



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer	Vårsemesteret, 2015 Åpen
Forfatter: Roald Wigestrånd
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: Betongens egenskaper i arktiske temperaturer Engelsk tittel: Properties of concrete in arctic temperatures	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Høyfast betong Lettbetong Egenskaper Lave temperaturer Nedfrysning Vannmetningsgrad	Sidetall: 79 + vedlegg/annet: 29 Stavanger, 12.06.15

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler mekaniske egenskaper i betong under lave temperaturer, og tar for seg både normal- og lettbetong. Oppgaven tar også for seg hvordan vann fryser i betong og hvordan betongens egenskaper blir forandret ved lavere temperaturer. Spesielt beskriver oppgaven hvordan vannmetningsgraden av betong ved nedfrysning spiller inn på utviklingen av de mekaniske egenskapene.

I oppgaven har det blitt støpt store mengder betong, og det har blitt gjort forsøk både på den ferske og herdede betongen. For å bestemme hvordan betongens egenskaper blir forandret, har prøvestykker blitt fryst ned til 0, -20 og -45°C. Deretter har tester for å fastslå trykkfasthet, spaltestrekfasthet, elastisitetsmodul, arbeidsdiagram og bøyestrekfasthet blitt utført. Disse resultatene har blitt sammenlignet med referansetester som har blitt utført ved 20°C. Resultatene ble også sammenlignet mot resultater fra beregningsmodeller som er lagt frem i litteraturen for å estimere egenskaper ved lave temperaturer.

Resultatene fra testene viser at fuktinnhold i betong har stor innvirkning på økning av trykkfasthet, strekkfasthet og elastisitetsmodul. Arbeidsdiagrammene viste en klar tendens til at prøvestykkene ble mer sprø ved lavere temperaturer. Ovnstørket betong som ble testet hadde markant mindre økning av trykkfasthet og strekkfasthet ved nedfrysning, og ingen økning av elastisitetsmodul. Lettbetong hadde tilsvarende, men mindre økning i forhold til normalbetongen som ble testet.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	1
Innholdsfortegnelse	2
Forkortelser	6
Symboler	6
Forord.....	8
Innledning.....	9
1 Teori	10
1.1 Betong.....	10
1.1.1 Sement.....	10
1.1.2 Tilslag	11
1.1.3 Vann og fuktighet	12
1.1.4 Pozzolaner	13
1.1.5 Tilsetningsstoffer	14
1.1.6 Vanninnhold i herdet betong.....	14
1.1.7 Høyfast betong	15
1.1.8 Egenskaper i fersk betong.....	16
1.2 Lettbetong.....	16
1.2.1 Lett tilslag	17
1.2.2 Forskjeller fra vanlig betong	17
1.3 Mekaniske egenskaper i herdet betong	19
1.3.1 Trykkfasthet.....	19
1.3.2 Strekkfasthet	19
1.3.3 Elastisitetsmodul	20
1.3.4 Arbeidsdiagram	20

1.3.5 Bøyestrekfasthet.....	21
1.4 Kryogenisk betong.....	21
1.4.1 Frysemekanismer.....	21
1.4.2 Mekaniske egenskaper i betong under lave temperaturer.....	23
2 Prøveprogram og materialer.....	33
2.1 Info om prøveprogrammet.....	33
3 Fremgangsmåte av laboratorieprogram.....	34
3.1 Blanding.....	34
3.1.1 Proporsjonering.....	34
3.1.2 Blandeprosedyre.....	34
3.2 Prøving av fersk betong.....	34
3.2.1 Synkmål.....	34
3.2.2 Luftinnhold.....	35
3.2.3 Densitet.....	36
3.3 Utstøping.....	37
3.3.1 Terninger.....	37
3.3.2 Sylindere.....	38
3.3.3 Bjelker.....	38
3.4 Prøving av herdet betong.....	39
3.4.1 Vanntetningsgrad.....	39
3.4.2 Nedfrysning.....	40
3.4.3 Trykkfasthet.....	40
3.4.4 Spaltestrekfasthet.....	41
3.4.5 Elastisitetsmodul.....	42
3.4.5 Arbeidsdiagram.....	44
3.4.6 Bøyestrekfasthet.....	45

3.5 Utstyr brukt i forbindelse med testingen	46
3.5.1 Klimaskap.....	46
3.5.2 Varmeskap	47
3.5.3 Tonitech trykkpresser	47
3.5.4 Temperaturmåler	47
3.5.5 Komprimeringsmaskin	47
3.6 Materialer.....	47
3.6.1 Stalite	48
3.6.2 «Speedy moisture tester».....	48
4 Eksperimentelt resultat og diskusjon.....	49
4.1 Fersk betong.....	49
4.1.1 Synkmål.....	49
4.1.2 Densitet	50
4.1.3 Luftinnhold.....	51
4.2 Trykkfasthet	52
4.2.1 7-døgns trykkfasthet.....	52
4.2.2 28-døgns trykkfasthet.....	53
4.2.3 Økning av trykkfasthet.....	54
4.2.4 Tilslagets påvirkning på økning av trykkfasthet	57
4.3 Spaltestrekkfasthet	57
4.3.1 Spaltestrekkfasthet resultater	58
4.3.2 Økning av spaltestrekkfasthet	59
4.4 Elastisitetsmodul.....	62
4.4.1 Elastisitetsmodul resultater.....	62
4.4.2 Økning av elastisitetsmodul.....	63
4.5 Arbeidsdiagram	64

4.5.1 Normal betong	65
4.5.2 Umettet betong	66
4.5.3 Lettbetong.....	67
4.6 Bøystrekkfasthet	68
4.6.1 Bøystrekkfasthet resultater.....	69
4.6.2 Økning av bøystrekkfasthet	70
4.7 Temperaturmåling.....	71
4.7.1 Temperatur resultater.....	71
4.7 Feilkilder	72
5 Konklusjon	73
Referanser.....	74
Figurliste.....	77
Tabell liste	79

Forkortelser

<i>ND</i>	Normal betong
<i>NDU</i>	Umettet normal betong
<i>LWA</i>	Lettbetong

Symboler

A_c	tversnittsareal
D	Densitet
E	Elastisitetsmodul
$E_{c,s}$	stabilisert sekantmodul av elastisitet
F	bruddlast
f_c	trykkfasthet
$f_c(T)$	trykkfastheten ved temperaturen T
$f_{cm}(T;m)$	trykkfastheten ved temperaturen T og vanninnholdet m
$f_{cm}(20^\circ\text{C})$	trykkfastheten ved 20°C
$\Delta f_{cm}(T;m)$	økning av trykkfasthet ved temperaturen T og vanninnholdet m
$\Delta f_{cm}(T)$	økningen av trykkfasthet ved temperaturen T
$f_{csp}(T)$	spaltestrekkfastheten ved temperaturen T
f_{ct}	bøyestrekfasthet
l	avstanden mellom støtter
L_0	opprinnelig målelengde
ΔL	lengdeforandring
T	Temperatur
t	tid
σ_{cl}	trykkfastheten ved lave temperaturer
σ_{co}	trykkfastheten ved romtemperatur
$\Delta\sigma_c$	økningen i trykkfasthet ved lave temperaturer
σ	spenning

σ_a	øvre spenningsnivå - $f_c/3$
σ_b	laveste spenningsnivå - $0,10 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \cdot f_c$
σ_p	forspenning - $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
σ_a^m	øvre registrerte spenningsnivå
σ_p^m	laveste registrerte spenningsnivå
ε	tøyningen
$\varepsilon_{a,3}$	tøyningen registrert ved slutten av tredje øvre spenningsnivå
$\varepsilon_{p,2}$	tøyningen registrert ved slutten av andre laveste spenningsnivå

Forord

Først og fremst vil jeg takke min veileder Kjell Tore Fosså. Hans veiledning for å finne oppgave og å veilede meg gjennom hele våren har vært til stor hjelp for meg i å gjennomføre oppgaven.

Har i mer enn to måneder denne våren jobbet ved betonglaboratoriet ved Universitet i Stavanger. Vil rette en stor takk til mine medstudenter Phong Vo, Grete Falk Gabrielsen, Kjetil Refsland og Jørgen Evjen for god hjelp og gode råd gjennom denne tiden. Vil også takke hele personalet ved betonglaboratoriet, og spesielt Samdar Kakay som stod på for å hjelpe meg med problemene som oppsto.

Vil til slutt takke min kjære Sandra som ikke bare har hjulpet meg praktisk med denne masteravhandlingen, men som har måtte høre meg snakke om hvor fantastisk betong er de siste 5 årene.

Avhandlingen er gjennomført på Universitetet i Stavanger, ved det Teknisk – Naturvitenskapelig fakultet, som også har stått for de økonomiske utgiftene. Oppgaven er todelt og er et resultat av et litteraturstudium og eksperimentelle tester som vi har gjennomført.

Innledning

Offshore betongkonstruksjoner i arktiske strøk vil bli utsatt for ekstreme temperaturer i vintersesongen. Temperaturer har en effekt på betongens egenskaper, og formålet med denne oppgaven er å identifisere hvilken effekt lave temperaturer i høyfast betong har på betongens herdnede egenskaper.

Når betong blir kjølt ned, forventes det at betongen får høyere fasthet og blir mer sprø. Dette vil i stor grad bli bestemt av fuktinnhold av betongen. Typen tilslag som er brukt i betongen vil også ha innvirkning på forandringen av egenskaper. Dette blir nærmere beskrevet i første kapittel som omhandler en litteraturstudie av betong, lettbetong og kryogenisk betong.

I tillegg til litteraturstudiet er det utført arbeid ved betonglaboratoriet ved Universitetet i Stavanger. Her har det blitt støpt og testet mye betong, og fremgangsmåten for støpingen, hva som er støpt og hvordan det er testet er beskrevet nærmere i kapittel 2. I kapittel 3 blir prøveprogrammet og materialene som har vært brukt gjennomgått.

I kapittel 4 presenteres resultatene etterfulgt av en diskusjon. Resultatene blir her sammenlignet mot hverandre og mot teorien som ble presentert i kapittel 1.

Til slutt består kapittel 5 av konklusjon av arbeidet som har blitt gjort.

1 Teori

1.1 Betong

Betong er en blanding av i hovedsak fem forskjellige materialer. Disse materialene er vann, sement, tilslag, pozzolaner og tilsetningsstoffer. Hvor mye og hvilken type material som brukes, har stor påvirkning på egenskapene den herdede betongen får, og vil også påvirke hvordan betongen oppfører seg under lave temperaturer.

1.1.1 Sement

Sementen som oftest blir brukt i dag er Portlandsement, og denne blir brukt i hele verden. Portlandsement ble originalt kalt dette siden den lignet på naturstein fra Portland i Dorsetshire, både i utseende, hardhet og fasthet. Her i Norge startet produksjonen av Portlandsement i 1892. På dagens marked finnes det flere forskjellige sementer. Sement som er til salgs i Norge må innfri krav fra Norsk Standard.

Råmaterialene i sement består stort sett av kalk, men inneholder også flere andre stoffer, som silisium-, aluminium, jern- og magnesiumoksider. Disse råmaterialene blir under produksjon av sement varmet opp til 1450°C i en roterovn. Det blir da dannet portlandsklinker, som blir tilsatt litt gips og gjerne andre tilsetningsstoffer før den knuses og males til sement. Etter at råmaterialet har vært gjennom roterovnen, består Portlandsement i hovedsak av 4 faser, se tabell.

TABELL 1: FASER I PORTLANDSEMENT [1]

Faser	Mineralogisk navn	Kjemisk formel	Forkortelse
Trikalsium silikat	Alite	$3\text{CaO} * \text{SiO}_2$	C ₃ S
Dikalsium silikat	Belite	$2\text{CaO} * \text{SiO}_2$	C ₂ S
Trikalsium aluminat	Aluminate	$3\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A
Tetrakalsium aluminatferitt	Feritt	$4\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF

Når sement blir blandet med vann, starter en prosess som kalles hydratisering. Her blir det dannet kalsium silikat hydrat, også kalt C-S-H gel. Når hydratiseringen starter, vil betongen

begynne å størkne, og hydratiseringen vil styre fasthetsutviklingen av betongen. I forbindelse med hydratiseringen vil det skje en del varmeutvikling.

Forskjellige typer sement består av ulike andeler av de forskjellige fasene som er nevnt i tabell 1, og dette påvirker hvordan hydratiseringen vil foregå. Dette vil da også påvirke fasthetsutviklingen av betongen og temperaturutviklingen i betongen.

