lc2} = 2,0\%$. Middeltrykktøyningen blir her lik $\varepsilon_{brudd,langs}$ da prøven er utsatt for sentrisk trykk uten gradient. Tabell 5.2 viser at testene stemmer godt med denne begrensningen av tøyningen. Ved tilsetning av 0,5% fiber overskrider $\varepsilon_{brudd,langs}$ denne grensen med 0,2% dette kan forklares med at EC2 ikke tar hensyn til effekten av tilsatt fiber.

Ved tilsetning av 0,5% fiber viser tabell 5.2 en økning på av maks spenning i forhold til referansebetongen (0,0% fiber). Dette kan komme av at fibre skaper en omslutningseffekt ved å forhindre tverreksjon eller en variasjon i betongens trykkapasitet. Videre viser tabellene at maks tøyning avtar fra 0,5% fiber til 1,0% fiber. Mulige årsaker til dette, vanskeligere for fiberen å fordele seg ved støping, fiberorientering og "balling" som vil påvirke fiberens evne til å aktiviseres under sentrisk trykk.

Tabell 5.2: Sentriske resultater

	LWC 0,0%	LWC 0,5%	LWC 1,0%
$F_{maks} [kN]$	717,1	783,2	738,9
$\sigma_{maks} [N/mm^2]$	31,9	34,8	32,8
$\varepsilon_{brudd,tverr} [\%]$	0,7	1,0	0,5
$\varepsilon_{brudd,langs} [\%]$	1,97	2,2	1,98
Tillatt tøyning: $\varepsilon_{lc2} [\%]$	2,0	2,0	2,0

Eksentrisk

Ligning 5.1 viser formelen for å bestemme om ett tverrsnit er kosentrisk belastet eller ikke. Ligning 5.2 viser at de eksentriske testseriene i rapporten ikke er kosentrisk belastet. Av den grunn må det ikke tas hensyn til eventuelle begrensninger EC2 måtte ha på middeltrykkføyningen. Maks føyning settes derfor lik ε_{cu2} for NDC og ε_{lcu2} for LWC.

$$\frac{e_d}{h} < 0,1 \quad (5.1)$$

$$\frac{25}{150} = 0,167 > 0,1 \quad (5.2)$$

Alle prøvene er påvirket av en føyningsgradient som fører til at fibrene blir aktivisert i større grad enn ved sentriske tester. Tabell 5.3 og tabell 5.4 viser at både spenning og føyning øker ved økende andel fiber for begge typer betonger.

I tabell 5.3 er og tabell 5.4 er tillatt bruddføyning for ikke-lineære analyser etter EC2 inkludert. Resultatene for LWC stemte bedre med ε_{lcu1} enn for ε_{lcu2} . Derimot var ikke dette tilfelle for NDC, her stemte ε_{cu2} bedre med testresultatene. ε_{lcu1} for LWC 1,0% bør sees bort fra grunnet store variasjoner i testresultatene for sylindrene. Alle tillatte føyninger er beregnet ut fra sylindrefasthetene. Spredningen på trykkapasitet innad i betongblandingene varierte mellom ulik andel fiber, tillatte føyninger har av den grunn en viss grad av usikkerhet knyttet til seg.

Tabell 5.3: Eksentriske resultater LWC

	LWC 0,0%	LWC 0,5%	LWC 1,0%
$F_{maks} [kN]$	413,1	424,8	426,7
$\sigma_{maks} [N/mm^2]$	36,8	37,8	37,9
$\varepsilon_{brudd, tverr} [\%]$	0,8	0,7	0,9
$\varepsilon_{brudd, langs} [\%]$	2,3	2,6	3,0
Tillatt føyning: $\varepsilon_{lcu2} [\%]$	3,1	3,1	3,2
Ikke-lin. Tøyning: $\varepsilon_{lcu1} [\%]$	2,3	2,3	1,6*

*Store variasjoner i testresultater for sylindrene se vedlegg E.

Tabell 5.4: Eksentriske resultater NDC

	NDC 0,0%	NDC 0,5%	NDC 1,0%
$F_{maks} [kN]$	717,0	732,0	791,6
$\sigma_{maks} [N/mm^2]$	63,7	65,1	70,4
$\varepsilon_{brudd, tverr} [\%]$	0,7	1,1	1,8
$\varepsilon_{brudd, langs} [\%]$	3,08	3,14	3,8
Tillatt føyning: $\varepsilon_{cu2} [\%]$	2,9	3,1	2,7
Ikke-lin. Tøyning: $\varepsilon_{cu1} [\%]$	3,4	3,6	3,0

5.4.2 Tverrtøyning

Flere av målingene til tverrtøyningene har støy og feil. Dette kommer av størrelsesordenen til tøyningene, og større sannsynlighet for friksjon i LDVT-ene ettersom de ligger horisontalt. Begrenset antall LVDT-er førte til at det kun ble brukt en til å måle på tvers av lengderetningen. I tillegg hadde måler på tverr sør ofte problemer og det ble byttet kabel uten hell. Konsekvensen av dette er at de fleste prismetestene ga bare en giver på tverrutvidelsen fornuftige resultat.

Tabell 5.5-5.8 viser tøyning og poissons ratio ved 60 % av bruddlast og ved bruddlast for testseriene. Fra tabellene ser en at poissons ratio har stor variasjon og ingen generell trend. Tabell 5.8 viser en økende tverrutvidelse med økende fiberprosent, derimot viser tabell 5.6 motsatt trend. Av den grunn kan en ikke trekke noen klare konklusjoner med grunnlag i disse dataene.

LWC

Tabell 5.5: Tøyninger ved 60% av bruddlast LWC, Poisson

	LWC 0%	LWC 0,5%	LWC 1,0%
$\varepsilon_{br,60l}$ [%]	1,20	0,87	0,87
$\varepsilon_{br,60t}$ [%]	0,28	0,20	0,23
$\nu_{br,60}$	0,23	0,23	0,26

Tabell 5.6: Tøyninger ved brudd LWC, Poisson

	LWC 0%	LWC 0,5%	LWC 1,0%
$\varepsilon_{brudd,langs}$ [%]	2,16	2,40	2,49
$\varepsilon_{brudd,tverr}$ [%]	0,76	0,65	0,69
ν_{brudd}	0,35	0,27	0,27

NDC

Tabell 5.7: Tøyninger ved 60% av bruddlast NDC

	NDC 0%	NDC 0,5%	NDC 1,0%
$\varepsilon_{br,60l}$	0,72	0,84	0,74
$\varepsilon_{br,60t}$	0,19	0,39	0,28
$\nu_{br,60}$	0,26	0,46	0,35

Tabell 5.8: Tøyninger ved brudd NDC, Poisson

	NDC 0,0%	NDC 0,5%	NDC 1,0%
$\varepsilon_{brudd,langs}$ [%]	3,08	3,14	3,79
$\varepsilon_{brudd,tverr}$ [%]	0,67	1,14	1,81
ν_{brudd}	0,22	0,36	0,48

5.5 Effekten av tøyingsgradient

Her blir kun resultatene fra LWC presentert ettersom NDC med sentrisk belastning ikke ble testet.

Tabell 5.9 illustrerer en klar forbedring i aktivisering av fiber ved eksentrisk belastning i forhold til sentrisk belastning. Generelt er trenden en økning i maks spenning og bruddtøyning. Årsaken til dette kan være omfordelingen av spenninger som oppstår pga forskjellige spenningstilstander i ytre og indre fibre, som beskrevet i litteraturkapittelet.

Skulle ifølge teorien hatt null spenninger på minst belastet side, forsøkene viste at det faktisk var strekkspenninger tilstede på minst belastet side. Årsaken til dette er at betong ikke oppfører seg 100% lineært elastisk og mulig feil i påføring av eksentrisk last kan ha ført til krumning av prøvestykket.

Tabell 5.9: Endringer ved eksentrisk testing i forhold til sentrisk testing

	Sentrisk	Eksentrisk	Endring [%]
LWC 0,0%			
$\sigma_{maks} N/mm^2$	31,9	36,8	13,3
$\varepsilon_{brudd,tverr} [\%]$	0,7	0,8	9,1
$\varepsilon_{brudd,langs} [\%]$	2,0	2,3	16,0
LWC 0,5%			
$\sigma_{maks} N/mm^2$	34,8	37,8	7,8
$\varepsilon_{brudd,tverr} [\%]$	1,0	0,7*	-45,3*
$\varepsilon_{brudd,langs} [\%]$	2,2	2,6	16,9
LWC 1,0%			
$\sigma_{maks} N/mm^2$	32,8	37,9	13,4
$\varepsilon_{brudd,tverr} [\%]$	0,5	0,9	45,4
$\varepsilon_{brudd,langs} [\%]$	2,0	3,0	33,8

*LVDT på tverr hengt seg opp

5.6 Effekten type betongmatrise

Opprinnelig skulle NDC og LWC av samme trykkfasthet bli testet. Differansen mellom LWC og NDC var i størrelsesorden rundt 20 N/mm^2 . Av den grunn er det lite hensiktsmessig å sammenligne resultatene mellom betontypene, ettersom NDC har en sylindrefasthet som er ca. 1,5 ganger større enn for LWC. Av den grunn kan det ikke trekkes noen konklusjoner ved å sammenligne disse resultatene.

Tabell 5.10: Testresultater for eksentrisk testing av LWC og NDC.

	LWC	NDC
0,0% Fiber		
$F_{maks}[kN]$	413,1	717,0
$\sigma_{maks}N/mm^2]$	36,8	63,7
$\varepsilon_{brudd,tverr}[\text{‰}]$	0,8	0,7
$\varepsilon_{brudd,langs}[\text{‰}]$	2,3	3,08
0,5% Fiber		
$F_{maks}[kN]$	424,8	732,0
$\sigma_{maks}N/mm^2]$	37,8	65,1
$\varepsilon_{brudd,tverr}[\text{‰}]$	0,7	1,1
$\varepsilon_{brudd,langs}[\text{‰}]$	2,6	3,14
1,0%		
$F_{maks}[kN]$	426,7	791,6
$\sigma_{maks}N/mm^2]$	37,9	70,4
$\varepsilon_{brudd,tverr}[\text{‰}]$	0,9	1,8
$\varepsilon_{brudd,langs}[\text{‰}]$	3,0	3,8

Kapittel 6

Feilkilder

- Avvik ved oppmålt tilslagsmengde ved blanding av betong.
- Feil og unøyaktighet på måleinstrumenter.
- Formfeil/avvik på prøvestykkene
- Menneskelige feil ved innsetting av prøvestykker for testing.
- Forskjeller i hvor lenge testene kjøres.
- Varierende herdetid.
- Menneskelige feil ved behandling av rådata.
- Variasjon ved plassering av målere.

Kapittel 7

Konklusjon

Det har blitt testet seks forskjellig resepter med varierende fibermengde på henholdsvis 0%, 0,5% og 1%, hvorav tre av blandingene var av lettbetong og tre var av normalbetong. Fiberen som ble brukt var dramix 65/60. Det ble støpt fire prizmer per resept, hvorav to ble belastet sentrisk og to ble belastet eksentrisk. De eksentriske prøvene hadde en eksentrisitet lik $b/6$ som ved lineærelastisk oppførsel ikke gir spenninger på minst belastet side.

For at konklusjoner skal kunne trekkes er det viktig at prøvestykkene oppfører seg likt innad i prismeparene. Ut fra variasjonen i bruddlast for prismeparene som vises i tabell 7.1 ser en at variasjonen er innenfor toleransenivået. Årsaken til at tøyningene variere såpass mye innad i prismeparene er at disse er avhengig av flere faktorer som fiberorientering og fiberfordeling, feilkalibrering av måleutstyr, støy på måleutstyr etc.

Testoppsettet har kun parvis identiske prøver. Dette kan være et litt snevert datagrunnlag å basere eventuelle konklusjoner på, ettersom normen for datagrunnlaget ikke kommer klart frem.

Tabell 7.1: Avvik lastkapasitet innad i prismepar ved testing i %.

Avvik	LA1-2	LA3-4	LB1-2	LB3-4	LC1-2	LC3-4	NC3-4
Bruddlast [%]	0,4	1,4	2,5	6,3	4,0	1,3	3,7
Tøyning [%]	16,7	19,0	9,5	8,0	0,0	0,0	5,0

NB: NA4 og NB4 var kun ett prøvestykke per serie, derfor ingen variasjon.

Bruddoppførsel

Forventet oppførsel var at LWC skulle være mer eksplosivt enn NDC. NDC krevde større belastning for å gå til brudd og dette er en mulig årsak til NDC fikk like sprø brudd som LWC. Dominerende bruddform var skjærbrudd, som utvikles pga. en kombinasjon av vertikale riss i midtsonen og skråriss i endesonen grunnet resultatanten av den treaksielle spenningstilstanden.

Etter 30% av maks vil det dannes flere riss i overgangssonen mellom tilslag og matrise.[23] Ved videre økning av belastning vil rissene vokse og til slutt møtes og

danne en kritisk bruddlinje gjennom tverrsnittet til prøvestykket. Ved denne type brudd rekker ikke fiberen å omfordele krefter ved brudd og har av den grunn liten effekt. Dette er da årsaken til at bruddene i testseriene ble eksplosive.

Effekten av fiber

Testresultatene viser at for sentrisk og eksentrisk testing var det ingen betydelig økning i spenning ved brudd. Dette kommer av at fiber i mindre grad påvirker trykkapasiteten til betongen. Eventuelle økninger i spenninger vil i størst grad være avhengig av materialegenskapene til betongen e.g, svakheter (støpereir), ujevne overflater og eksisterende mikroriss fra herdeprosess før testing.

Testresultatene viser at fiberen hadde en betydelig effekt på de eksentrisk belastede prismenes tøyning. Testene ga større tøyning ved brudd ved økende andel fiberprosent. Testresultater indikerer da en mer duktil oppførsel før brudd ved tilførsel av fiber i betongen. Tøyningene tillatt i EC2 for et tverrsnitt under bøyning stemte godt for NDC eksentrisk og LWC sentrisk. Tøyningene til LWC eksentrisk stemte derimot bedre overens med tøyningene tillat for en ikke-lineær analyse. Dette er et interessant resultat som bør undersøkes nærmere for å utrede hva som kan være årsaken til dette.

Tverrtøyninger

Ut fra testresultatene konkluderes det med at det er tverrtøyningene som markerer når prøvestykket går til brudd. Videre er det variasjon for målingene av tverrtøyningene. Av den grunn kan en ikke trekke noen klare konklusjoner fra de resultatene, men trenden var at tverrtøyningene økte ved økende andel fiberprosent.

Effekten av tøyingsgradient

Resultatene viser en forbedring i aktivisering av fiber ved eksentrisk belastning i forhold til sentrisk belastning. Som førte til at prismene fikk større tøyninger.

Effekten av betongmatrise

Ettersom LWC og NDC endte opp med å ikke ha like materialegenskaper er det lite hensiktsmessig å sammenligne resultatene. Konkluderer med at det burde utføres prøvestøp av NDC for å sørge for like materialegenskaper i betongblandningene.

7.1 Forslag til videre arbeid

- Prøve forskjellige typer lett tilslag som har en mindre porøs struktur enn Leca.
- Endringer i testoppsett for å muliggjøre postpeak målinger.
- Benytte DIC målinger (Digital Image Correlation)
- Testoppsett hvor tverreksjonspansjonen på trykksiden er bestemmende.
- Få samme fasthet på NDC- og LWCblandinger.
- Flere prøvestykker, forbedre de statistiske egenskapene til testoppsettet.
- Undersøke fiberorienteringen for prismene.
- Simulering av ikke-lineær oppførsel ved tilsetning av fiber i betong.
- Flere målinger av tverrutvidelsen.

Bibliografi

- [1] <http://snl.no/betong%2Fhistorie>, note = Åpnet Februar 24, 2014, title = Betong - Historie, author = Inger Lise A. Delphin.
- [2] Norsk betongforening publikasjon nr. 15, betonggulv - gulv på grunn, påstøp, 1998.
- [3] Norsk betongforening publikasjon nr. 23, lettbetong prosjekteringsveiledning, 1998.
- [4] Norsk betongforening publikasjon nr. 7, sprøytebetong til betongsikring, 2011.
- [5] Perumalsamy N Balaguru and Surendra P Shah. *Fiber-reinforced cement composites*. 1992.
- [6] Bosfa. Dramix 65/60 product data sheet. <http://bosfa.com/docs/accordions/3D6560GG.pdf>. pnet April 30, 2014.
- [7] CEN. Ns-en 14651:2005+a1:2007 - prøvingsmetode for betong med metalliske fibere - måling av bøyestrekfasthet (proporsjonalitetsgrense og restfastheter), 2007.
- [8] CEN. Ns-en 1992-1-1:2004+na:2008: Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger, 2008.
- [9] CEN. Ns-en 1998-1:2004+na:2008 eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning - del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger, 2008.
- [10] CEN. Ns-en 12390-3:2009 - prøving av herdnet betong - del 3: Prøvelegemers trykkfasthet, 2009.
- [11] Satish Chandra and Leif Berntsson. *Lightweight aggregate concrete*. William Andrew, 2002.
- [12] Fédération Internationale du Béton. *Model Code 2010-first complete draft*. Fédération Internationale du Béton fib/International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [13] J. L. Clarke et al. *Structural lightweight aggregate concrete*. Blackie academic professional, 1993.

- [14] S. P. Shah et. al. Test method for measurement of the strain-softening behaviour of concrete under uniaxial compression. Technical report, RILEM technical committees, 2000.
- [15] Stefan Jacobsen et al. *TKT 4215 Concrete technology 1*. Institutt for konstruksjonsteknikk NTNU, 2013.
- [16] Terje Kanstad et al. Forslag til retningslinjer for dimensjonering utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner. Technical report, SINTEF, 2011.
- [17] Headed Reinforcement Corporation Europe. Hrc-produkter og ns-en 1992-1-1 (eurokode 2). <http://www.hrc-europe.com/pdf/HRC+NS-EN-1992.pdf>. Åpnet 12.mars, 2014.
- [18] Per Jahren. *Betong, historie og historier*. Tapir akademisk forlag, 2011.
- [19] M. D. Kotsovos. *Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression*. 1983.
- [20] Gro Markeset. Failure og concrete under compressive strain gradients. Technical report, NTNU, 1993.
- [21] Standard Norway. Ns-en 206-1: Concrete, part 1: Specification, performance, production and conformity, 2003.
- [22] Leidulv Vinje Øystein Lset, Henrik LurÅ“n. *Betongelementboken bind H - Dimensjonering for jordksjelv*. SB Grafisk.
- [23] Petra Schumacher. Rotation capacity of self-compacting steel fiber reinforced concrete. Technical report, Dramstadt University of Technology, 2006.
- [24] Svein Ivar Sørensen. *Betongkonstruksjoner, beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Tapir akademisk forlag, 2009.
- [25] Daniel C. Jansen Surendra P. Shah, Sokhwan Choi. *Strain softening of concrete in compression*. 1994.
- [26] Erik Thorenfeldt, S Fjeld, et al. Stålfiberarmering i betong. veiledning for prosjektering, utførelse og kontroll. *Høringsutkast Mai*, 2006, 2006.
- [27] J.G.M van Mier et. al. Strain-softening of concrete in uniaxial compression. Technical report, RILEM technical committees, 1997.

Kapittel 8

Figur- og tabelliste

Figurer

2.1	Bruddlinje for LWC versus NWC [13]	6
2.2	Bilde av fiber	8
2.3	Fremstilling av omslutningseffekten [17]	11
2.4	Områder med treaksiell spenningstilstand grunnet friksjonskrefter ved randen [27]	12
2.5	Randforstyrrelser grunnet friskjonskrefter i endesonene [19]	13
2.6	Illustrasjon av tøyingsgradient	13
2.7	Parabel-rektangel diagram for betong under trykk etter EC2	14
2.8	Illustrasjon av EC2 pkt 6.1(4)	14
2.9	Illustrasjon av middeltøyning	15
2.10	Ikke-lineær spenningskrue etter EC2	15
2.11	Illustrasjon av omslutningseffekten etter EC2 [8]	16
3.1	Forskaling til prismene	20
3.2	Måling av fuktabsorpsjon og fuktinnhold av tilslagene	21
3.3	Måling av synkutbredelse, luftinnhold og densitet av fersk betong	23
3.4	Lagring av elementene	24
3.5	Testriggen	25
3.6	Pålimt LVDT på prismene	26
3.7	Pålimt LVDT på nord og sørsiden av prismene	27
3.8	Oppsett måledata	27
3.9	Oppsett av eksentrisk(venstre) og sentrisk(høyre) belastning	28
3.10	Dimensjoner på eksentrisk lastplate	28
3.11	Navn på sideflater	29
3.12	Testrigg sylinter	30
3.13	Oversikt over testdato og herding	31

4.1	Eksempel på bruddform	37
4.2	Eksempel på bruddform	38
4.3	Bruddflate for prøvestykker NDC t.v. og LWC t.h.	39
4.4	Kraft tid for prismer med 0.0% fiberinnhold	41
4.5	Kraft tid for prismer med 0.5% fiberinnhold	42
4.6	Kraft tid for prismer med 1.0% fiberinnhold	42
4.7	Kraft tid for prismer med 0.0% fiberinnhold	43
4.8	Kraft tid for prismer med 0.5% fiberinnhold	43
4.9	Kraft tid for prismer med 1.0% fiberinnhold	44
4.10	Trend tøyninger for sentriske og eksentriske tester	45
4.11	Spenning - tøyning for prismer med 0.0% fiberinnhold	46
4.12	Spenning - tøyning for prismer med 0.5% fiberinnhold	46
4.13	Spenning - tøyning for prismer med 1.0% fiberinnhold	47
4.14	Spenning - tøyning for prismer med 0.0% fiberinnhold	47
4.15	Spenning - tøyning for prismer med 0.5% fiberinnhold	48
4.16	Spenning - tøyning for prismer med 1.0% fiberinnhold	48
4.17	Tøyning - tid for prismer med 0.0% fiberinnhold	49
4.18	Tøyning - tid for prismer med 0.5% fiberinnhold	49
4.19	Tøyning - tid for prismer med 1.0% fiberinnhold	50
4.20	Tøyning - tid for prismer med 0.0% fiberinnhold	50
4.21	Tøyning - tid for prismer med 0.5% fiberinnhold	51
4.22	Tøyning - tid for prismer med 1.0% fiberinnhold	51
4.23	Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.0% fiberinnhold	52
4.24	Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.5% fiberinnhold	52
4.25	Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 1.0% fiberinnhold	53
4.26	Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.0% fiberinnhold	53
4.27	Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 0.5% fiberinnhold	54
4.28	Normalisert spenning - tøyning diagram prismer med 1.0% fiberinnhold	54
4.29	Tverrtøyning - tid 0.0% fiberinnhold	55
4.30	Tverrtøyning - tid 0.5% fiberinnhold	56
4.31	Tverrtøyning - tid 1.0% fiberinnhold	56
4.32	Tverrtøyning - tid 0.0% fiberinnhold	57
4.33	Tverrtøyning - tid 0.5% fiberinnhold	57
4.34	Tverrtøyning - tid 1.0% fiberinnhold	58
5.1	Trykkapasitet sylindere i forhold til prismer	60
5.2	Trend tøyning tverr og langs	61

Tabeller

2.1	Eksempler på lette tilslag med tilhørende densitet [11]	5
3.1	Oversikt over prøveserier	19
3.2	Materialer benyttet i betongblandingene	22
3.3	Egenskaper stålfiber	22
3.4	Støpetidspunkt	23
3.5	Målinger av fersk betong	24
3.6	Oversikt over ID på alle prøvestykker	30
4.1	Resultater sylindertesting	34
4.2	Oversikt over navn på elementene	35
4.3	Nøkkeltall resultater av prismetesting	36
4.4	Bruddlast	41
4.5	Maksimal spenning og maksimal langsgående tøyning	45
4.6	Maksimal tverr bruddtøyning	55
5.1	Tillatte tøyninger regnet ut fra materialdata	62
5.2	Sentriske resultater	62
5.3	Eksentriske resultater LWC	63
5.4	Eksentriske resultater NDC	63
5.5	Tøyninger ved 60% av bruddlast LWC, Poisson	64
5.6	Tøyninger ved brudd LWC, Poisson	64
5.7	Tøyninger ved 60% av bruddlast NDC	64
5.8	Tøyninger ved brudd NDC, Poisson	64
5.9	Endringer ved eksentrisk testing i forhold til sentrisk testing	65
5.10	Testresultater for eksentrisk testing av LWC og NDC.	66
7.1	Avvik lastkapasitet innad i prismeapar ved testing i %.	68

Kapittel 9

Vedlegg

Innhold

A. Resepter betongblanding	A-1
B. Prosedyre for prøving av lett tilslag - initielt fuktinnhold og bulkdensitet samt resultat.	B-1
B.1. Resultat fuktinnhold	B-2
C. Prosedyre for prøving av lett tilslag - partikkeldensitet og 1-times vannabsorpsjon og resultat.	C-1
C.1. Resultat 1-times vannabsorpsjon	C-2
D. Tabell for standard normalfordelingen	D-1
E. Resultater sylindere	E-1
F. Resultater prizmer	F-1
F.1. LWC - 0,0% søyle 1	F-1
F.2. LWC - 0,0% søyle 2	F-5
F.3. LWC - 0,0% søyle 3	F-9
F.4. LWC - 0,0% søyle 4	F-13
F.5. LWC - 0,5% søyle 1	F-17
F.6. LWC - 0,5% søyle 2	F-21
F.7. LWC - 0,5% søyle 3	F-25
F.8. LWC - 0,5% søyle 4	F-29
F.9. LWC - 1,0% søyle 1	F-33
F.10. LWC - 1,0% søyle 2	F-37
F.11. LWC - 1,0% søyle 3	F-41
F.12. LWC - 1,0% søyle 4	F-45
F.13. NDC - 0,0% søyle 4	F-49
F.14. NDC - 0,5% søyle 1	F-52
F.15. NDC - 0,5% søyle 3	F-56
F.16. NDC - 0,5% søyle 4	F-59
F.17. NDC - 1,0% søyle 3	F-63
F.18. NDC - 1,0% søyle 4	F-66
G. Diverse beregninger	G-1
G.1. Tøyningsberegninger	G-1
G.1.1. Resultater tøyningsberegninger	G-2

A Resepter betongblanding

Korreksjoner mengde SP-stoff.

	Opprinnelig mengde [L]	Korrigert 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	0,230	0,683
NDC 0,5%	0,452	0,330	0,782
NDC 1,0%	0,453	0,330	0,783

Prosj./id.:		NDC 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 FA (STD FA 10)	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		-3,849	16,808
Absorbent vann	6,7	0,668			0,668
Årdal 0-2 mm (A-3726)_vasket	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	0,000	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

17,476

*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 kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** 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
Absorbent vann	6,6	0,663			0,663
Årdal 0-2 mm (A-3726)_vasket ma	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	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 kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Standard FA (STD FA 10)	302,0	30,200			30,200
Elkem Microsilica 940 U (A-4066)	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
Absorbent vann	6,6	0,657			0,657
Årdal 0-2 mm (A-3726)_vasket m	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	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	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 sylindre					
100x200 sylindre					
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-4066)	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
Absorbent 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-3726)	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
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	0	100	0	0
0	0	0	100	0	0
0	0	0	100	0	0
Dramix 65/60 3D	0	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
Absorbert 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	0,000	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	0,818	81,5	0,667	0,450
		0,0	100	0,000	0,000
		0,0	100	0,000	0,000
		0,0	100	0,000	0,000
Dramix 65/60 3D	39,0	3,900			3,900
	0	0,0	0,000		0,000

21,728

*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					

Totalt tilsatt SP

Prosj./id.:		LWC 1800 1,0% 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	455,0	45,496			45,496
Elkem Microsilica 940U (A-4066)	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-3726)	264,9	26,491	1,0	0,265	26,756
0	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	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	0,000			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 Prosedyre for prøving av lett tilslag - initielt fuktinnhold og bulkdensitet samt resultat.

SINTEF Byggforsk Betong- og natursteinslaboratoriet	KS 14-05-04-531 Prøving av lett-tilslag - initielt fuktinnhold og bulkdensitet	Gradering Intern	Side 1 av 1
Utarbeidet av Sverre Smeplass	Godkjent av Tor Arne Hammer	Versjon 1	Gyldig fra 2013-11-01

1 Utstyr

- Tørkeskap
- Thaulow-bøtte 10 l
- Vekt 0-25 kg

2 Gjennomføring

- To tilslagsprøver, begge på 10 kg (m_f) tørkes ved 105°C i 1 døgn.
- Tilslaget avkjøles og veies (m_t) og fylles i Thaulow-bøtta. Bøtta avrettes ved hjelp av stållinjal.
- Netto vekt av tilslaget i bøtta (m_b) bestemmes.

3 Beregning

Initielt fuktinnhold, f_i , bestemmes som: $f_i = 100(m_f - m_t) / m_t$ (%)

Dersom forskjellen i fuktinnhold mellom de to prøvene er større enn 0,4 % fukt, forkastes resultatet, og det gjøres nytt prøveuttak og måling. Ved rapportering brukes middelverdiene for de to tilslagsprøvene.

Bulkdensiteten, ρ_b , bestemmes som: $\rho_b = m_b / 0,01 \text{ m}^3$ (kg/m³)

Dersom forskjellen i bulkdensitet mellom de to prøvene er større enn 4 %, forkastes resultatet, og det gjøres nytt prøveuttak og måling. Ved rapportering brukes middelverdiene for de to tilslagsprøvene.

4 Rapportering

Initielt fuktinnhold rapporteres med en desimal, bulkdensiteten rapporteres uten desimaler.

B.1 Resultat fuktinnhold

Prøver for fuktinnhold


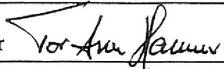
Leca 2-4					
	Før tørk	Etter tørk	Vekt skål	Differanse	Fuktinnhold %
Bunn	601,00	600,80	445,10	0,20	0,13
Midt	621,70	621,60	449,70	0,10	0,06
Topp	600,20	600,00	445,50	0,20	0,13

Leca 4-8					
	Før tørk	Etter tørk	Vekt skål	Differanse	Fuktinnhold %
Bunn	1020,30	931,40	448,10	88,90	15,54
Midt	1000,20	928,50	442,20	71,70	12,85
Topp	1000,60	927,40	451,50	73,20	13,33

Alle mål oppgitt i gram.

Dato:	07.02.2014
Utført av:	

C Prosedyre for prøving av lett tilslag - partikkeldensitet og 1-times vannabsorpsjon og resultat.

 SINTEF SINTEF Konstruksjoner og betong Postadresse: 7034 Trondheim Foretaksnr.: 948007029		KVALITETSSIKRING	
		GJELDER: PRØVING AV LETT-TILSLAG - partikkeldensitet og 1-times vannabsorpsjon	
		UTARBEIDET AV: Sverre Smeplass	
DATO: 1993-11-02	GRADERING: Intern	GODKJENT AV: Tor Arne Hammer 	GYLDIG FRA: 1993-11-08
IB NR: KS 70 119	UTGAVE NR: 2	ELEKTRONISK ARKIVKODE: I:KAPRO\709110\XOSKE085.W51	ANTALL SIDER: 1

1 Begrensning

Metoden kan benyttes for lett-tilslag med partikkelstørrelser fra 1-16 mm

2 Utstyr

- Tørkeskap
- Pyknometerkolbe med trang, gradert hals, 1000 ml
- Vekt 0-6 kg

3 Gjennomføring

- To tilslagsprøver, begge på ca 0,5 kg, vaskes på en sikteduk ett nivå finere enn nedre fraksjonsgrense, og tørkes deretter ved 105°C i 1 døgn. Tilslaget avkjøles.
- Pyknometerkolben fylles med tilslag, ca 2/3 full. Netto tørr tilslagsmengde i kolben (m_t) bestemmes. Kolben fylles opp med vann.
- 1 time etter vanntilsetting etterfylles kolben til 1000 ml (V_k), netto vekt av vann og tilslag i kolben (m_k) bestemmes.
- Vannet siles av kolben, tilslaget helles ut og overflatetørkes ved hjelp av en fuktig, ikke loende bomullsklut eller lignende. Det skal ikke forekomme fritt vann på tilslagsoverflatene etter denne behandlingen, men heller ikke fargeomslag pga uttørking. Vekten av det fuktige tilslaget (m_f) bestemmes.
- Tilslaget tørkes i tørkeskap ved 105 °C i 1 døgn. Tørr vekt etter endt forsøk (m_u) bestemmes.

4 Beregning

Dersom m_u avviker fra m_t med mer enn 0,2 % for noen av prøvene skal forsøket forkastes og gjentas.

1 times vannabsorpsjon, w_{1t} , bestemmes som: $w_{1t} = 100(m_f - m_t) / m_t$

Dersom forskjellen i 1 times vannabsorpsjon mellom prøvene er større enn 0,4 % absorpsjon skal resultatene forkastes og forsøket gjentas.

Tørr partikkeldensitet, ρ_p , bestemmes som: $\rho_p = m_t / (V_k - (m_k - m_t)/\rho_w)$
 der ρ_w er vannets densitet.

Dersom forskjellen i partikkeldensitet mellom prøvene er større enn 50 kg/m³ skal resultatene forkastes og forsøket gjentas.

5 Rapportering

1 times vannabsorpsjon rapporteres med en desimal, tørr partikkeldensitet rapporteres uten desimaler.

C.1 Resultat 1-times vannabsorpsjon

Tørkede prøver

KS70 119 1-times vannabsorpsjon og partikkeldensitet

Bunn

Målt /resultat	Leca 2-4		Leca 4-8	
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 1	Prøve 2
Volum av kolbe (cm ³)	1000,00		1000,00	
Vekt av kolbe (g)	296,24		299,50	
Vekt av tørt tilslag og kolbe (g)	530,20		933,90	
Vekt av vann, tilslag og kolbe (g)	1123,80		1495,30	
Vekt av fuktig tilslag (g)	270,10		679,20	
Vekt av fuktig tilslag etter trykktank (g)				
Tørr sluttvekt (g)	233,00		633,30	
Partikkeldensitet (kg/m ³)	575,69	0	1446,42	0
1-times vannabsorpsjon (%)	15,45	0,0	7,06	0,0
Trykkmetning (%)	-	-	-	-

Midt

Målt /resultat	Leca 2-4		Leca 4-8	
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 1	Prøve 2
Volum av kolbe (cm ³)	1000,00		1000,00	
Vekt av kolbe (g)	294,70		291,92	
Vekt av tørt tilslag og kolbe (g)	528,90		870,90	
Vekt av vann, tilslag og kolbe (g)	1128,70		1475,50	
Vekt av fuktig tilslag (g)	280,50		618,90	
Vekt av fuktig tilslag etter trykktank (g)				
Tørr sluttvekt (g)	233,20		578,20	
Partikkeldensitet (kg/m ³)	585,21	0	1464,29	0
1-times vannabsorpsjon (%)	19,77	0,0	6,89	0,0
Trykkmetning (%)	-	-	-	-

Topp

Målt /resultat	Leca 2-4		Leca 4-8	
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 1	Prøve 2
Volum av kolbe (cm ³)	1000,00		1000,00	
Vekt av kolbe (g)	320,90		298,37	
Vekt av tørt tilslag og kolbe (g)	539,00		897,00	
Vekt av vann, tilslag og kolbe (g)	1163,20		1481,00	
Vekt av fuktig tilslag (g)	257,40		641,10	
Vekt av fuktig tilslag etter trykktank (g)				
Tørr sluttvekt (g)	216,80		597,38	
Partikkeldensitet (kg/m ³)	580,36	0	1439,01	0
1-times vannabsorpsjon (%)	18,02	0,0	7,09	0,0
Trykkmetning (%)	-	-	-	-

Dato:	07.02.2014
Utført av:	

Prøver med faktisk fuktnivå

KS70 119 1-times vannabsorpsjon og partikkeldensitet**Bunn**

Målt /resultat	Leca 2-4		Leca 4-8	
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 1	Prøve 2
Volum av kolbe (cm ³)	1000,00		1000,00	
Vekt av kolbe (g)	296,24		299,50	
Vekt av tørt tilslag og kolbe (g)	549,90		950,00	
Vekt av vann, tilslag og kolbe (g)	1128,90		1563,10	
Vekt av fuktig tilslag (g)	291,10		662,60	
Vekt av fuktig tilslag etter trykktank (g)				
Tørr sluttvekt (g)	252,50		550,20	
Partikkeldensitet (kg/m ³)	602,52	0	1681,31	0
1-times vannabsorpsjon (%)	14,76	0,0	1,86	0,0
Trykkmøtning (%)	-	-	-	-

Midt

Målt /resultat	Leca 2-4		Leca 4-8	
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 1	Prøve 2
Volum av kolbe (cm ³)	1000,00		1000,00	
Vekt av kolbe (g)	294,70		291,92	
Vekt av tørt tilslag og kolbe (g)	515,30		918,19	
Vekt av vann, tilslag og kolbe (g)	1122,50		1535,80	
Vekt av fuktig tilslag (g)	262,50		640,80	
Vekt av fuktig tilslag etter trykktank (g)				
Tørr sluttvekt (g)	219,50		637,00	
Partikkeldensitet (kg/m ³)	561,61	0	1637,78	0
1-times vannabsorpsjon (%)	18,99	0,0	2,32	0,0
Trykkmøtning (%)	-	-	-	-

Topp

Målt /resultat	Leca 2-4		Leca 4-8	
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 1	Prøve 2
Volum av kolbe (cm ³)	1000,00		1000,00	
Vekt av kolbe (g)	320,90		298,37	
Vekt av tørt tilslag og kolbe (g)	563,20		1024,10	
Vekt av vann, tilslag og kolbe (g)	1152,70		1579,00	
Vekt av fuktig tilslag (g)	285,70		748,40	
Vekt av fuktig tilslag etter trykktank (g)				
Tørr sluttvekt (g)	240,50		637,00	
Partikkeldensitet (kg/m ³)	590,26	0	1630,49	0
1-times vannabsorpsjon (%)	17,91	0,0	3,12	0,0
Trykkmøtning (%)	-	-	-	-

Dato:	07.02.2014
Utført av:	

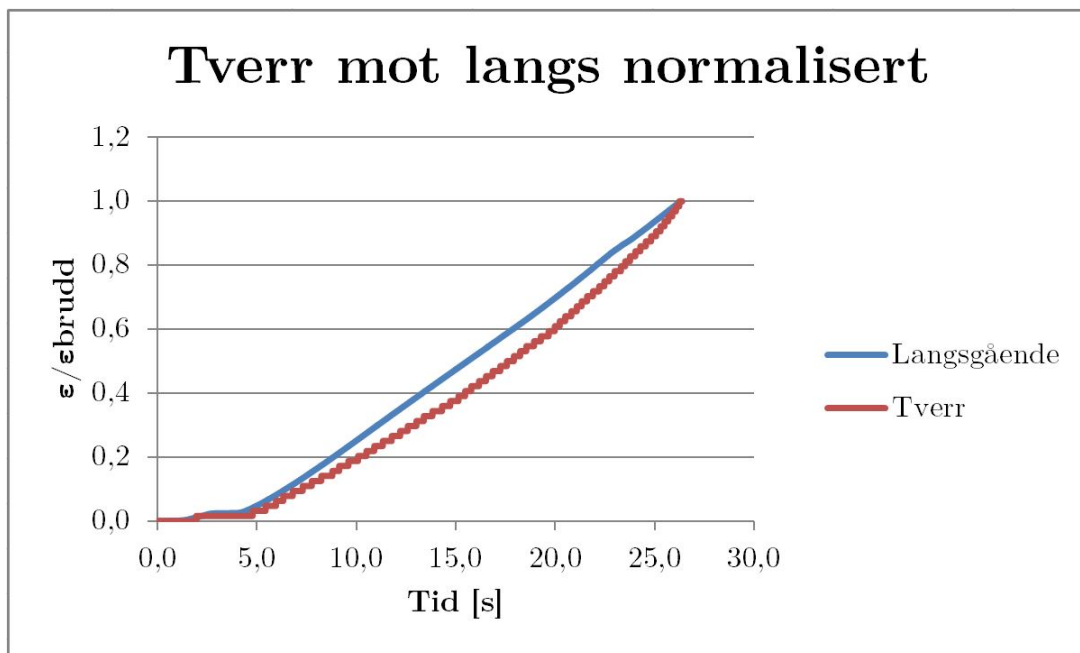
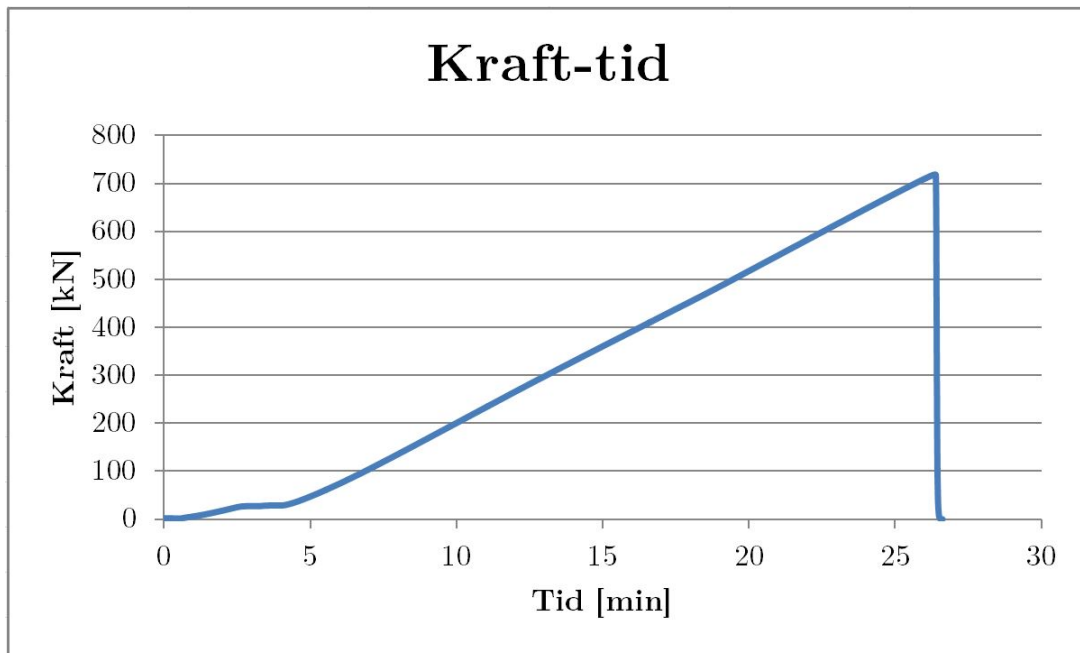
E Resultater sylindere