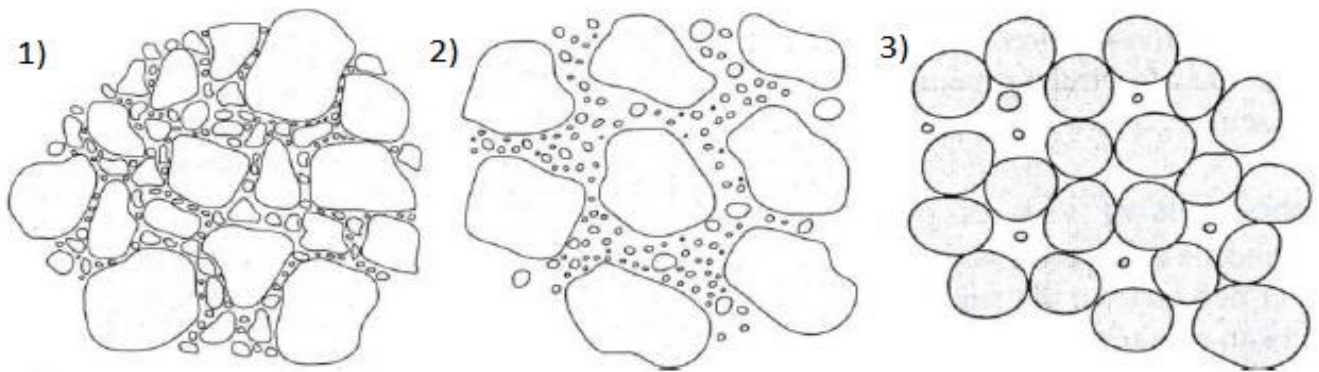
1.1.1.1 Norcem Anleggsement FA

I denne oppgaven blir Norcem Anleggsement FA brukt. Dette er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen er godt tilpasset for bruk i konstruksjoner med krav til høy slutfasthet. Sementen gir også god støpelighet, selv om relativt lite vann blir tilsatt blandingen. Varmeutviklingen er relativt lav i denne sementen, og tidligfastheten er også lav i forhold til for eksempel Norcem Industrisement. Norcem Anleggsement FA tilfredsstiller kravene til Portland flygeaskesement. NS-EN 197-1-CEM II/A-V42,5 N. Mer info om sementen kan finnes i vedlegg.

1.1.2 Tilslag

Sand, grus og stein som blir blandet i betongen blir ofte samlet under begrepet tilslag. Vanligvis utgjør tilslaget 65-75% av betongens volum. Det er vanlig å skille mellom fint tilslag og grovt tilslag. Fint tilslag er sand, og har ofte kornstørrelse med gradering 0-8 mm, mens grovt tilslag har kornstørrelse over 8 mm for eksempel 8-16 mm og 8-22 mm.

Grunnen til at graderingen deles opp slik, er for å få en god korngradering. Man oppnår en god korngradering når det er en jevn fordeling av de forskjellige kornstørrelsene, slik at de mindre kornene kan fylle igjen hulrommene som oppstår mellom de større kornene. Dette gir en sterkere betong og en fersk betong som er lettere å bearbeide.



FIGUR 1: FORSKJELLIGE TILSLAGSSAMMENSETNINGER: 1) BRA GRADERING, 2) MIDDELS GRADERING, 3) DÅRLIG GRADERING [2]

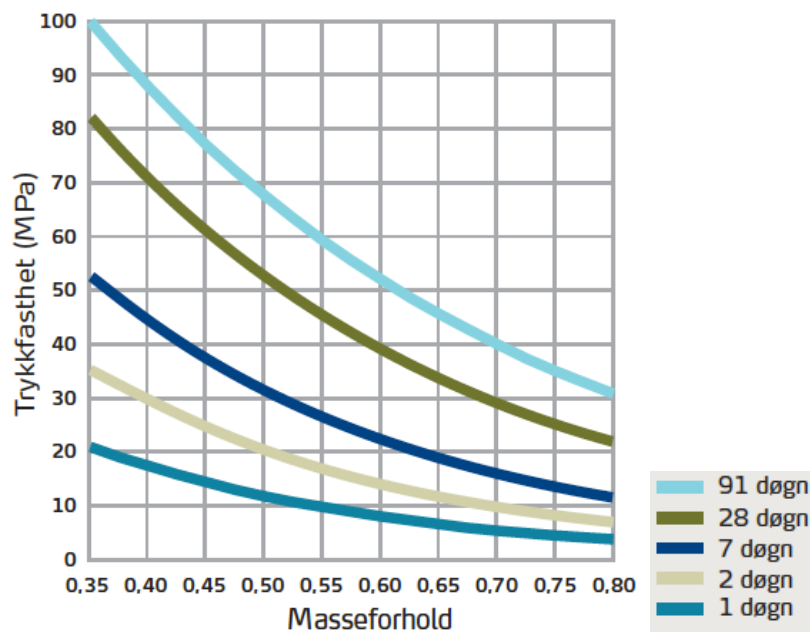
Opptil 75% av volumet til betongen kan bestå av tilslag, og vekten av tilslaget kan derfor utgjøre stor forskjell for betongens vekt. Det skilles dermed mellom normalt tilslag, lett tilslag og tungt tilslag. Normal tilslag har en korndensitet på mellom 2000 kg/m^3 – 3000 kg/m^3 . Tungt tilslag har en korndensitet på større eller lik 3000 kg/m^3 , mens lett tilslag har en korndensitet på mellom 800 kg/m^3 – 2000 kg/m^3 .

1.1.3 Vann og fuktighet

Vanninnholdet i betongen har stor betydning for egenskapene til betongen. For fersk betong vil vannet ha påvirkning på støpeligheten på betongen, da mer tilsatt vann vil gi økt avstand mellom partiklene og dermed økt støpelighet. Tilsatt vann vil også ha en direkte påvirkning på betongens styrke, da i sammenheng med hvor mye sement som er tilsatt. Se formel under:

$$\frac{\text{totalt vann tilsatt-absorpsjon}}{\text{sement}} = \text{masseforhold} = \frac{v}{c} \text{ tall} \quad (1-1)$$

Dette masseforholdet benyttes til å beregne fasthet på den ferdig herdede betongen. Sluttfastheten kan beregnes utfra w/c-tallet som blir benyttet, og hvilken sement som blir brukt.



FIGUR 2: FASTHETSUTVIKLING AV ANLEGGSEMENT FA BASERT PÅ W/C-TALL [DATABLAD]

Figuren over viser fasthetsutviklingen til betong støpt med Anleggsement FA. En kan se ifra figuren at lavere w/c-tall vil gi høyere slutfasthet. Det er derfor viktig å vite hvor mye vann som er i blandingen. Tilsetningsstoffer og tilslag kan både absorbere fuktighet, og ha fuktighet i seg, og det gjelder derfor å ha kontroll på dette når betongen skal støpes.

1.1.4 Pozzolaner

Pozzolaner er stoffer som ikke danner faste forbindelser i kontakt ved vann. Først når de kommer i kontakt med kalsiumhydroksid, C-S-H gel, reagerer de og danner et sementliknende materiale. Når pozzolaner reagerer med C-S-H gel dannes bindestoffer, og dermed øker fastheten og tettheten til betongen. Pozzolaner kan dermed brukes i tillegg til, eller for å erstatte sementmengden i betongen. [1]

1.1.4.1 Flygeaske

I denne oppgaven er det brukt Norcem Anleggsement FA. Denne sementen er iblandet 20% flygeaske. Flygeaskepartiklene er 10-20 μm i størrelse og har en spesifikk overflate lik typisk sement på rundt 300-500 m^2/kg . Asken øker støpeligheten til betongen og gir en høyere langtidsfasthet. Den pozzolanske reaksjonen skjer veldig sakte, og hvis nok fuktighet er til stede, kan reaksjonen foregå over flere år.

1.1.5 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer i betong er ifølge europeisk standard: «Material added during the mixing process of concrete in a quantity not more than 5% by mass of the cement content of the concrete, to modify the properties of the mix in the fresh and/or hardened state». [3]

Det finnes mange forskjellige tilsetningsstoffer som kan forandre flere egenskaper av betongen, de viktigste er:

- Vannreducerende/plastiserende og superplastiserende stoffer
- Lufttilførende stoffer
- Akselererende stoffer
- Retarderende stoffer

Har i denne oppgaven brukt superplastiserende stoffer.

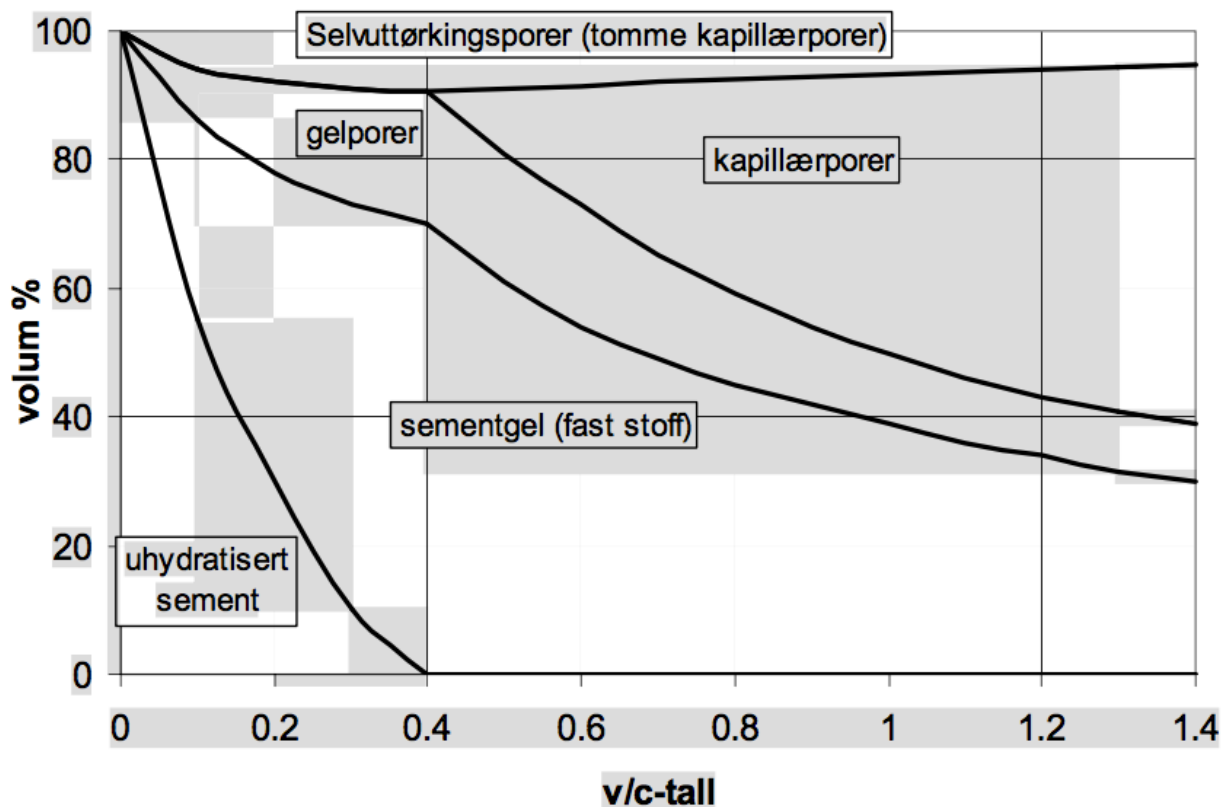
1.1.5.1 Vannreducerende/plastiserende stoffer og superplastiserende stoffer

Disse tilsetningsstoffene er de mest brukte tilsetningsstoffene i Norge. Hovedoppgaven til SP-stoffer er å spre sementpartikler som henger sammen. Dette vil gi bedre støpelighet for fersk betong. SP-stoffer kan bli brukt på forskjellige måter. Det kan brukes i tillegg til vann, og gi bedre støpelighet. Det kan også brukes samtidig som man fjerner vann, noe som vil gi lavere w/c-tall, og dermed høyere fasthet. I tillegg kan SP-stoff brukes samtidig som man fjerner vann og sement, som vil gi uendrede egenskaper. [1]

1.1.6 Vanninnhold i herdet betong

Herdet betong kan bli sett på som ett tofasert materiale, der den ene delen er tilslaget, og den andre delen er den herdete sementpastaen. Tilslaget har normalt liten evne til å absorbere vann, mens sementpastaen har høy porøsitet og kan inneholde mye vann.