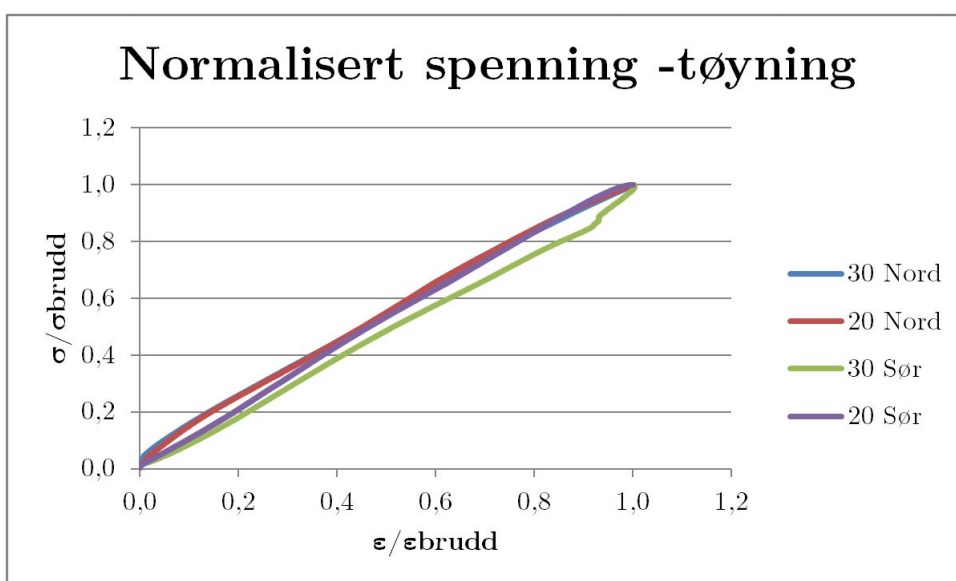
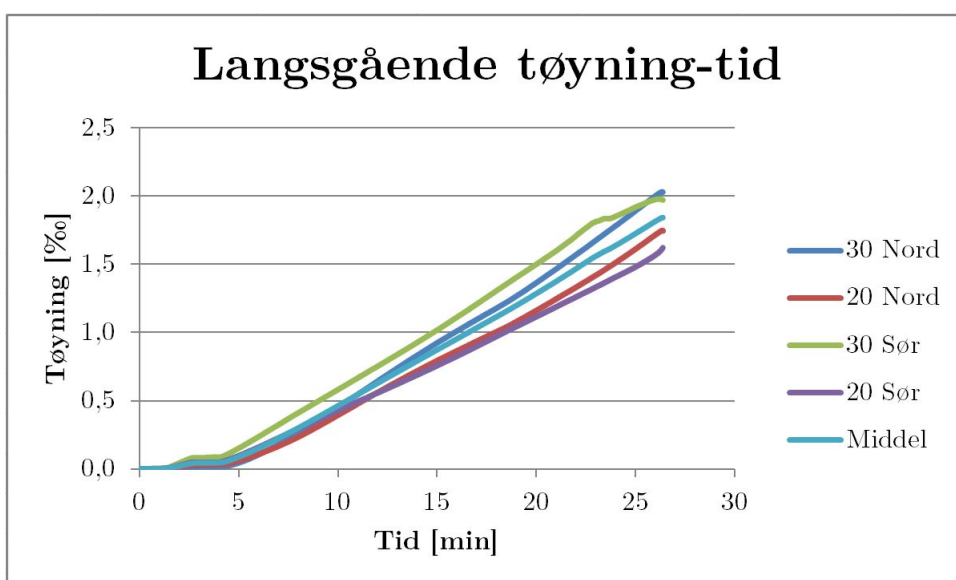
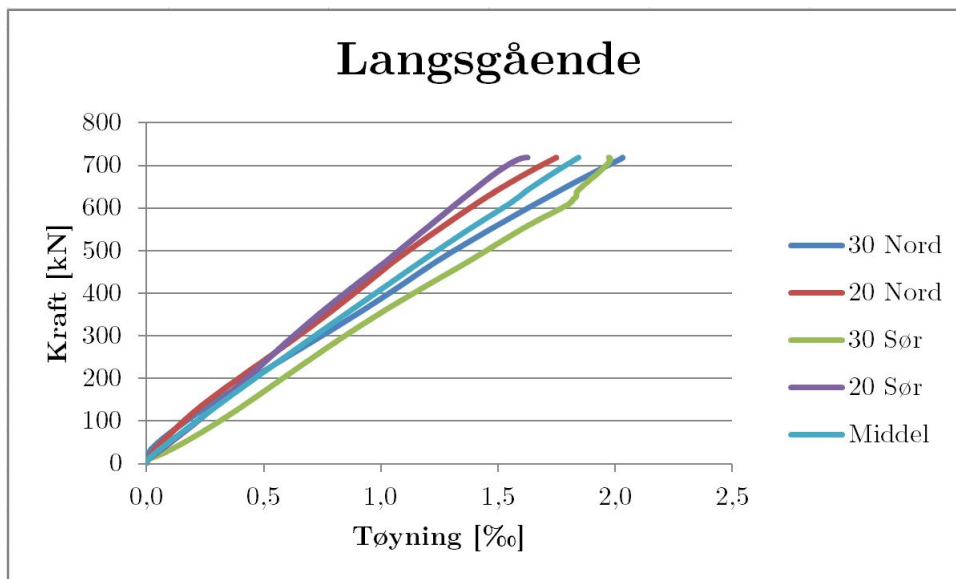
LWC										
Sylnr.	Fiber %	Vekt [g]	Høyde [mm]	$fck_s [N/mm^2]$	μ_{fck}	S_{fck}	$\rho [kg/m^3]$	μ_ρ	S_ρ	
1	0	2720	195	46,1			1732,5			
2	0	2749,9	195	47,1	45,6	1,7	1751,5	1738,2	11,6	
3	0	2716,9	197	43,8			1730,5			
1	0,5	2747,1	194	44,6			1749,7			
2	0,5			44,7	44,8	0,3		1749,6	0,2	
3	0,5	2746,7	197	45,2			1749,5			
1	1	3171,7	195	61,5			2020,2			
2	1	2764,4	198	38,1	48,7	11,8	1760,8	1856,5	142,4	
3	1	2808	199	46,5			1788,5			
NDC										
1	0	3467,7	195	61,9			2208,7			
2	0	3475	195	62,3	61,4	1,2	2213,4	2199,5	20,2	
3	0	3416,9	193	60,1			2176,4			
1	0,5	3501,2	194	63,5			2230,1			
2	0,5	3595	196	65,7	62,5	3,8	2289,8	2259,9	29,9	
3	0,5			58,3						
1	1	3586,5	195*	69,3			2284,4			
2	1	3569,6	196*	68,9	68,9	0,5	2273,6	2288,0	16,5	
3	1	3620,6	196	68,4			2306,1			

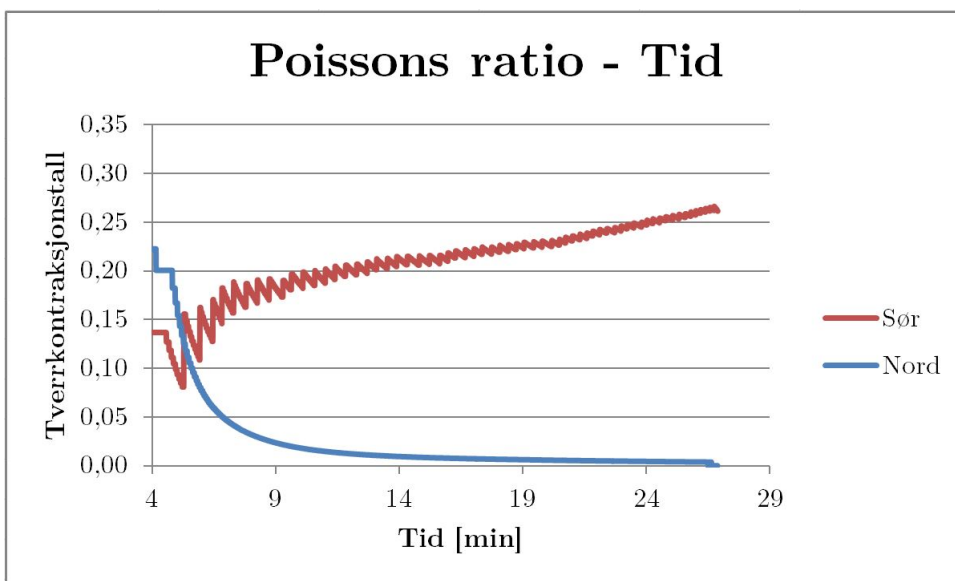
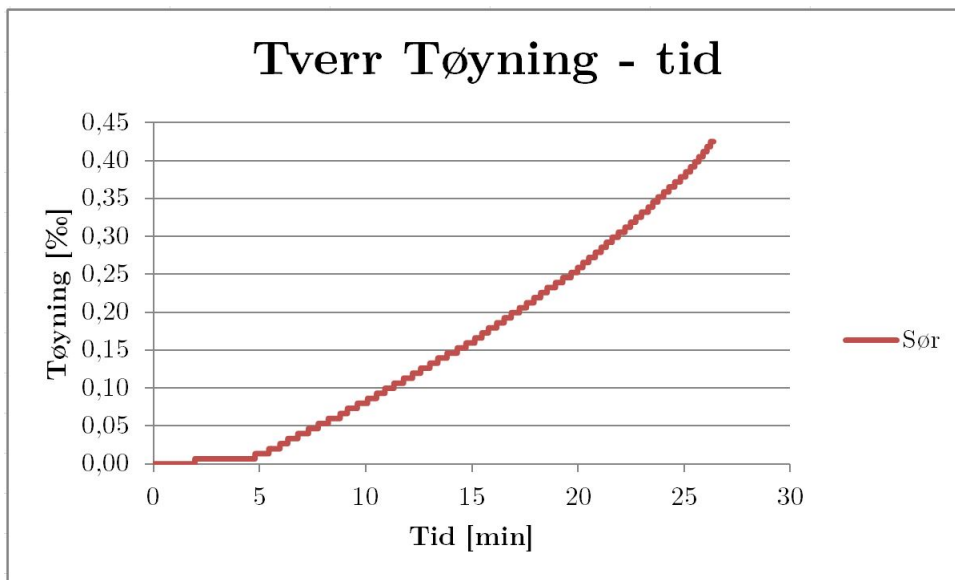
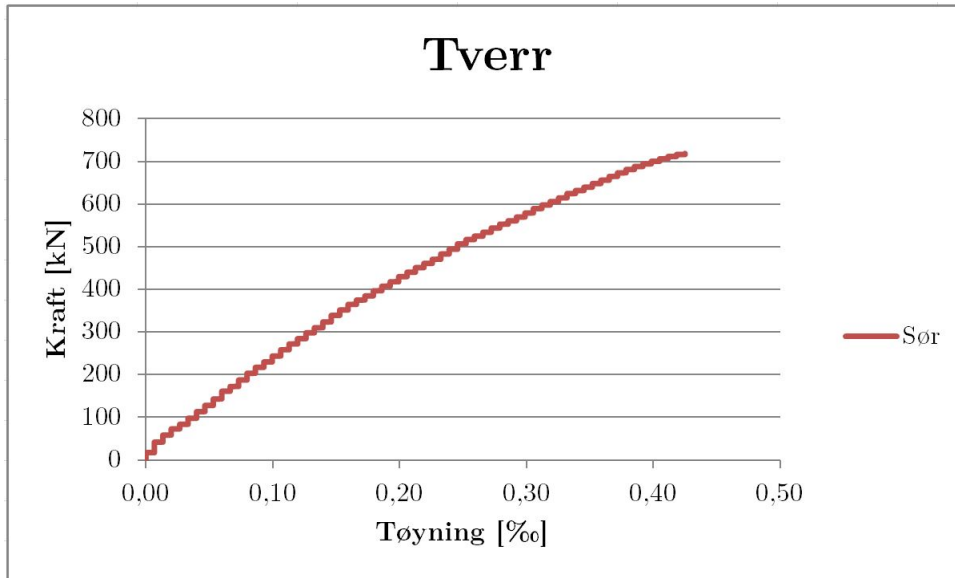
* Høyde ble målt etter testing.

F Resultater prismer

F.1 LWC - 0,0% søyle 1

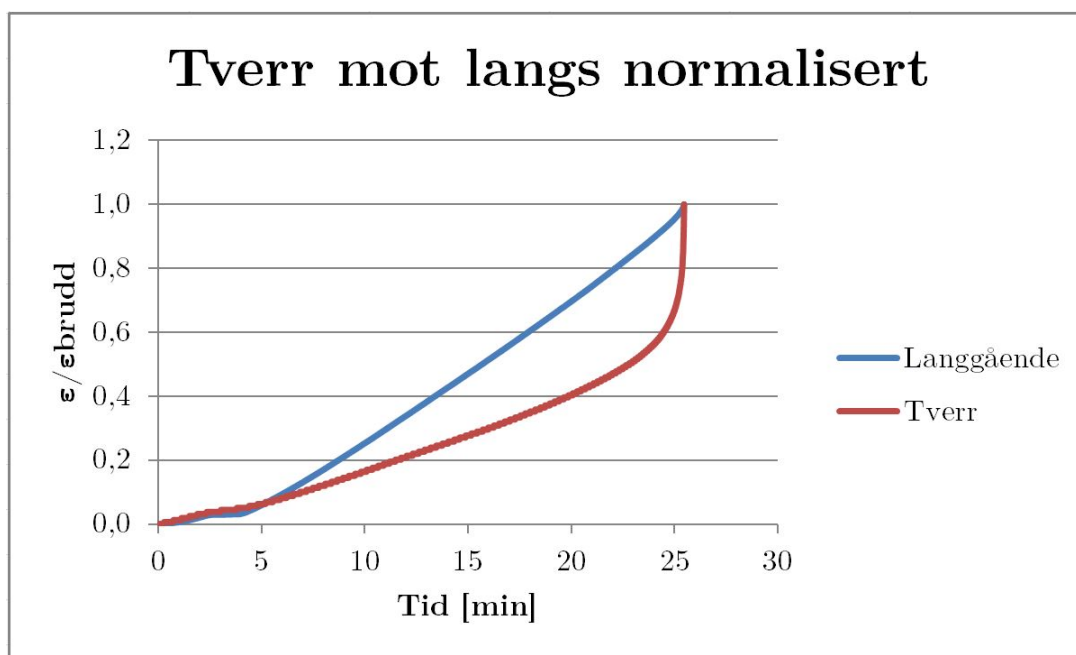
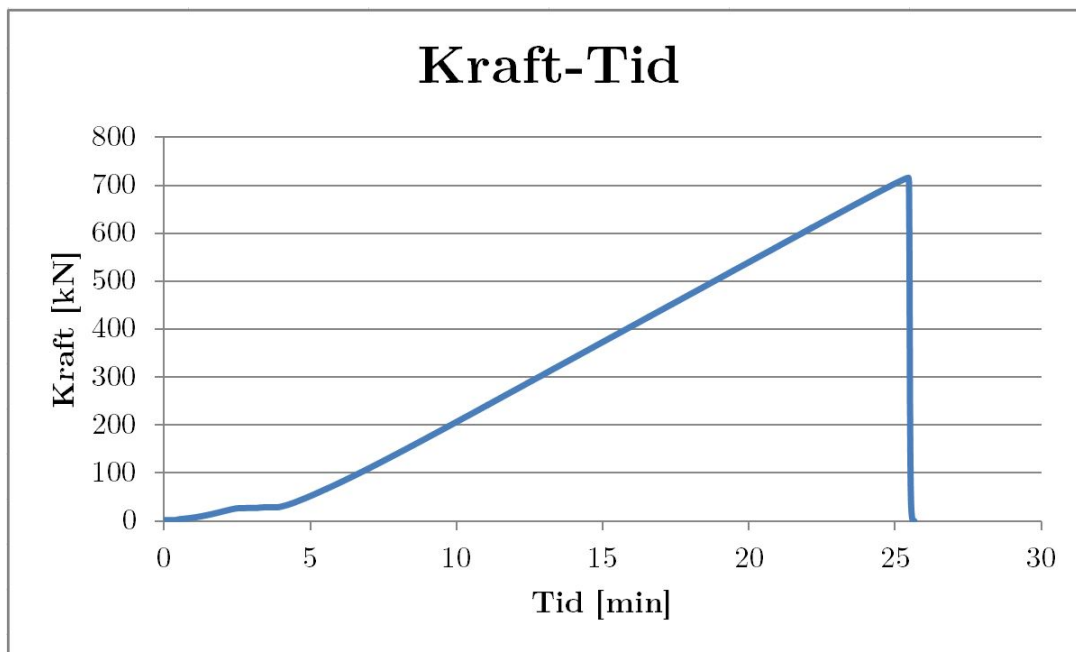


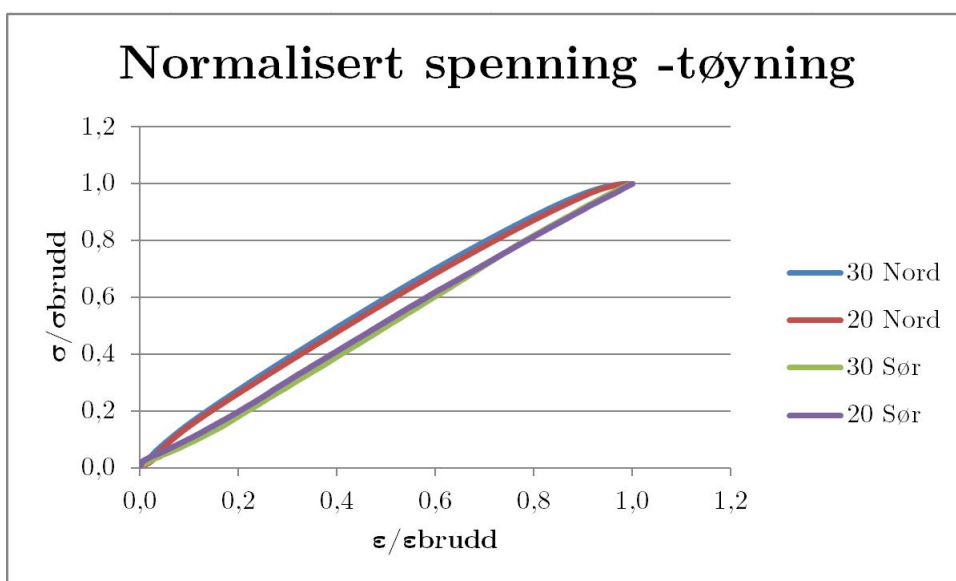
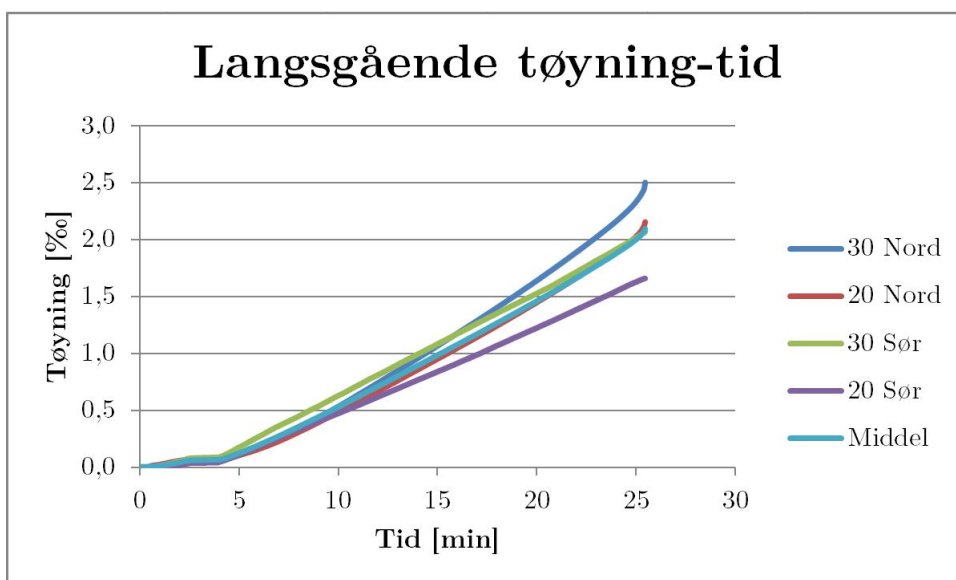
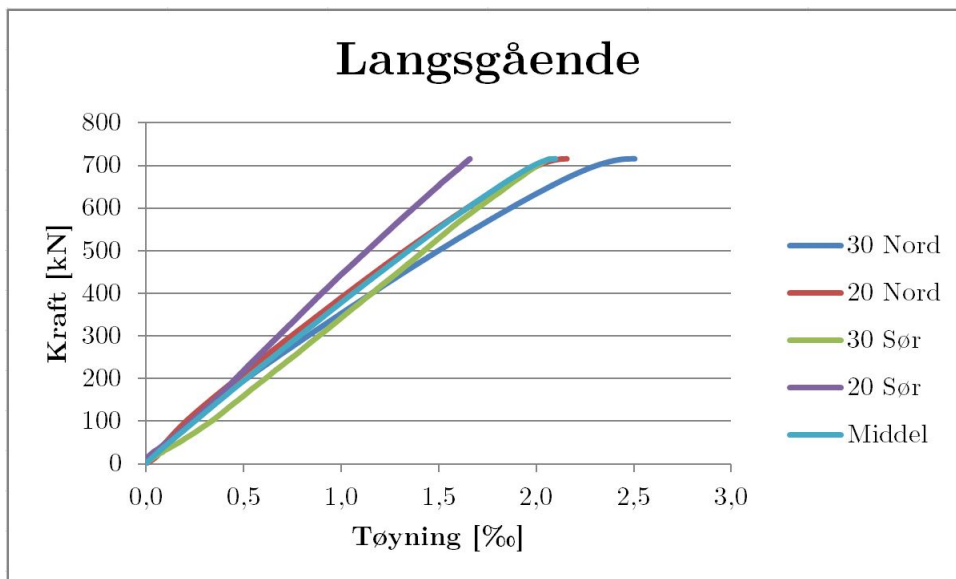


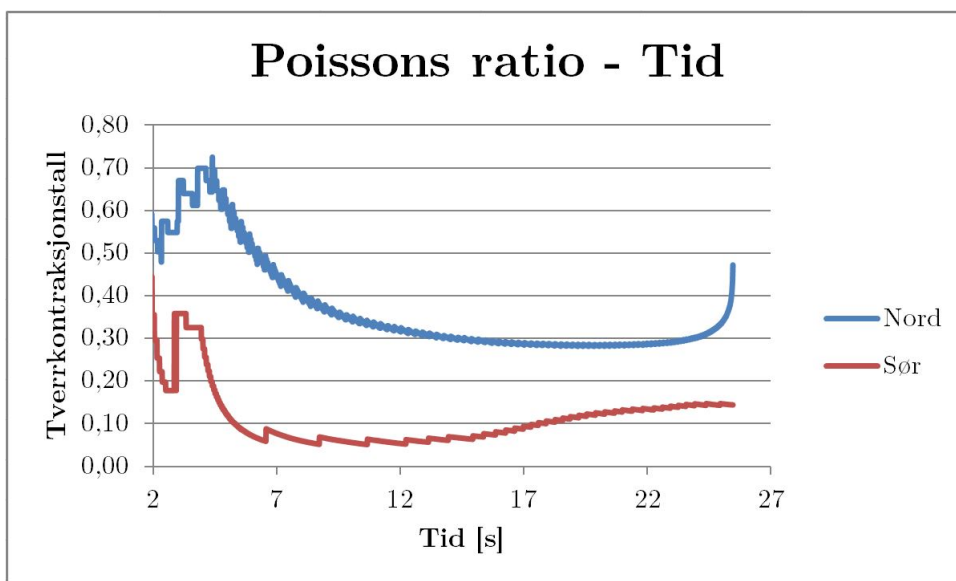
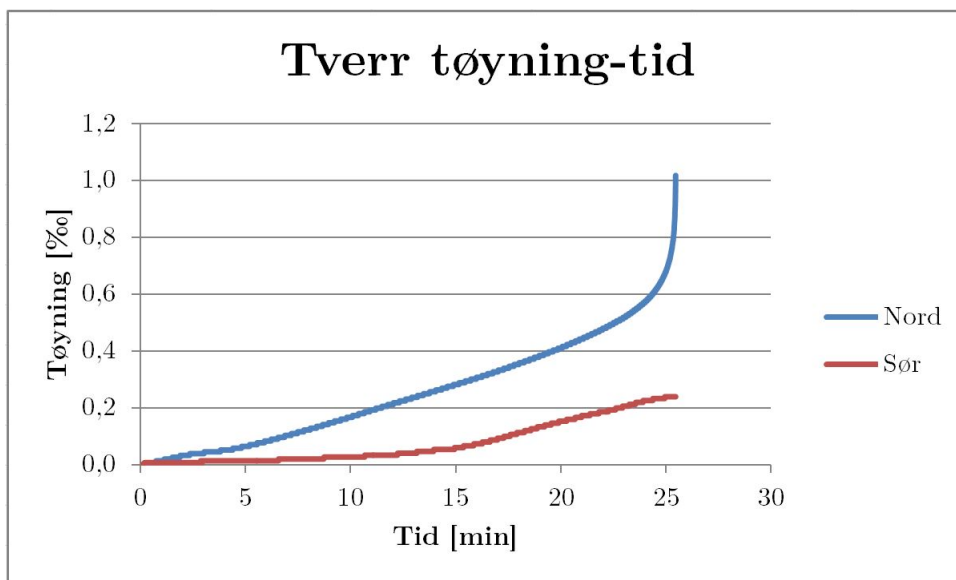
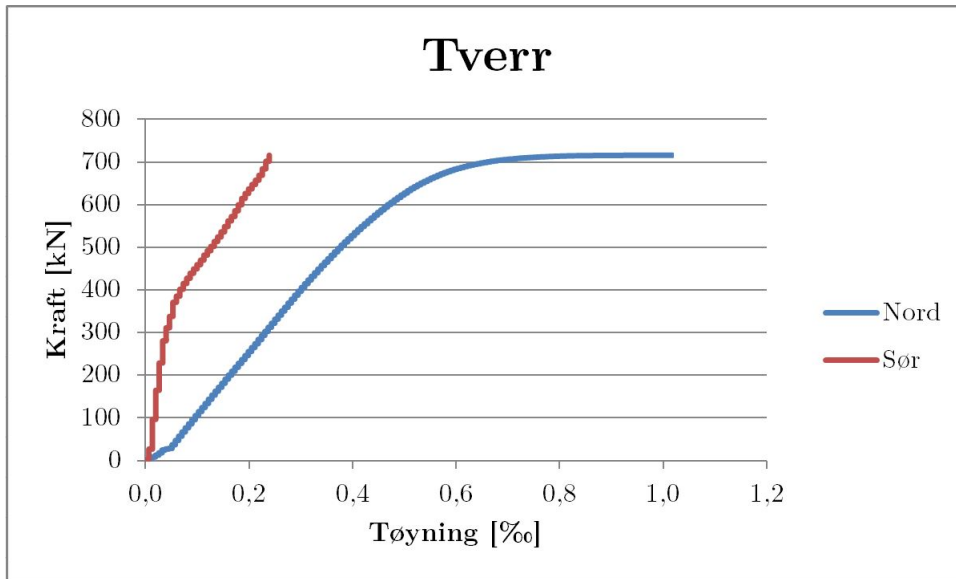


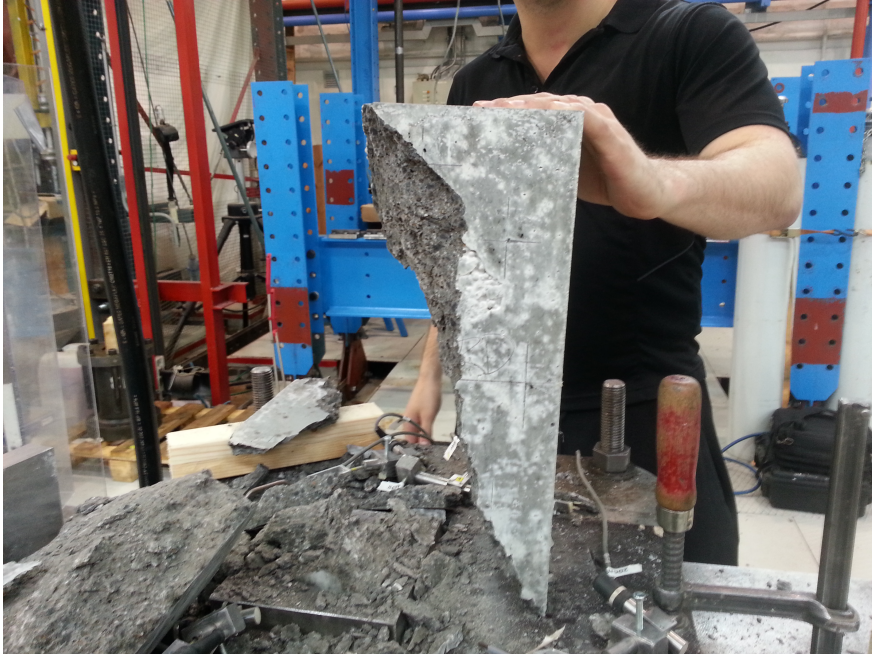


F.2 LWC - 0,0% søyle 2

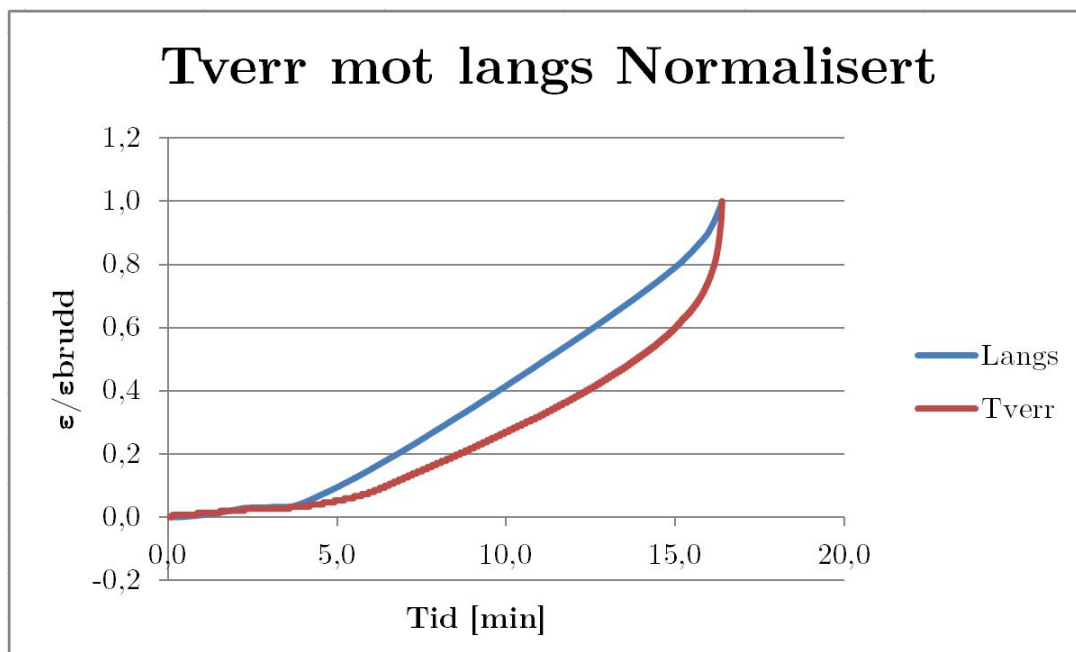
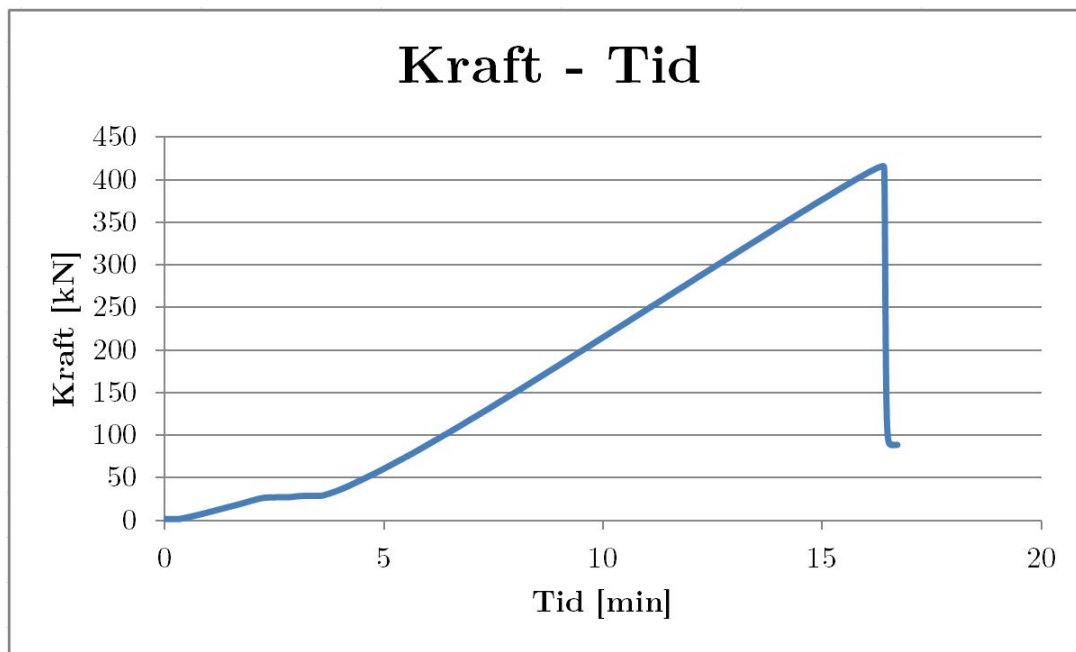


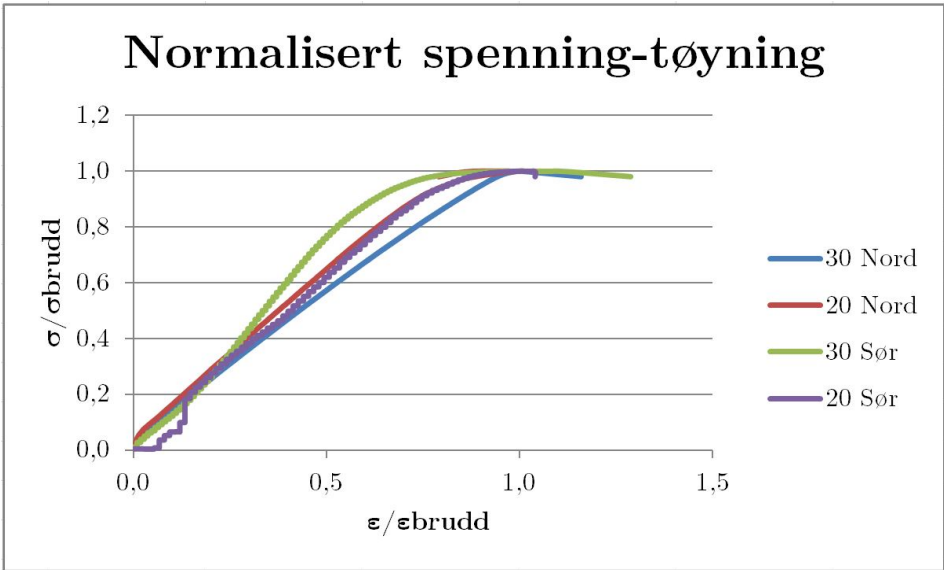
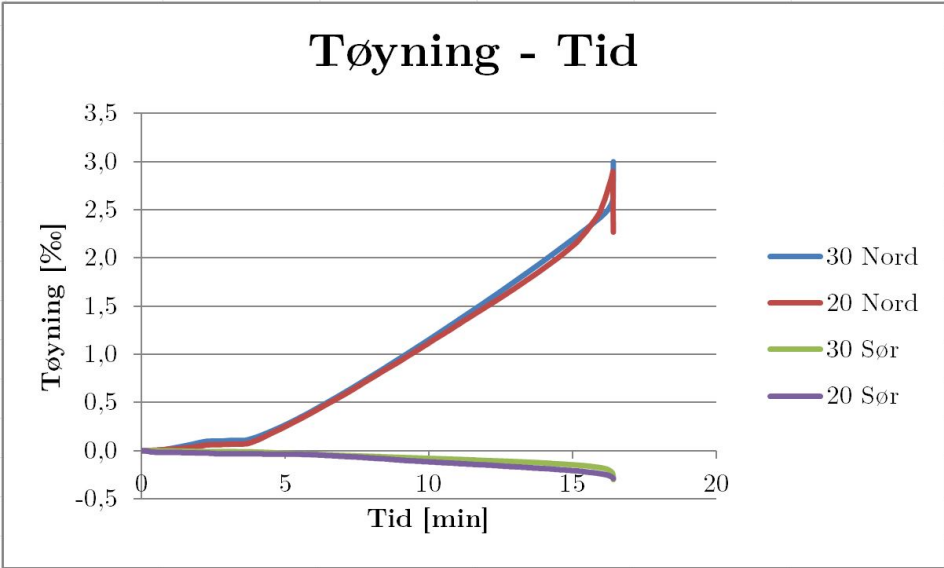
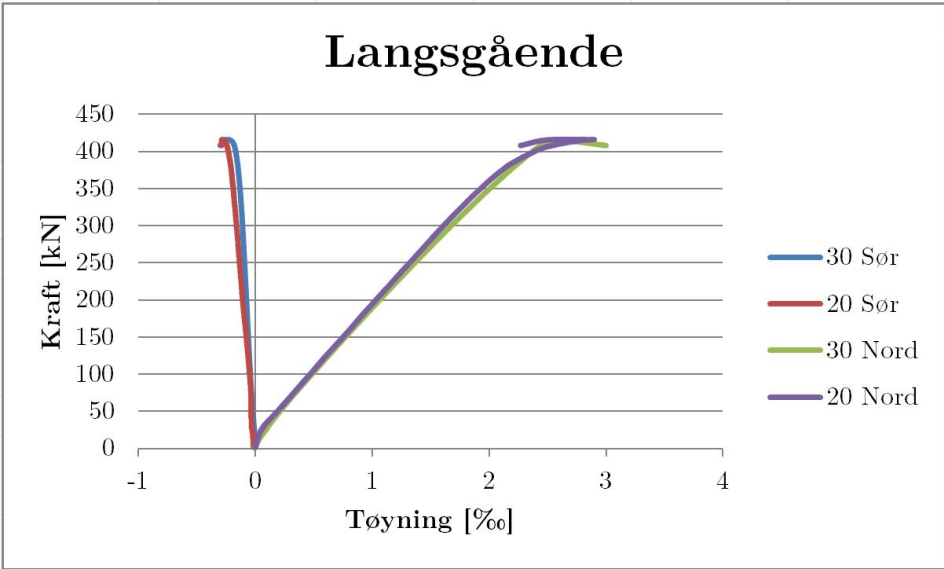


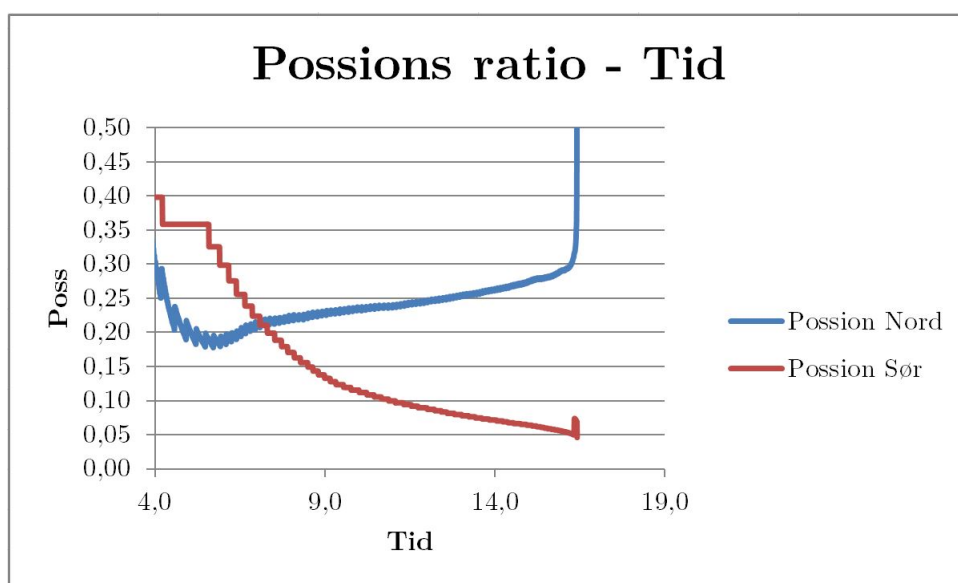
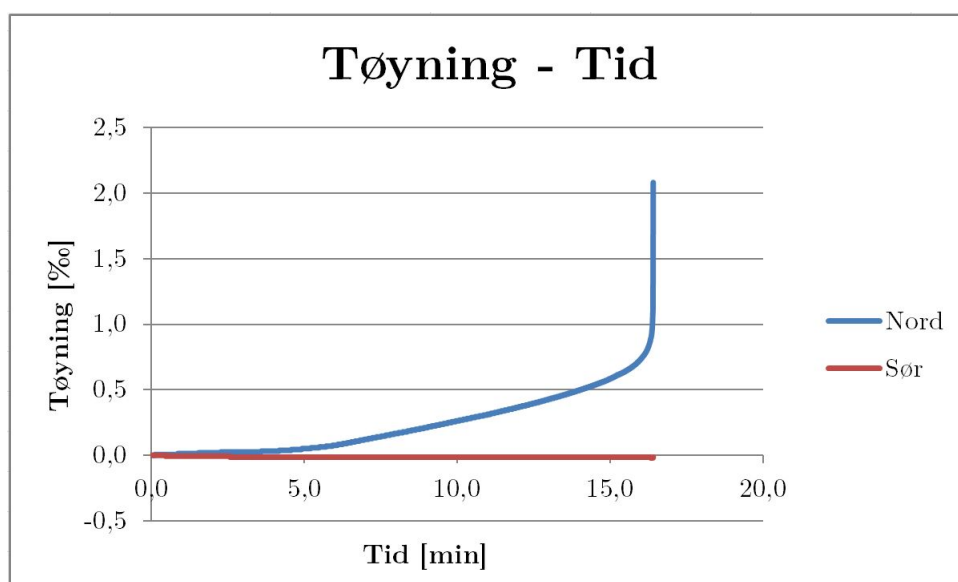
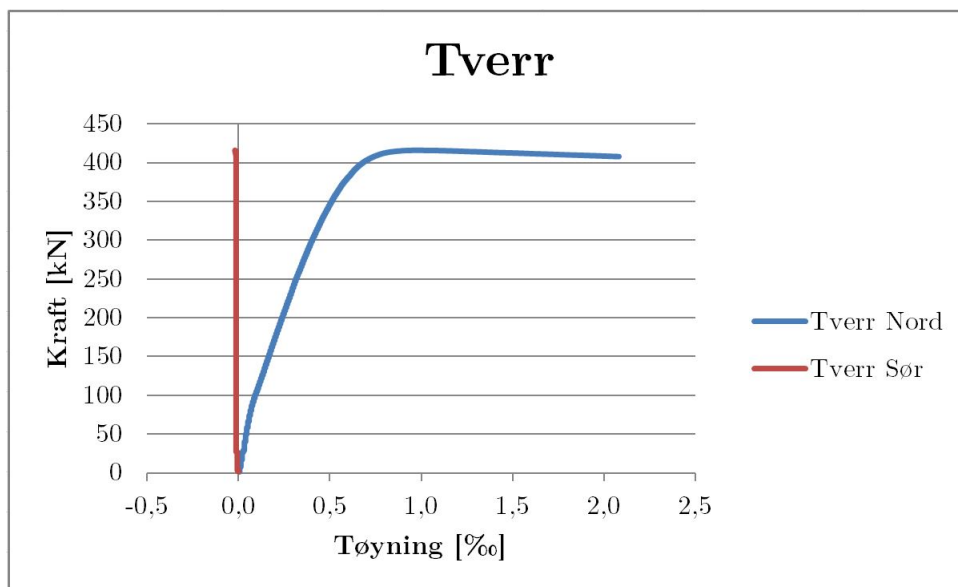




F.3 LWC - 0,0% søyle 3

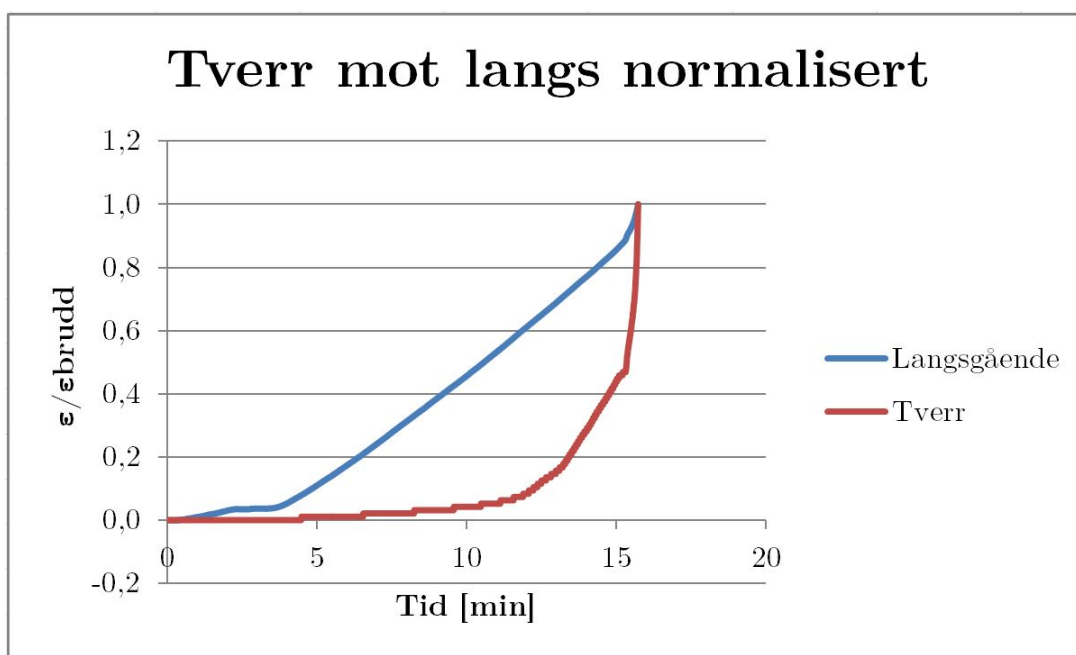
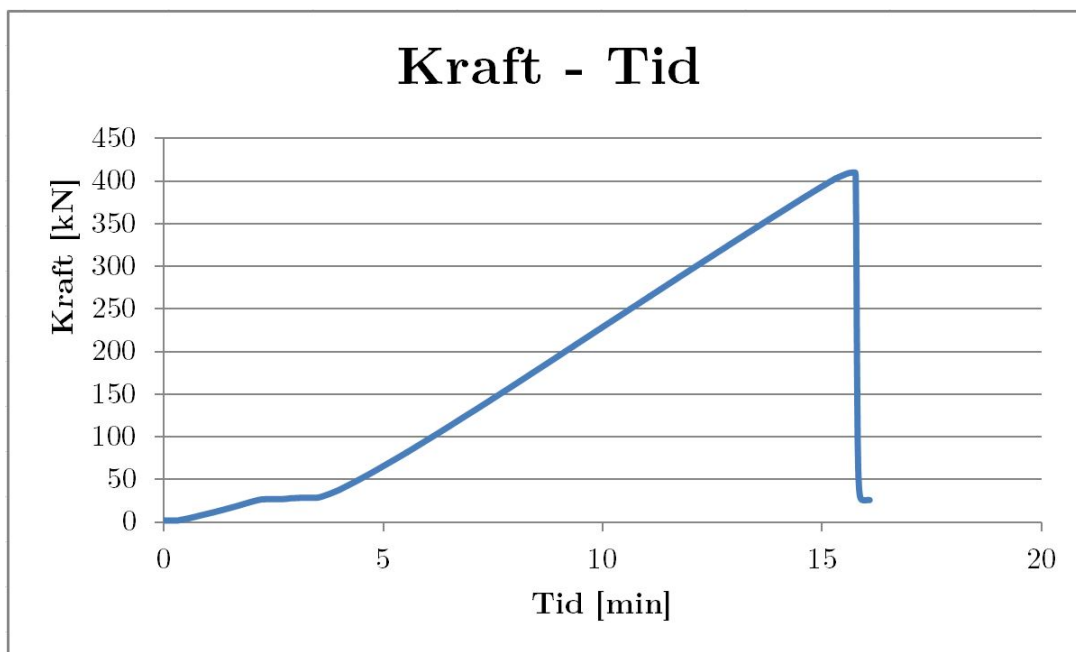


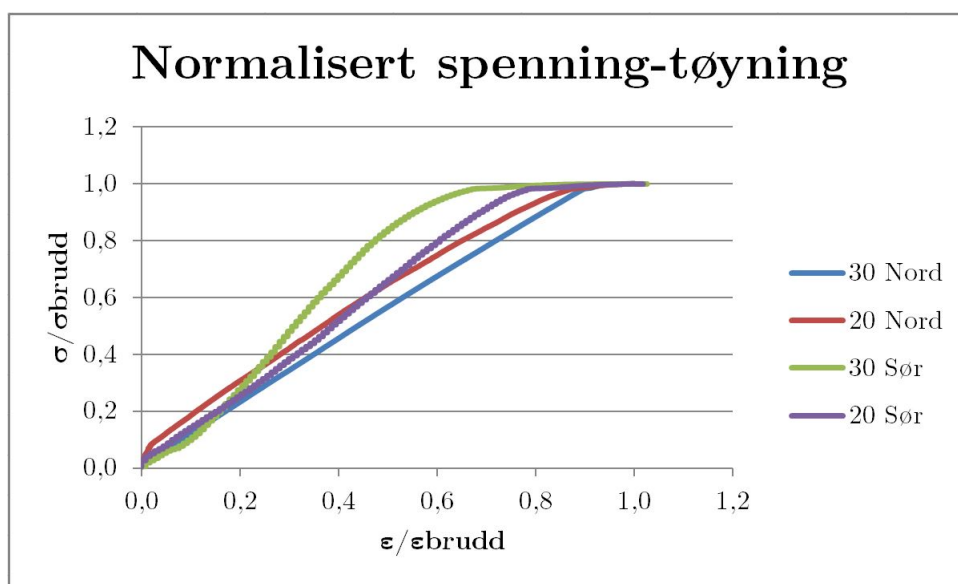
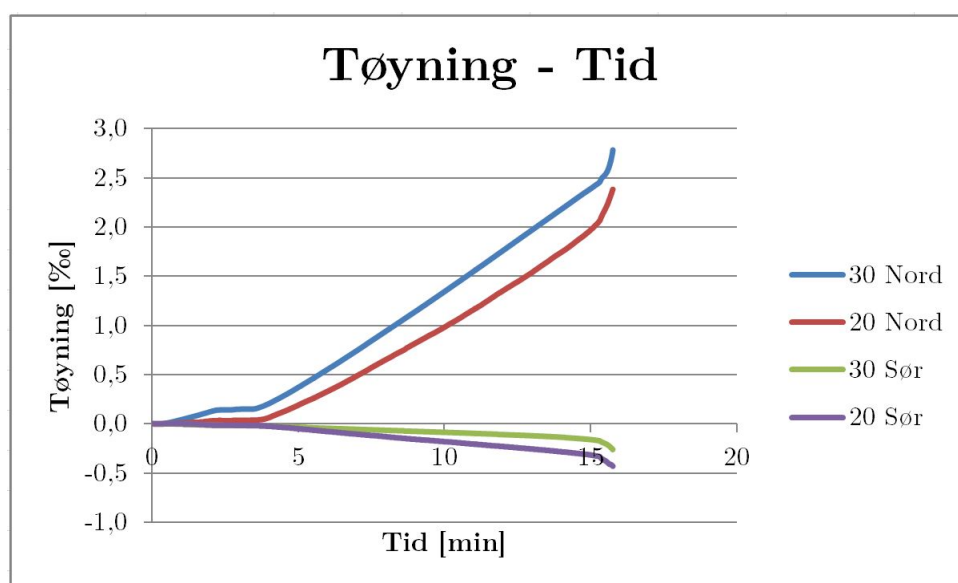
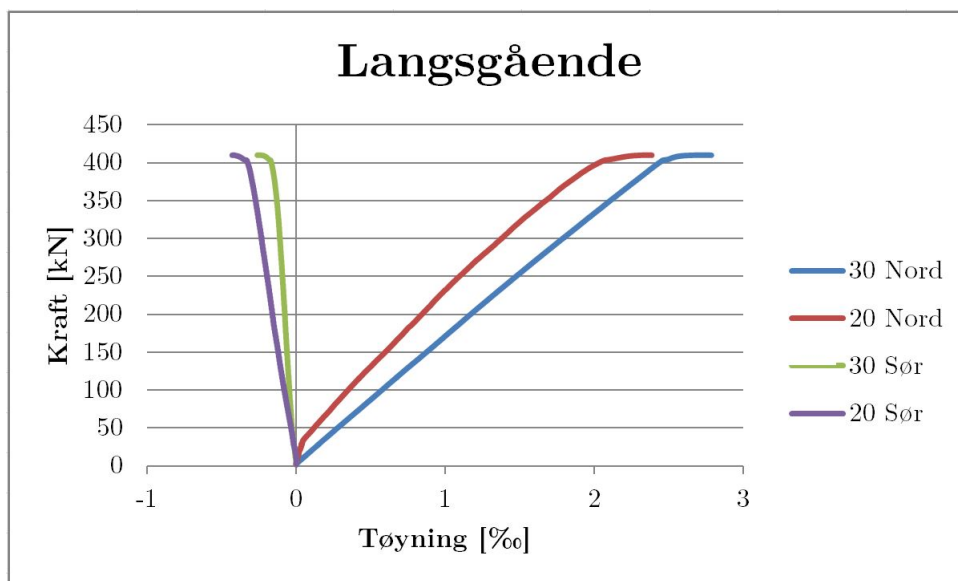


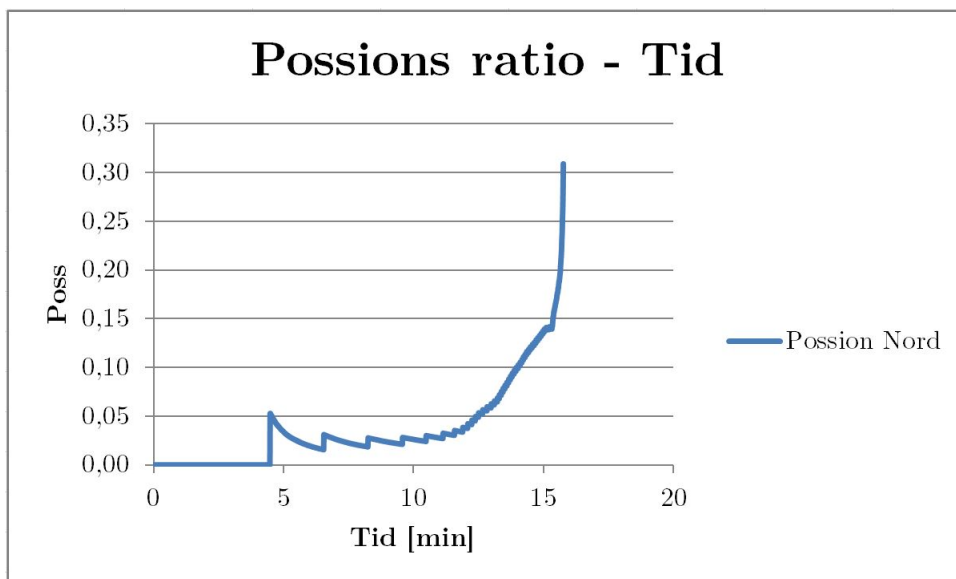
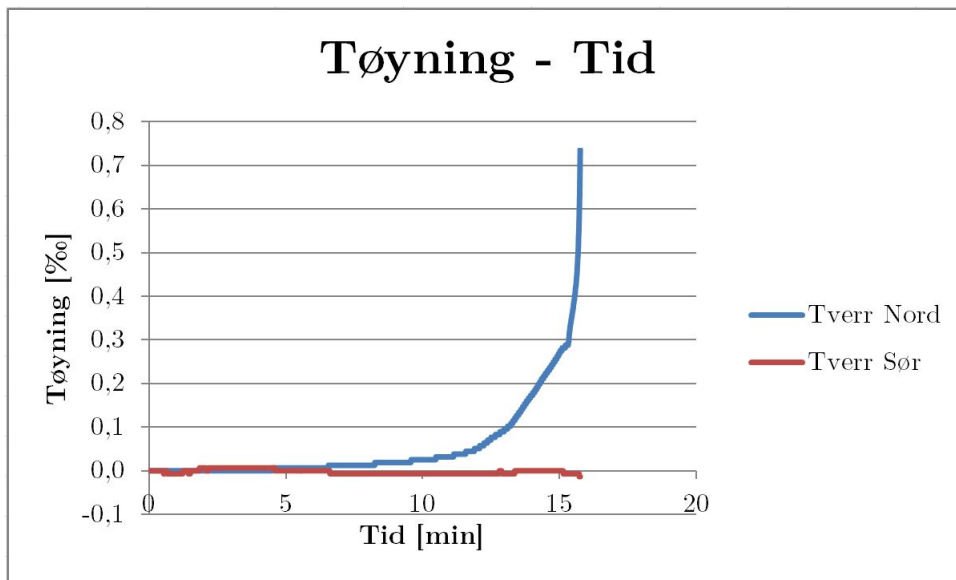
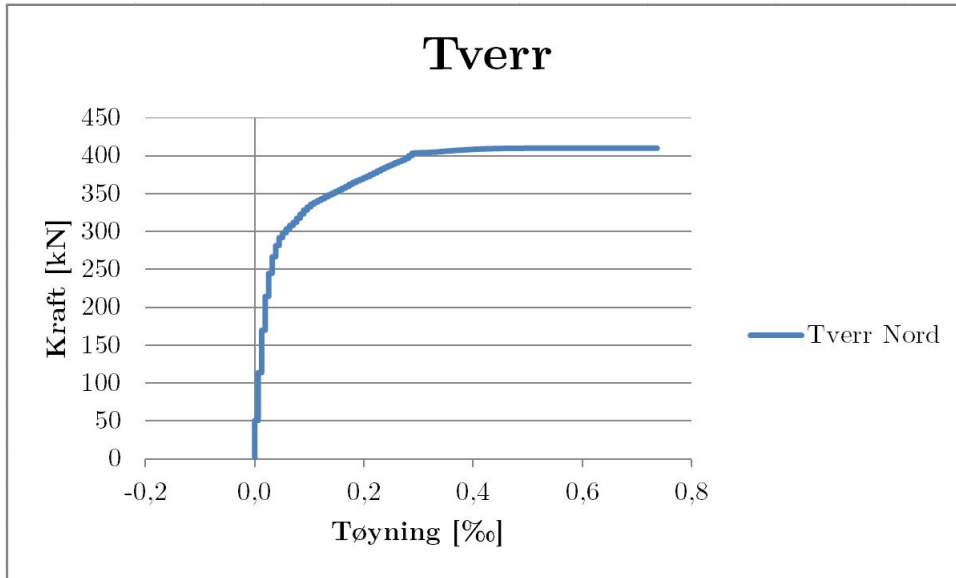




F.4 LWC - 0,0% søyle 4

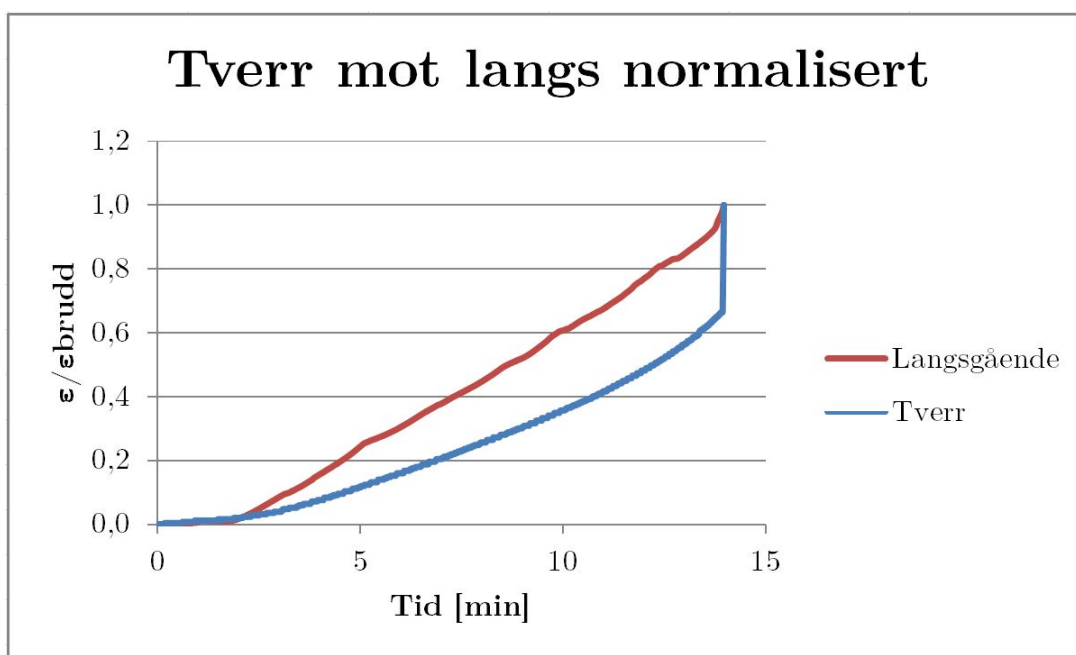
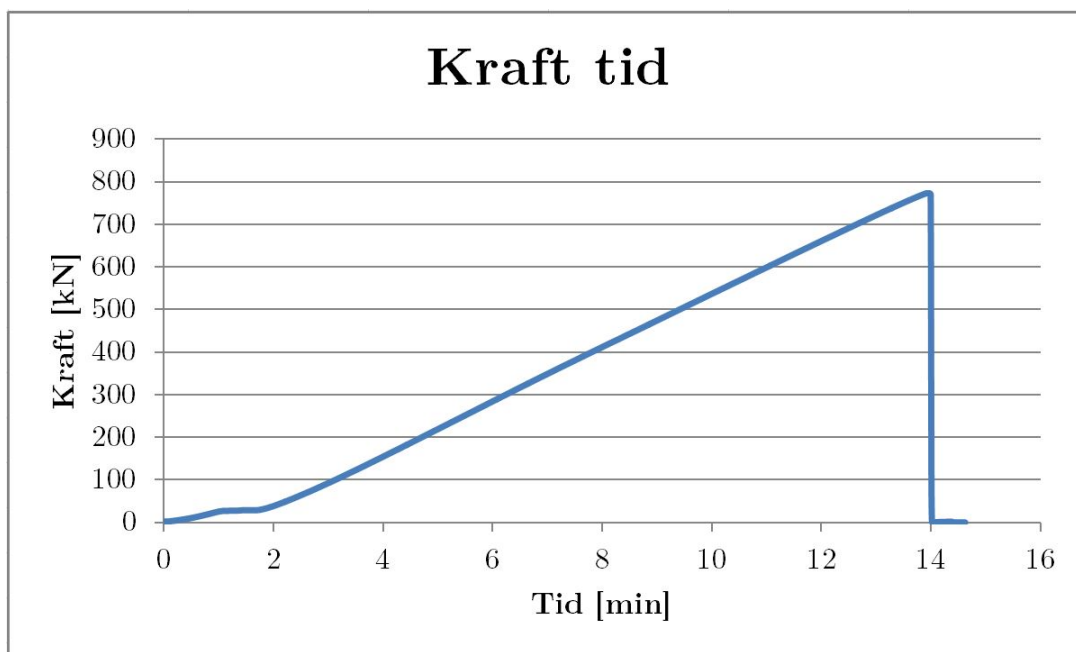


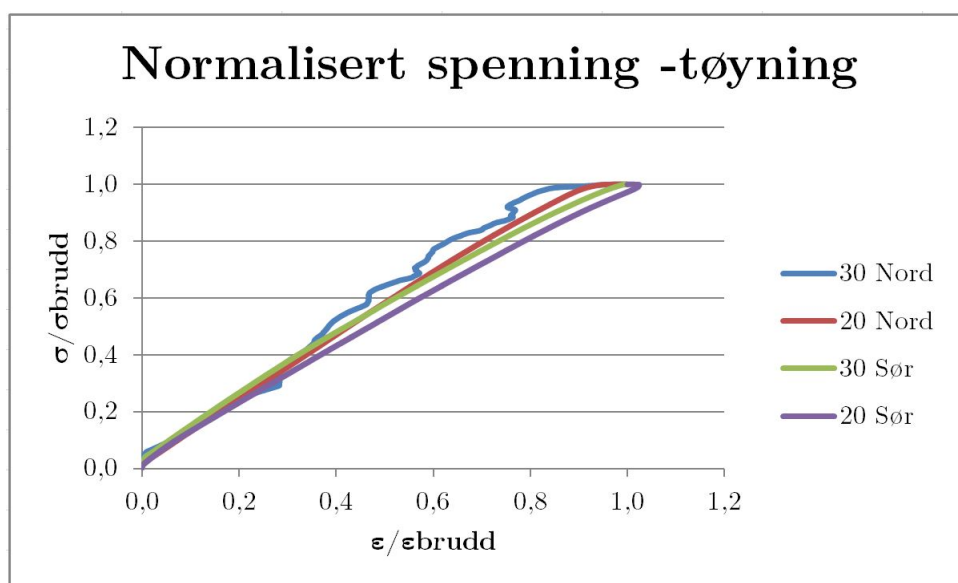
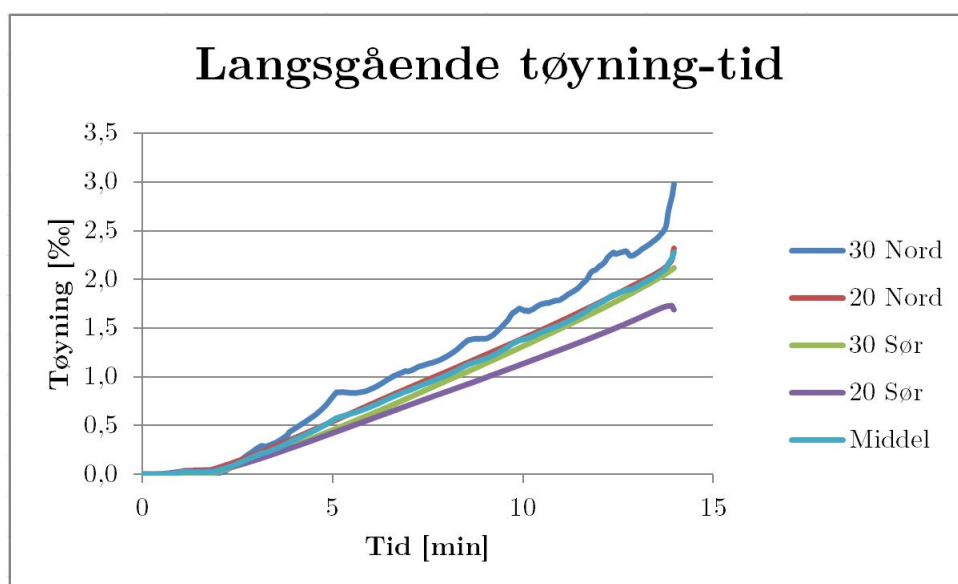
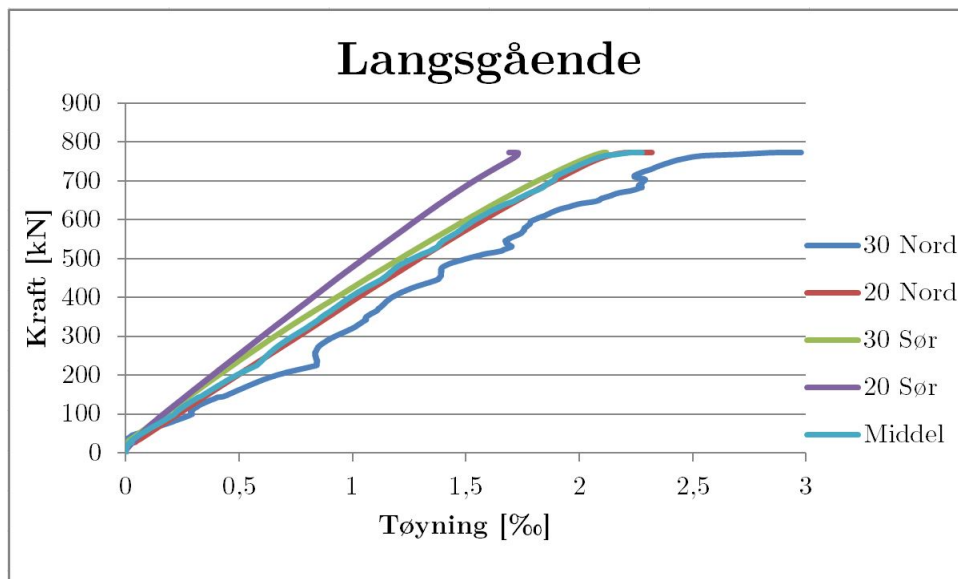


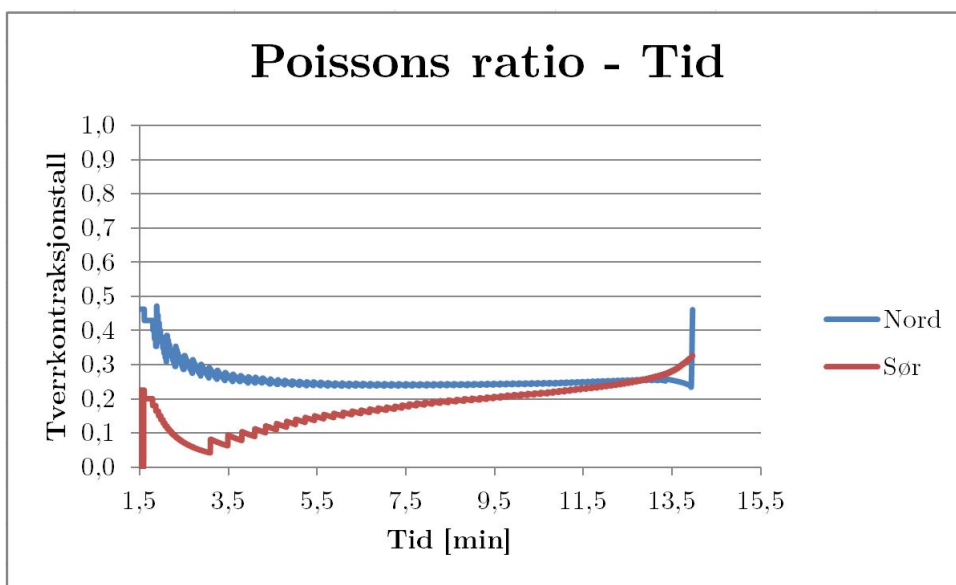
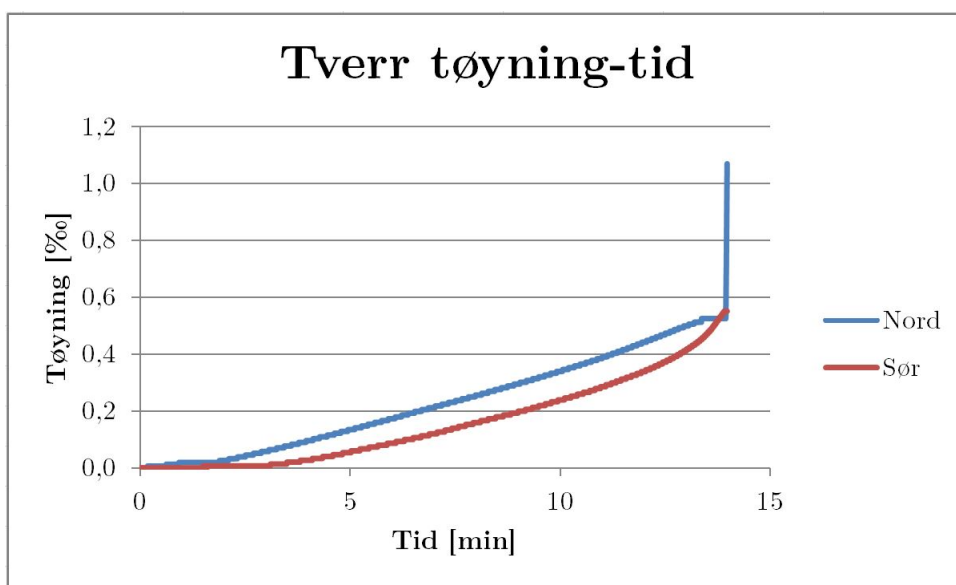
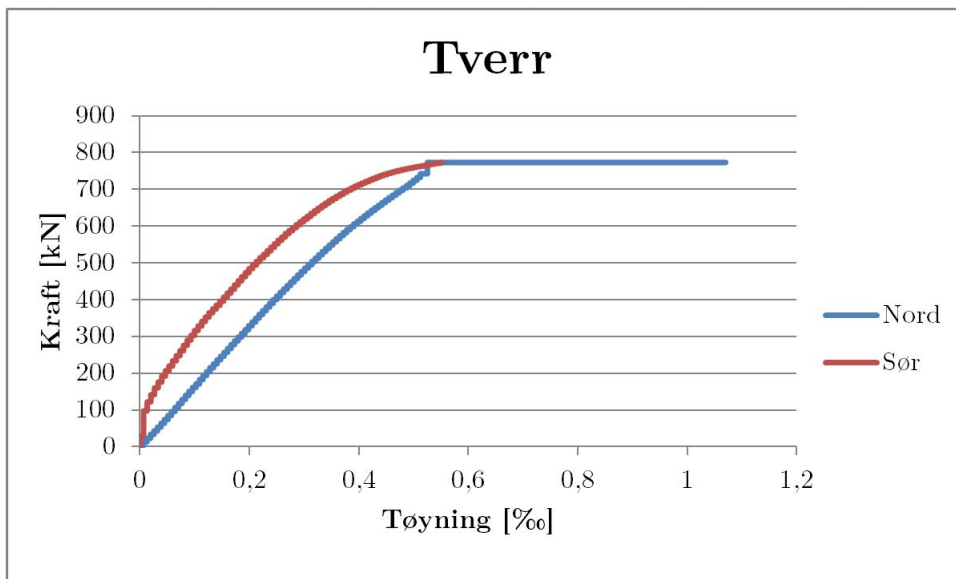




F.5 LWC - 0,5% søyle 1

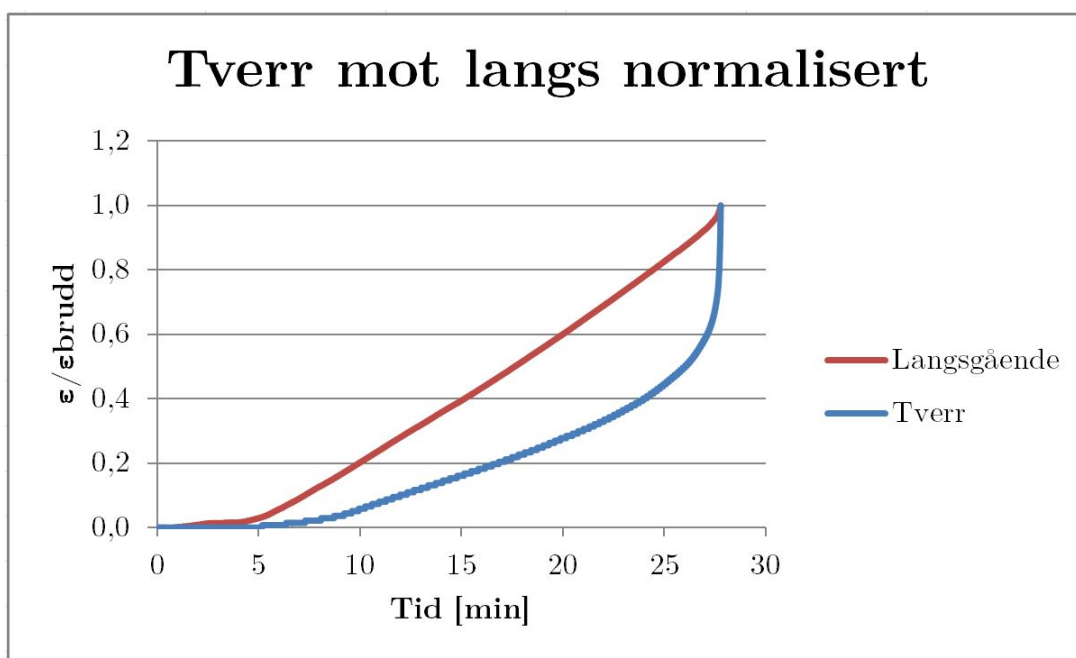
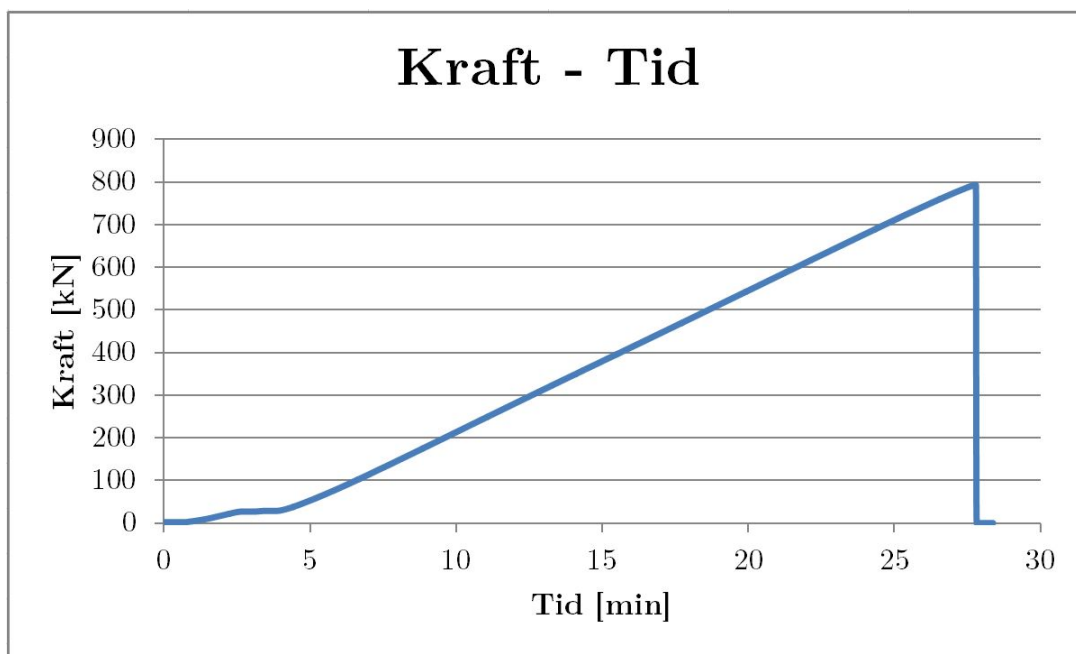