Denne sementpastaen består ifølge Veen av hydrater av forskjellige sammensetninger (gel), Ca(OH)_2 -krystaller, sement som ikke har reagert med vann og av kapilærporer som var fylt av vann i fersk tilstand. [4]



FIGUR 3: VOLUM AV DE FORSKJELLIGE FASENE I BETONGEN UTFRA V/C-TALLET [1]

Fra figuren over kan man se at hvis man har lavere w/c-tall enn 0,4, vil man få mer sement som ikke er hydratisert, og man vil også få mindre kapillærporer. Hvis betong blir herdet i vann, er det mulig å få full hydratisering, men dette er ikke veldig sannsynlig, siden den stopper før kapillærporene er blitt tomme. [5] Hvis man da antar en gjennomsnittlig grad av hydratisering på 0,8 kan man estimere vanninnholdet i betongen med følgende formel:

$$m = \frac{12 \cdot \left(\frac{w}{c} - 0.20 \right)}{\frac{w}{c} + 0.32} \quad (1-2)$$

m er da i % av massen. [4]

1.1.7 Høyfast betong

Høyfast betong er ifølge Neville betong som har høyere fasthet enn B60 betong. [5] Ifølge norsk standard skal B60 betong ha karakteristisk trykkfasthet på 60 MPa for sylinder og 75 for terning etter 28-døgn herding. [6] Den enkleste måten å oppnå høyfast betong er å ha lave w/c-tall i betongen som skal støpes. Problemet med dette er at det da kan være vanskelig å få god støpelighet. Det er derfor viktig å bruke sement som får god støpelighet

selv ved lave w/c-tall. Norcems Industrisement og Anleggsement er eksempler på sementer som er velegnet til å bruke til høyfast betong.

1.1.8 Egenskaper i fersk betong

Som tidligere nevnt er støpelighet en veldig viktig egenskap i den ferske betongen. Tre egenskaper ved betongen spiller inn på støpeligheten [7]:

- Formbarhet - betongens evne til å fylle ut støpeformen og omslutte armeringen.
- Komprimerbarhet - betongens evne til å bli pakket ut.
- Stabilitet - betongens evne til å flyte ut, men samtidig opprettholde en jevn sammensetning i hele massen.

Betongens støpelighet kan bli testet på mange forskjellige måter. En vanlig måte å teste formbarheten er synkmålstesten. Denne testen blir nærmere beskrevet i kap. 2.2.1, og viser enkelt om betongen er formbar eller ikke, og hvor formbar den eventuelt er. Hvis den ikke blir så formbar som ønskelig, er det mulig å tilsette betongen mer superplastiserende stoff for å få bedre støpelighet.

En annen viktig parameter for fersk betong er luftinnholdet i betongen. Dette kan bli målt i den ferske betongen for å se at det ligger på det nivået det har blitt proporsjonert å ligge på. Måten dette måles på blir beskrevet i kap. 2.2.2. For betong som skal tåle frost, er det viktig å ha luftinnhold $>4\%$, siden det vil hindre oppsprekking av betongen under gjentatte tine/fryse sykluser. Det er likevel viktig å ikke ha ett for høyt luftinnhold, siden det vil virke negativt på fastheten til betongen. En tommelfingerregel er at fastheten synker med 5% for hvert prosent ekstra luft. [1]

1.2 Lettbetong

Lettbetong er betong hvor hele eller deler av tilslaget er blitt byttet ut med annet tilslag som har lavere densitet enn vanlig tilslag. Siden tilslaget står for opptil 75% av volumet til betongen kan dette ha stor innvirkning på betongens densitet og egenvekt. Lettbetong klassifiseres av Neville som betong med densitet mellom 300 og 1850 kg/m³. [5]

1.2.1 Lett tilslag

Det finnes mange forskjellige typer lett tilslag. Fint tilslag kan oppnås ved å bruke lettvekt sand i stedet for normal sand. Lettvekt sand er ofte knust leca klinker. Hvis deg grove tilslaget også er ett lett tilslag, vil dette føre til en betong med veldig lav densitet.

I denne oppgaven blir bare det grove tilslaget byttet ut med et lettere tilslag. Som fint tilslag blir sand brukt både for normal og lettbetong. Dette vil gi betongen en betydelig lavere densitet.

1.2.2 Forskjeller fra vanlig betong

1.2.2.1 Fasthet

Lett-tilslaget er som regel mer porøst, og har lavere fasthet enn vanlig tilslag, dette vil også føre til at lettbetong har lavere fasthet enn normalbetong. Fastheten er fortsatt først og fremst styrt av w/c-tallet, og det er mulig å oppnå høyfast lettbetong hvis w/c-tallet er lavt nok. Dersom to typer betong er tilsatt akkurat de samme materialene, men at den ene har vanlig og den andre har lett tilslag, vil betongen med lett tilslag oppnå lavere fasthet. Ifølge Neville har dette sammenheng med at det grove lett-tilslaget er svakt, og blir den begrensende faktor for styrken av betongen. [5]

Norsk standard angir krav til fasthetsklasse for lettbetong i NS-EN 206-1 og har noe forskjellige krav i forhold til hva den angir for vanlig betong. Dette kan sees i tabell 2.

TABELL 2: FASTHETSKLASSER FOR LETTBETONG [8]

Fasthetsklasse NS	LB12	LB20	LB25	LB30	LB35	LB45	LB55	LB65	LB75
CEN-betegnelse	LC12/13	LC20/22	LC25/28	LC30/33	LC35/38	LC45/50	LC55/60		
Karakteristisk sylindrefasthet f_{ock}	12	20	25	30	35	45	55	65	75
Karakteristisk terningfasthet f_{ck} ¹⁾	13	22	28	33	38	50	60	72	83
¹⁾ Andre verdier kan benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindere er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen									

1.2.2.2 Vanninnhold

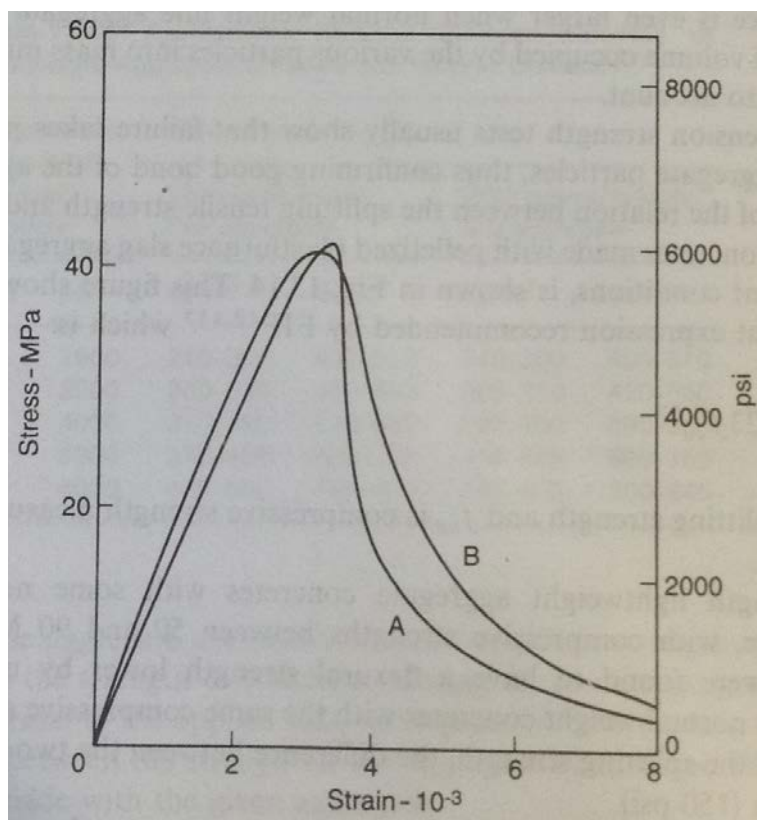
Som nevnt tidligere er lett-tilslag som regel porøst. Dette vil si at tilslagets evne til å absorbere vann er høyere enn hva det er for vanlig tilslag. Dette kan føre til problemer med å holde kontrollen på w/c-tallet til betongen. Hvis absorpsjonsevnen til tilslaget ikke er riktig målt, kan vann bli absorbert i større eller mindre grad i forhold til det som er

beregnet. Dette kan igjen føre til at mer eller mindre vann er igjen til å reagere med sement, og vil lede til usikre resultater i den herdede betongen.

Tilslaget absorberer ikke alt vannet på en gang, og det kan derfor være lurt i å la den ferdig blandede betongen stå en stund i en re-mikser etter at den er blandet. Dette gjør at tilslaget kan få absorbert det vannet som det er målt til å kunne absorbere, og vil gjøre resultatene mer nøyaktige.

1.2.2.3 Duktilitet og sprøhet

Betong er i utgangspunktet ett lite duktilt og veldig sprøtt materiale. Hvis betongen blir påført last over flytegrensen, vil den normalt gå til brudd like etter. I motsetning til dette er stål er ett eksempel på ett lite sprøtt materiale, som tåler store plastiske deformasjoner før det går til brudd.



FIGUR 4: SPENNING-TØYNING DIAGRAM FOR LETT TILSLAG, A) KUN LETT TILSLAG, B) LECA KLINKER OG NATURLIG SAND [5]

Figuren over hvis ett spenning-tøyning diagram med to kurver. a)-kurven er en betong med bare lett-tilslag, og man kan se at den går raskere til brudd i forhold til b)-kurven som

er en betong med vanlig fint tilslag, men med lettere grovt tilslag. En betong med vanlig tilslag ville normalt hatt en mindre bratt kurve enn begge de to som er i diagrammet. Dette betyr at lettbetong gir lite forvarsel til feil før den går til brudd. Det blir ofte tilsatt fiber til lettbetongen for å forhindre dette, og for å gjøre lettbetongen mer duktil.

1.3 Mekaniske egenskaper i herdet betong

En stor del av denne oppgaven er å prøve ut de mekaniske egenskapene til betong i arktiske strøk. Skal derfor her gå gjennom de mekaniske egenskapene som skal testes.

1.3.1 Trykkfasthet

Trykkfasthet er den egenskapen til betong som er mest vanlig å teste. Det er også den egenskapen som bestemmer fasthetklassene til betong. I figuren under er fasthetklassene til normal betong listet opp.

TABELL 3: FASTHETSKLASSER FOR NORMALBETONG [8]

Fasthetsklasse NS	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
CEN-betegnelsen		C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C55/67				
Karakteristisk sylindrefasthet f_{cck}	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karakteristisk terningfasthet f_{ck} ¹⁾	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110
¹⁾ For fasthetsklasse B55 og høyere kan andre verdier benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindere er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen											

En kan se fra tabell 3 at det er forskjell om trykkfastheten blir testet på en terning eller sylinder. Det er vanlig å si at trykkfastheten til en sylinder er ca $0.8 \cdot$ trykkfastheten til en terning. [9] Kan se fra figuren over at dette stemmer ganske bra, selv om det blir nærmere $0,85 \cdot$ trykkfastheten til en terning med høyere fasthetsklasse enn B75.

1.3.2 Strekkfasthet

Strekkfastheten til betong er lav i forhold til trykkfastheten. For vanlig betong pleier strekkfastheten å være 10-12% av trykkfastheten, mens den bare er 4-6% for høyfast betong [1]. Det er derfor vanlig å armere betongen med stålarmring for å ta opp strekkspenningene som oppstår.

1.3.3 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul eller Youngs modul er forholdet mellom fasthet og forlengelse i ett materiale. E-modulen beskriver materialets motstandsevne mot elastisk deformasjon. Høyere e-modul betyr stivere materiale. E-modulen kan bli regnet ut ved hjelp av følgende formel:

$$E = \frac{\text{Spenning}}{\text{deformasjon}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1-3)$$

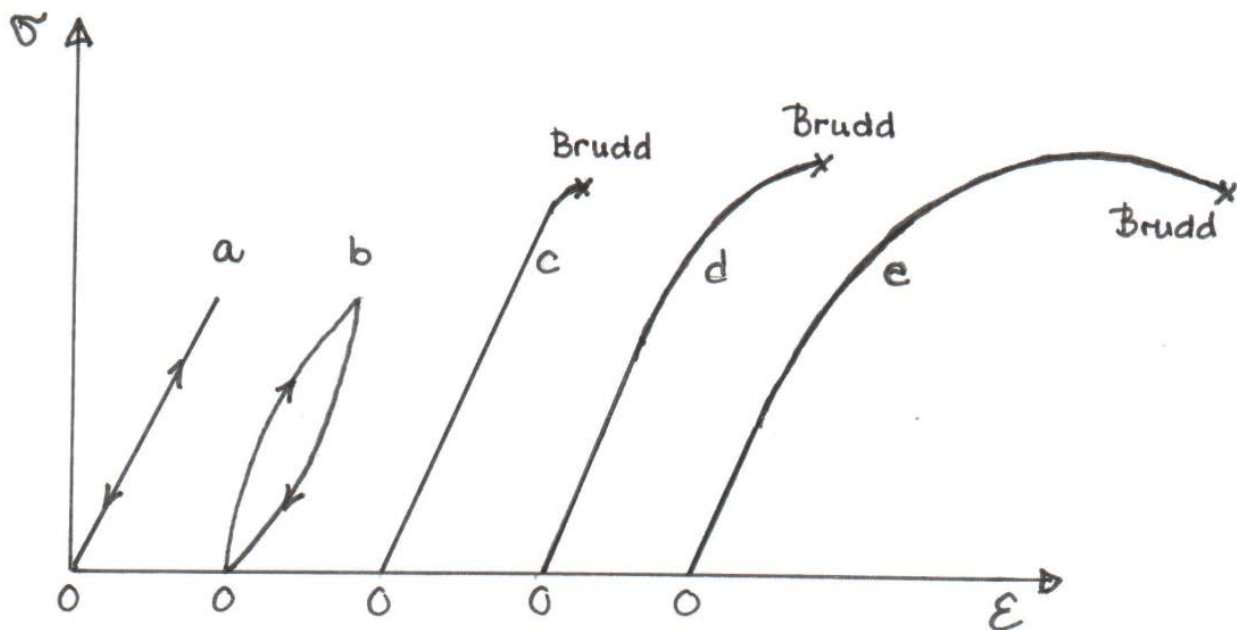
der

σ er spenning;

ϵ er deformasjon.