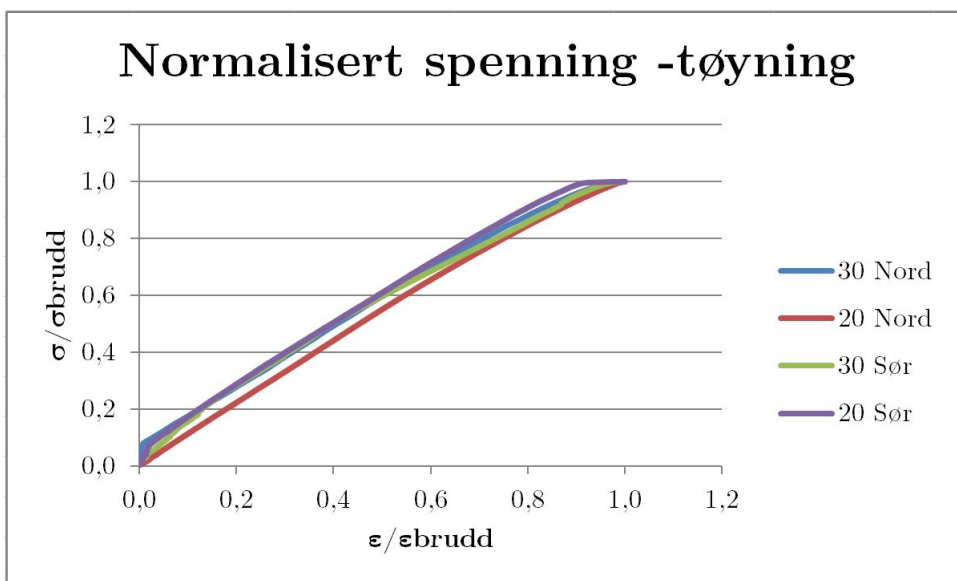
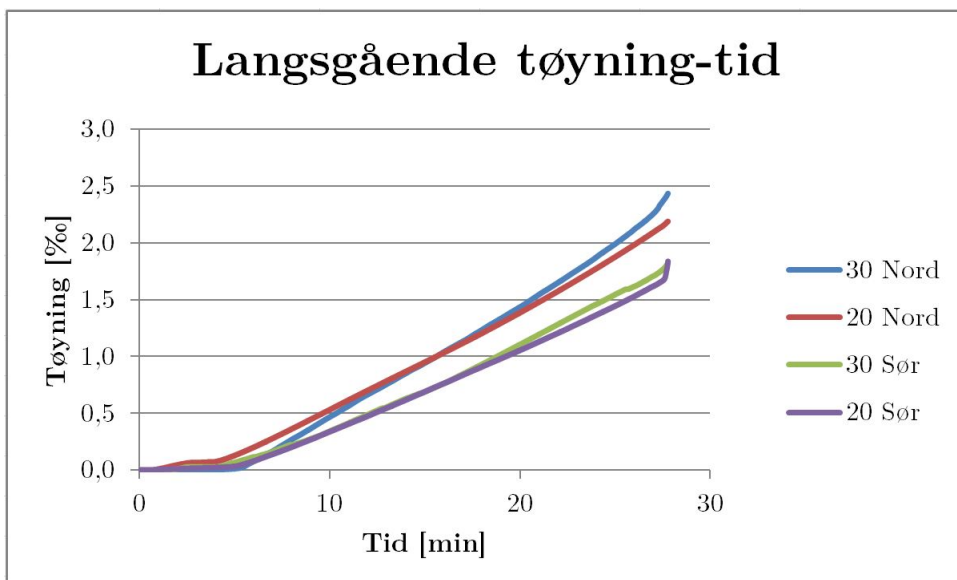
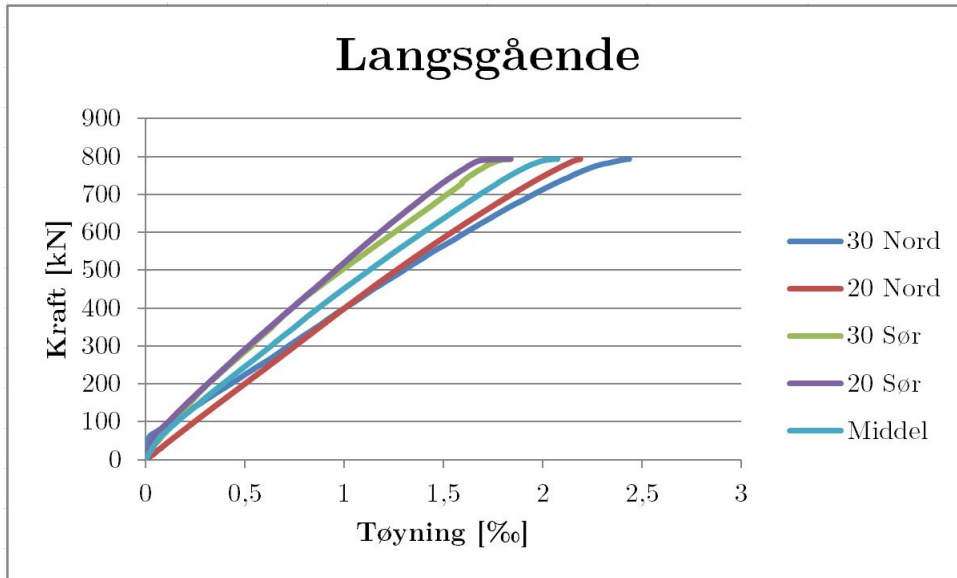


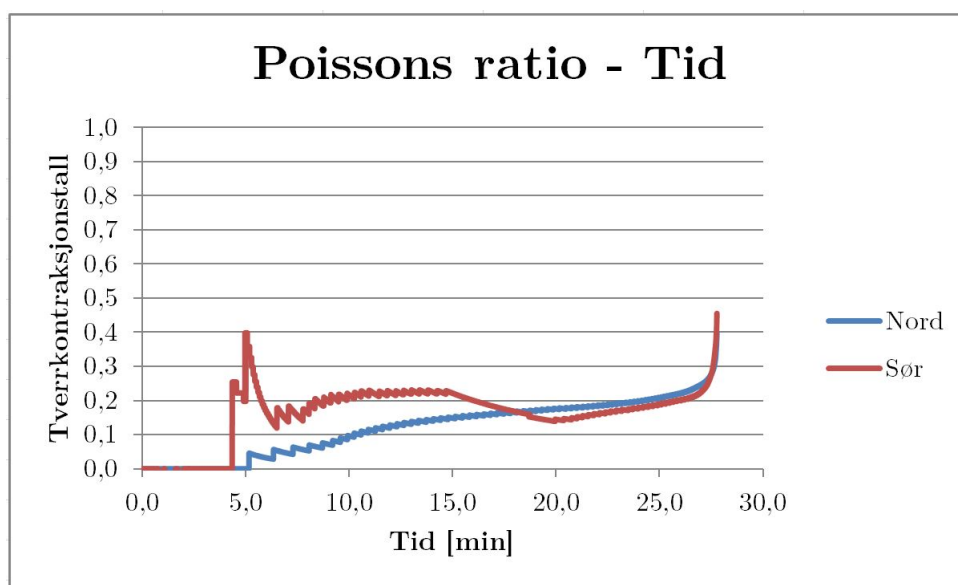
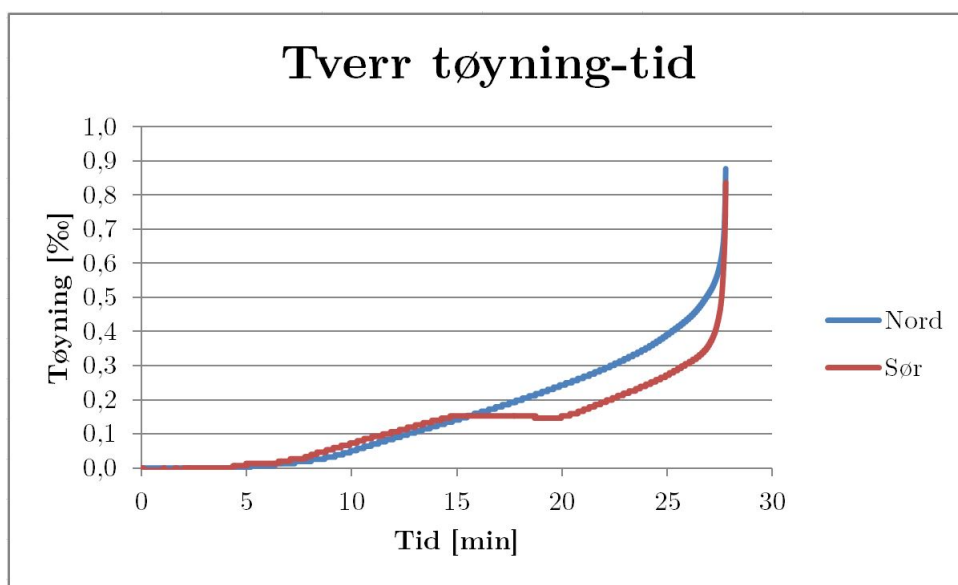
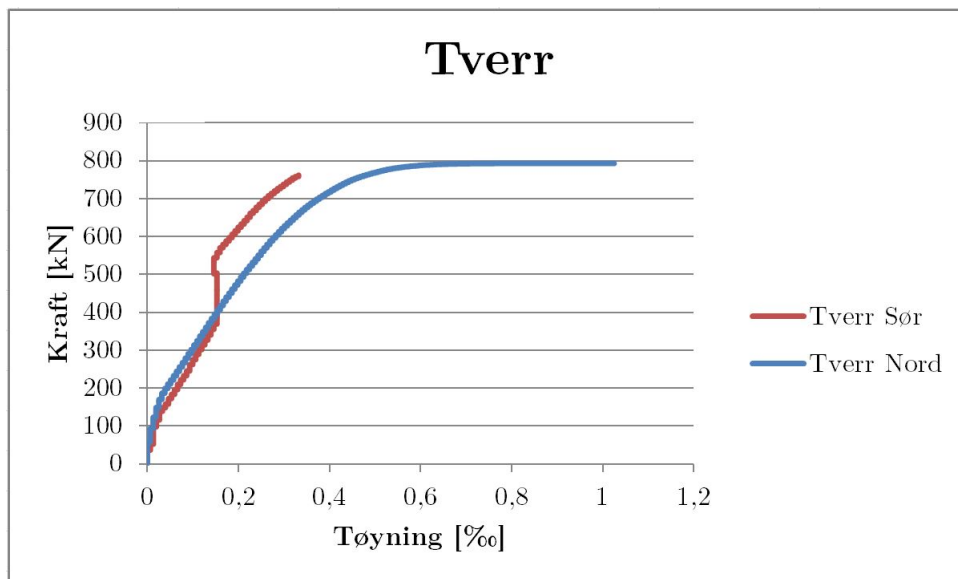




F.6 LWC - 0,5% søyle 2

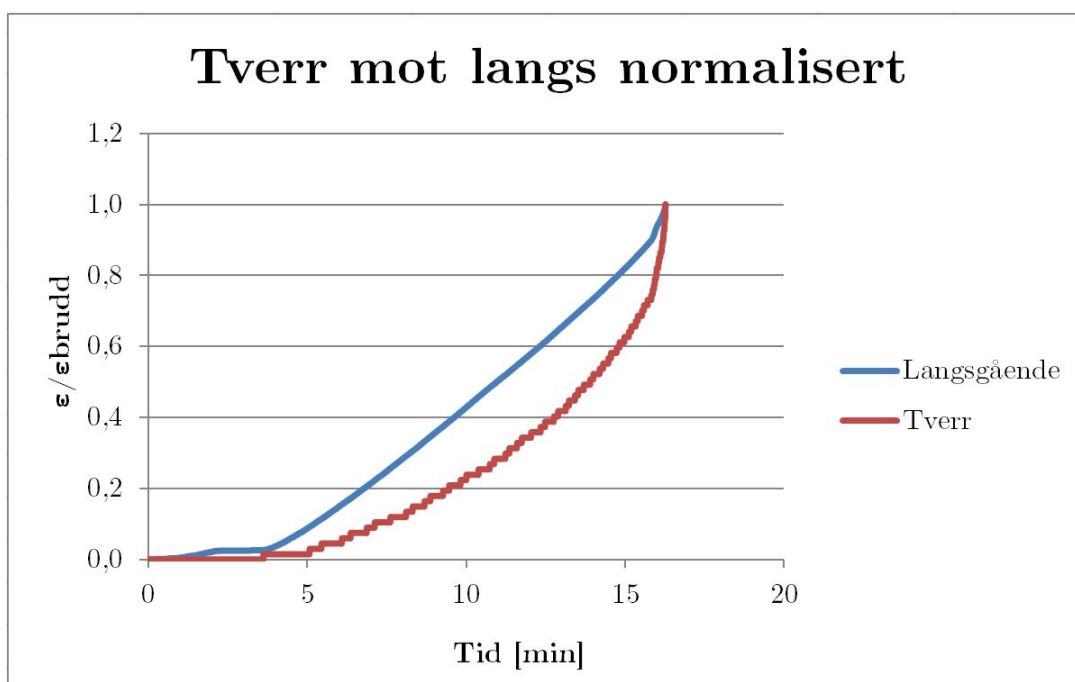
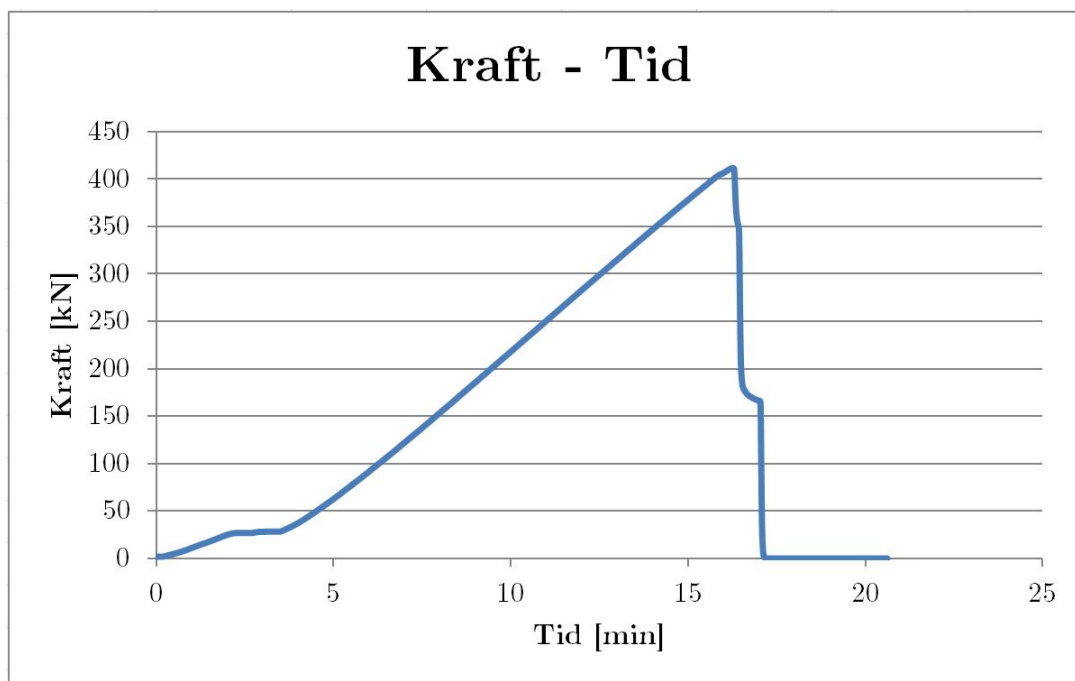


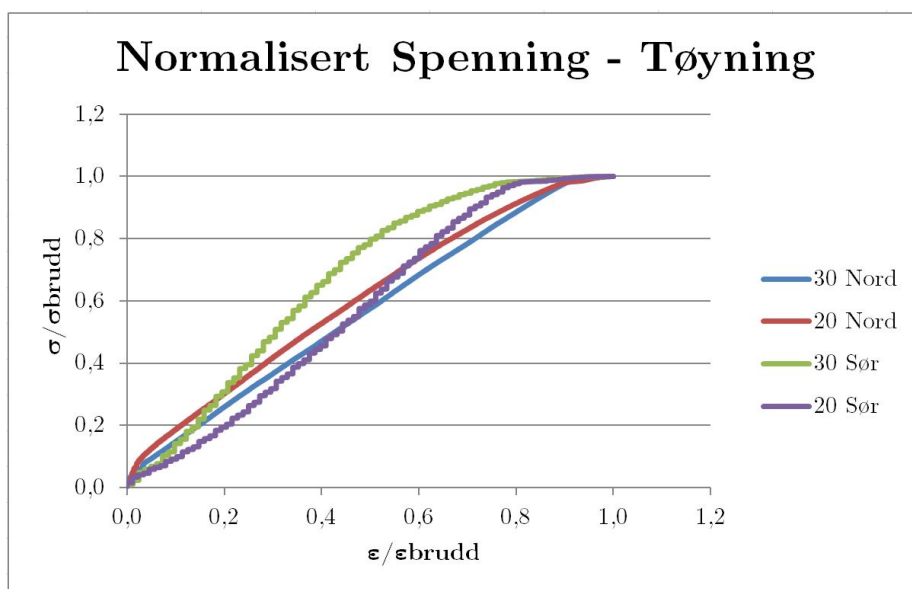
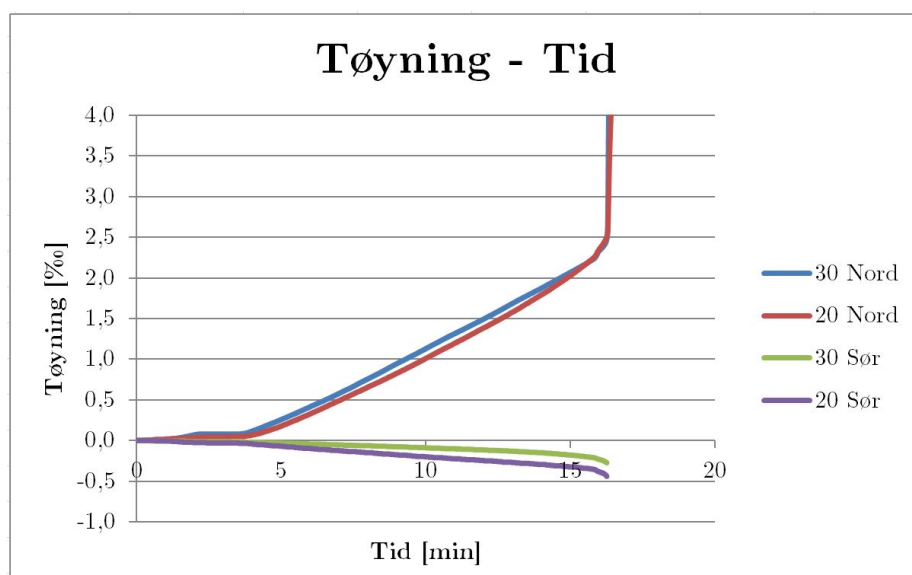
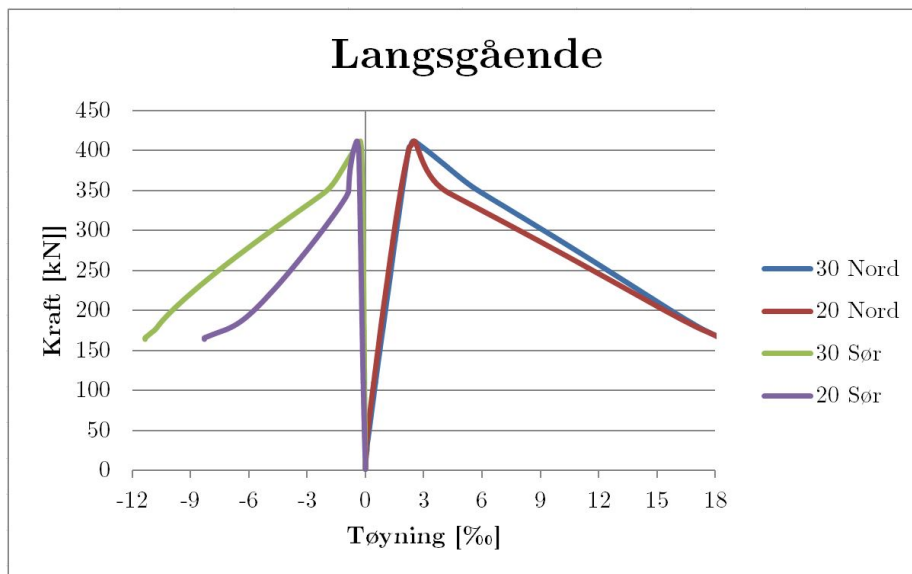


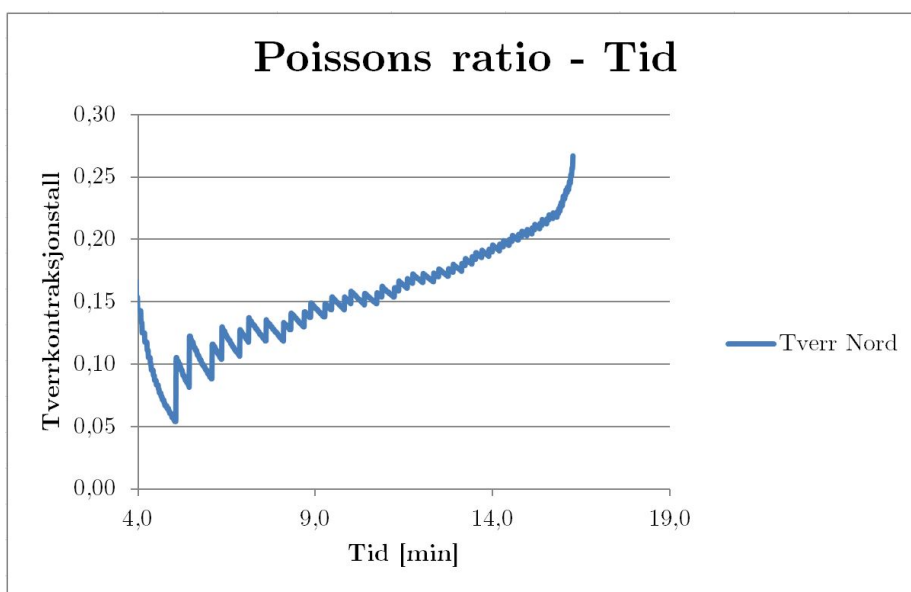
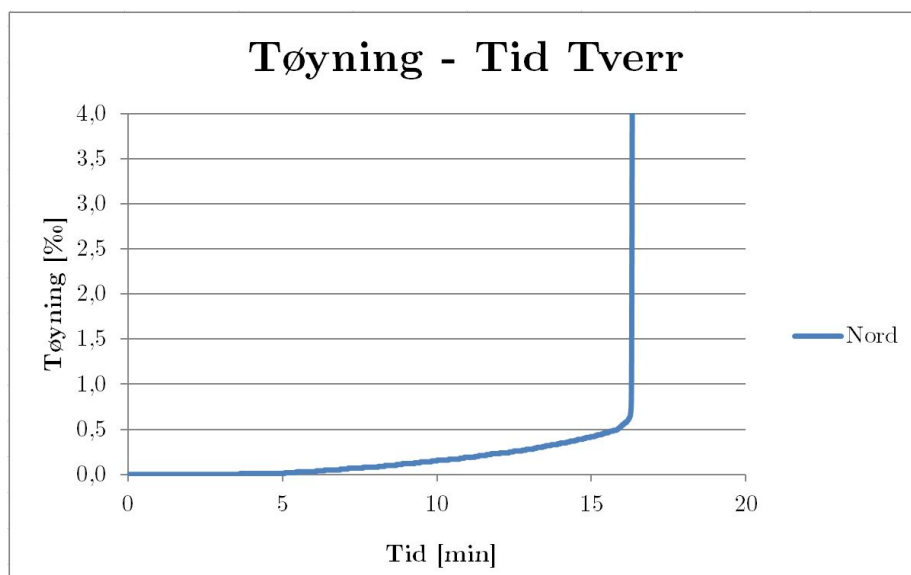
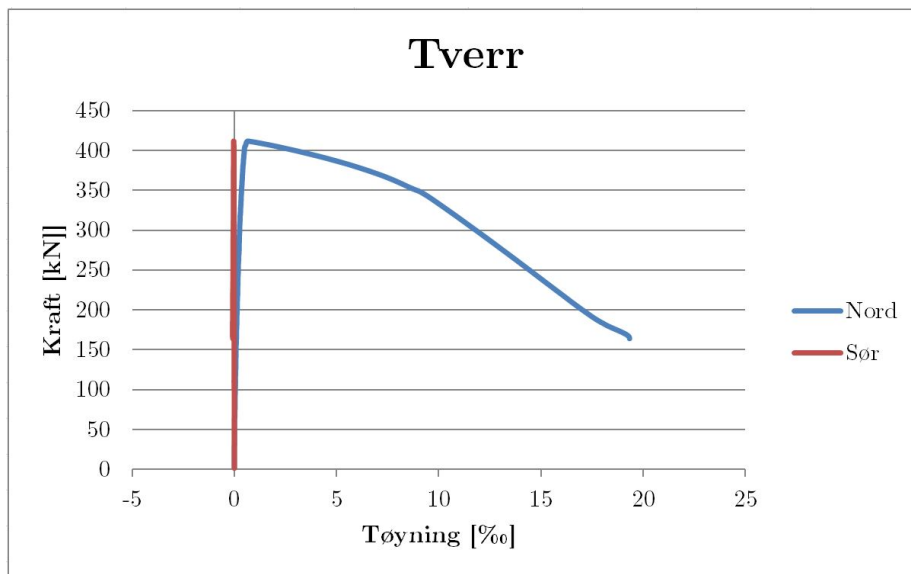




F.7 LWC - 0,5% søyle 3

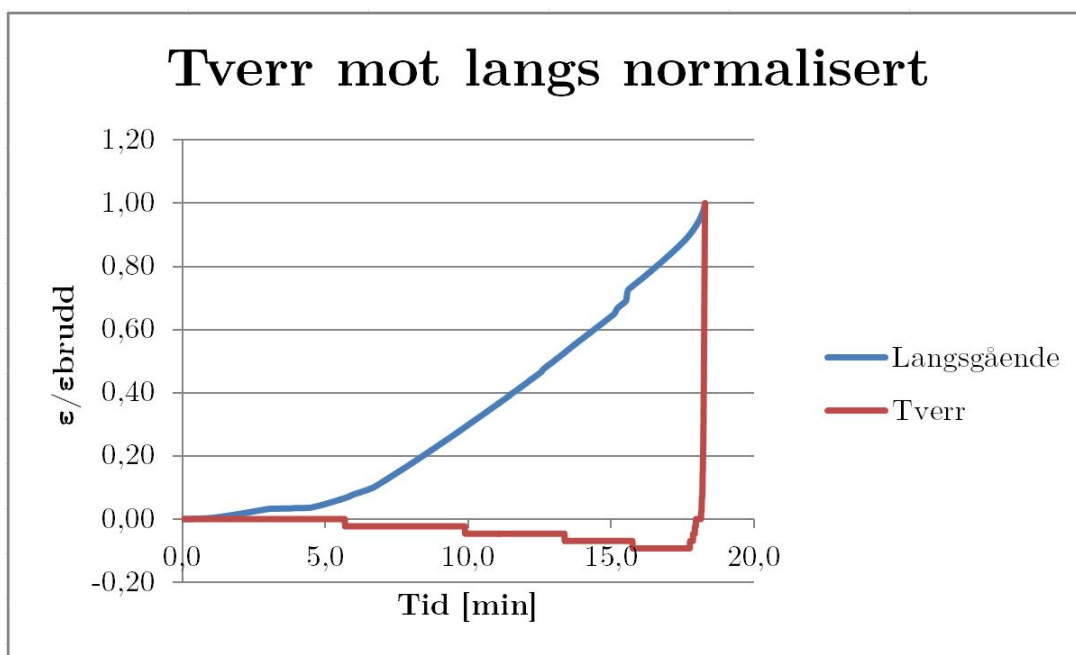
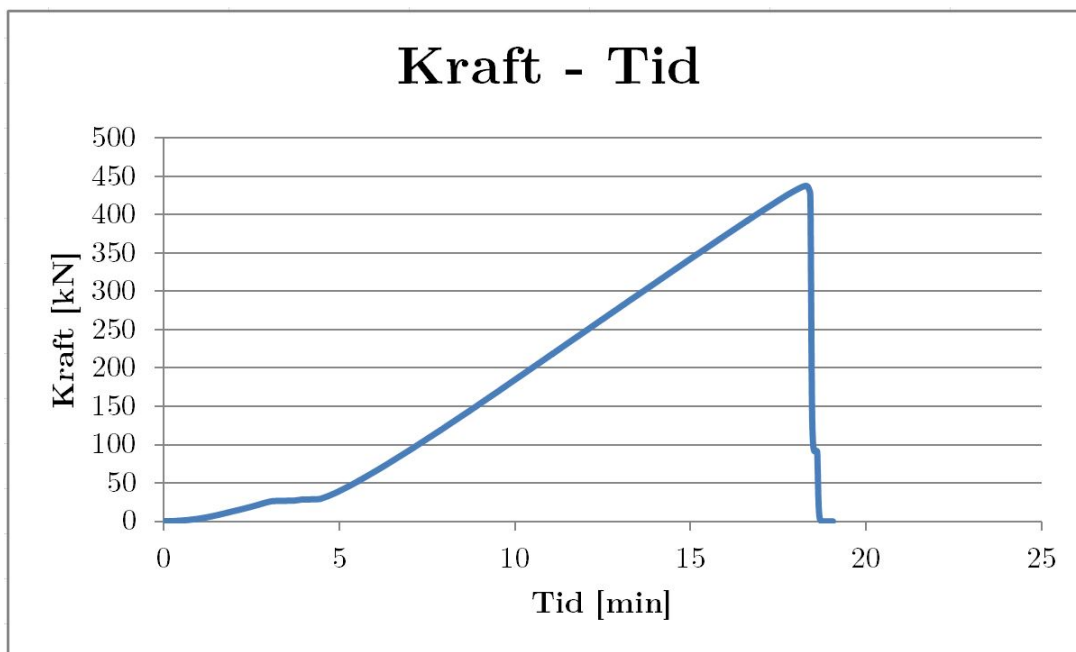


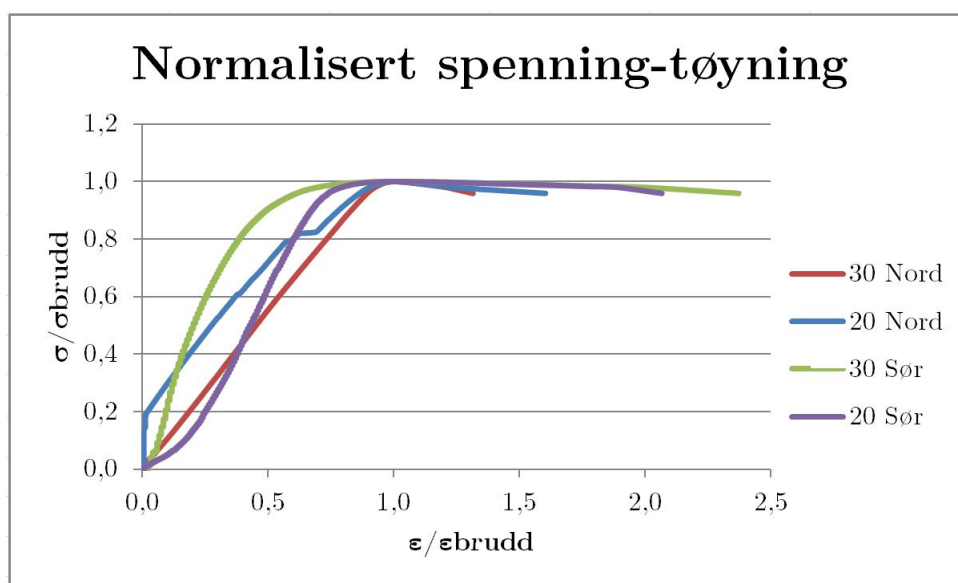
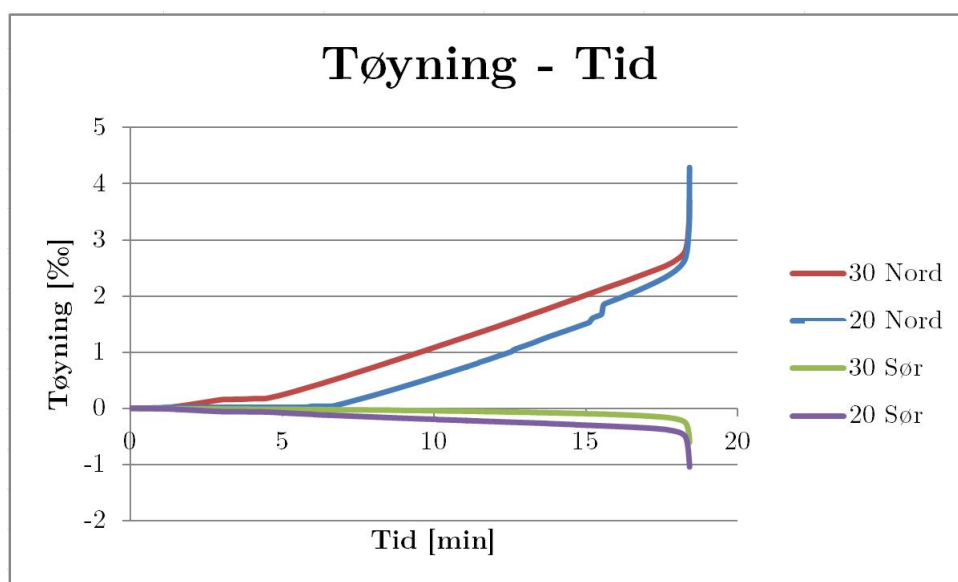
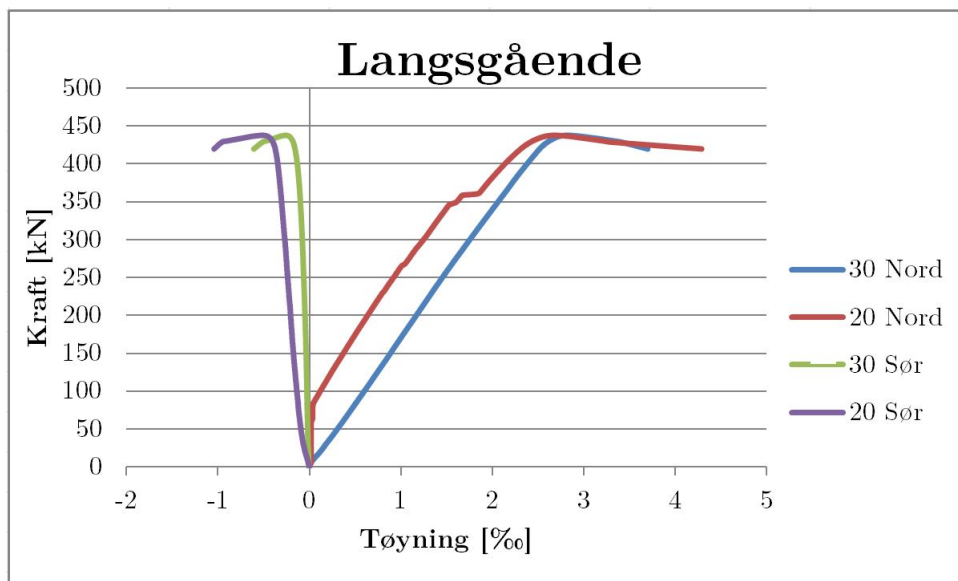


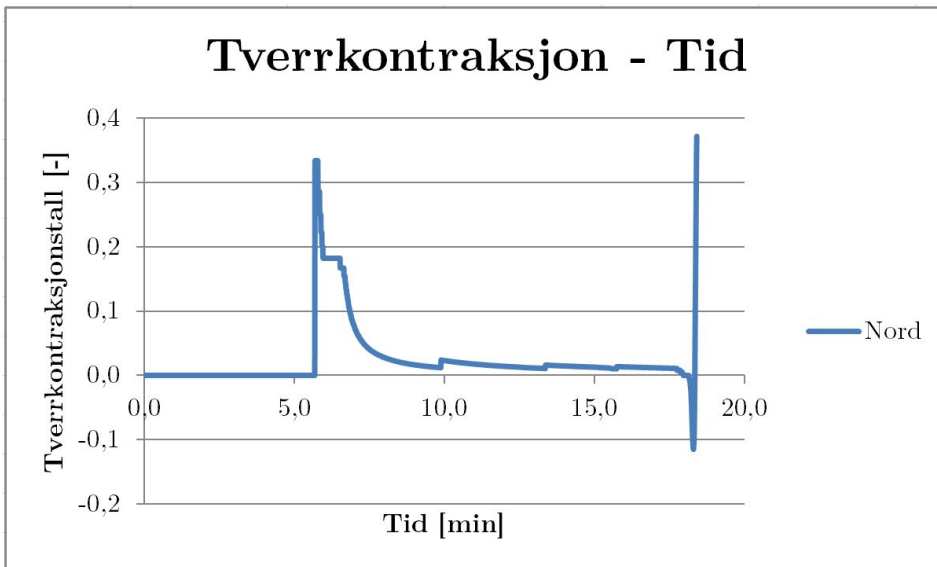
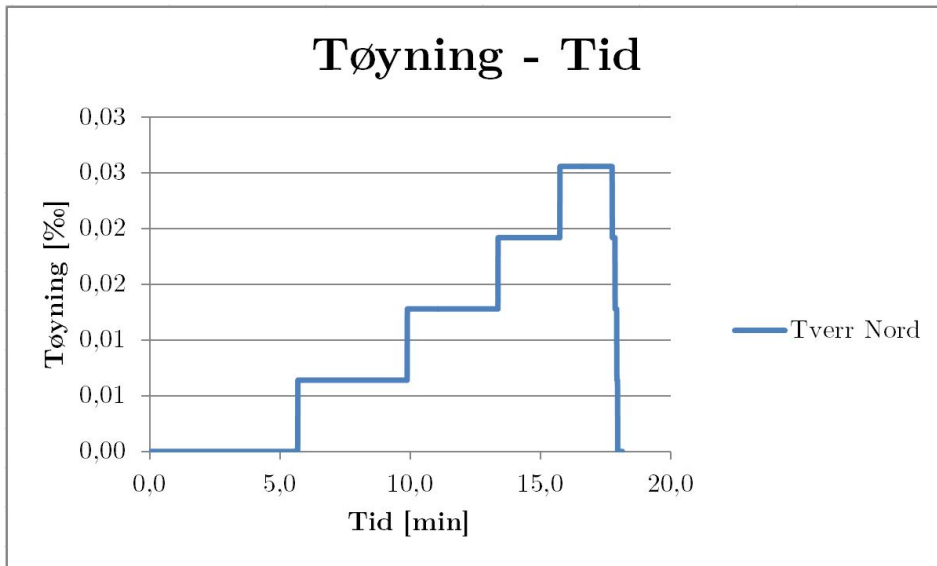
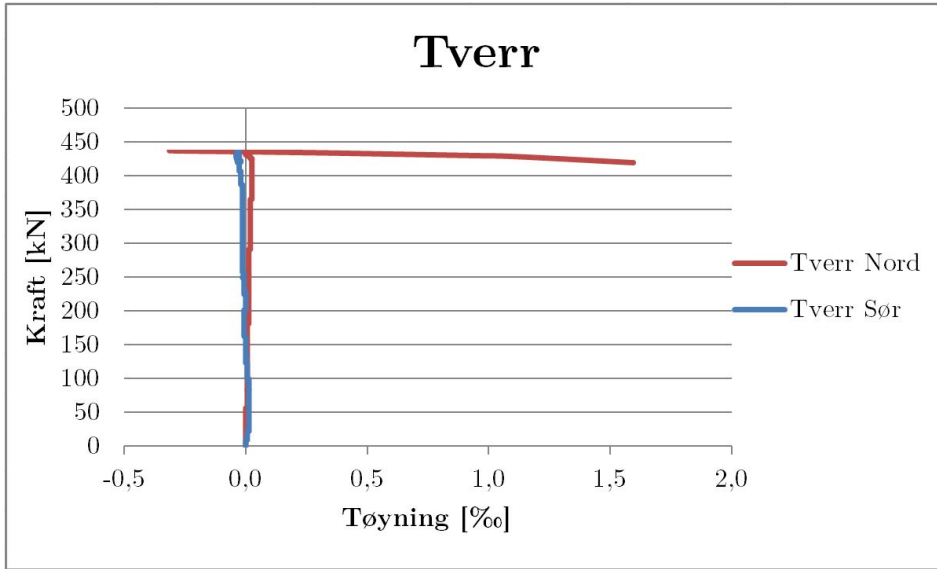