1.3.4 Arbeidsdiagram

Forholdet mellom spenning og tøyning i et prøvestykke kan visualiseres i ett diagram. Dette diagrammet kalles et arbeidsdiagram. Ifra dette diagrammet kan man se om materialet som blir testet er sprøtt eller duktilt. I figuren under er det tegnet flere forskjellige arbeidsdiagram, som viser forskjellige måter materialet kan oppføre seg på.



FIGUR 5: FORSKJELLIGE ARBEIDSDIAGRAM. A) RETTLINJET ELASTISK, B) IKKE RETTLINJET ELASTISK, C) SPRØTT MATERIALE, D) SVAKT DUKTILT MATERIALE, E) DUKTILT MATERIALE [10]

Betong er et sprøtt materiale og vil normalt falle inn i kategori c ifra figuren over.

1.3.5 Bøyestrekfasthet

Ifølge norsk standard kan bøyestrekfastheten til betong finnes ved hjelp av trepunkts eller fire punkts bøyetest. [11] I denne testen vil betongen bli påført større og større spenninger. Betongen vil etterhvert risse og deretter gå til brudd. Dette kan unngås hvis betongen blir armert ved hjelp av stålarmering, eller ved å bli tilsatt fiber. Dette vil gjøre betongen mer seig og duktil.

I denne oppgaven er det ikke blitt brukt noe armering eller fiber i prøvestykkene. Så fokus vil være på hvordan betongens bøyestrekfasthet oppfører seg når betongen blir nedkjølt.

1.4 Kryogenisk betong

Betong er det mest brukte byggematerialet i verden, og dens egenskaper er veldig godt dokumentert i både romtemperatur og høyere temperaturer. Hvordan betong oppfører seg i lavere temperaturer og videre mot kryogeniske temperaturer er derimot ikke like godt dokumentert. Kryogeniske temperaturer er temperaturer under -165 °C . [12] Siden det kreves mye energi for oppnå kryogeniske temperaturer, og det ikke har vært mange bruksområder for kryogenisk betong har det ikke blitt utført mye forskning på dette området.

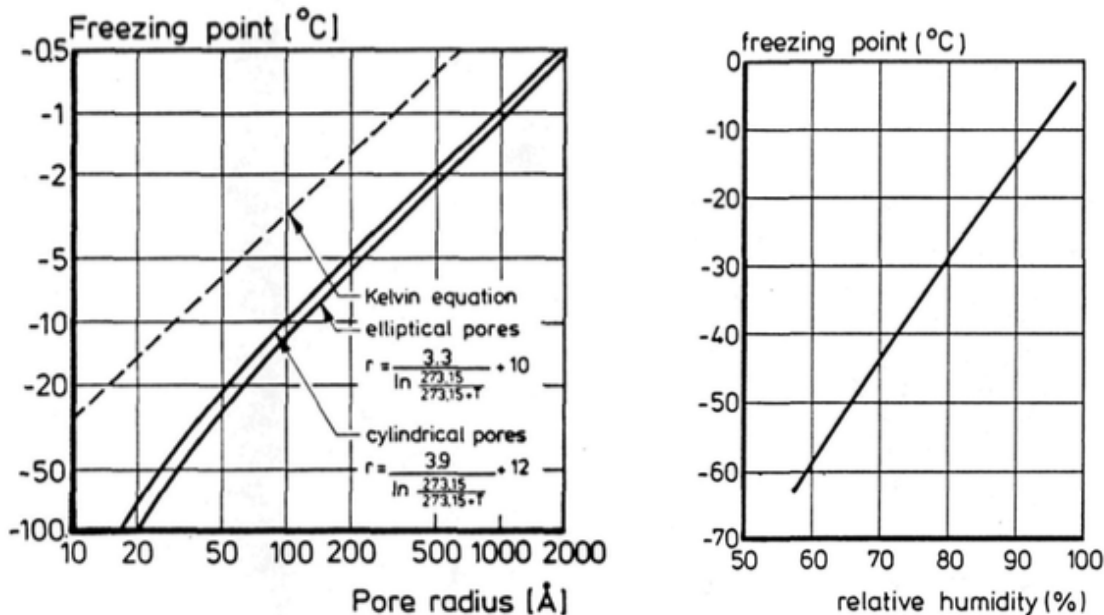
På 70- og 80-tallet ble det utført en del forskning på hvordan betong oppfører seg under senkede temperaturer. Bruksområde for kryogenisk betong er i blant annet i LNG-tanker, liquefied natural gas tanker, som brukes for å oppbevare naturgass i flytende form. [13] Det er også interessant å ha kunnskap om hvordan betong oppfører seg i temperaturer som ikke er fullt så lave som -165 °C . Spesielt er dette aktuelt i forbindelse med utbygging av oljefelt i arktiske strøk, der konstruksjoner vil bli utsatt for forholdsvis lave temperaturer.

Dette kapitlet vil derfor handle om kryogenisk betong. Spesielt vil kapitlet handle om frysemekanismer i betongen og hvordan de mekaniske egenskapene blir forandret under lave temperaturer.

1.4.1 Frysemekanismer

Når rent vann fryser under atmosfærisk trykk, skjer det ved 0 °C , og det skjer en økning i volum med 9%. Siden vann i betong ligger i porer, fryser ikke vann i betong på samme måte som vann under vanlige omstendigheter. [4]

Frysepunktet til vann i betong blir påvirket av flere forskjellige parametere. Vannet i betongen kan bli påvirket av noen av de andre materialene betongen består av, fortrinnsvis forskjellige salter. Konsentrasjonen av disse saltene vil normalt være relativt lav, og vil derfor ikke senke frysetemperaturen mer enn noen grader. [4] Noe som vil ha større påvirkning på frysepunktet, vil være størrelsen av porene som vannet er i.



FIGUR 6: FRYSEPUNKT SOM FUNKSJON AV PORESTØRRELSE OG RELATIV FUKTIGHET [4]

Som figuren over viser, vil frysepunktet synke kraftig ettersom porene blir mindre og den relative fuktigheten blir lavere. Ser at ved å oppbevare betongen i vann fram til nedfrysning, og dermed ha en relativ fuktighet opp mot 100%, vil frysepunkt være ganske nære 0, men hvis betongen blir tørket ut før nedfrysning vil frysepunktet bli mye lavere.

Ifølge Veen har Stockhausen, Dorner, Zech og Setzer laget en oversikt fire forskjellige trinn i frysing av vann i betong: [14]

1. Først fryser vann i porer med $r > 0.1$ mm. Disse porene er fylt med vann når betongen hadde herdeforhold med mer enn 99% relativ luftfuktighet. Dette vannet vil fryse mellom 0 og -4°C .
2. Vann i kapilærporer med $r > 0.01$ mm vil deretter fryse. Disse porene er fylt med vann når den relative fuktigheten er mellom 90 og 99%. Dette vannet vil fryse mellom -20 og -30°C .

3. Strukturert vann. Dette er det absorberte vann i porer mellom $3 \text{ nm} < r < 10 \text{ nm}$. Disse porene er fylt med vann når den relative fuktigheten er mellom 60 og 90%. Dette vannet fryser mellom -30 og -80°C .
4. Absorbert vannlag på veggene av veldig små gel-porer, $r < 3 \text{ nm}$, fryser ikke mellom 0 og -160°C .

1.4.2 Mekaniske egenskaper i betong under lave temperaturer

1.4.2.1 Trykkfasthet

Når betong blir kjølt ned, vil trykkfastheten normalt bli høyere enn ved romtemperatur. [15] Denne økningen er nesten proporsjonal med vanninnholdet til betongen. Ifølge Miura kan man da lage følgende formel:

$$\sigma_{cl} = \sigma_{co} + \Delta\sigma_c \quad (1-4)$$

σ_{cl} er trykkfastheten ved lave temperaturer.

σ_{co} er trykkfastheten ved romtemperatur.

$\Delta\sigma_c$ er økningen i trykkfasthet ved lave temperaturer, er proporsjonal med vanninnhold i betongen. [15]

Ifølge Veen har Goto og Miura laget en formel for å regne ut nøyaktig hva trykkfastheten vil bli ut ifra hvor mange grader betongen har blitt fryst ned til, og hva vanninnholdet til betongen er: [16] [17]

$$f_{cm}(T;m) = f_{cm}(20^\circ\text{C}) + \Delta f_{cm}(T;m) \quad (1-5)$$

der

$f_{cm}(T;m)$ er trykkfastheten ved temperaturen T og vanninnholdet m .

$f_{cm}(20^\circ\text{C})$ er trykkfastheten ved 20°C .

$\Delta f_{cm}(T;m)$ er økning av trykkfasthet ved temperaturen T og vanninnholdet m , og kan finnes fra formlene under:

$$\Delta f_{cm}(T;m) = \left(1 - \left(\frac{T+180}{180}\right)^2\right) \cdot 12 \cdot m \quad (1-6)$$

Hvis $T > -120^\circ\text{C}$.

$$\Delta f_{cm}(T:m) = 10.7 \cdot m \quad (1-7)$$

For $T < -120^\circ\text{C}$.

Her er m = vanninnhold i % av vekt.

T = temperatur i $^\circ\text{C}$.

Veen trekker også frem Okada og Iguro, som også har laget en formel som indikerer økningen av trykkfastheten til den nedfryste betongen. Denne formelen er bare en funksjon av temperaturen, og ikke av fuktigheten. Dette kommer av at det bare ble testet betong som var fullstendig mettet av vann. De kom da fram til denne formelen: [18]

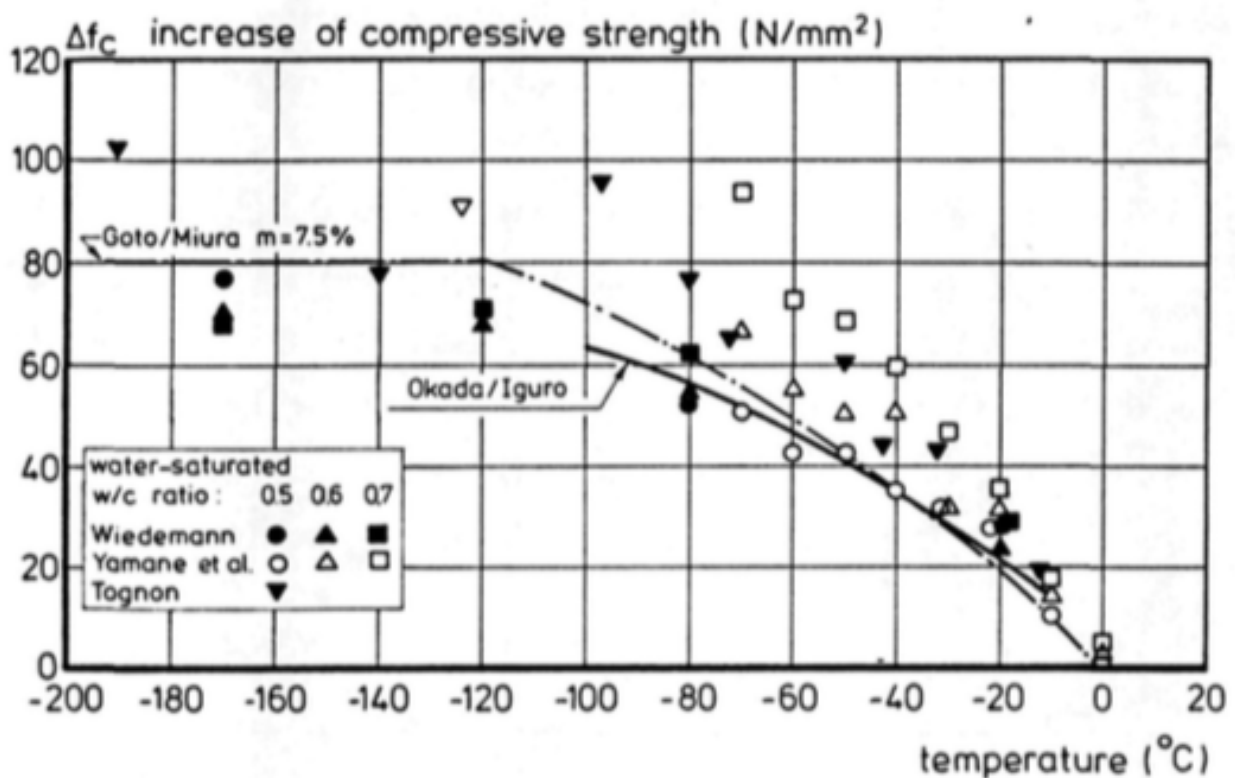
$$\Delta f_{cm}(T) = 5.4 - 0.86 \cdot T - 0.00276 \cdot T^2 \quad (1-8)$$

der

$\Delta f_{cm}(T:m)$ er økningen av trykkfasthet ved temperaturen T ;

T er temperaturen trykkfastheten skal estimeres ved.