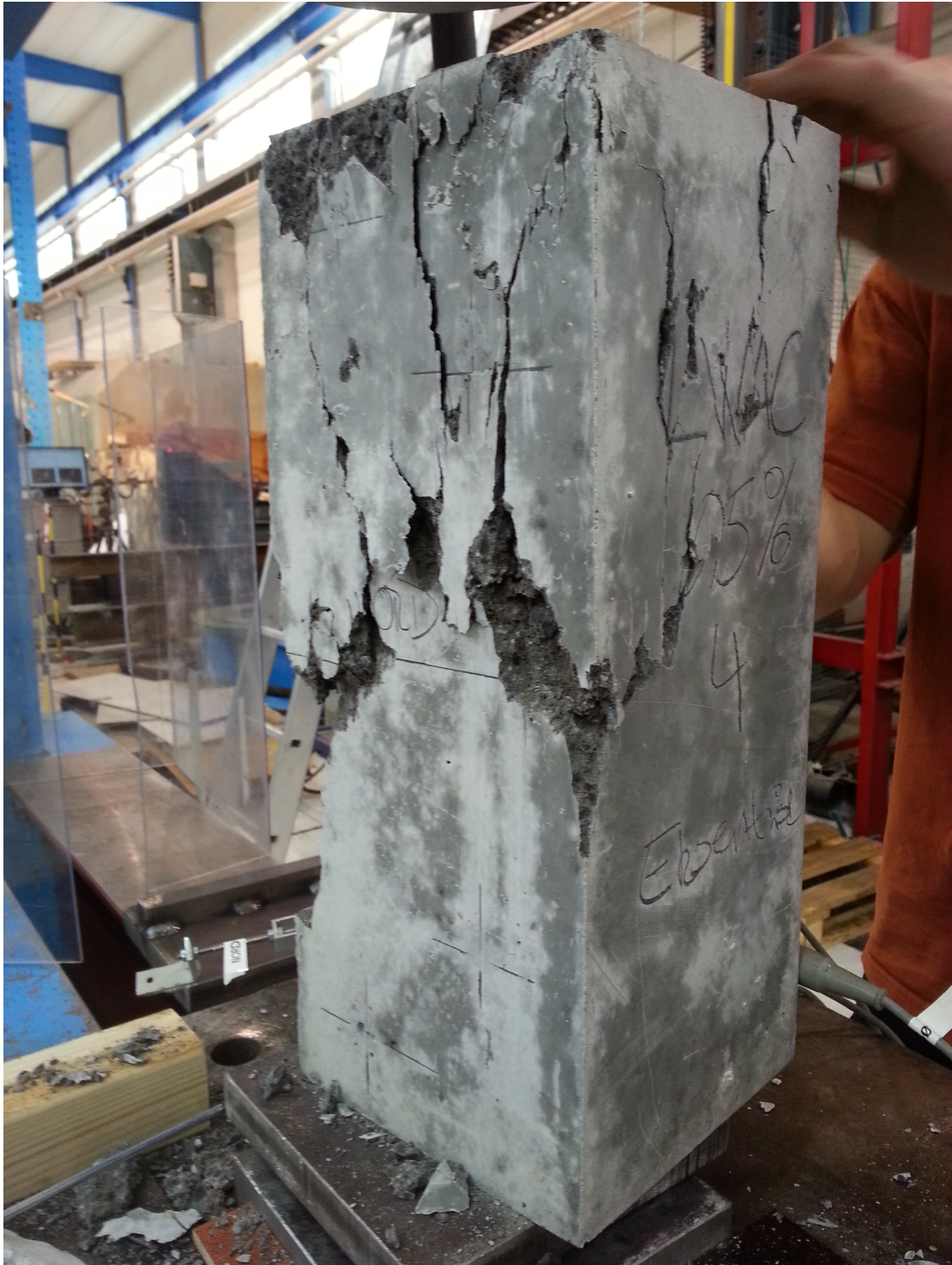


F.8 LWC - 0,5% søyle 4

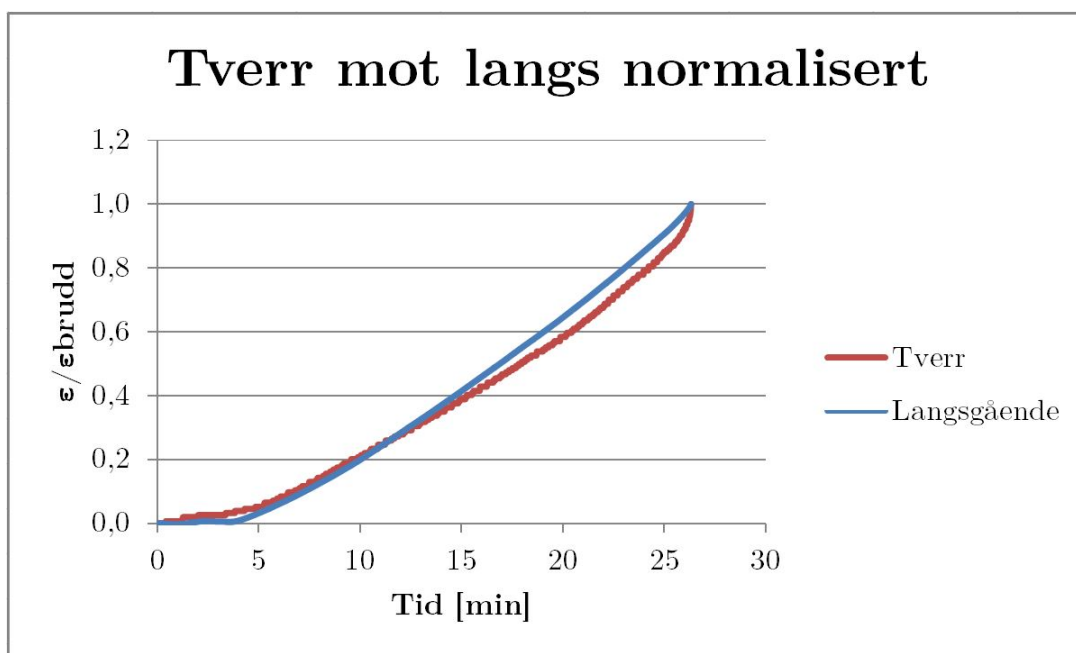
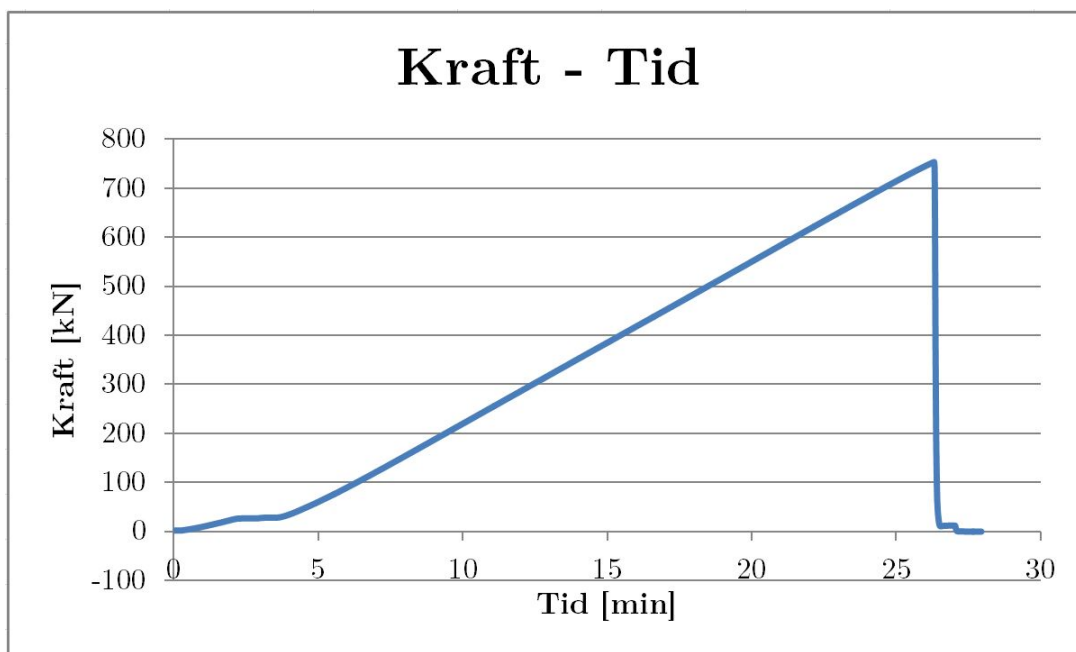


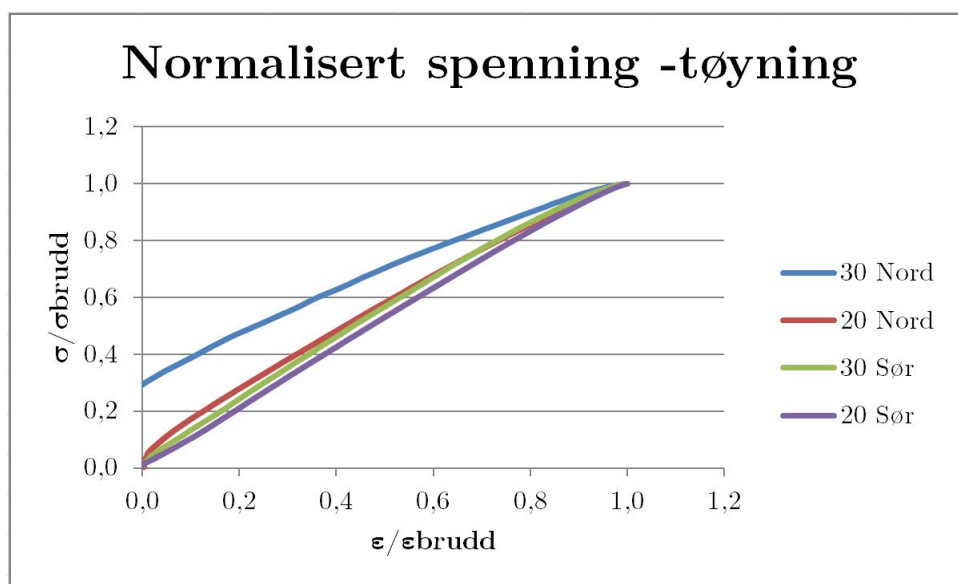
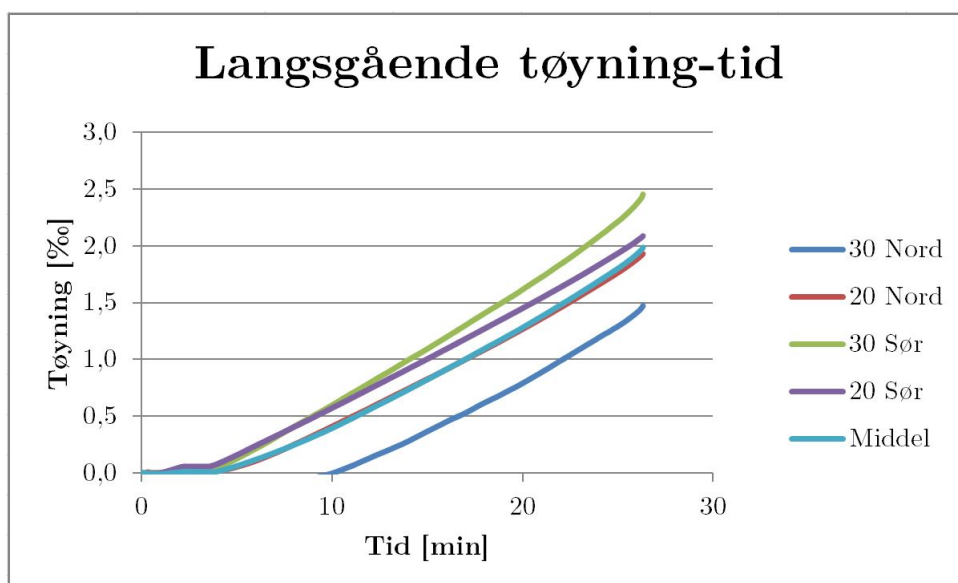
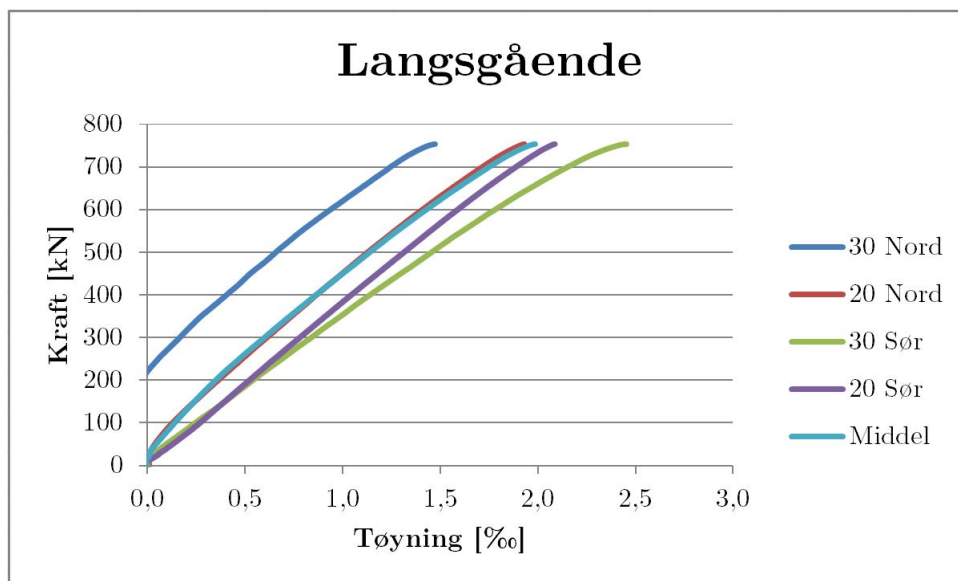


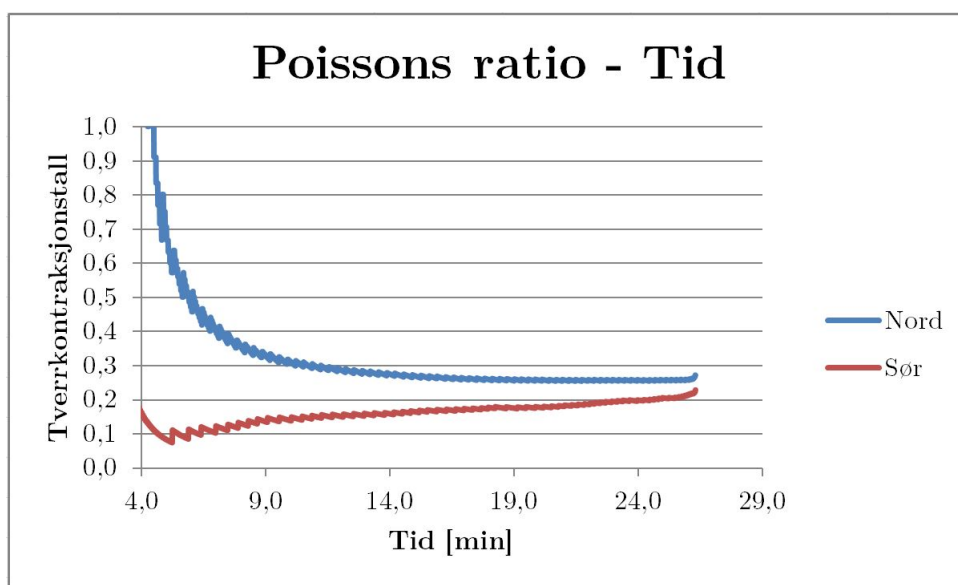
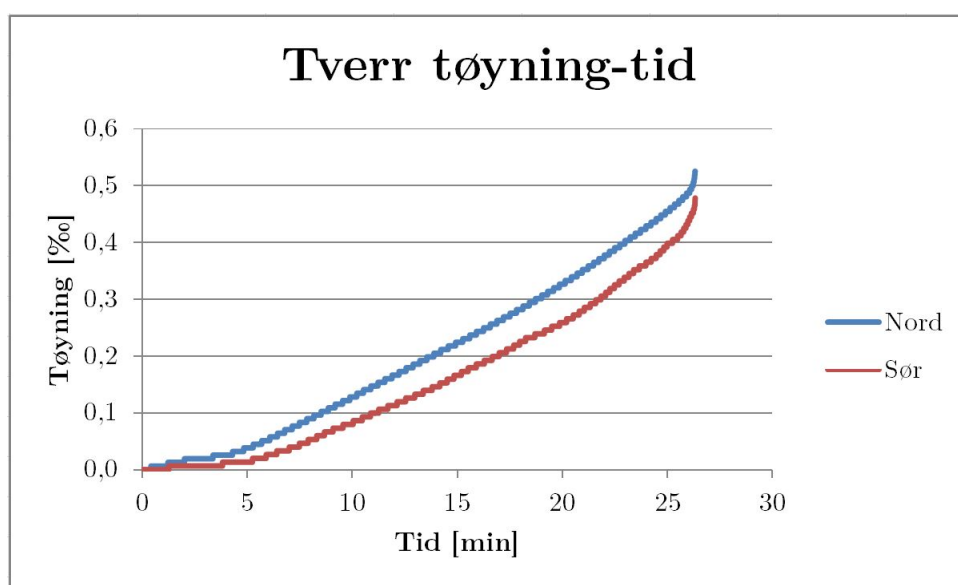
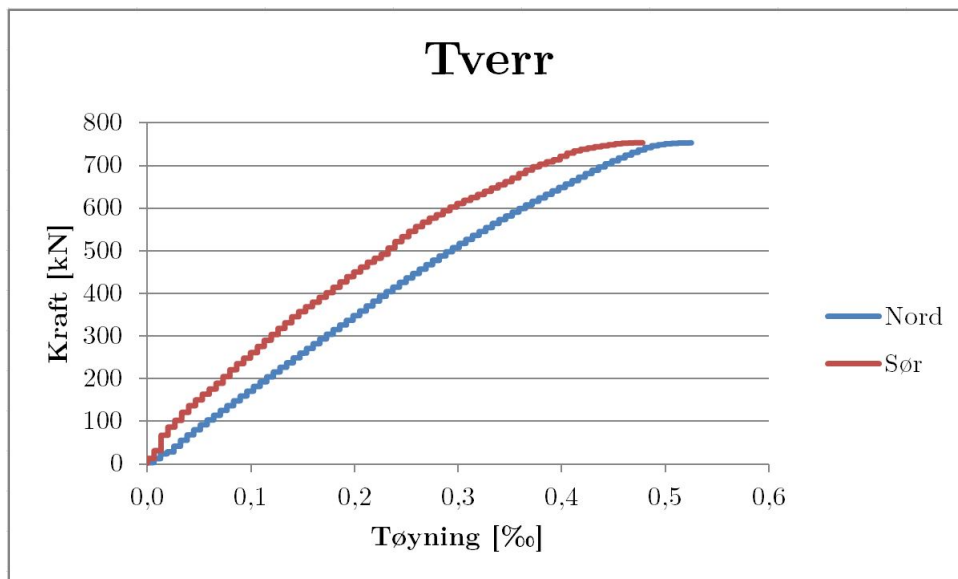




F.9 LWC - 1,0% søyle 1

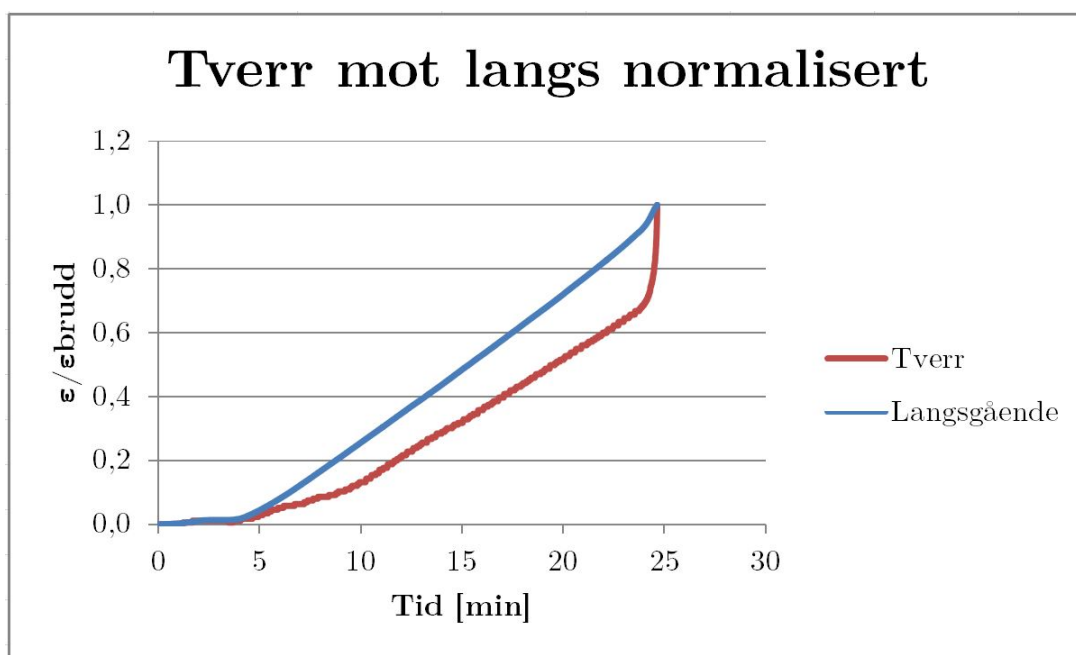
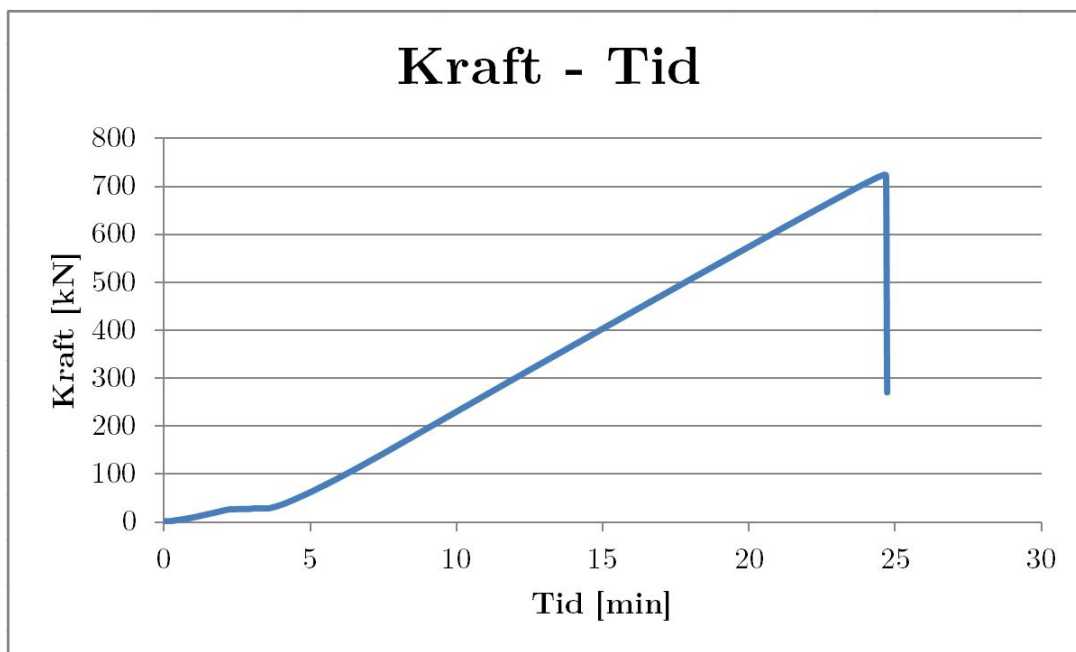


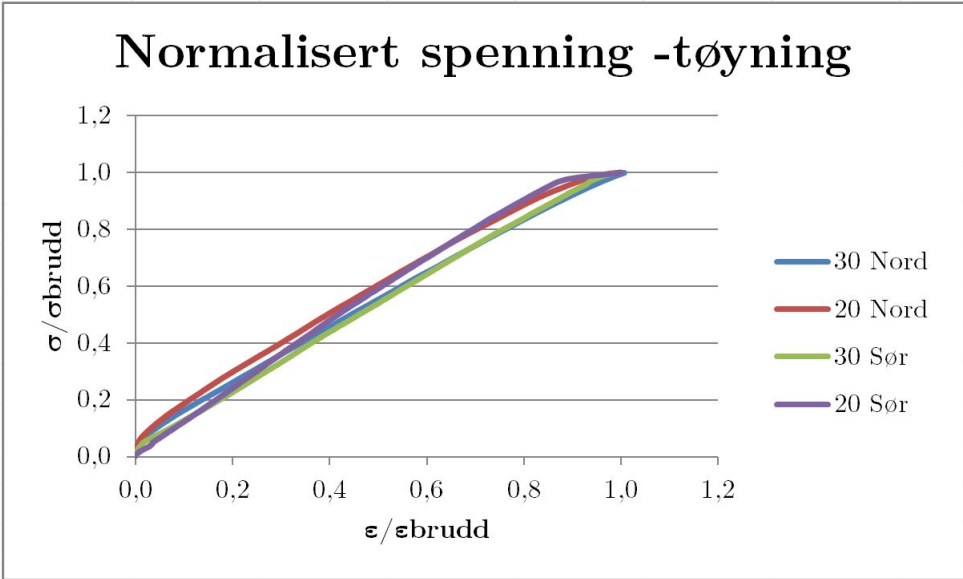
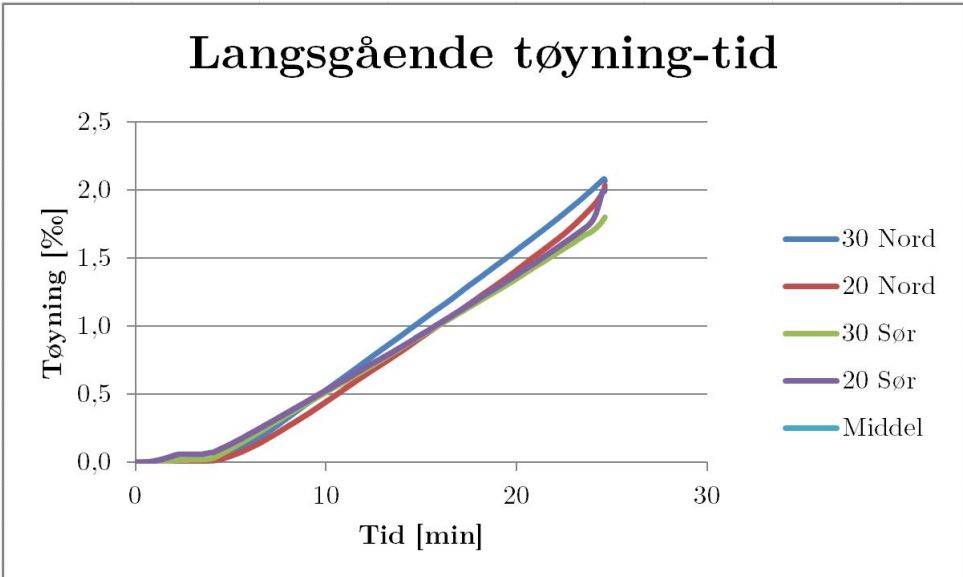
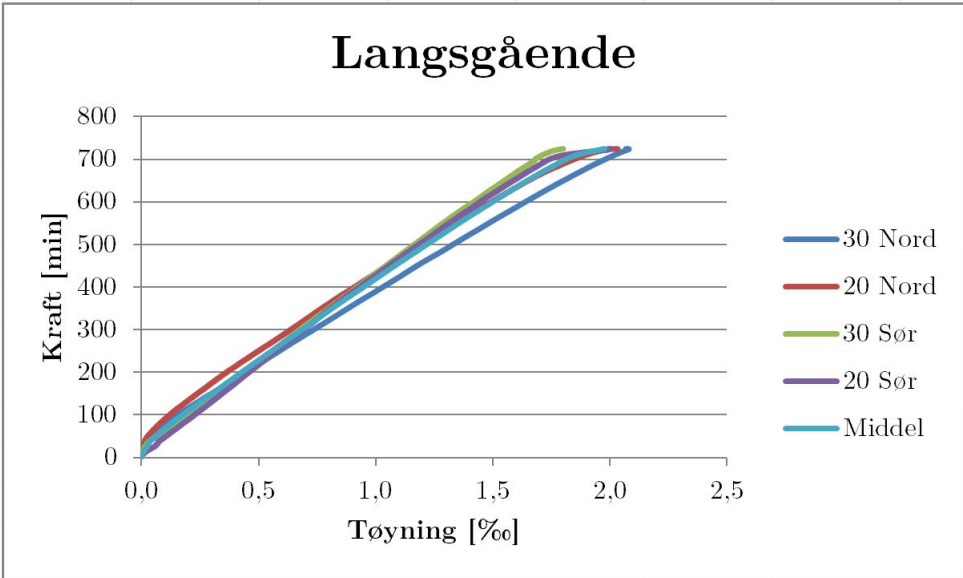


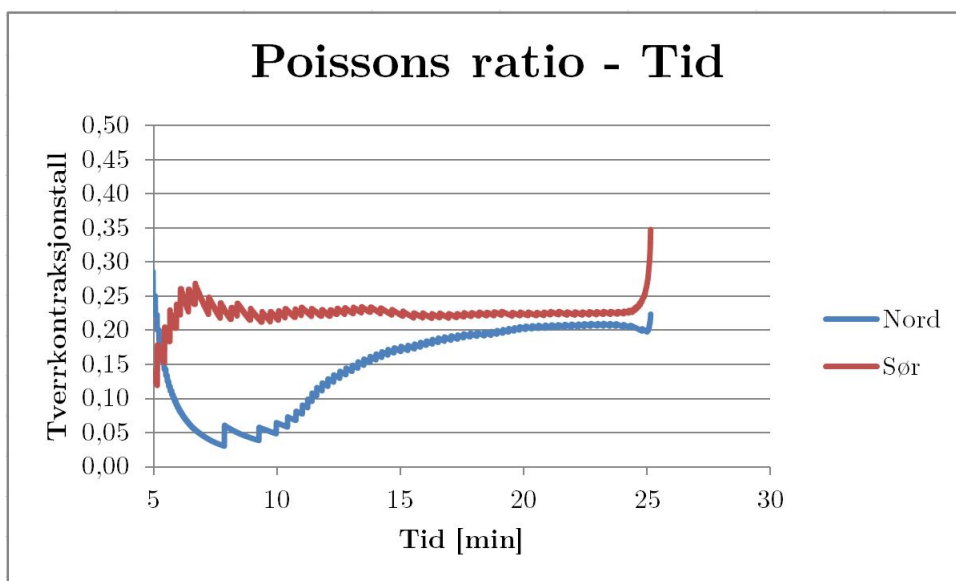
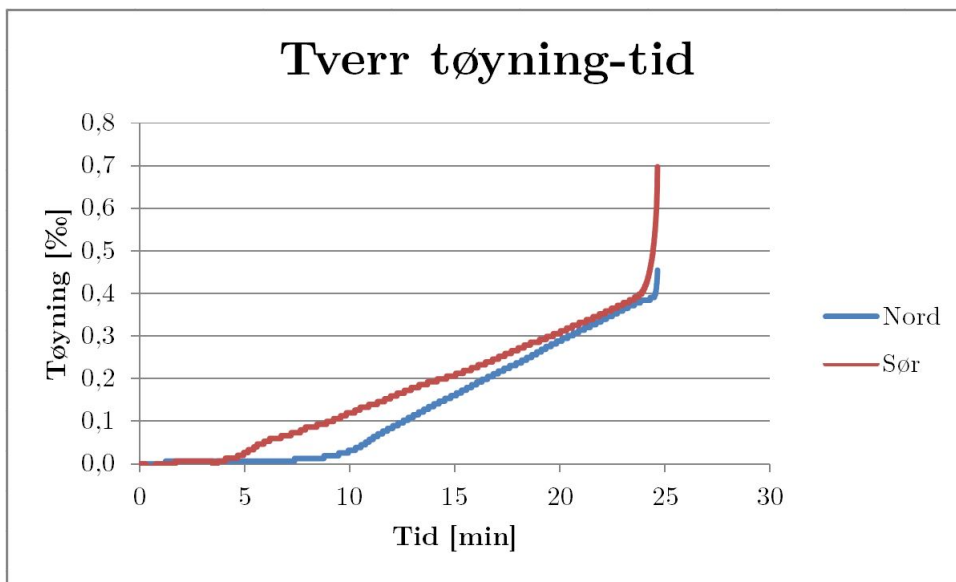
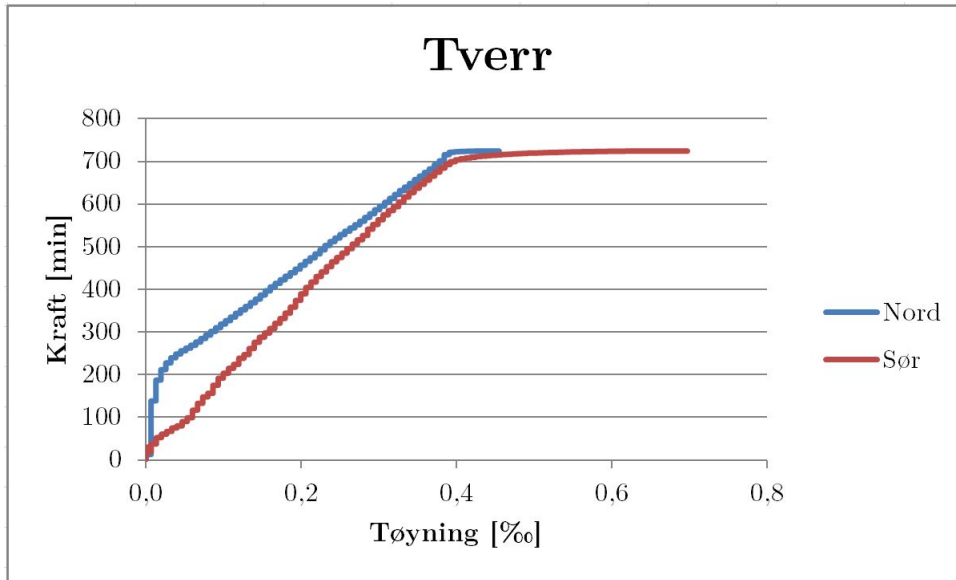




F.10 LWC - 1,0% søyle 2

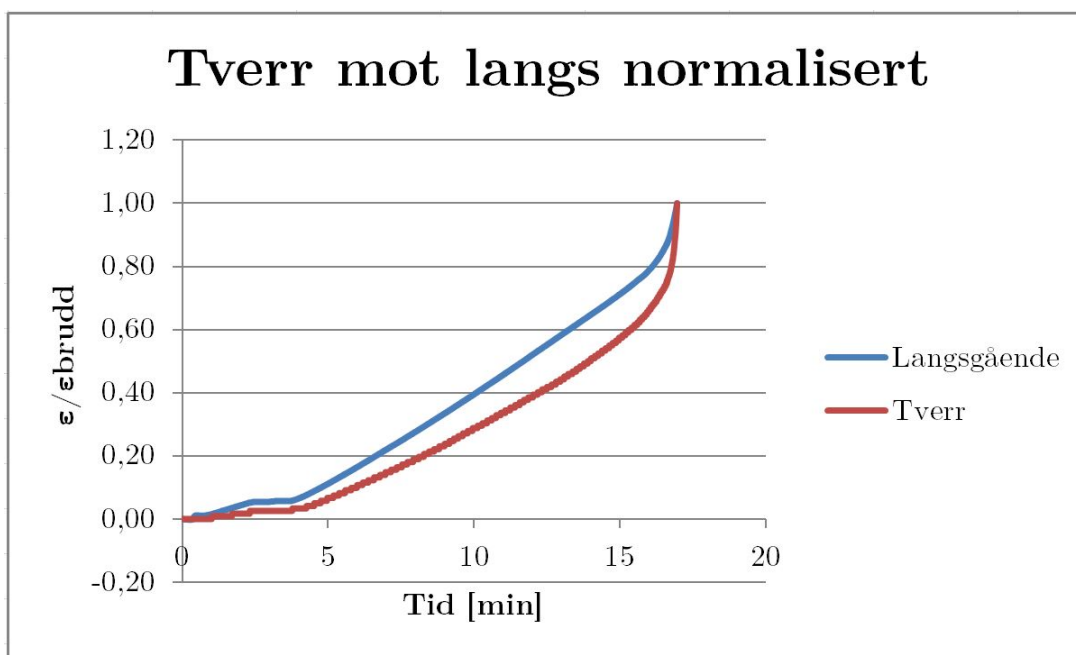
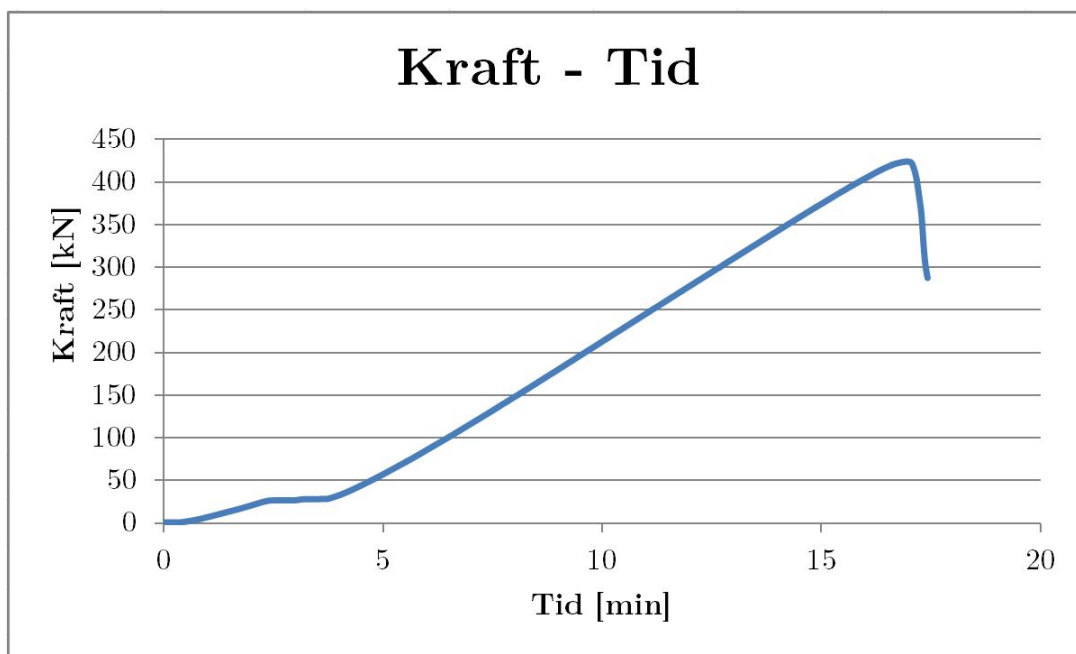