Formelen er gyldig mellom -10°C og -100°C .



FIGUR 7: ØKNING AV TRYKKFASTHET AV VANNMETTET BETONG VED NEDFRYSNING [4]

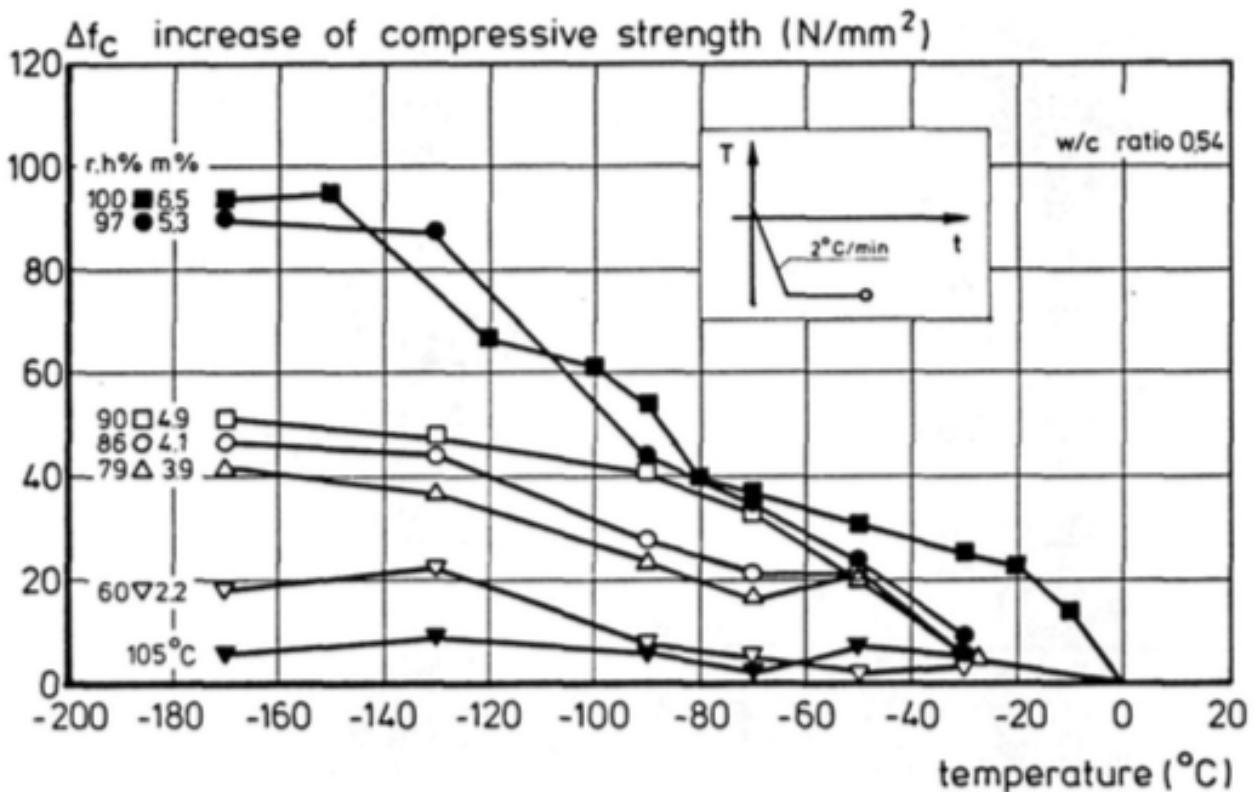
I figur 7 er de to formlene over plottet inn i en graf der også testresultater har blitt plottet inn. Grafen viser økning av trykkfasthet ved nedfrysning. En kan se at disse formlene undervurderer økningen i trykkfasthet mellom -10°C og -40°C . Dette fordi nedfrysning av større porer, gir en kraftig økning av fasthet. Ifølge kap. 1.4.1 fryser disse porene mellom -20 og -30°C .

Det har også blitt gjort en del forskning om sementtype har noe å si på trykkfastheten når betongen blir kjølt ned. Veen nevner Tognon som testet tre forskjellige sementer, der w/c-tallet var det samme i alle blandingene (0.5). Etter seks måneders herding ble terningene testet på tre forskjellige temperaturer. Økningen i trykkfastheten ble da funnet til å ikke være avhengig av typen sement som ble brukt. [19]

Det viser seg derfor at økningen av trykkfasthet som kommer av en senkning av temperaturen ikke kommer fra opprinnelig fasthet eller blandingsforhold, men i stor grad blir styrt av den frie fuktigheten i betongen.

1.4.2.1.1 Fuktinnhold

Fuktinnholdet i betongen avhenger av hvordan betongen ble oppbevart før den ble nedfrost. Vannmettet betong har for eksempel blitt oppbevart i vann helt frem til den blir frost ned. Ovnstørket betong skal i teorien ikke inneholde fukt, og er blitt tørket før den blir frost. Mellom disse to ekstremene kan betong også bli oppbevart ved en bestemt relativ fuktighet for å gi betongen denne metningsgraden. Veen presenterer resultater fra Wiedemann, som viser hvor mye trykkfastheten økte ved syv forskjellige fuktnivåer. [20] Kan se fra grafen under at betongen med høyest fuktinnhold øker mest.



FIGUR 8: ØKNINGEN I TRYKKFASTHET SOM FUNKSJON AV TEMPERATUR OG FUKTINHOLD [4]

Figuren over er basert på testing av betong med w/c-tall på 0,54. Fra figur 7 kan man se at betong med høyere w/c-tall og dermed høyere vanninnhold som regel får høyere økning av trykkfasthet når betongen blir fryst ned.

1.4.2.1.2 Tilslagets påvirkning

Ifølge Veen har Tognon også testet mange forskjellige tilslag mot hverandre for å se hvordan disse oppfører seg i forhold til hverandre når betongen blir fryst ned. [20] Han testet da fem forskjellige vanlige tilslag i tillegg til at han testet to lett-tilslag.

Sementmengde var konstant for alle blandingene, mens w/c-tallet var noe høyere for lettbetongen for å oppnå lik støpelighet. Tognon fant da at blandingene med uporøse tilslag hadde relativ økning. Blandingene som var støpt med lett-tilslag hadde derimot merkbart mindre økning av trykkfasthet i forhold til de tyngre blandingene ved nedfrysning.

Veen nevner også Berner et al [21], som har testet en høyfast lettbetong med w/c-tall på 0,35 og densitet på 1920 kg/m^3 . Fastheten til denne betongen sluttet å stige på ca -90°C , og også denne fikk mindre økning i fasthet i forhold til de vanlige tilslagene.

Dette tyder dermed på at lettbetong vil ha en mindre økning i trykkfasthet enn vanlig normalbetong, og Veen foreslår at det er fordi lett-tilslaget er den svakeste komponenten i betong under trykk. [4]

1.4.2.2 Strekkfasthet

Mange av de som har gjort tester på betongens trykkfasthet under lave temperaturer har også gjort tester på betongens strekkfasthet i samme prøveprogrammet. Det har da blitt oppdaget at også strekkfastheten øker ved lavere temperaturer, men at økningen avtar når temperaturen nærmer seg -70°C . [12]

1.4.2.2.1 Fuktinnehold

Det er flere som har undersøkt hvordan fuktforholdene under herdingen påvirker strekkfastheten ved lavere temperaturer. Veen nevner blant annet Goto og Miura [15, 16], som har testet betong som hadde hatt 11 forskjellige herdebetingelser. Det ble da konkludert med at strekkfastheten, som trykkfastheten, ved lavere temperaturer ikke blir påvirket av den opprinnelige styrken, blandingsforhold, herdemetode eller alder av betongen. Ifølge Goto og Miura blir økningen av strekkfasthet ved lave temperaturer styrt av fuktinnholdet. Økningen i strekkfasthet kan dermed beskrives på lignende måte som trykkfasthetens økning ble beskrevet.

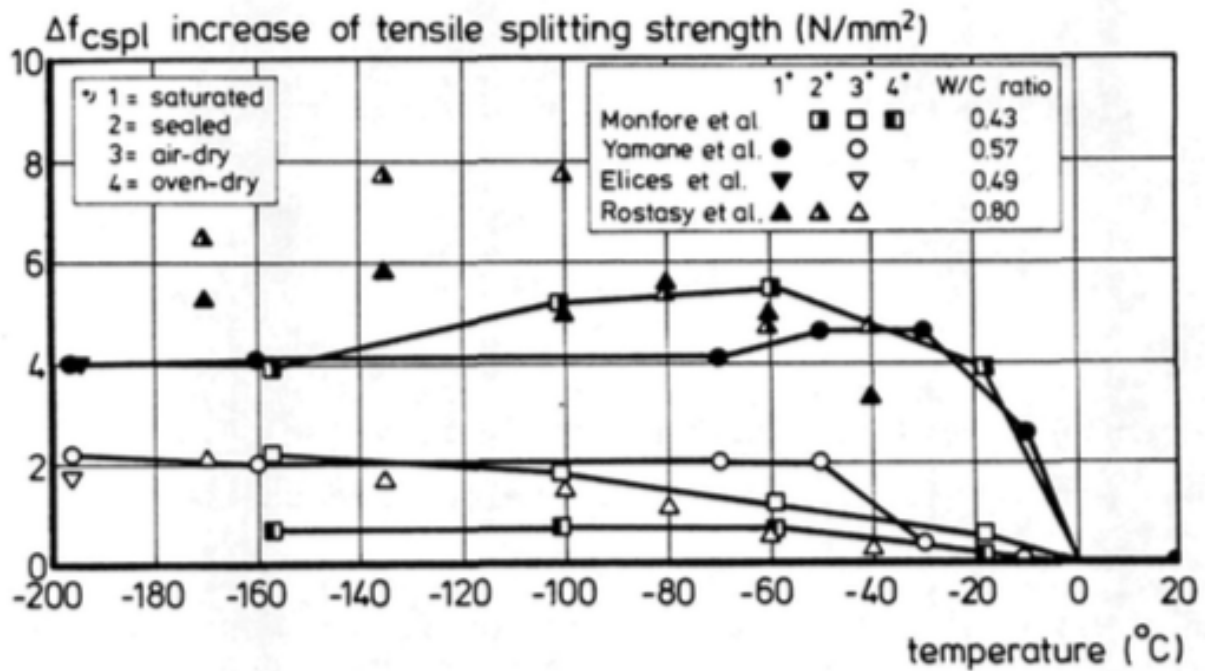
Siden det var stor spredning i resultatene av spaltesttrekkfasthet bestemte Goto og Miura å estimere spaltesttrekkfastheten fra trykkfastheten, og de kom da fram til følgende formel:

$$f_{csp}(T) = 0.214 \cdot f_c(T)^{0.75} \quad (1-9)$$

der

$f_{csp}(T)$ er spaltesttrekkfastheten ved en temperatur T ;

$f_c(T)$ er trykkfastheten ved en temperatur T , denne kan regnes ut ved hjelp av formel (1-5).