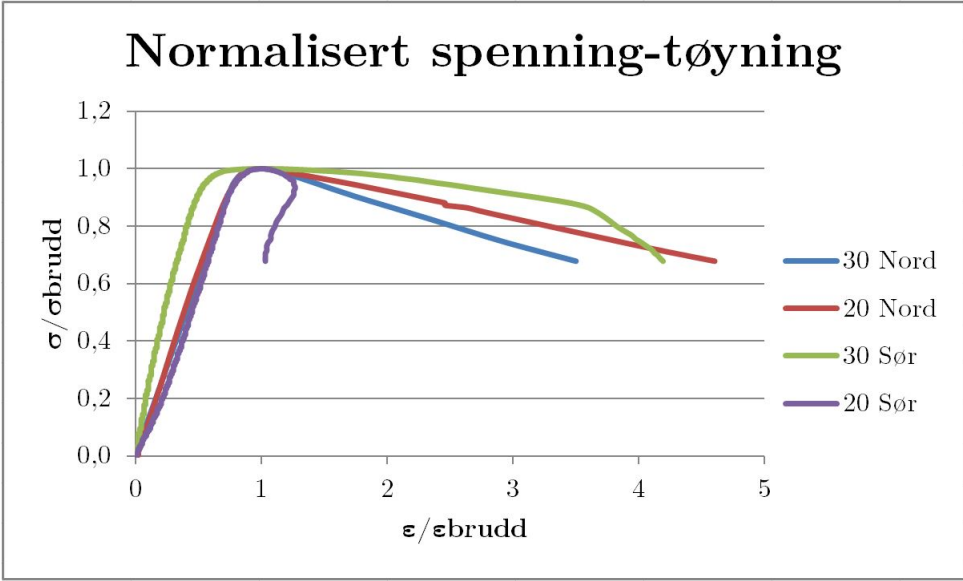
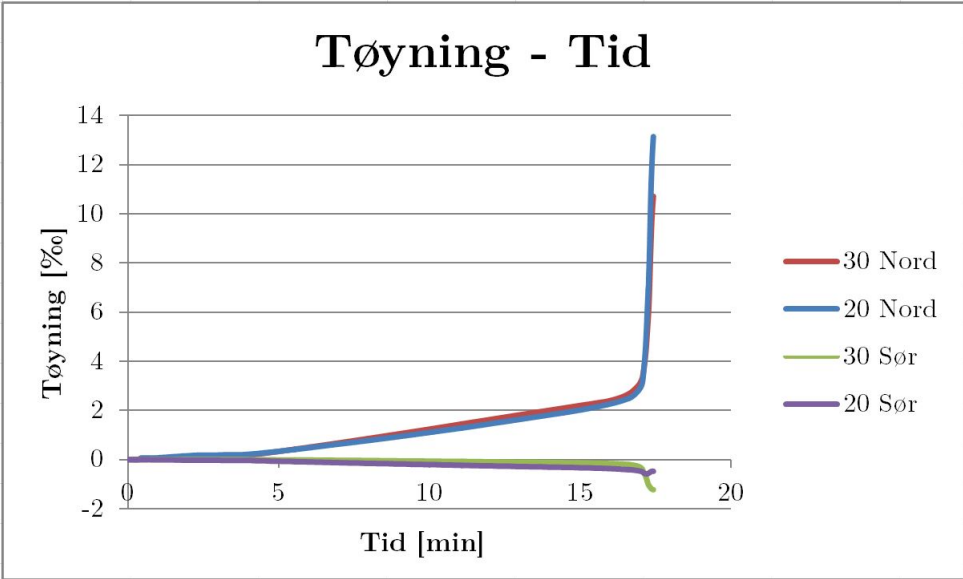
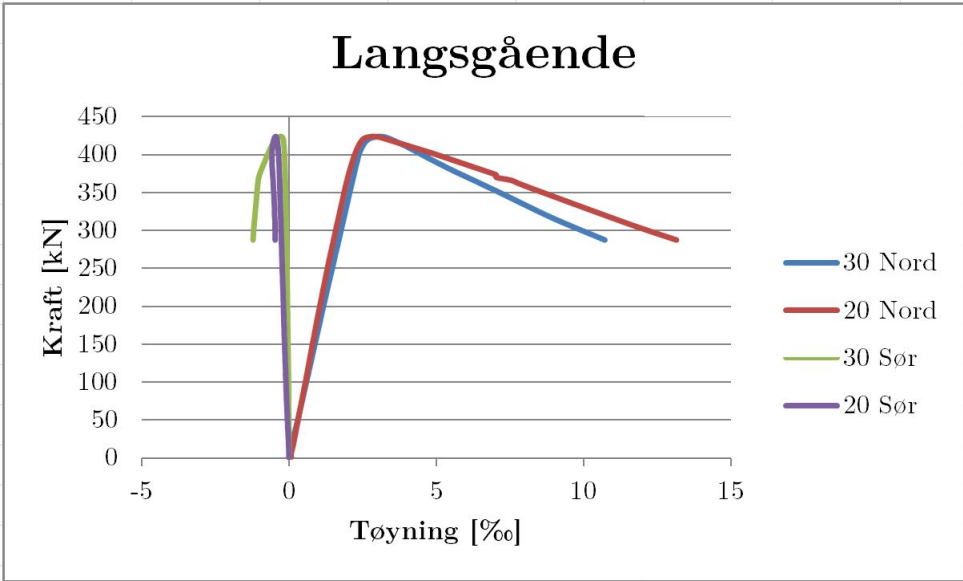


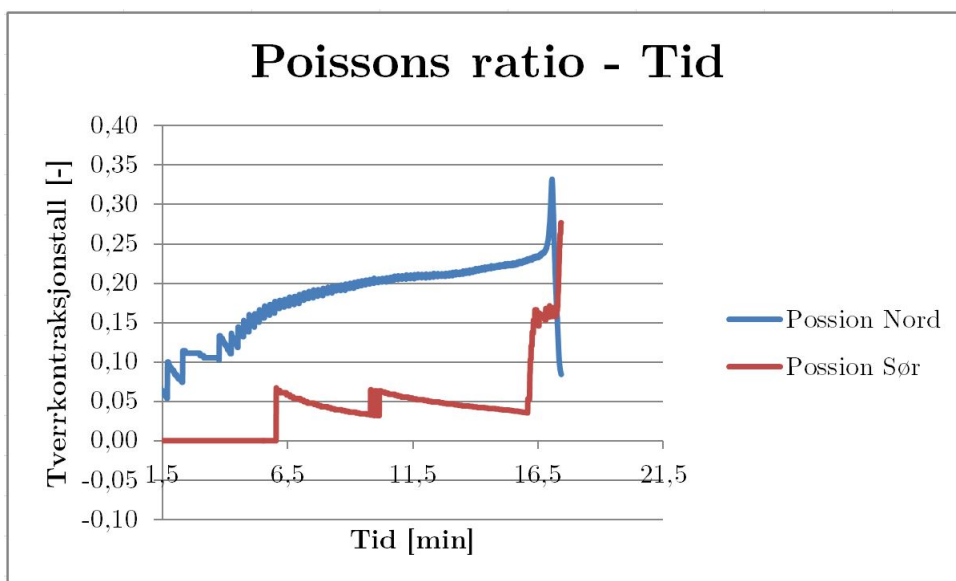
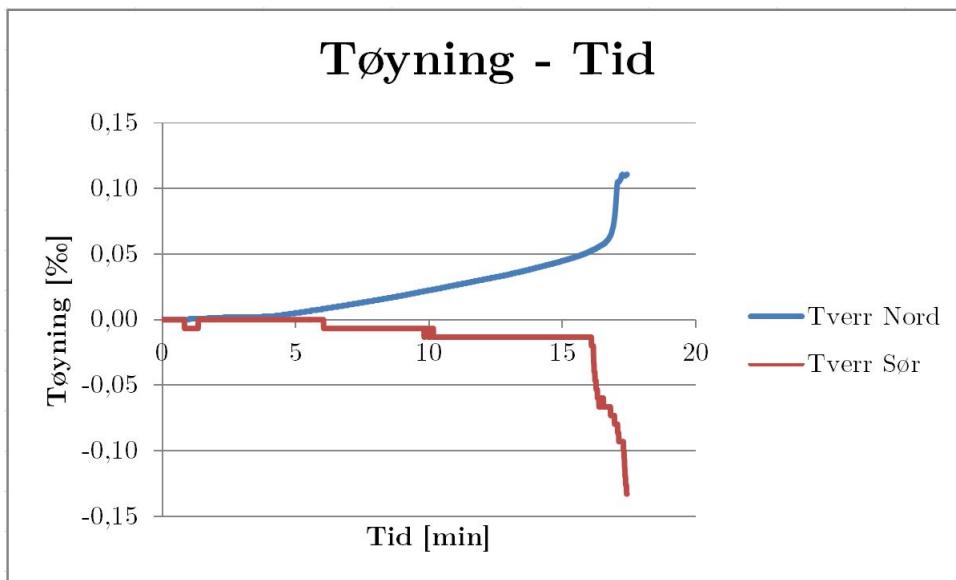
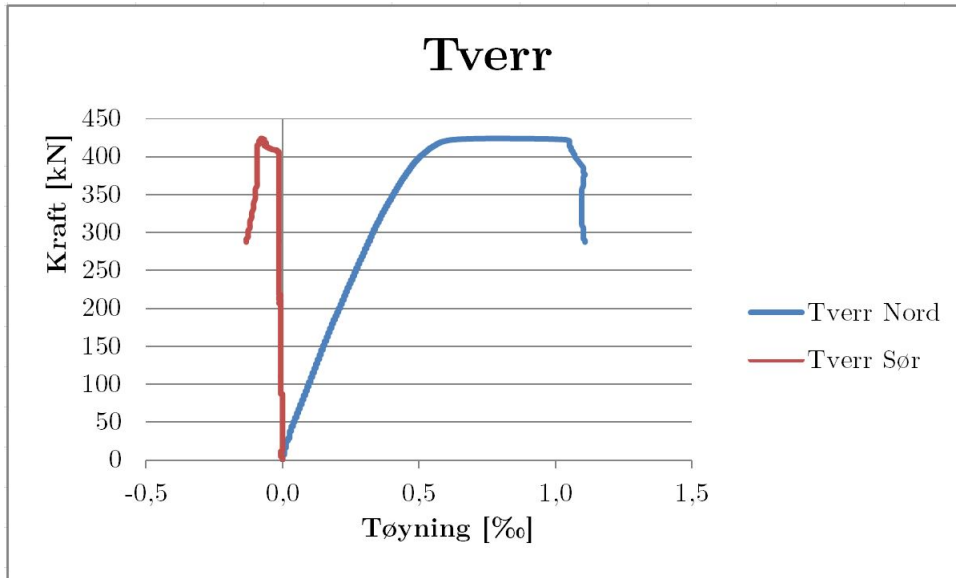




F.11 LWC - 1,0% søyle 3

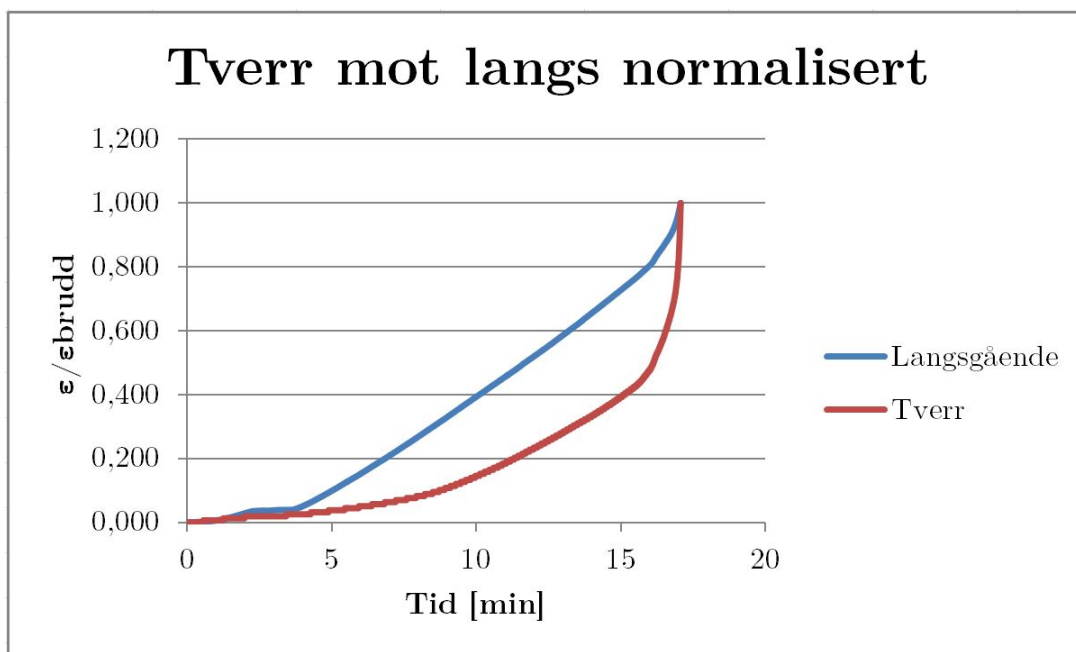
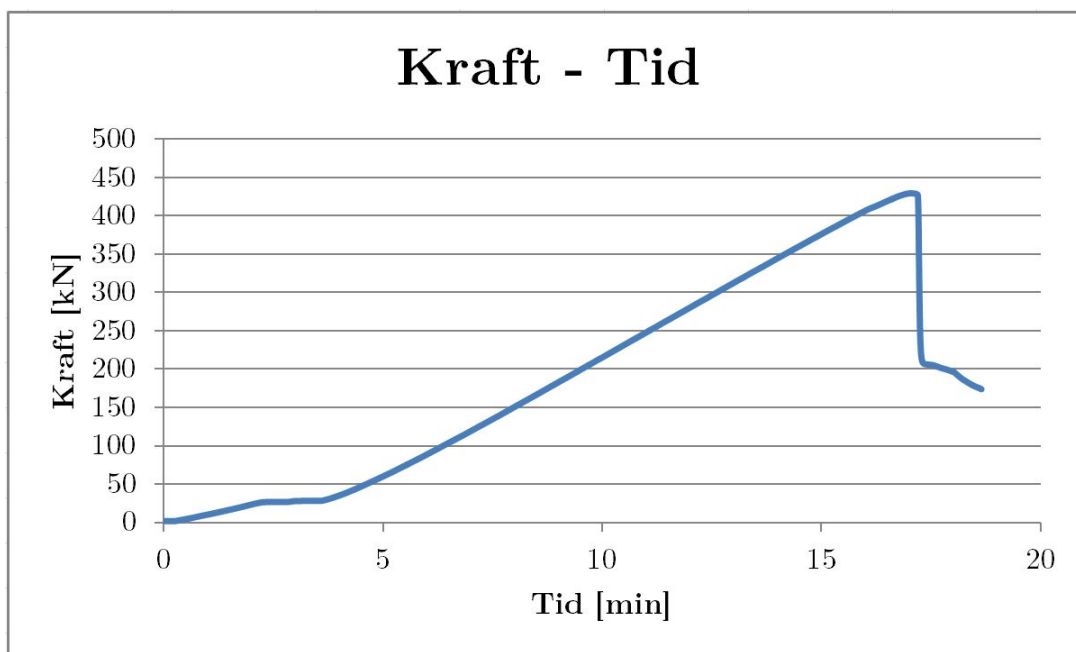


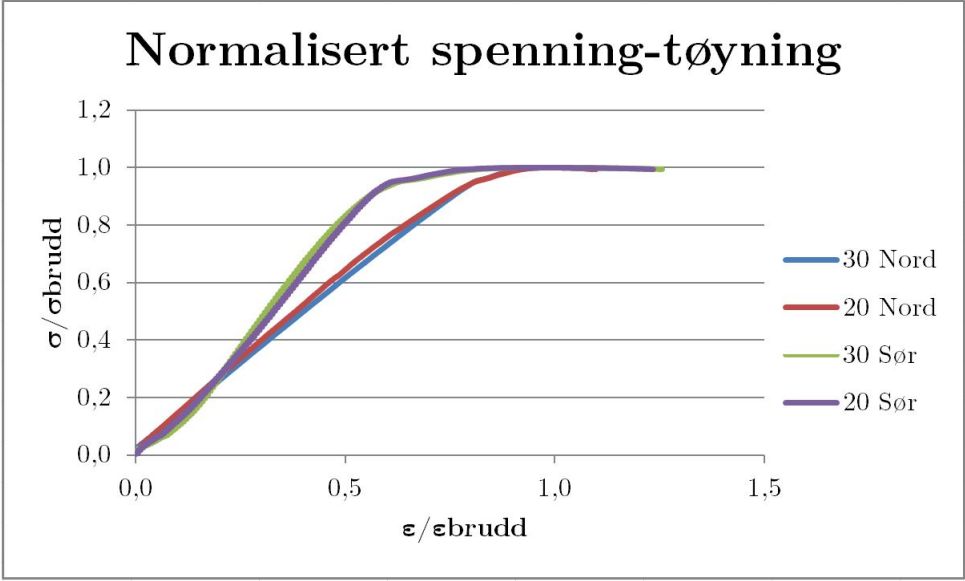
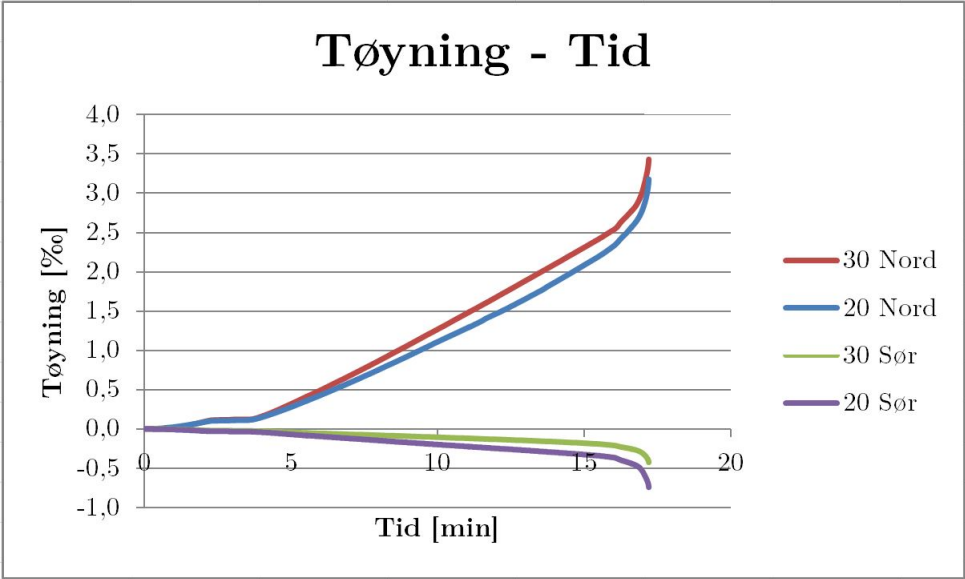
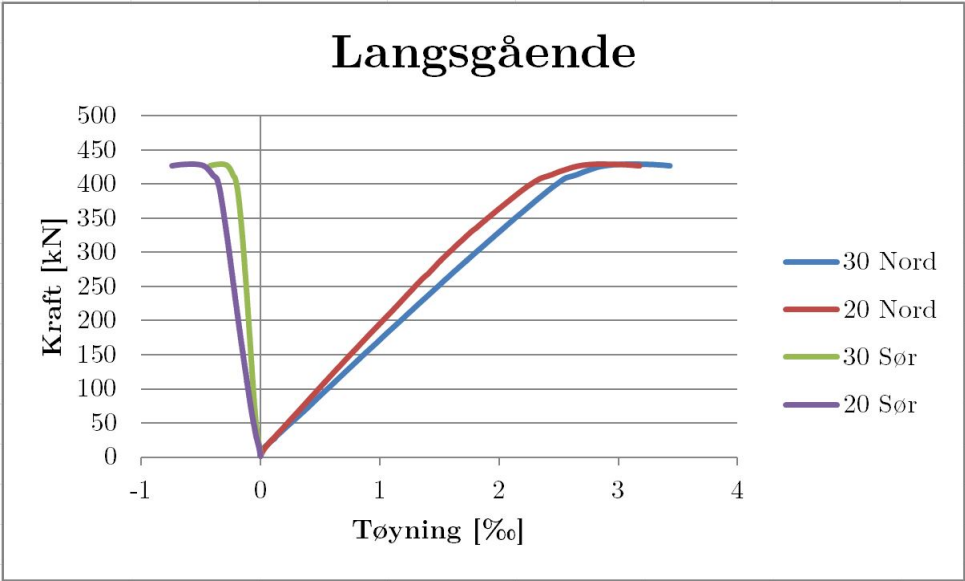


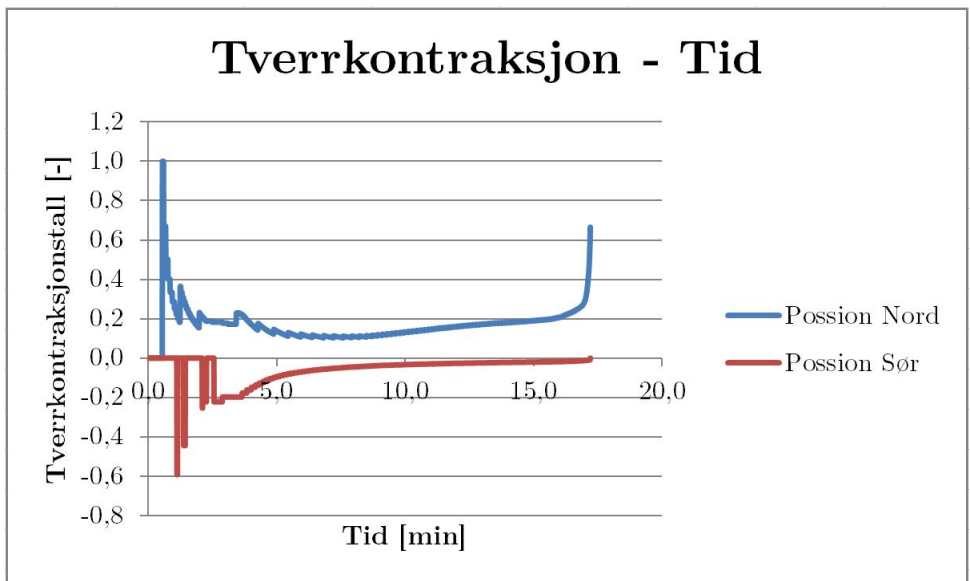
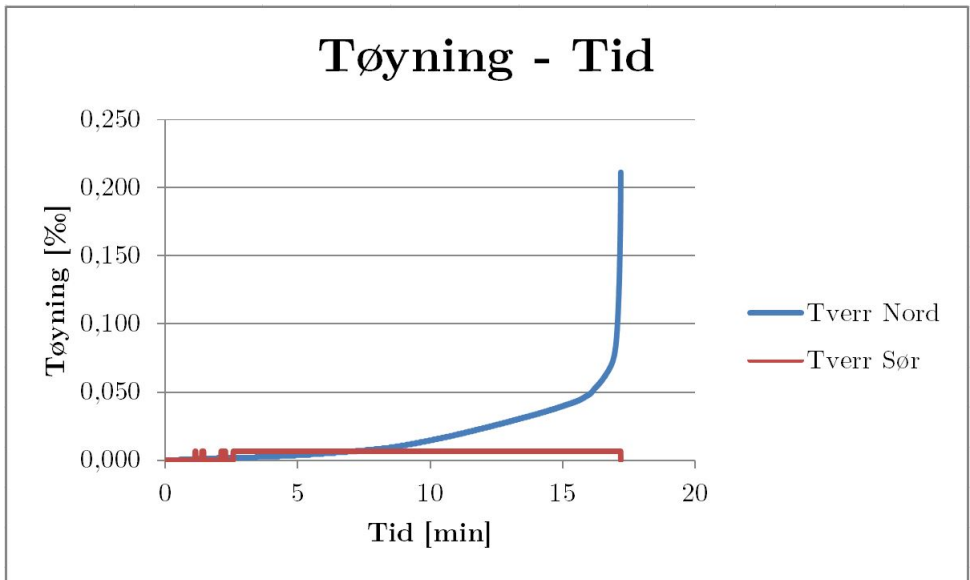
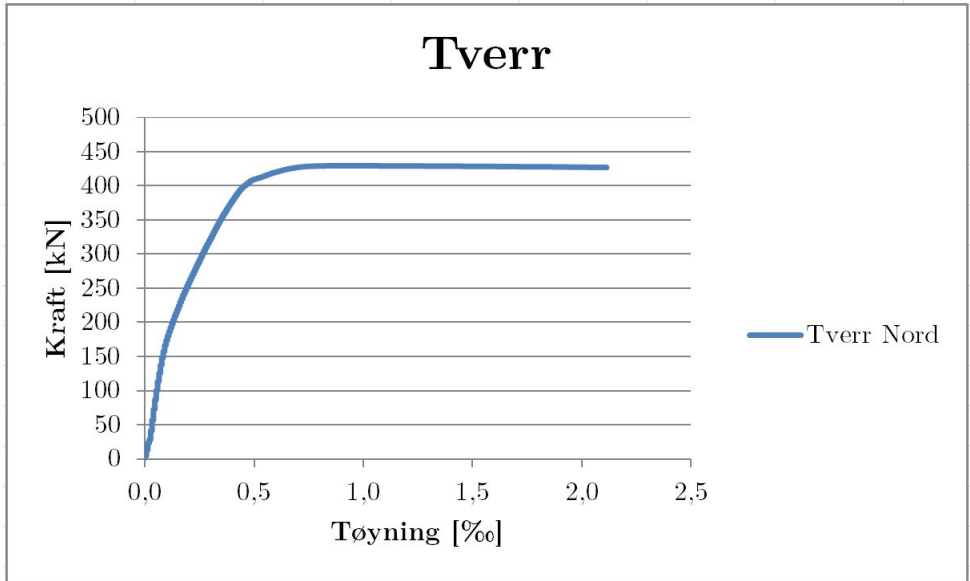




F.12 LWC - 1,0% søyle 4

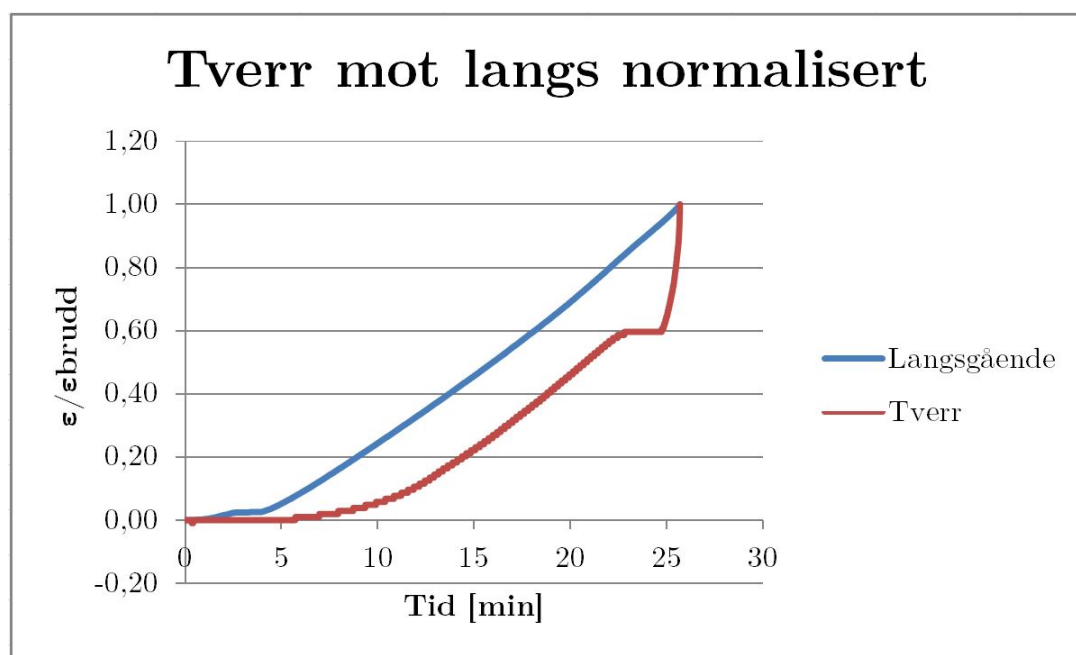
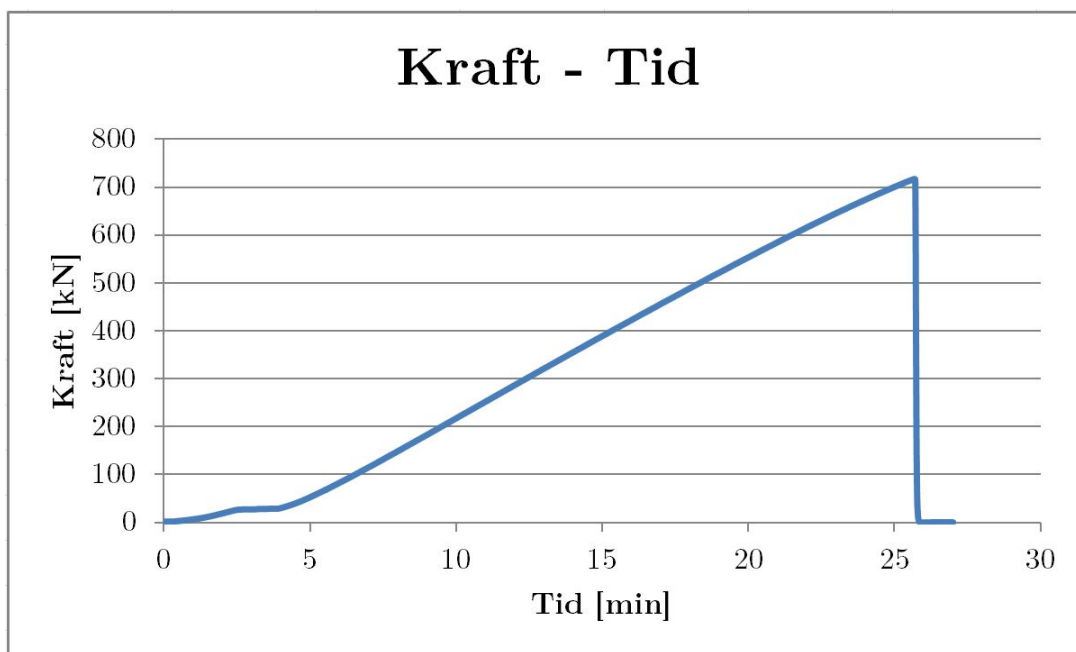


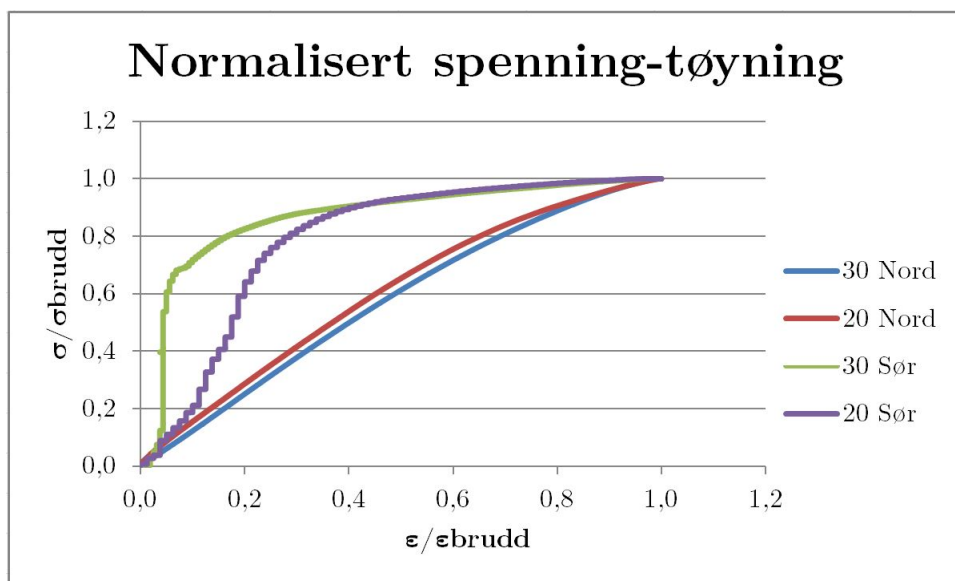
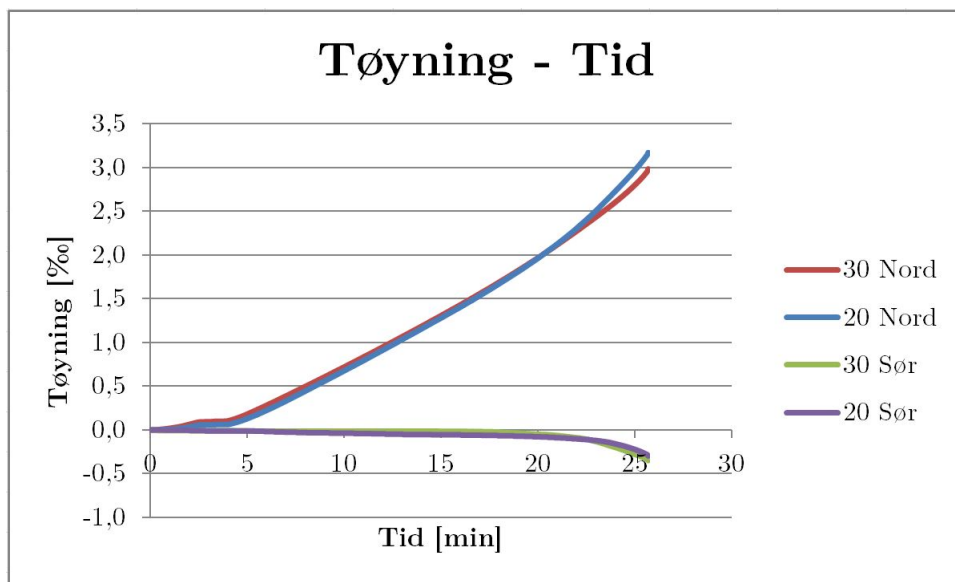
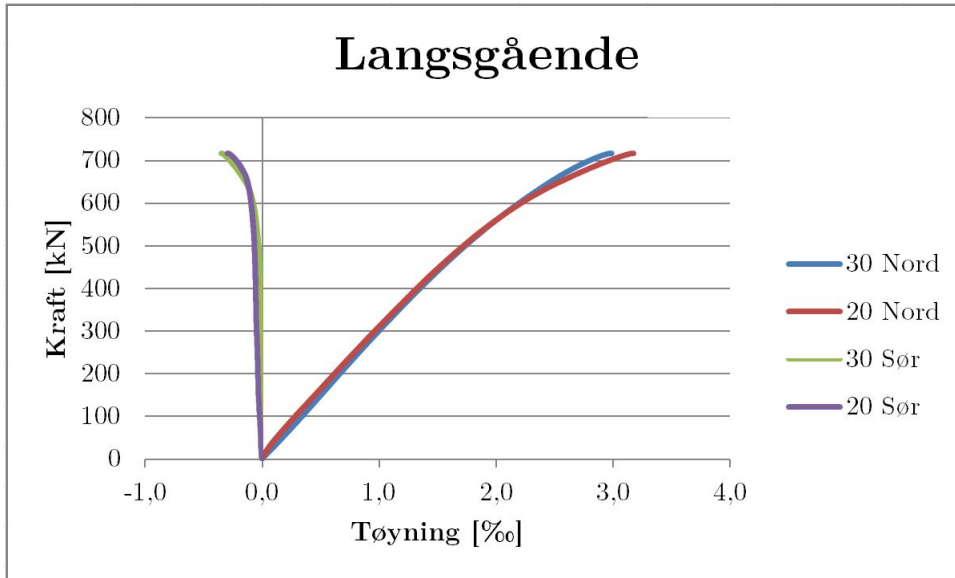


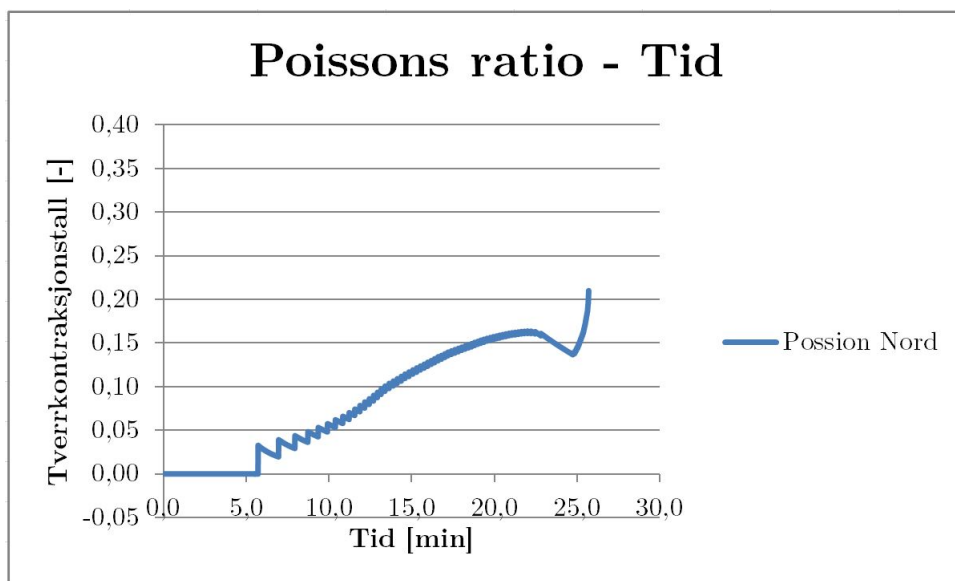
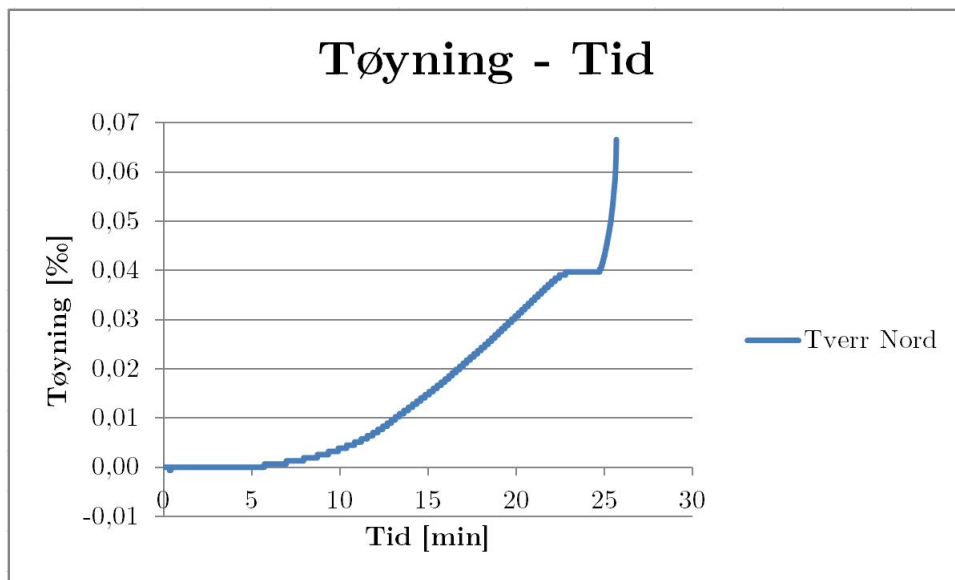
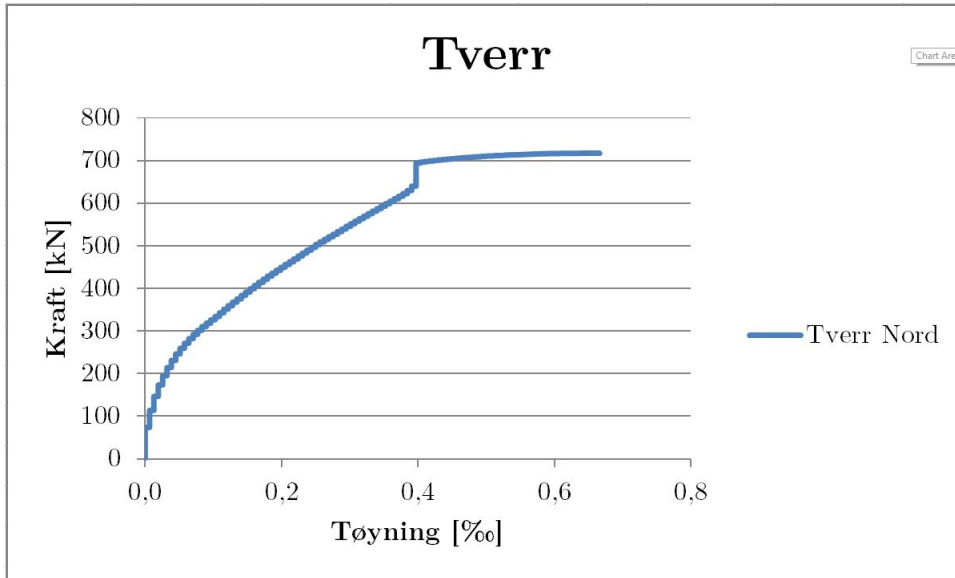