FIGUR 9: ØKNING I STREKKFASTHET SOM FUNKSJON AV HERDEBETINGELSER OG TEMPERATUR

[4]

Som figuren over viser, har strekkfastheten en markant økning fram til -20°C og når sin maks når temperaturen blir -60°C. Dette gjelder når betongen er vannmettet. Hvis temperaturen blir enda lavere enn dette, vil strekkfastheten ikke øke mer, og heller reduseres litt.

Hvis prøvestykkene har lavere vannmetningsgrad, vil de ikke få noe reduksjon over -60°C, men de vil også ha en mye lavere økning i strekkfasthet i utgangspunktet.

Okada og Iguro har i tillegg til å lage en formel for å estimere trykkfastheten også laget en formel for å forutsi strekkfastheten for vannmettet betong: [18]

$$f_{cspl}(T) = 2.4 + 0.06 \cdot f_c(T) \quad (1-10)$$

der

$f_{cspl}(T)$ er strekkfastheten ved en temperatur T;

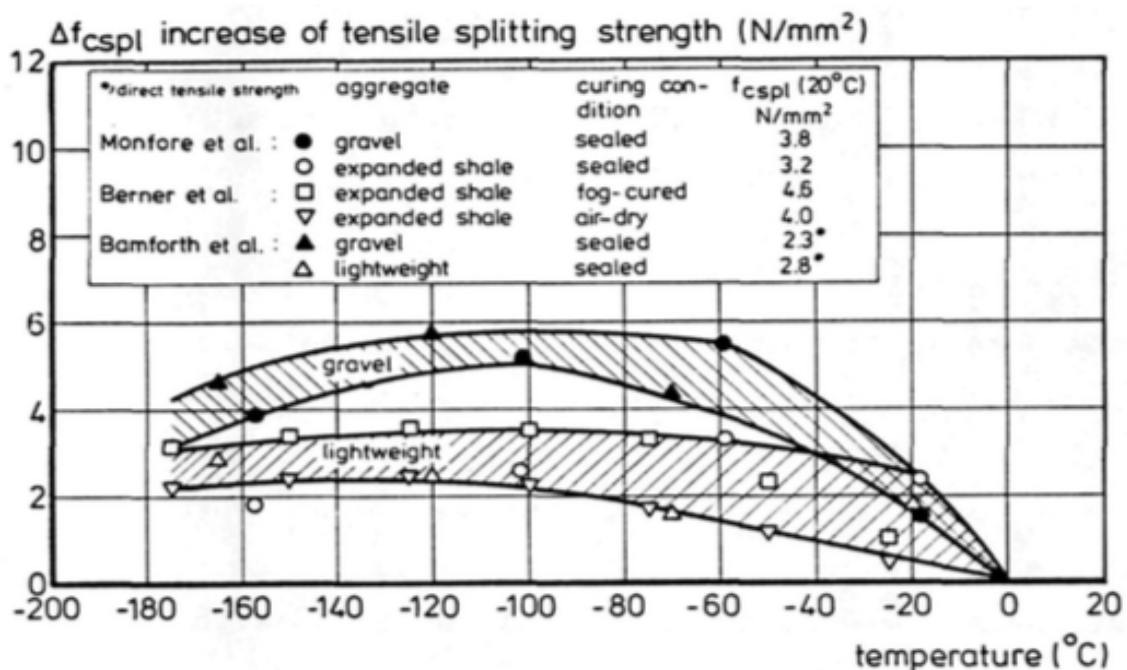
$f_c(T)$ er trykkfastheten ved en temperatur T, denne kan regnes ut ved hjelp av formel (1-5) og (1-7).

Denne formelen gjelder mellom -10 og -100°C.

I all hovedsak skjer størsteparten av økningen til strekkfastheten mellom 0 og -40°C. Trykkfasthetens økning skjer i hovedsak mellom 0 og -100°C. Betong har altså en forskjellig økning av trykk- og strekkfasthet når den blir fryst ned.

1.4.2.2.2 Tilslagets påvirkning

Det har blitt gjort mye forskning på tilslagets påvirkning på betongens strekkfasthet. Spesielt på lett-tilslagets påvirkning. Veen [4] har samlet mye av denne forskningen i figuren som er under:



FIGUR 10: ØKNING I STREKKFASTHET MED FORSKJELLIGE TILSLAG MOT TEMPERATUR [4]

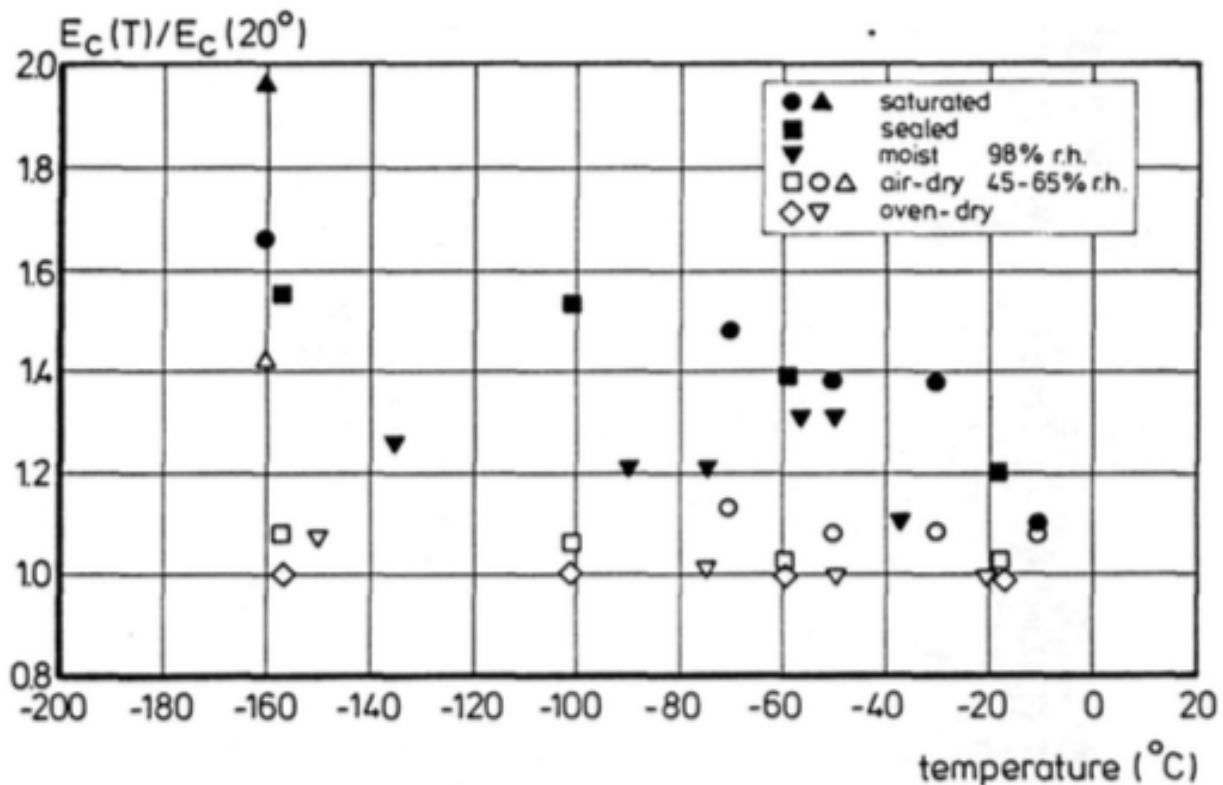
Kan sees fra figuren over at det blir en mindre økning i strekkfasthet når det blir brukt lett-tilslag. Det stemmer overens med det som ble sett med trykkfasthet. Lettbetongen har også en betydelig mindre strekkfasthet ved 20°C.

1.4.2.3 Elastisitetsmodul

Siden elastisitetsmodulen får en dramatisk reduksjon etter flere termiske sykluser, har den blitt mye undersøkt. I dette kapitlet blir fuktinnholdet og tilslagets påvirkning på elastisitetsmodulen under nedfrysning gjennomgått.

1.4.2.3.1 Fuktinnhold

Det er mange som har undersøkt hvordan vanninnholdet og herdebetingelsene til betongen spiller inn på elastisitetsmodulen ved lavere temperaturer. Veen [4] har samlet en del av disse resultatene og de kan sees i figuren under:

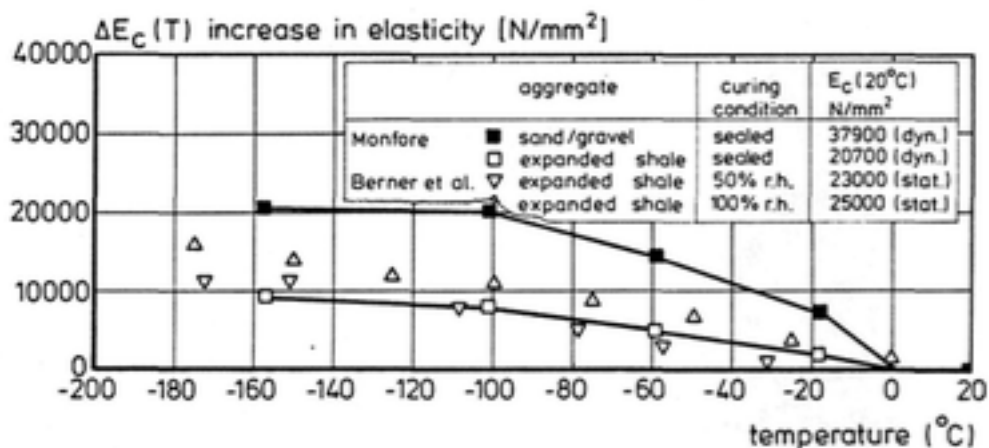


FIGUR 11: INNFLYTELSE FRA HERDEBETINGELSER PÅ ELASTISITET VERSUS TEMPERATUR [4]

Kan fra figuren over se at betong som er vannmettet vil ha en dramatisk økning av elastisitetsmodulen ved nedfrysning. Mesteparten av stigningen skjer mellom 0 og -50°C , og ved -50°C har prøver som er nesten helt vannmettet opp mot 1,4 ganger så høy elastisitetsmodul som de hadde ved romtemperatur. E-modulen fortsetter også å stige når betongen blir kjølt enda mer ned, og fullstendig vannmettet betong har nesten doblet e-modul ved -160°C . Betong som har lav blitt tørket i varmeskap opplever ingen økning av elastisitetsmodul, og prøver med lav fuktinnhold opplever også mye lavere økning enn vannmettet betong gjør.

1.4.2.3.2 Tilslagets påvirkning

Berner et al. [21] [22] og Monfore og Lentz [23] har undersøkt effekten tilslaget har på elastisitetsmodulen til nedfrostet betong. Veen [4] har samlet resultatene deres i figuren som sees under:

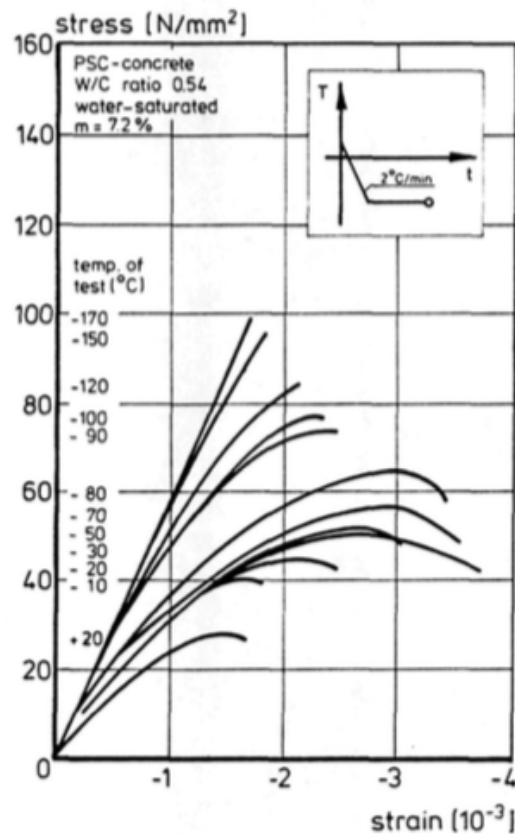


FIGUR 12: ØKNING I E-MODUL MOT TEMPERATUR, NORMAL BETONG OG LETTBETONG [4]

Kan fra figuren over se at betong med lett-tilslag har en tilsvarende, men markant lavere stigning i forhold til betong med vanlig tilslag.

1.4.2.4 Arbeidsdiagram

Arbeidsdiagrammet til betong under trykk vil også bli påvirket av temperaturen og fuktinnholdet når den blir nedfrost. [4] Etersom temperaturene blir lavere og lavere, blir betongen mer og mer sprø, og har mindre plastisk deformasjon. Dette gjelder spesielt vannmettet betong ved ekstremt lave temperaturer, som ofte vil oppnå spenning-tøyningsforhold som kun er elastiske. Prøvestykker som er tørket vil normalt tåle lavere last, men vil få mer plastisk deformasjon.



FIGUR 13: ARBEIDSDIAGRAM AV VANNMETTET BETONG SOM FUNKSJON AV TEMPERATUR [20]

En kan se fra figuren over hvordan både maks spenning og maks tøyning øker mellom +20 og -70°C. Betongen oppfører seg her duktilt. Når betongen derimot blir enda kaldere, blir den mindre duktil. Spenning-tøyning forholdet blir lineært, og bruddene blir mer og mer sprø. Den maksimale tøyningen når sitt maks rundt -60°C, og blir gradvis mindre. Tøyningen blir likevel ikke mindre enn det den var ved romtemperatur.

1.4.2.5 Bøyestrekfasthet

Det er lite data tilgjengelig om hvordan bøyestrekfastheten vil utvikle seg ved kryogeniske temperaturer. Likevel er det grunn til å tro at den vil oppføre seg slik spaltestrekfastheten oppfører seg under nedfrysning. Forventer dermed at det skjer en økning av bøyestrekfasthet, men at denne økningen vil avta når temperaturen nærmer seg -60°C.

2 Prøveprogram og materialer

TABELL 4: PRØVEPROGRAM

Prøve	Antall terninger	Antall sylindere	Antall bjelker	Antall liter [l]
Normal betong	15	24	8	345
Umettet betong	12	16	0	140
Lettbetong	15	24	8	310

2.1 Info om prøveprogrammet

Det ble støpt 2 forskjellige typer betong. Normal og lettbetong. Umettet betong er normalbetong som har blitt lagt i ovn og dermed har lavere vannmetningsgrad enn normalbetongen. Lettbetongen er lik normalbetongen utenom at det grove tilslaget er et lett tilslag.

Utenom den umettede betongen var det ikke praktisk mulig å få støpt alt på samme dag, så normal betongen ble støpt over to dager og lettbetongen ble fordelt over fire dager.

TABELL 5: FORDELING AV BETONGEN

	20 grader	0 grader	-20 grader	-45 grader
7 døgn trykkfasthet	3 terninger			
28 døgn trykkfasthet	3 terninger	3 terninger	3 terninger	3 terninger
Strekkfasthet	2 sylindere	2 sylindere	2 sylindere	2 sylindere
Elastisitetsmodul	2 sylindere	2 sylindere	2 sylindere	2 sylindere
Arbeidsdiagram	2 sylindere	2 sylindere	2 sylindere	2 sylindere
Bøyestrekfasthet	2 bjelker	2 bjelker	2 bjelker	2 bjelker

Tabellen over viser hvordan de forskjellige prøvestykkene som ble støpt ble testet. Den gjelder for normal betong og lettbetong. Det ble ikke støpt bjelker til den umettede betongen, og for den umettede betongen ble de samme sylindere brukt til både testing av elastisitetsmodul og testing av arbeidsdiagram.

3 Fremgangsmåte av laboratorieprogram

3.1 Blanding

Støpingen ble utført ved betonglaboratoriet ved Universitetet i Stavanger på 7 forskjellige dager. Programmet er lagt ved som vedlegg.

3.1.1 Proporsjonering

Proporsjoneringen ble gjort ved hjelp av et proporsjonerings skjema som er utviklet ved NTNU. Det ble bestemt at både normalbetongen og lettbetongen skulle ha w/c-tall på 0,33, siden dette skulle oppfylle kravene til fasthetsklasse B70 og LB75 når Anleggsement FA ble brukt. Det ble i tillegg lagt inn at matriksvolumet skulle være på 360 l/m³, slik at støpeligheten skulle bli bra selv som w/c-tallet var såpass lavt. Det ble i tillegg lagt opp til at det kunne tilsettes inntil 1% av SP-stoff hvis det var nødvendig. Blandeskjemaer er lagt ved i vedlegg.

3.1.2 Blandeprosedyre

Blanderen som ble brukt var en tvangsblender med 110 liters kapasitet. Alle materialer ble først veid opp og deretter var blandeprosedyren som følger:

1. Fint og grovt tilslag blandes tørt i 1 minutt.
2. Sement ble tilsatt og blandet i 1 minutt.
3. 3 minutter blanding etter at vann var tilsatt.
4. SP-stoff ble tilsatt og deretter blandet 1 minutt for at det superplastiserende stoffet skulle få tid til å virke.

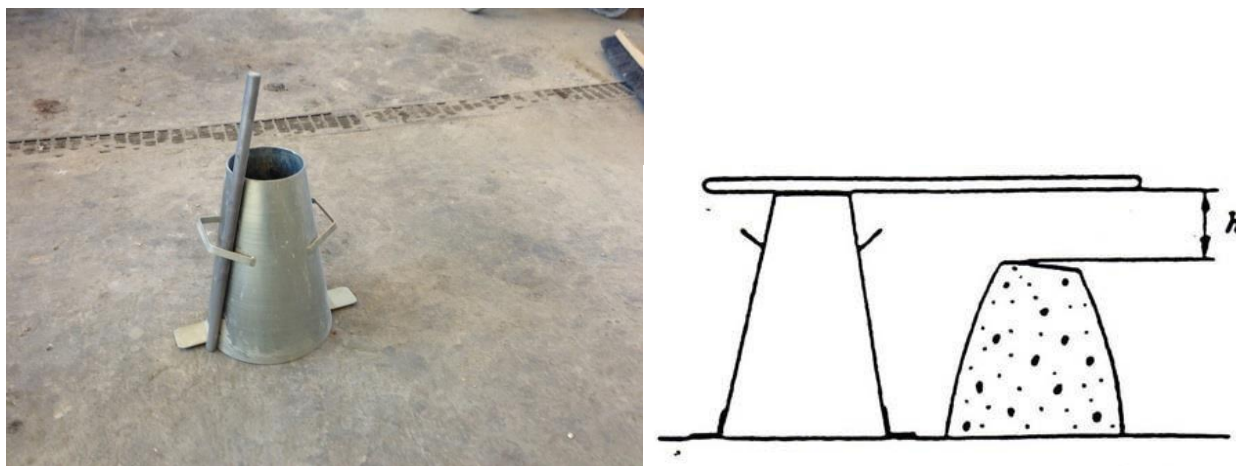
3.2 Prøving av fersk betong

Det ble utført flere tester på den ferske betongen. Som tidligere nevnt i 1.1.8 blir betongens styrke og bestandighet påvirket av betongens ferske egenskaper. All prøvetakingen ble gjort i samsvar med NS-EN 12350-1:2000, og blir beskrevet i dette kapittelet.

3.2.1 Synkmål

Synkmål ble målt og utført etter NS-EN 12350-2:2009. Dette var den første testen som ble gjort på den ferske betongen etter at den var blandet. Synkkjeglen ble plassert på et flatt underlag, og både kjeglen og underlaget ble fuktet. Deretter ble kjeglen holdt mot

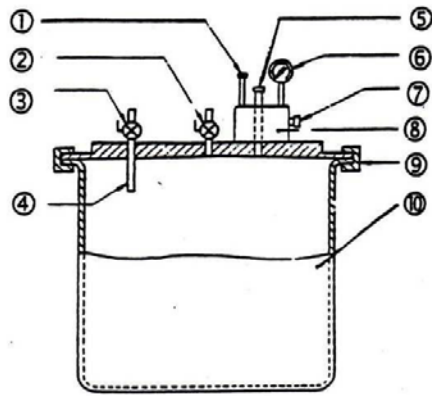
underlaget av en person, mens en annen fylte betong oppi kjeglen. Kjeglen ble fylt opp i 3 omganger, der en tredjedel ble fylt opp om gangen, og ved hver tredjedel ble det brukt en komprimeringsstang til å komprimere betongen med 25 slag. Når kjeglen var fylt opp ble toppen rettet av før kjeglen ble løftet rett opp i en jevn fart. Hvis synkkjeglen ble løftet med vridning eller sidebevegelser kunne prøven bli ujevn og ikke bli godkjent. Måtte da tas ny prøve. Hvis prøven ble godkjent ble synkmålet målt fra høyeste punkt av betongen og til synkkjeglens topp. Synkmålet ble angitt til nærmeste 10 mm. [24]



FIGUR 14: SYNKKJEGLE OG KOMPRIMERINGSSTAV TIL VENSTRE OG MÅLING AV SYNK TIL HØYRE [24]

3.2.2 Luftinnhold

Luftinnhold ble målt og utført etter NS-EN 12350-7:2000. Trykk-gauge-metoden ble brukt. Beholderen som ble brukt var en beholder med volum på 8 liter. Se figur av beholderen med apparat på figur 16 under. Beholderen ble fylt med betong i 3 lag, og det ble komprimert med 25 støt fra komprimeringsstangen ved hvert lag. Når det siste laget var komprimert, ble toppen rettet av, og det ble rengjort godt rundt kanten med en svamp. Apparatet ble satt på, og vann ble pumpet inn i beholderen gjennom den ene ventilen. Samtidig som dette ble gjort, ble det brukt en gummihammer til å banke på beholderen, slik at luftbobler som var fanget i betongen skulle boble opp. Når det kom vann ut fra den andre ventilen ble begge ventilene lukket. Det ble sjekket at luftventilen var skrudd helt igjen, før det ble pumpet inn luft ved hjelp av pumpen. Deretter ble det pumpet inn luft til det var over startpunktet på måleren, og lufttrykket ble så stabilisert ved startpunktet. Til slutt ble hovedventilen åpnet, og etter 20 sekunder kunne luftinnholdet leses av i prosent på måleren.



FIGUR 15: BEHOLDER OG APPARAT FOR TRYKK-GAUGE-METODEN [25]

På figur 16 er

1. Pumpe
2. Ventil B
3. Ventil A
4. Forlengingsrør for kalibreringsjekk
5. Hoved luftventil
6. Trykk-gauge
7. Luftventil
8. Luftkammer
9. Klemmer
10. Beholder

Luftinnholdet ble angitt til nærmeste 0,1%. [25]

3.2.3 Densitet

Densiteten ble målt og utført etter NS-EN 12350-6:2000. Beholderen som ble brukt for å måle luftinnholdet ble også brukt for å måle densiteten. Før apparatet ble satt på for å måle luftinnholdet, ble beholderen veid. Beholderen var da full av betong som var blitt komprimert 3 ganger. Densiteten kunne da bli beregnet etter følgende formel.

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (3-1)$$

der

D er densiteten av den ferske betongen, i kg/m³;

m_1 er beholderens masse, i kg;

m_2 er beholderens masse pluss massen av betongprøven i beholderen, i kg;

V er beholderens volum, i m^3 .

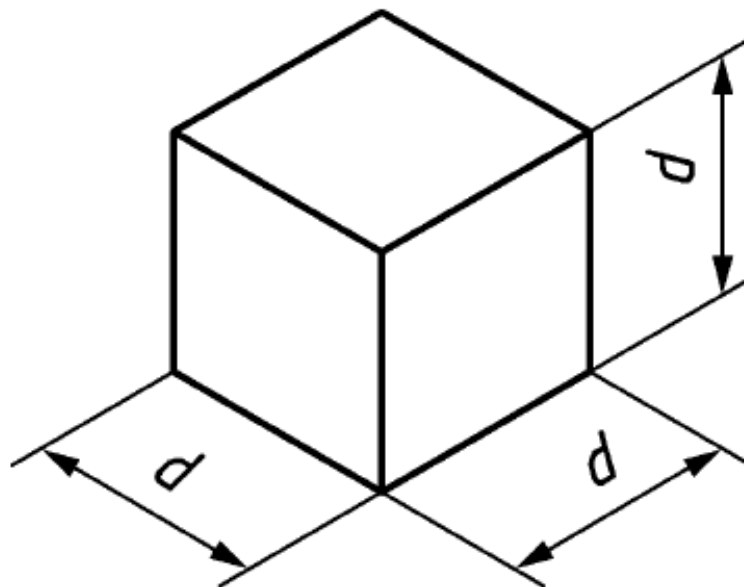
Densiteten ble angitt til nærmeste 10 kg/m^3 . [26]

3.3 Utstøping

For den mettede normalbetongen og lettbetongen ble det støpt 15 terninger, 24 sylindere og 8 bjelker. For den umettede betongen ble det støpt 12 terninger og 16 sylindere. Alle prøvestykker ble støpt etter NS-EN 12390-1:2000. [27]