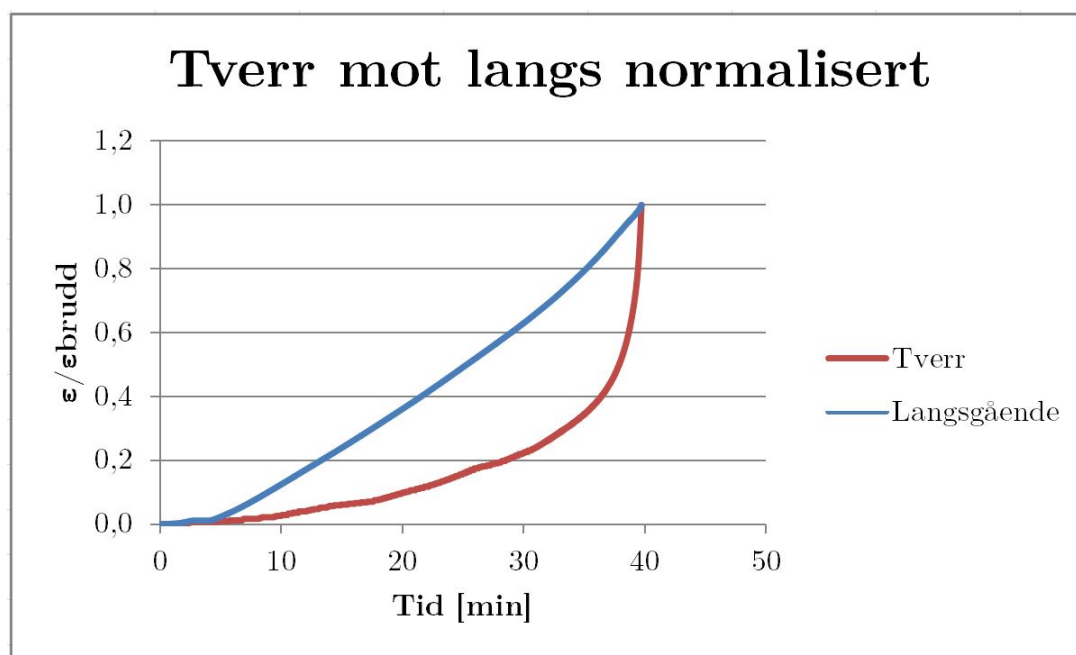
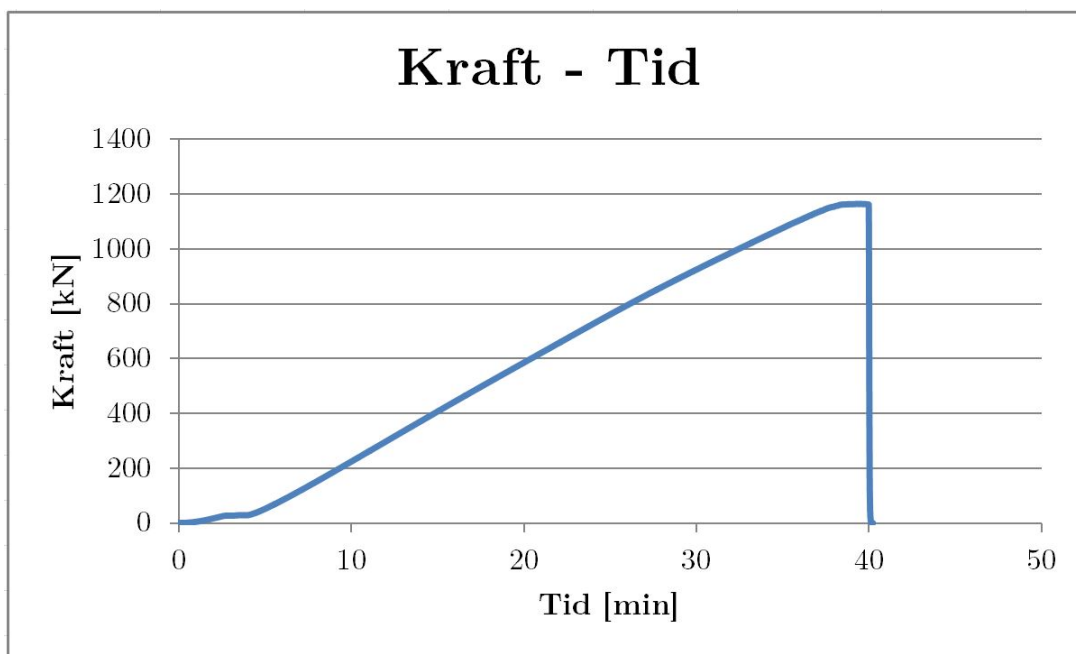
F.13 NDC - 0,0% søyle 4

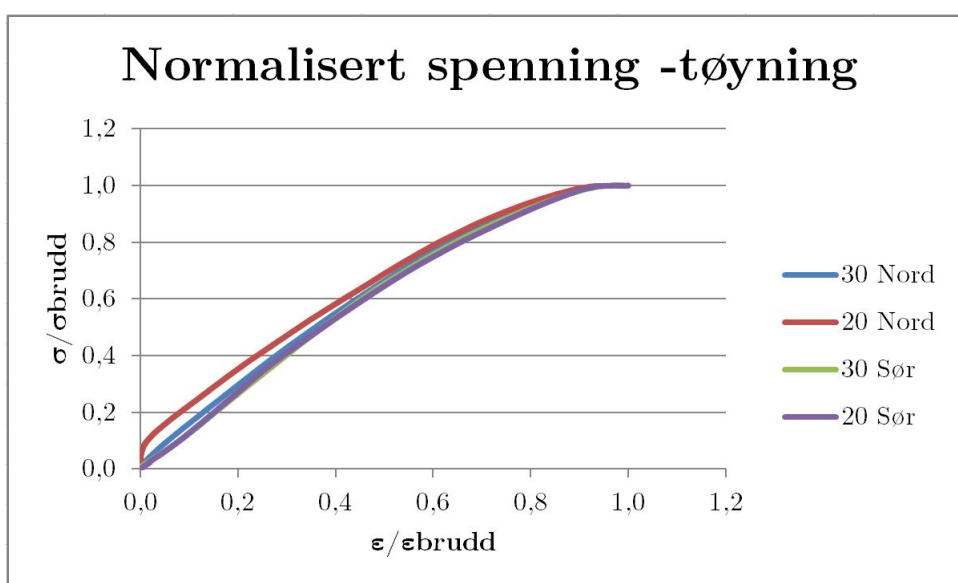
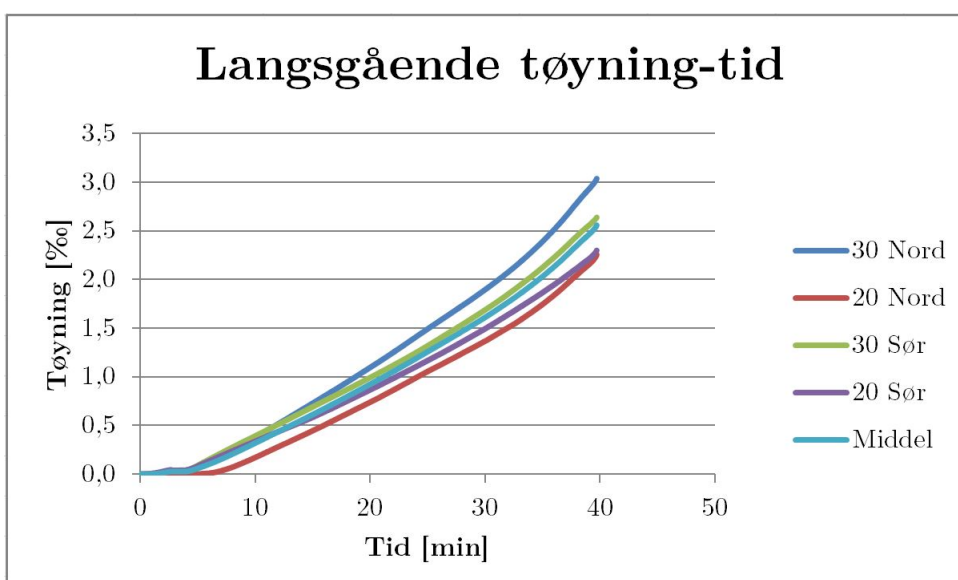
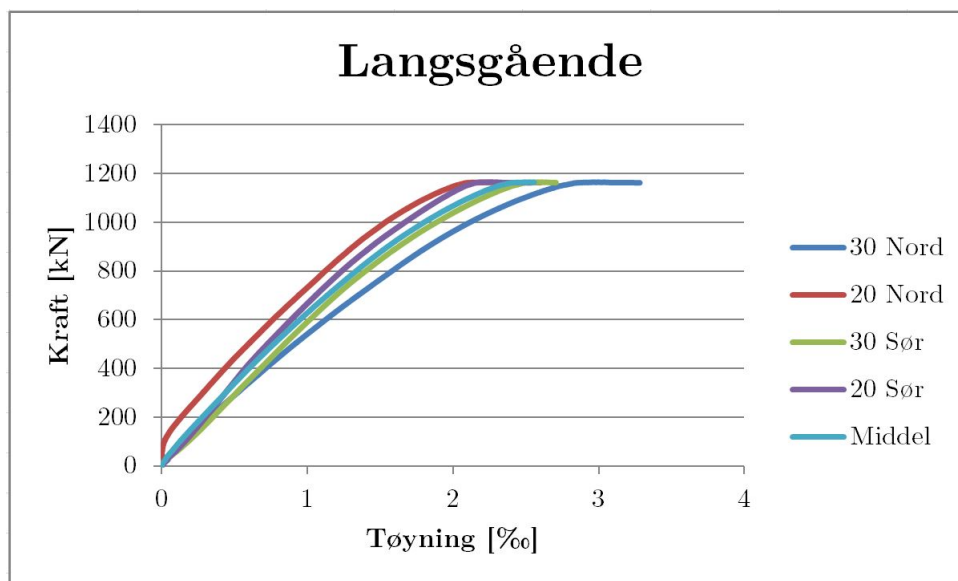


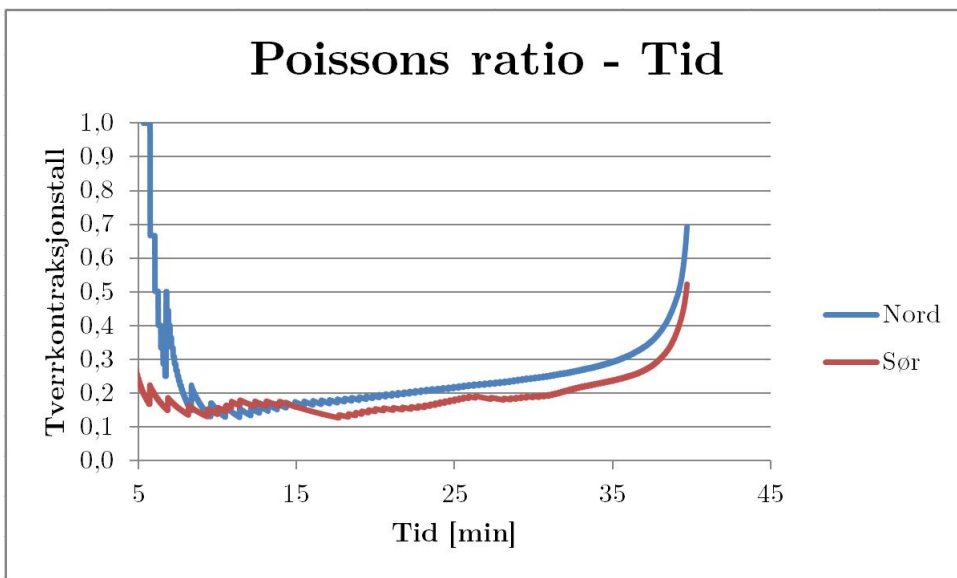
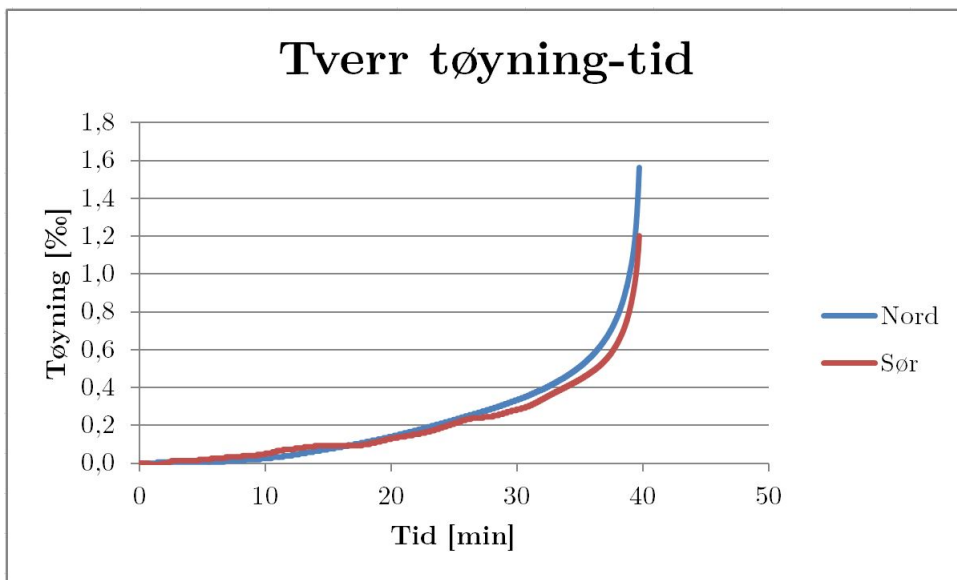
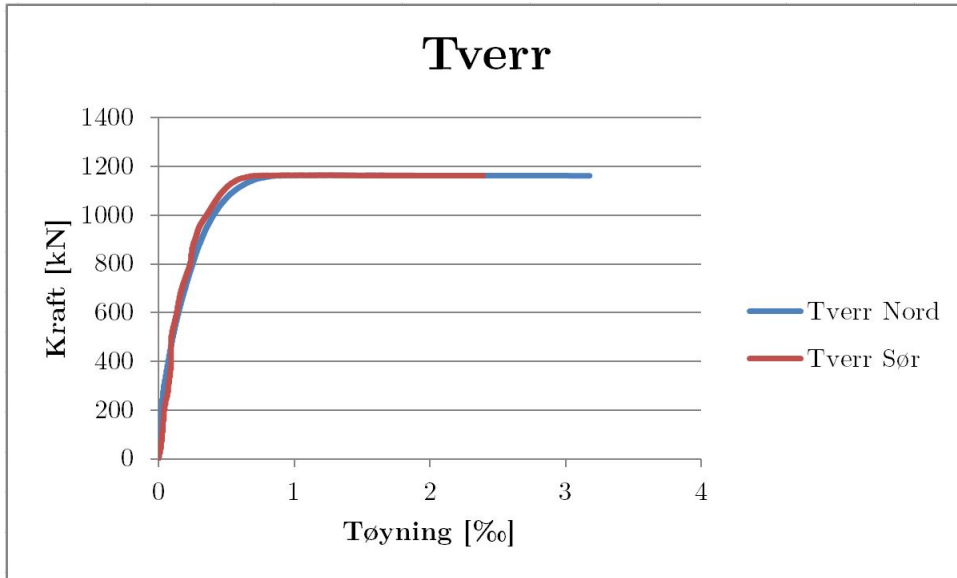




F.14 NDC - 0,5% søyle 1

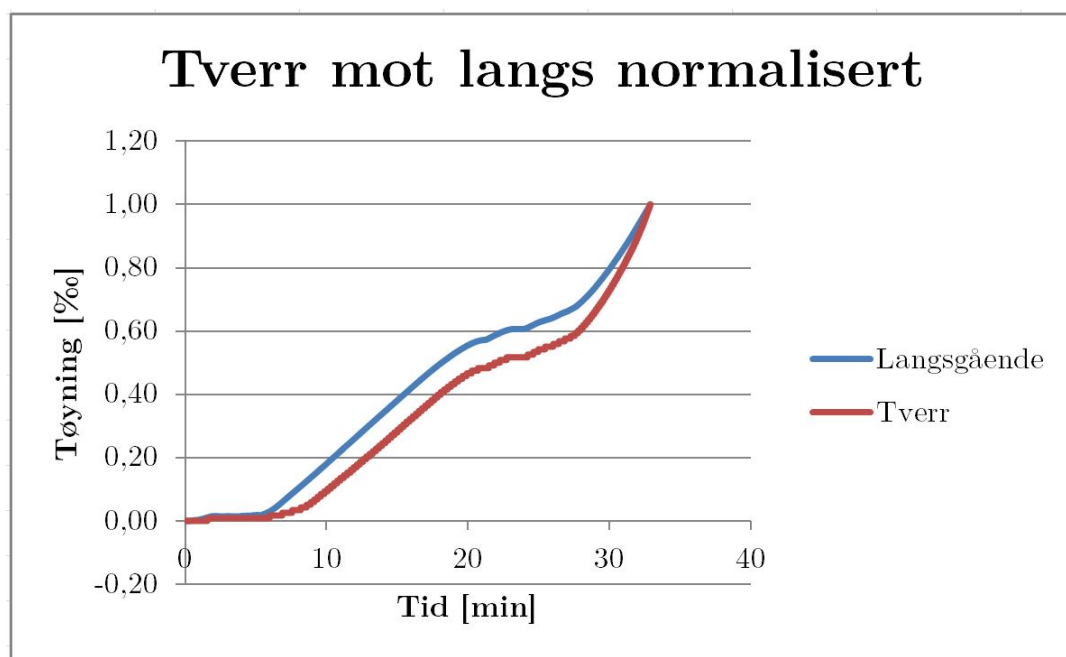
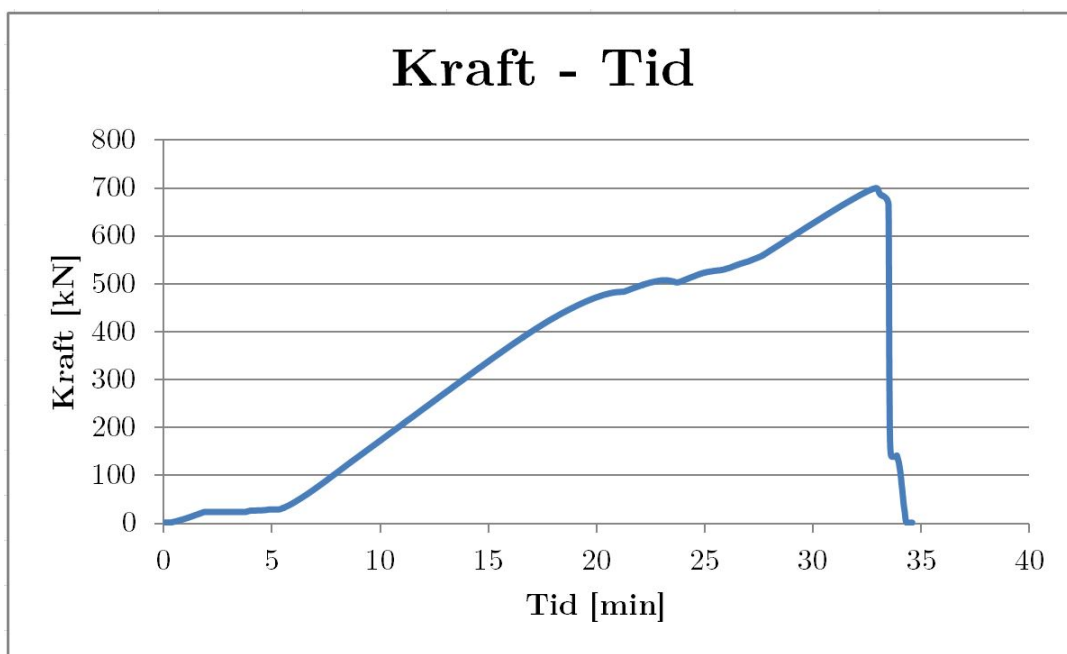


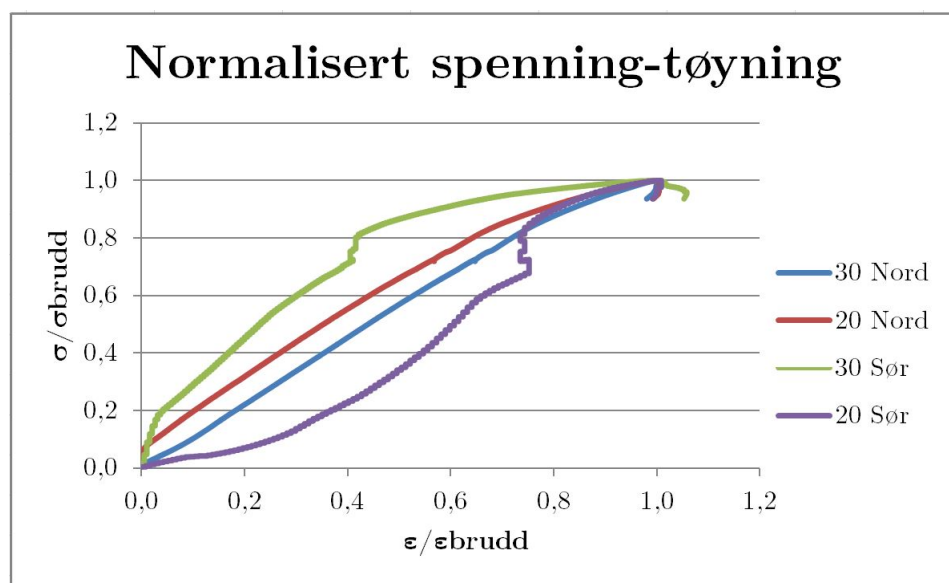
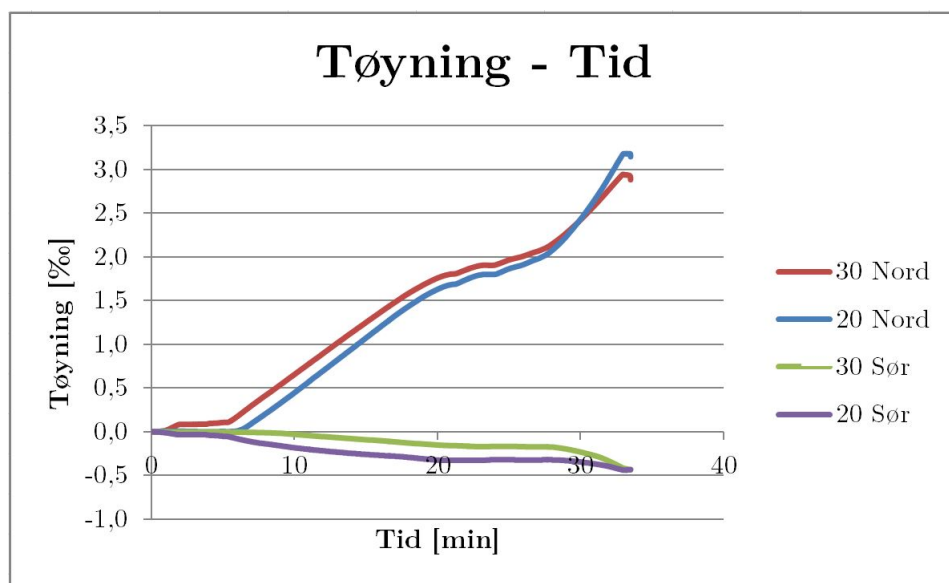
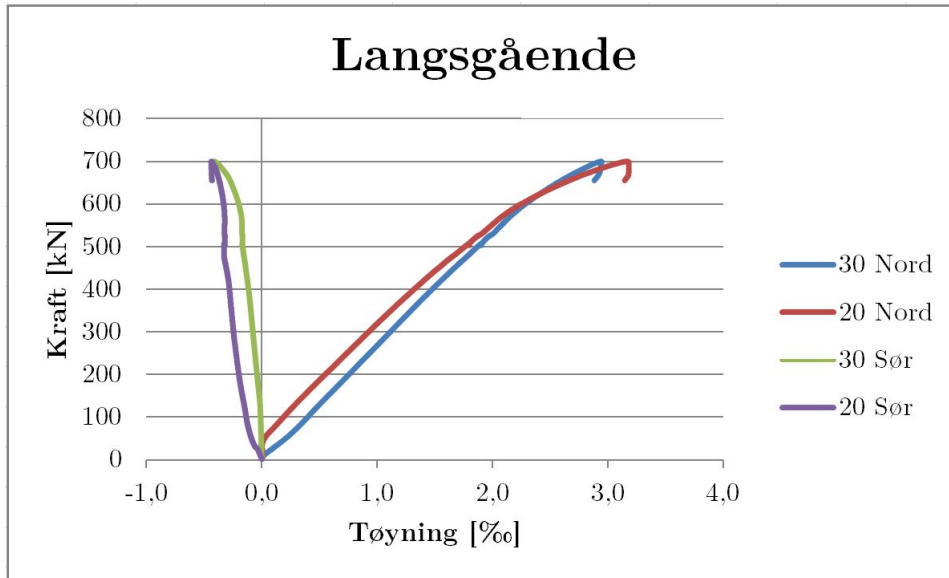


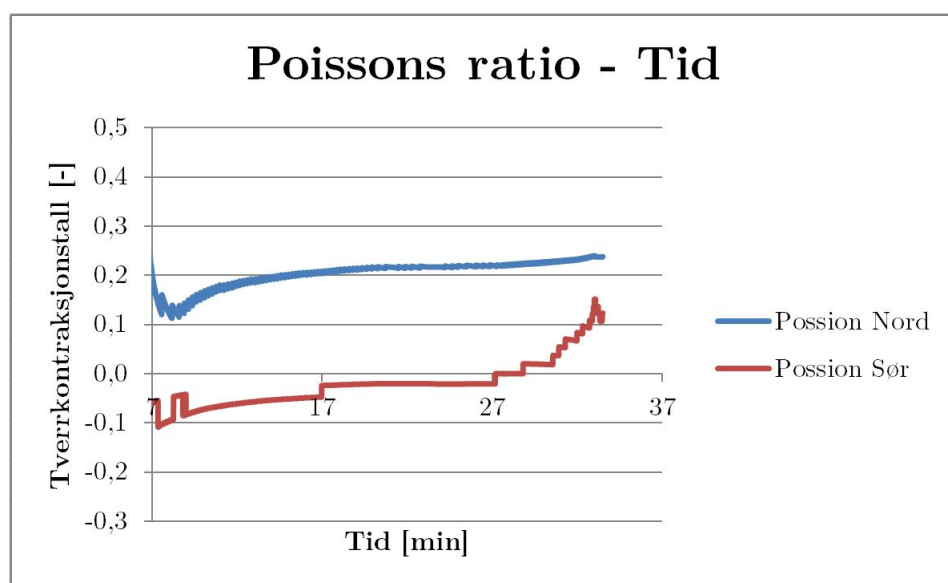
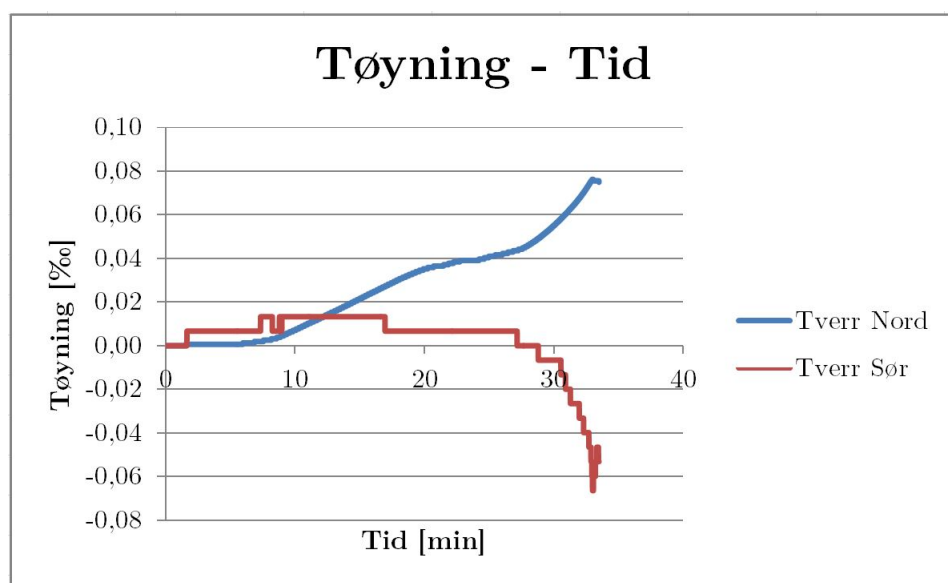
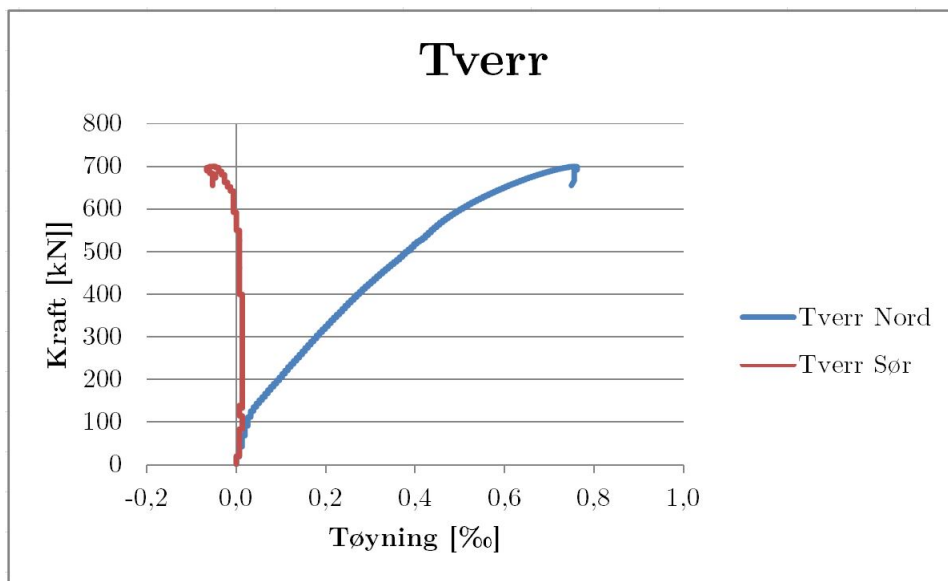




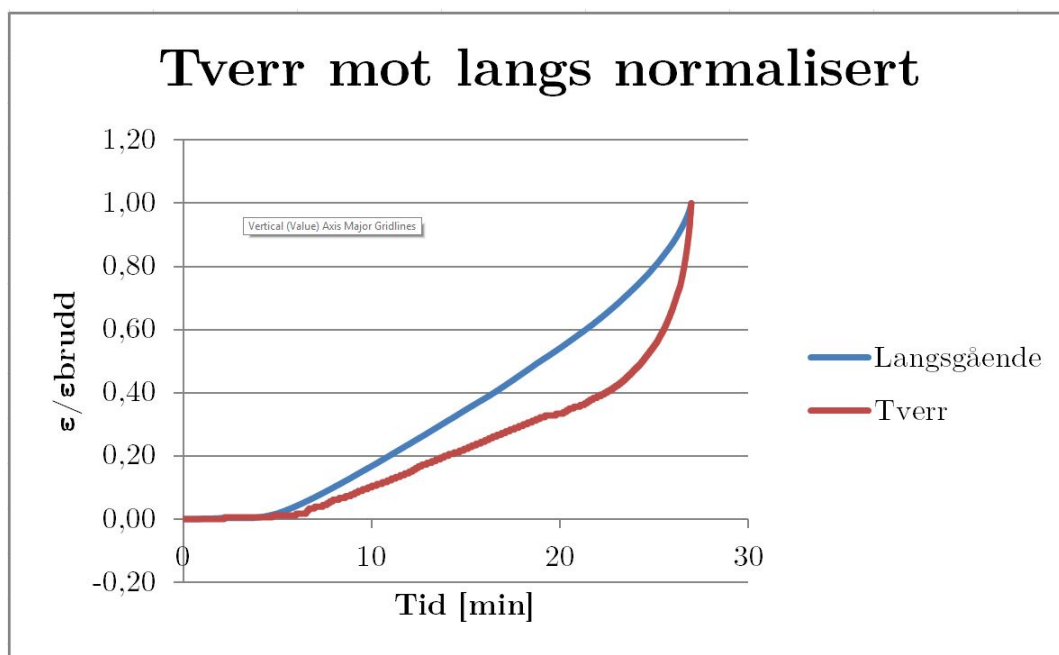
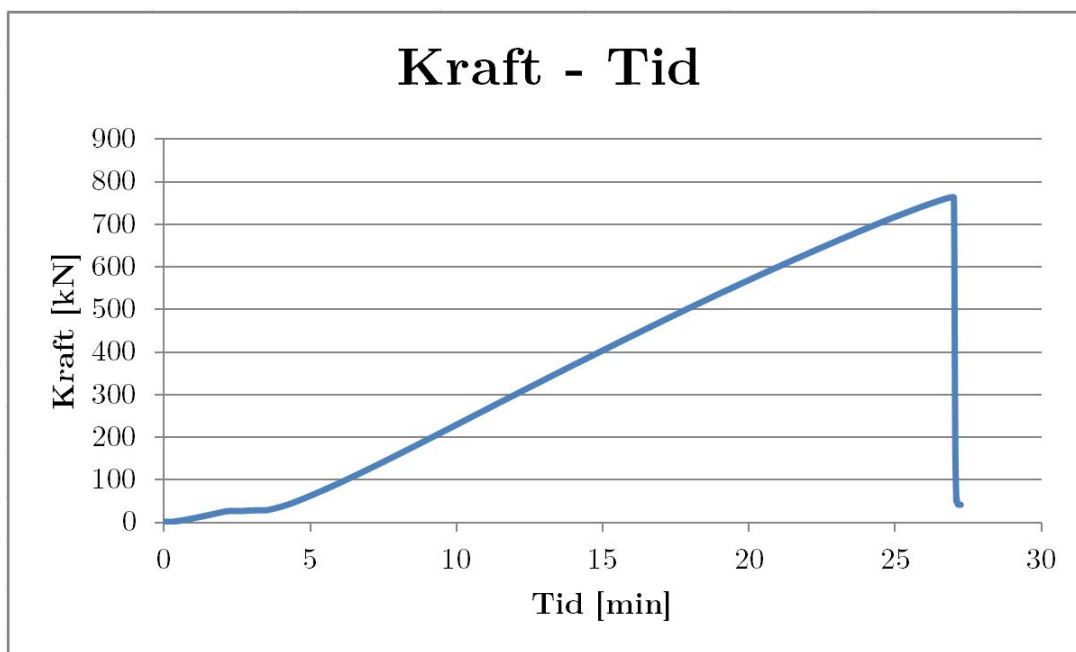
F.15 NDC - 0,5% søyle 3

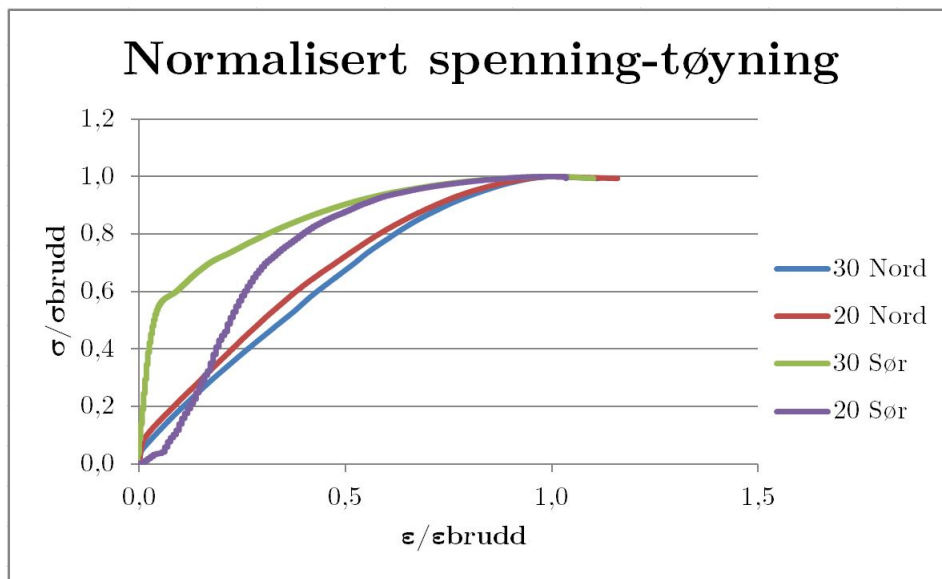
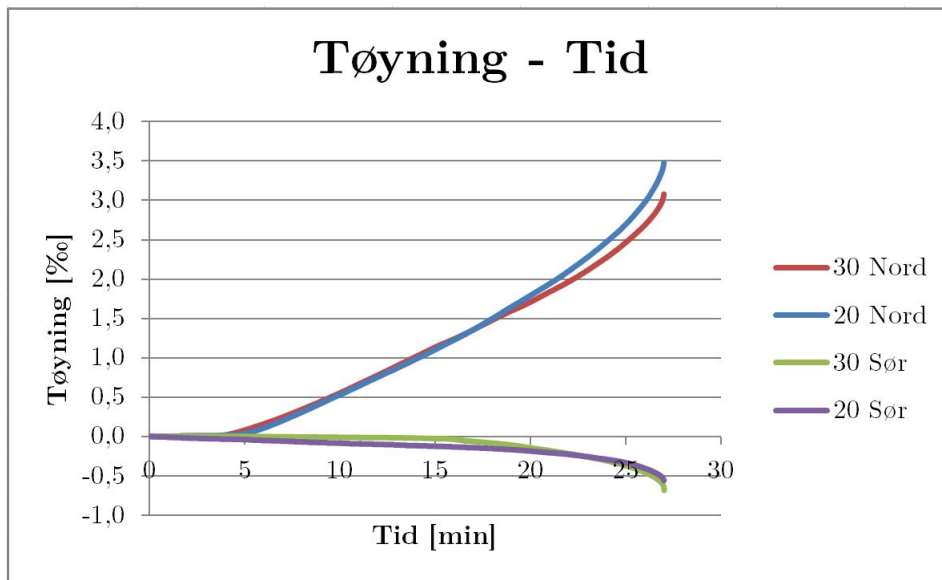
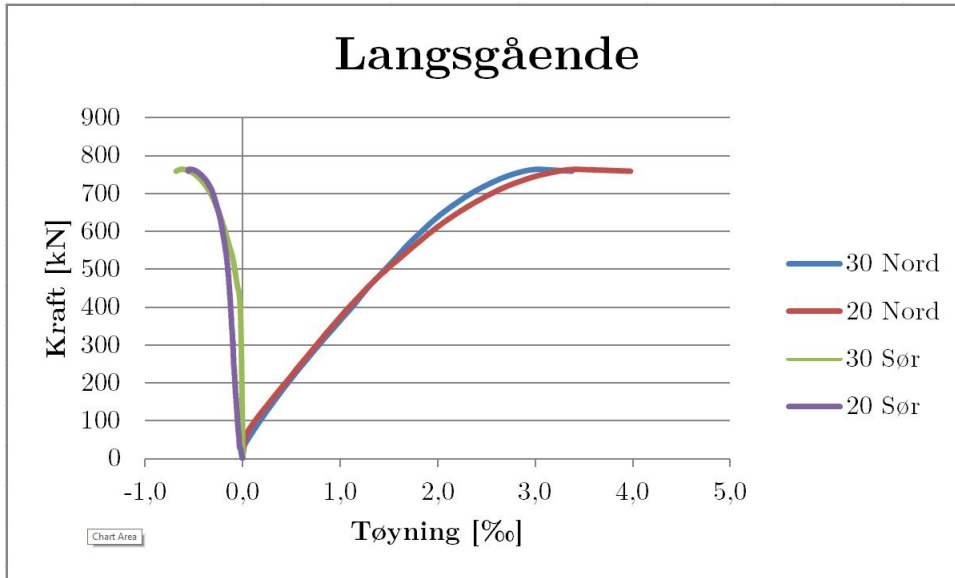


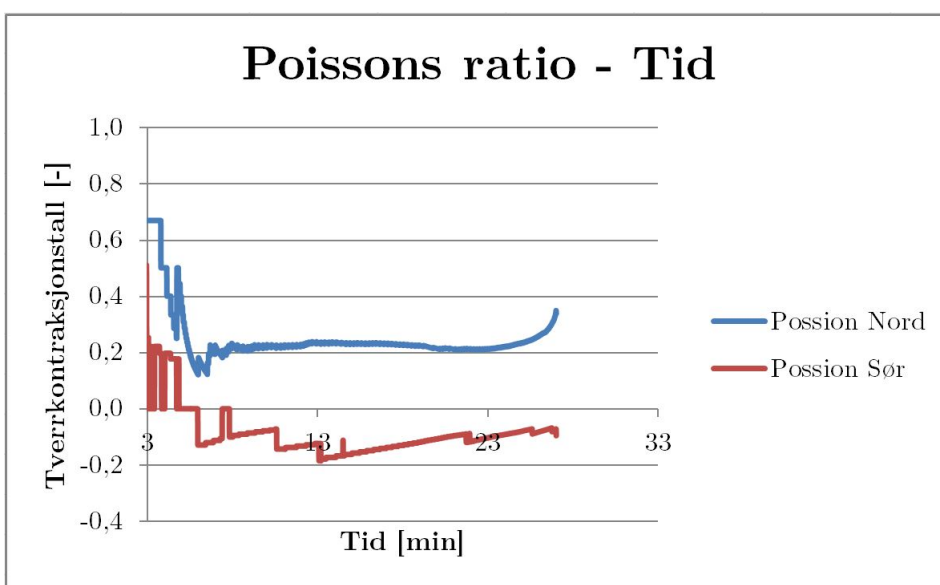
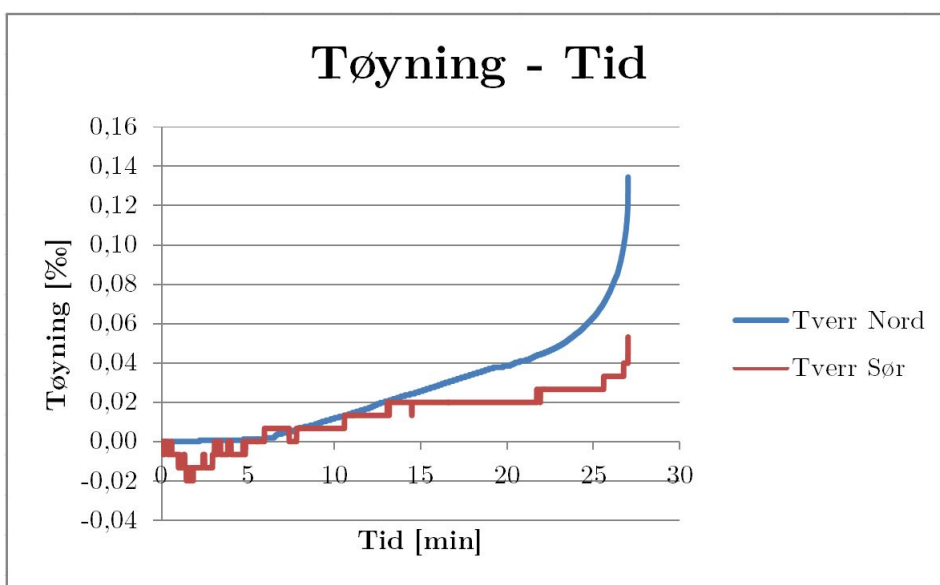
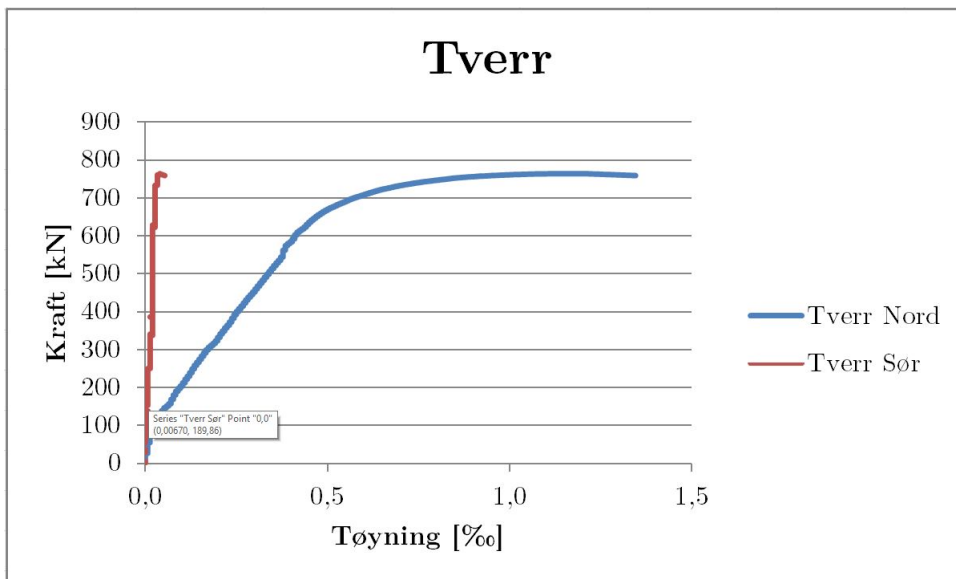




F.16 NDC - 0,5% søyle 4

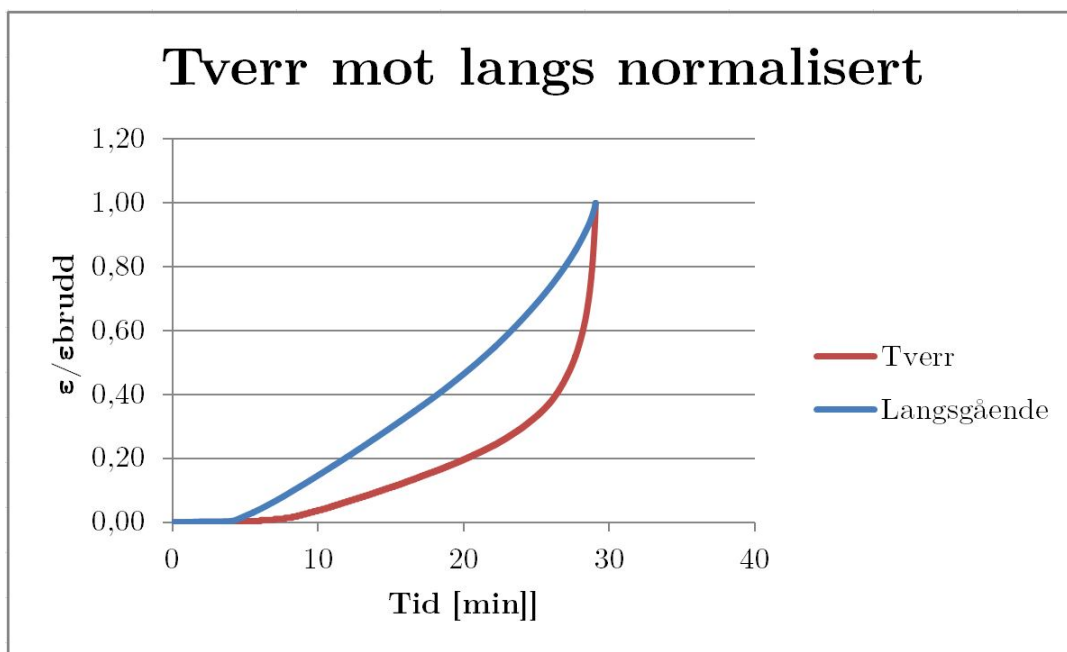
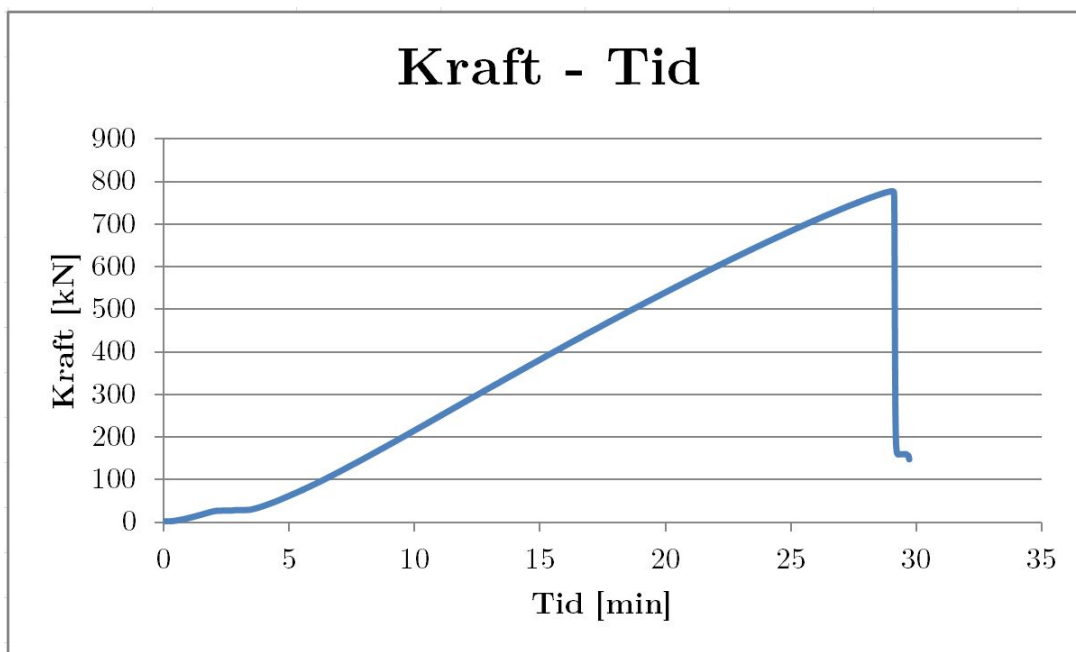


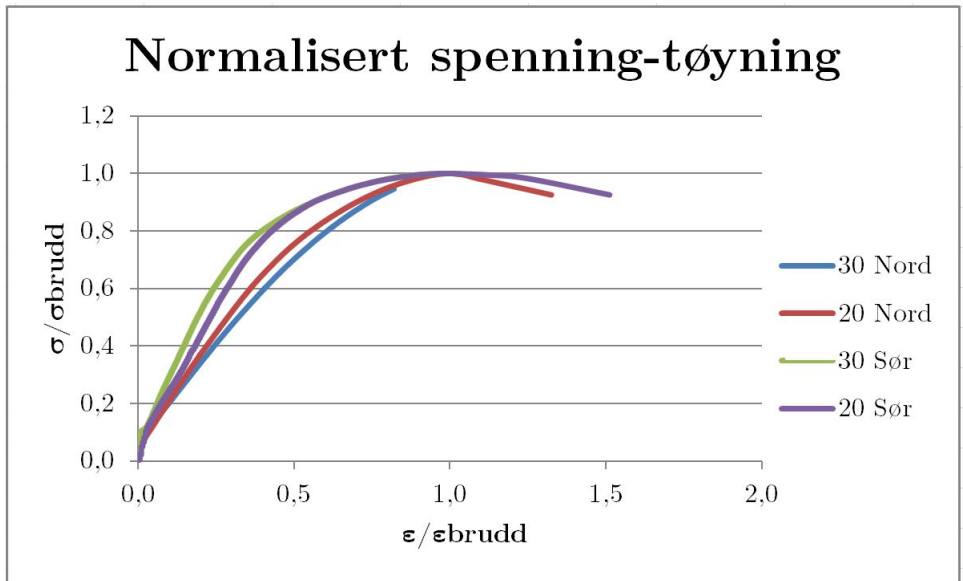
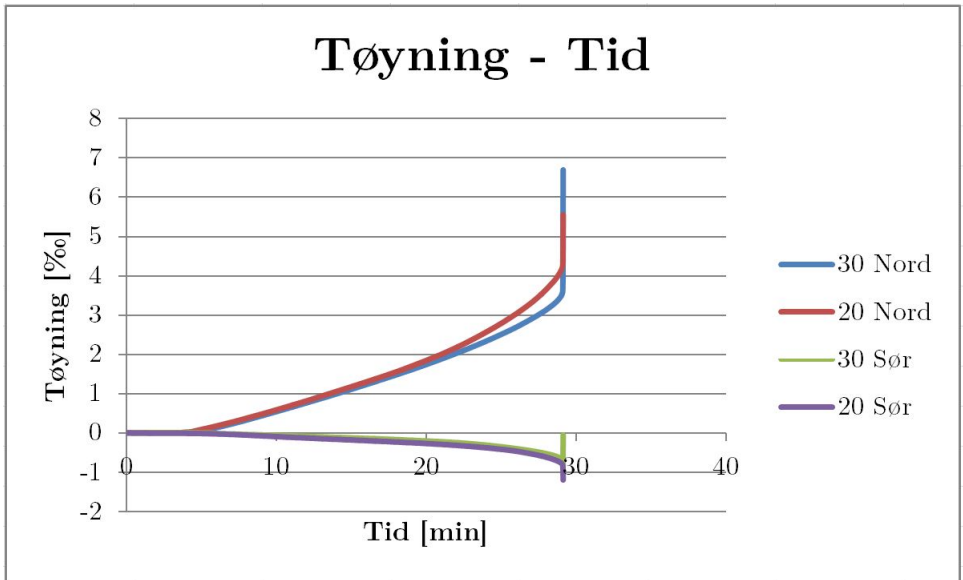
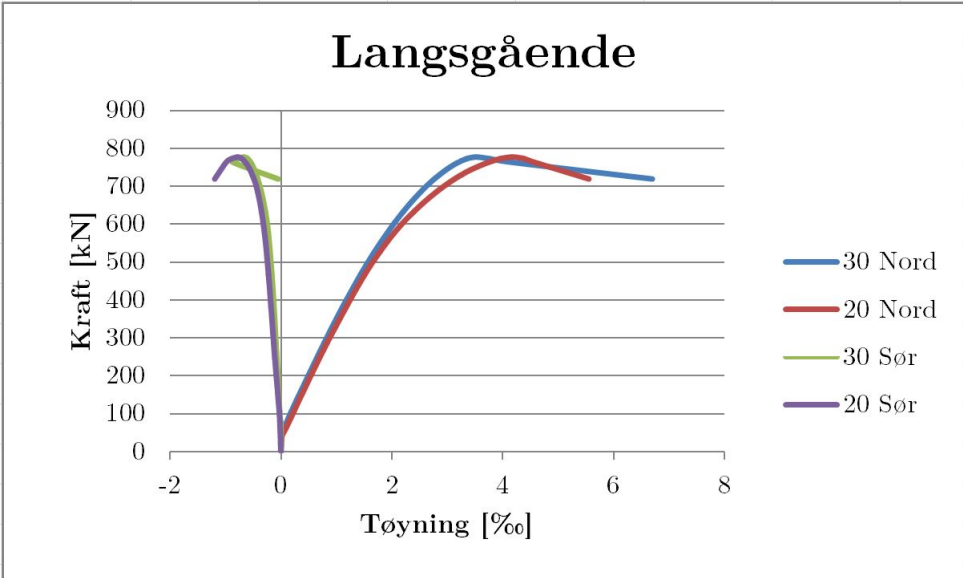


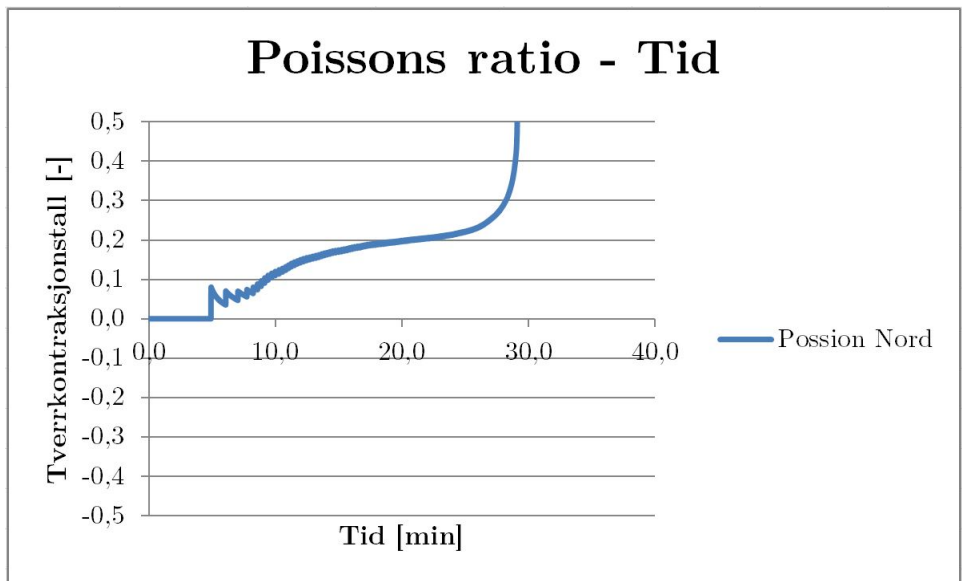
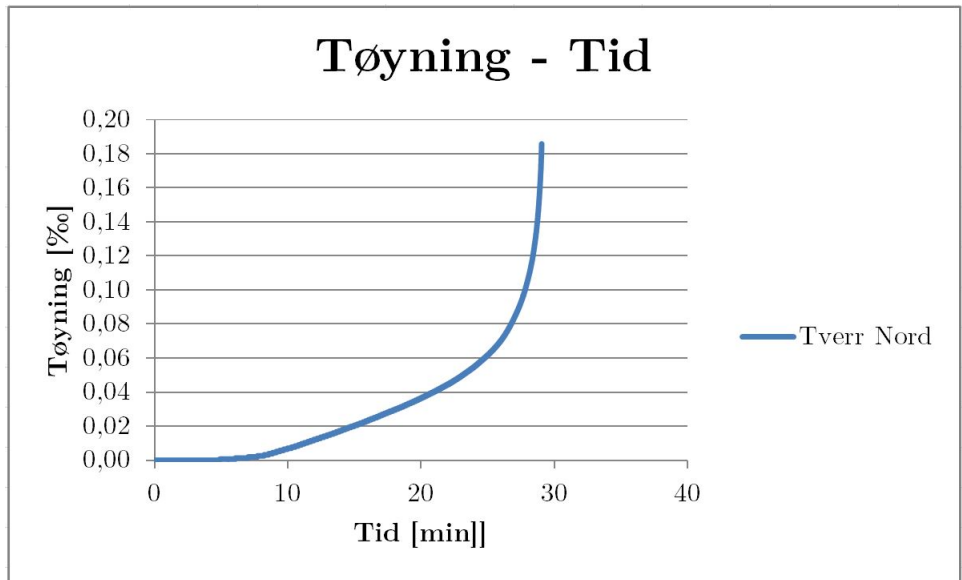
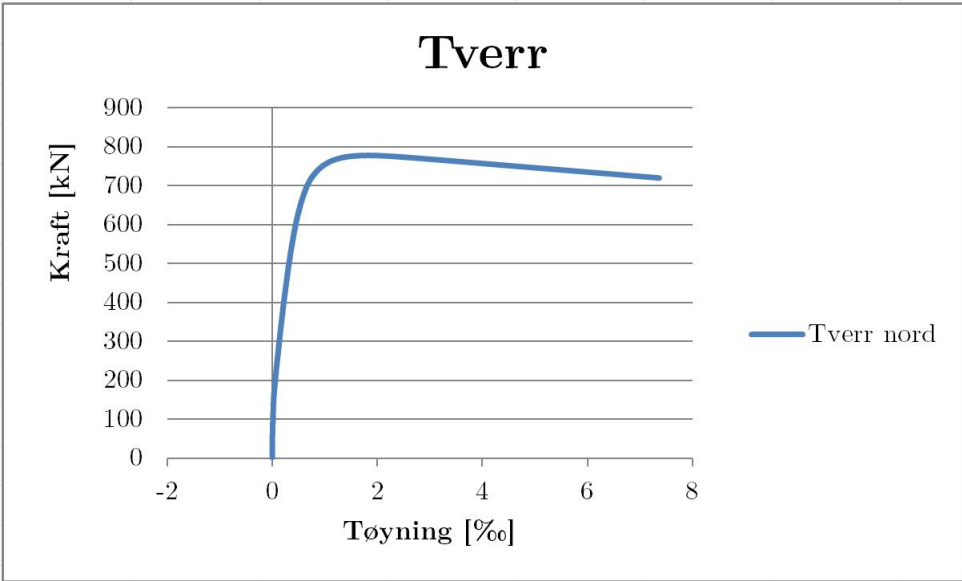




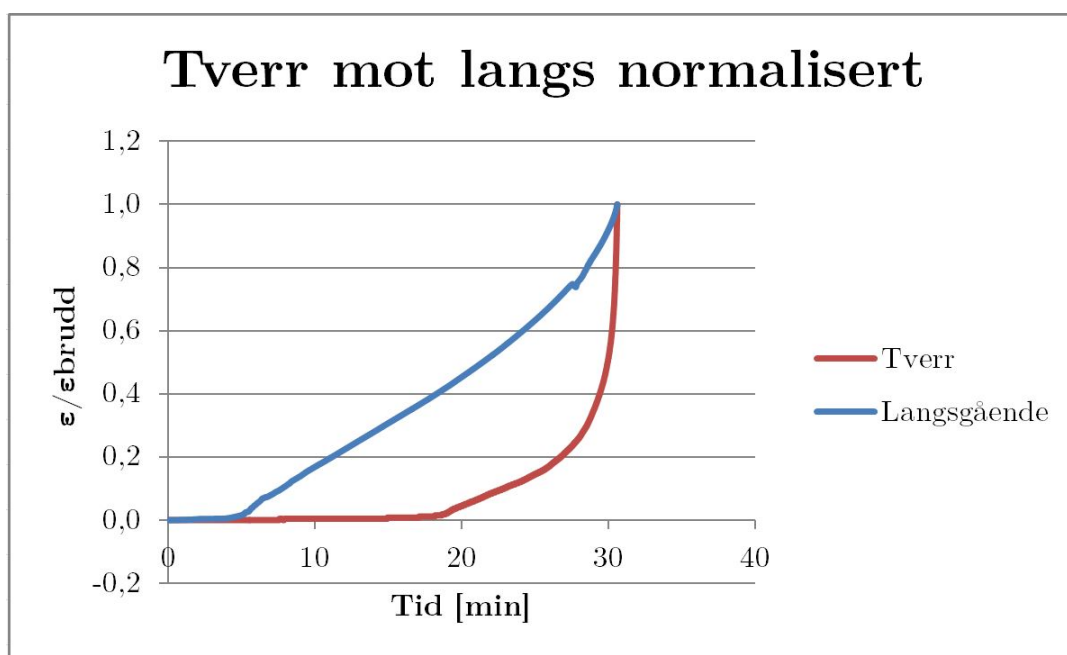
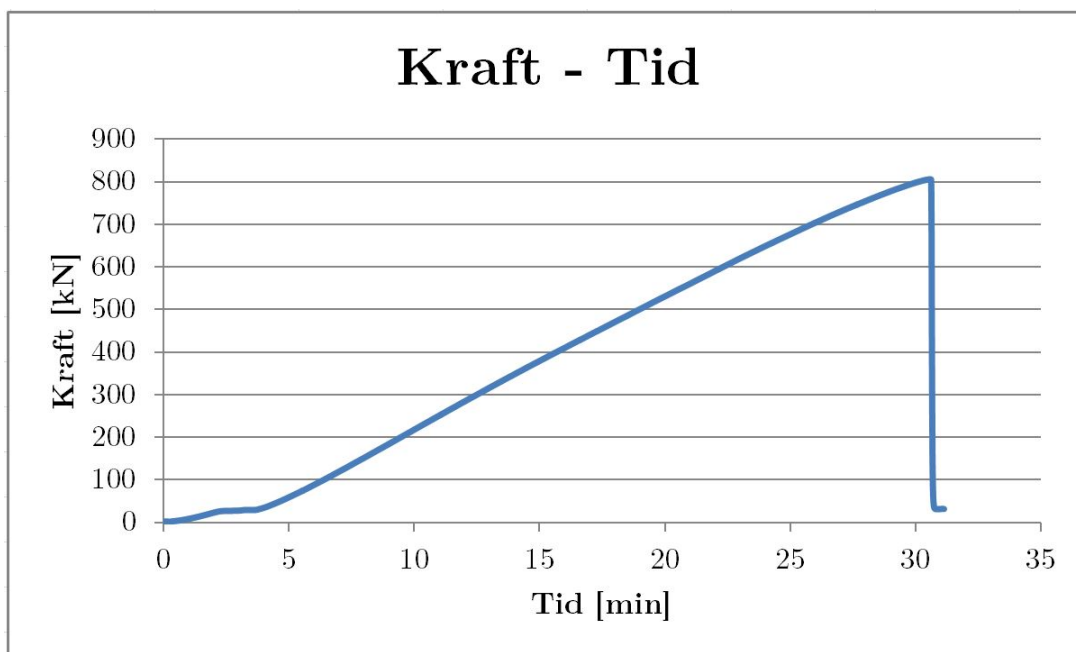
F.17 NDC - 1,0% søyle 3

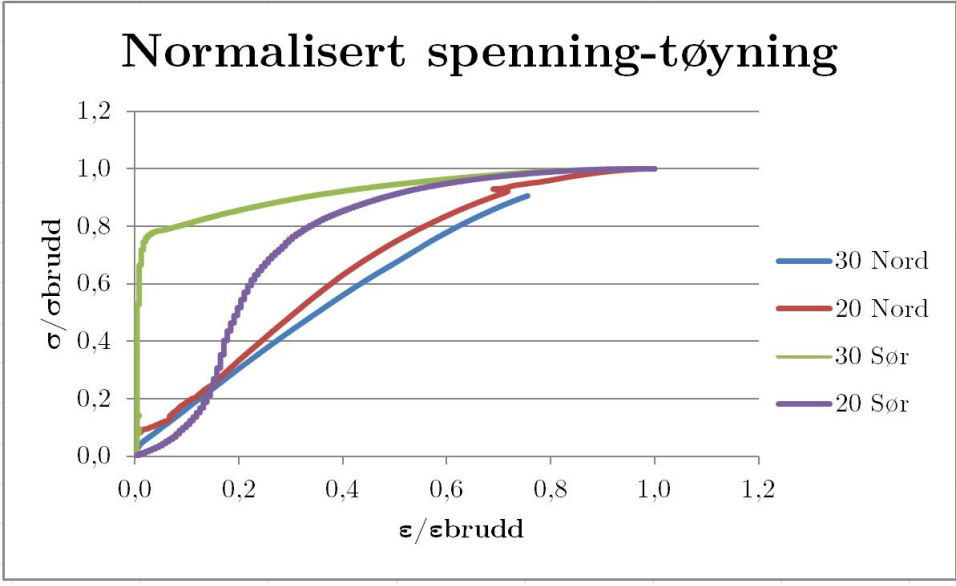
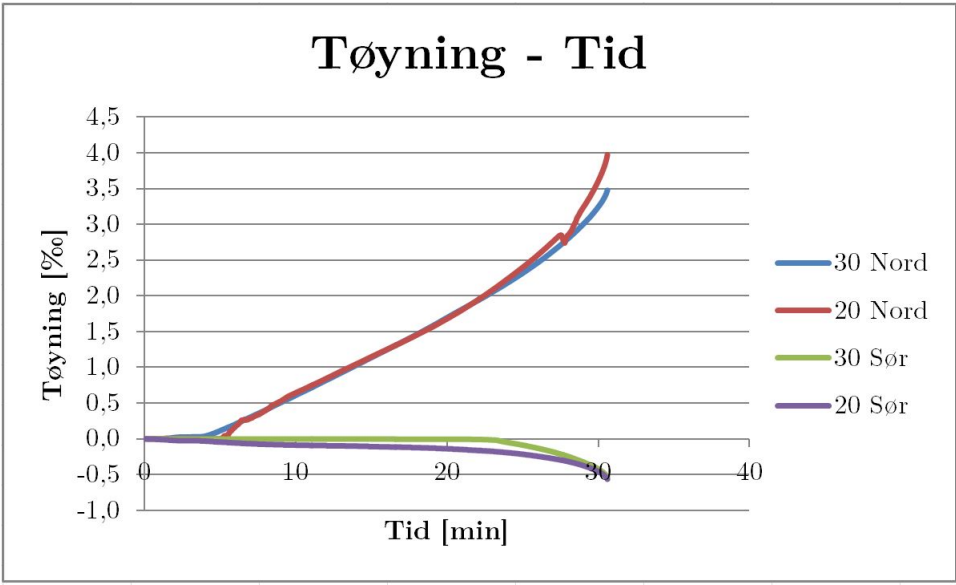
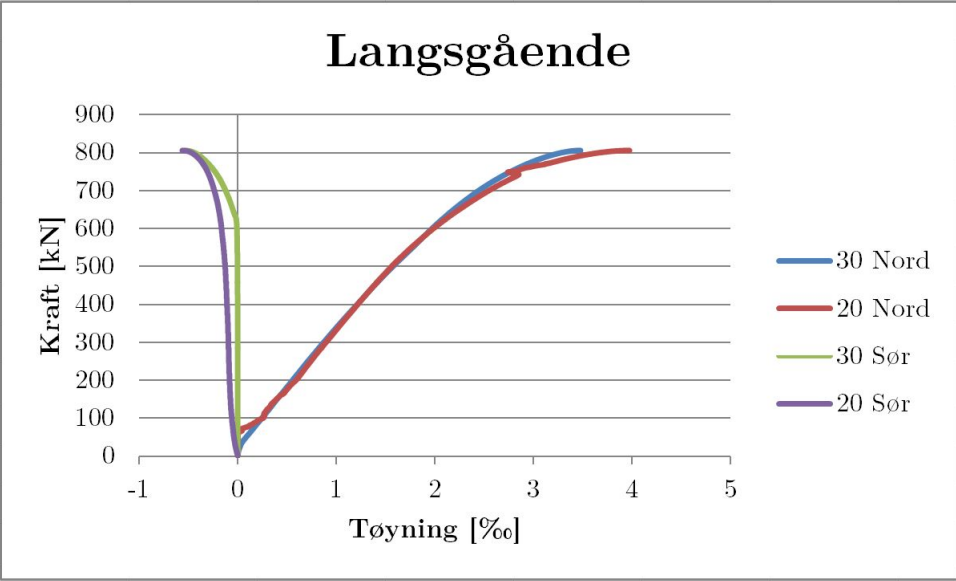


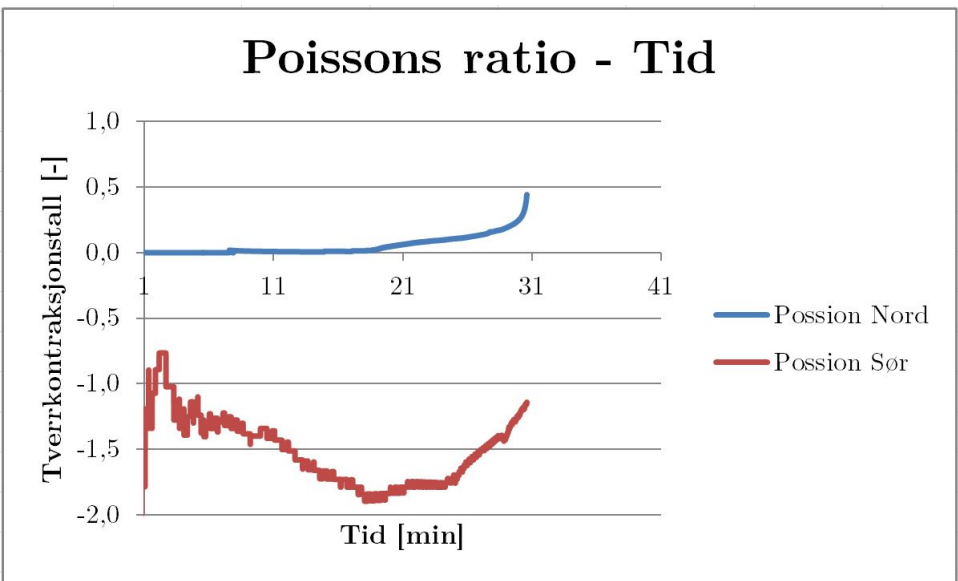
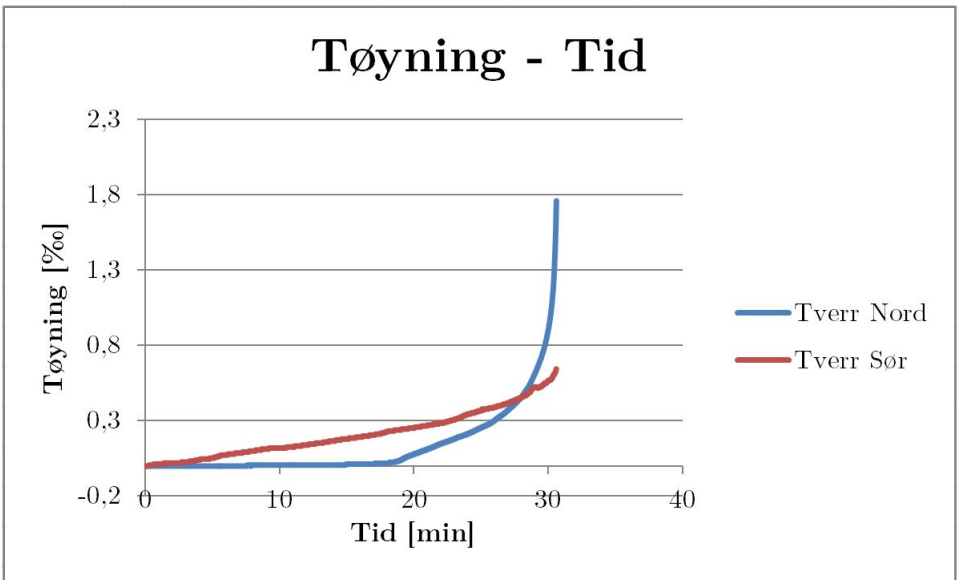
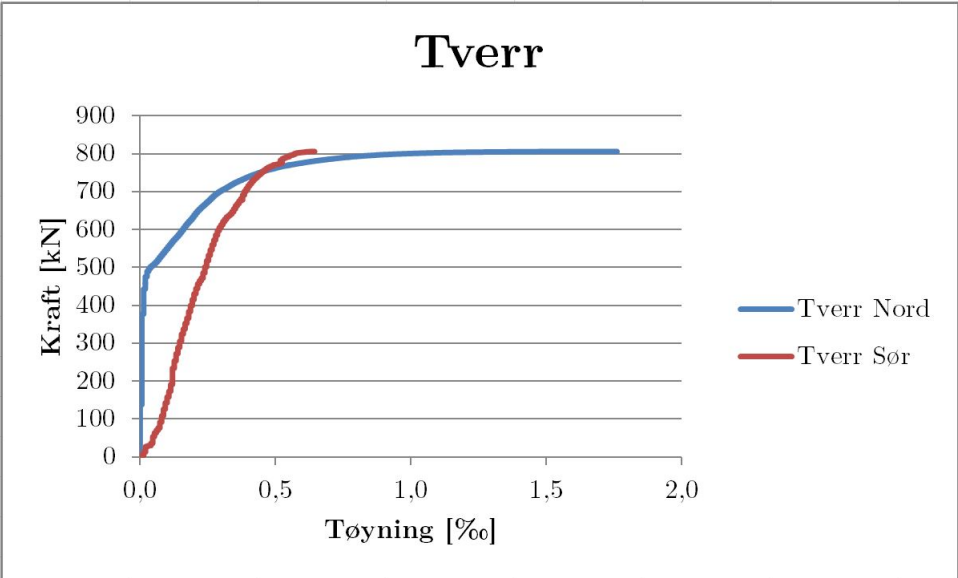




F.18 NDC - 1,0% søyle 4









G Diverse beregninger

G.1 Tøyningsberegninger

Antar at ved et større testvolum av betongblandingene vil det vise seg at f_{ck} er normalfordelt da dette er oppførselen som er grunnlaget for verdiene oppgitt i EC2. Med denne antagelsen kan den karakteristiske verdien av testdataene våre regnes ut etter ligning 1. Hvor Φ^{-1} hentes ut fra tabellen for standardnormalfordelingen og er lik $-1,64$. materialverdiene brukt i utregning er hentet fra resultatene av sylindertesting, årsaken til dette er at disse resultatene er sikrere da testmetoden er standardisert.

$$f_{ck} = \mu_{f_{ck}} + \Phi^{-1}(0,05) \cdot S_{f_{ck}} \quad (1)$$

Resultatene for utregnede karakteristiske verdier for f_{ck} er presentert i tabell 2

Formler NDC

Tillatte tøyninger for NDC er beregnet etter formlene vist i ligning 2-6 og presentert i tabell 2. Formlene er hentet fra tabell 3.1 i EC2 da $f_{ck} > 50N/mm^2$.

$$f_{cm}[N/mm^2] = f_{ck} + 8[N/mm^2] \quad (2)$$

$$\varepsilon_{c1}[\%] = 0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cu1}[\%] = 2,8 + 27 \cdot \left(\frac{98 - f_{cm}}{100}\right)^4 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{c2}[\%] = 2,0 + 0,085 \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cu2}[\%] = 2,6 + 35 \cdot \left(\frac{90 - f_{ck}}{100}\right)^4 \quad (6)$$

Formler LWC

Tabell 1 viser utregnede verdier som er nødvendige for å beregne tillatte tøyninger for LWC. Disse verdiene er regnet ut etter formlene vist i lign 7-9 som er hentet fra tabell 11.3.1 i EC2 bortsett fra formelen for E_{lcm} som er hentet fra tabell 3.1. I formlene for korreksjonsfaktorene η_1 og η_e skal ρ være ovenstørr densitet, da dette ikke var en av testparametrene som ble målt er det her blitt brukt romdensitet. Korreksjonsfaktorene vil i realiteten være noe lavere enn det som presenteres i tabell 1.

Tabell 1: Div verdier for utregning av tillatt tøyning

	η_1	η_e	E_{lcm}	k
LWC 0,0%	0,87	0,62	35,8	1
LWC 0,5%	0,88	0,63	36,1	1
LWC 1,0%	0,91	0,71	32,7	1

$$\eta_1 = 0,4 + \frac{0,6\rho}{2200} \quad (7)$$

$$\eta_e = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 \quad (8)$$

$$E_{lcm} = 22 \cdot \frac{f_{cm}^{0,3}}{10} \quad (9)$$

Tillatte tøyninger etter EC2 er beregnet etter formlene gitt i ligning 11-14 og presentert i tabell 2. Faktoren k i ligning 11 er lik 1 da betongen ikke hadde sand som tilslag.

$$f_{lcm}[N/mm^2] = f_{lck} + 8[N/mm^2] \quad f_{lck} > 20[N/mm^2] \quad (10)$$

$$\varepsilon_{lc1}[\%] = \frac{k \cdot f_{lcm}}{E_{lcm} \cdot \eta_e} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{lcu1}[\%] = \varepsilon_{lc1} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{lc2}[\%] = 2,0 \quad (13)$$

$$\varepsilon_{lcu2}[\%] = 3,5 \cdot \eta_1 \quad (14)$$

G.1.1 Resultater tøyningberegninger

Verdiene for LWC 1,0% i tabell 2 ikke representative for betongen da prøvestykkene innenfor denne serien hadde veldig stor variasjon på fasthet. Dette kom av at det var ett støpereir i sylindere 2 samt densiteten til sylindere 1 var ca. 400g tyngre enn de to andre testobjektene. Dette førte til stor spredning i testresultat som igjen fører til en veldig lav karakteristisk verdi.

Tabell 2: Tillatte tøyninger regnet ut fra materialdata

	$x_k[N/mm^2]$	$\varepsilon_{lc2}[\%]$	$\varepsilon_{lcu2}[\%]$	$\varepsilon_{lc1}[\%]$	$\varepsilon_{lcu1}[\%]$
LWC 0,0%	42,9	2,0	3,1	2,3	2,3
LWC 0,5%	44,3	2,0	3,1	2,3	2,3
LWC 1,0% *	29,3	2,0	3,2	1,6	1,6
	$x_k[N/mm^2]$	$\varepsilon_{c2}[\%]$	$\varepsilon_{cu2}[\%]$	$\varepsilon_{c1}[\%]$	$\varepsilon_{cu1}[\%]$
NDC 0,0%	59,5	2,3	2,9	2,6	3,4
NDC 0,5%	56,2	2,2	3,1	2,5	3,6
NDC 1,0%	68,1	2,4	2,7	2,7	3,0

*Store variasjoner i testresultater for sylindere se vedlegg E.