3.3.1 Terninger

Terninger ble støpt for å teste trykkfastheten etter 7 og 28 døgn. Terningene var av størrelsen $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$, se figur under. Terningene ble utstøpt i 2 lag, og ble komprimert ved hjelp av en komprimeringsmaskin, se kap. 2.5.5. Terningene ble så dekket til med plastikk og lagret i 24 timer ved $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Etter 24 timer ble terningene avformet, og deretter lagret i vannbad ved $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i minst 28 døgn. [28]

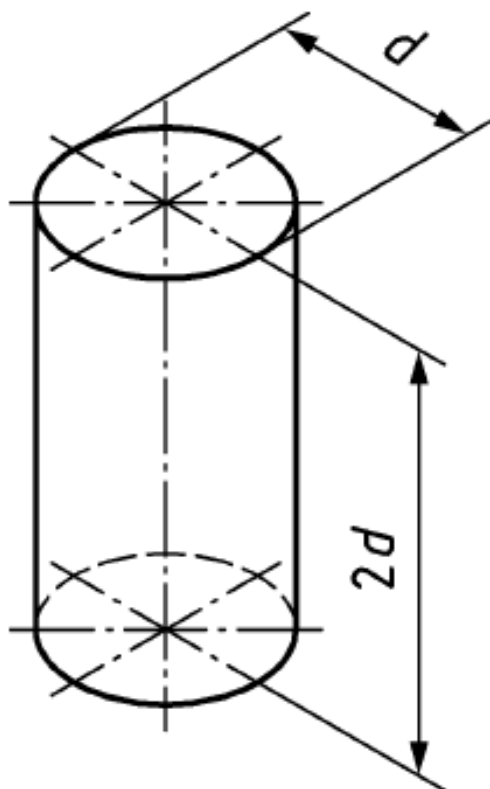


$d, \text{ mm}$	100	150	200	250	300
-----------------	-----	-----	-----	-----	-----

FIGUR 16: NOMINELLE STØRRELSER FOR TERNINGER [27]

3.3.2 Sylindere

Sylindrene ble støpt for å teste betongens spaltestrekkfasthet, elastisitetsmodul og arbeidsdiagram. Sylindrene som ble brukt for testing var av størrelsen 150*300 mm, se figur under. Utstøping skjedde i 3 lag, og ved hvert lag ble sylindrene komprimert ved hjelp av en komprimeringsmaskin, se kap. 2.5.5. Deretter ble prøvestykkene avrettet og et lokk ble satt på toppen av sylindrene før de ble lagret på labben i 24 timer ved $20\pm 5^\circ\text{C}$. Etter 24 timer ble sylindrene tatt ut av formene, og deretter lagret i vannbad ved $20\pm 2^\circ\text{C}$ i minst 28 døgn. [28]



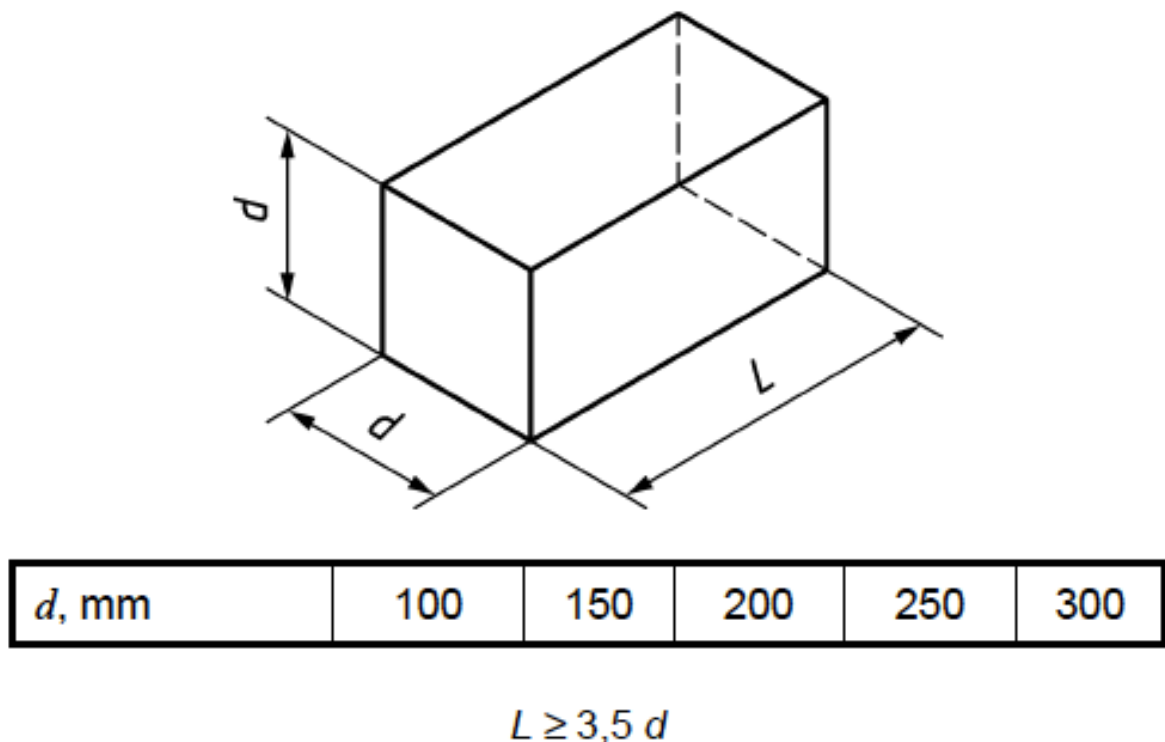
d , mm	100	113 ^a	150	200	250	300
^a This has a load-bearing area of 10 000 mm ² .						

FIGUR 17: NOMINELLE STØRRELSER FOR SYLINDRE [27]

3.3.3 Bjelker

Bjelkene ble støpt for å teste betongens bøyestrekfasthet. Bjelkene var av størrelsen 150*150*550, se figur under. Utstøping skjedde i 2 lag, og bjelkene ble komprimert ved

hjelp av en komprimeringsmaskin ved hvert lag, se kap. 2.5.5. I tillegg ble bjelkene også vibrert litt ved hjelp av en ekstern vibrator før de ble avrettet. Deretter ble bjelkene dekket med plastikk og lagret i 24 timer ved $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Etter 24 timer ble bjelkene tatt ut av formene, og deretter lagret i vannbad ved $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i minst 28 døgn. [28]



FIGUR 18: NOMINELLE STØRRELSER FOR BJELKER [27]

3.4 Prøving av herdet betong

For å teste de mekaniske egenskapene til betongen, ble det utført flere tester på den herdede betongen. I dette kapittelet vil disse testene bli beskrevet. I tillegg blir det beskrevet hva som ble gjort for å teste betong under forskjellige metningsgrad.

3.4.1 Vannmetningsgrad

For å teste hvordan vannmetningsgraden spiller inn på betongens mekaniske egenskaper ved lave temperaturer ble en del av prøvestykkene tørket ut før de ble testet og fryst ned. Dette ble gjort ved at prøvestykkene ble lagt i varmeskap på 80°C , i 13 dager. Deretter ble prøvestykkene enten testet, eller fryst ned før de ble testet.

Det ble bestemt å ha terningene i varmeskap i 13 dager, ved å legge en terning i varmeskap i 21 dager først. De tre siste døgnene mistet terningen to gram med vann, og

det ble dermed antatt at terningen etter 21 døgn hadde 0% fuktighet. Kunne dermed regne ut at fuktigheten til betongen etter 13 dager i varmeskapet ville være ca 88%. Logg over uttørkingen kan finnes som vedlegg.

3.4.2 Nedfrysning

For å fryse ned betongen ble det brukt et klimaskap. Temperaturen i dette klimaskapet kan settes mellom 200? og -45°C. I tillegg kan den relative fuktigheten settes mellom 0 og 100%. Den relative fuktigheten ble ved alle temperaturer satt til 10%. For å sikre at betongen hadde riktig temperatur under testing, lå betongen minst 4 døgn i klimaskapet før den ble testet. Under testing av spaltestrekkfasthet, og bøyestrekfasthet ble temperaturen målt. Disse testene gjorde det mulig å måle temperaturen ved sentrum av prøvestykkene. Logg over temperaturene som ble målt kan finnes som vedlegg.

3.4.3 Trykkfasthet

Trykkfastheten ble testet i henhold til NS-EN 12390-3:2009. [29] Prøvestykkene som skulle testes ble tatt ut av enten klimaskapet, varmeskapet eller vannbadet, og rensset for partikler. Deretter ble terningen plassert i senter av trykkpressen. Testen ble startet, og kraften ble påført med en konstant hastighet på 0.6 MPa/s. (sjekk dette). Denne kraften ble påført helt til terningene gikk til brudd. Kraften ved brudd ble da registrert som bruddlast.

Kan deretter regne ut trykkfastheten fra følgende formel:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3-2)$$

der

f_c er trykkfastheten, i MPa;

F er bruddlasten, i N;

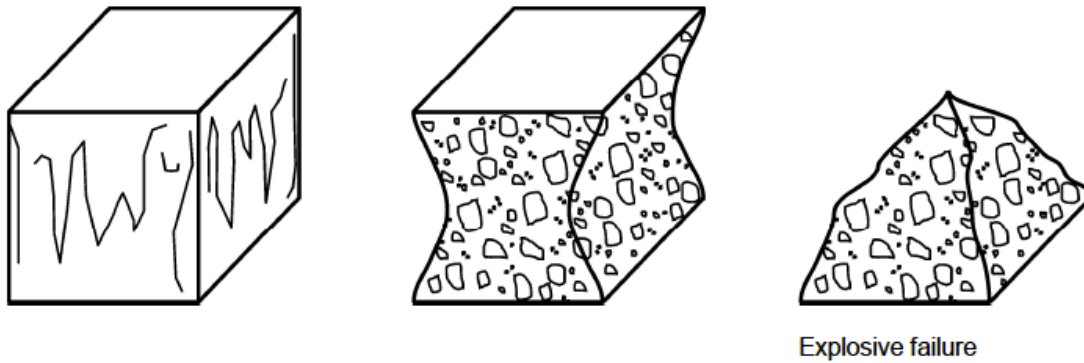
A_c er tverrsnittsarealet som trykklasten virker mot, i mm².

Trykkfastheten skal oppgis til nærmeste 0,1 MPa. [29]

NS-EN 12390-3:2009 stiller krav til hvordan prøvestykkene ser ut etter brudd.

Prøvestykkene ble derfor kontrollert etter testen for å se om de hadde tillatte bruddformer.

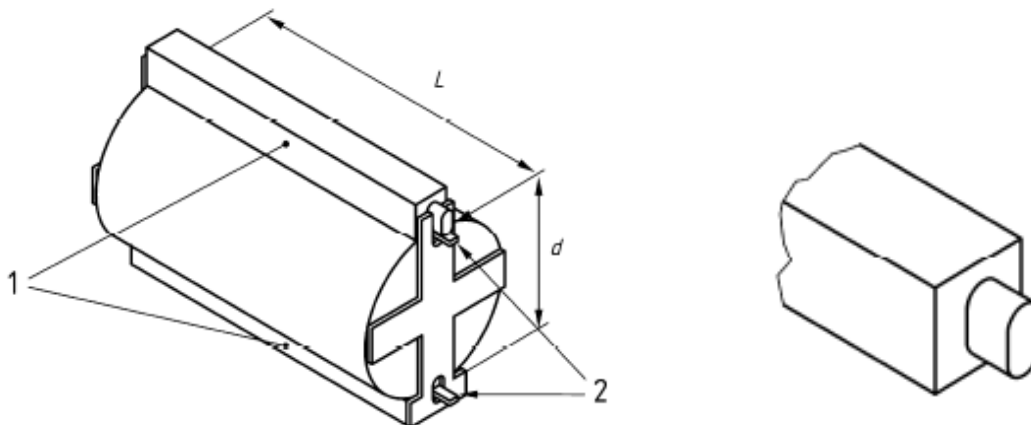
Figuren på neste side viser tilfredsstillende bruddformer av terninger.



FIGUR 19: TILFREDSTILLENDE BRUDDFORMER [29]

3.4.4 Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfastheten ble testet i henhold til NS-EN 12390-6:2009 [30]. Ifølge denne standarden skal prøvestykkene være sylinderformede og konformere til NS-EN 12390-1. [27] Før testen ble startet ble alle prøvelegemene rengjort og partikler ble fjernet. Prøvelegemet ble plassert i en «jig», og testen ble startet. Kraften ble påført med en konstant hastighet på 3534 N/s, og ble påført til sylindere gikk til brudd. Bruddlasten ble da registrert. Se figur for «jiggen» under. Spaltestrekkfastheten ble angitt til nærmeste 0,05 MPa. [30]



FIGUR 20: «JIG» FOR SYLINDER UNDER TESTING AV SPALTESTREKKFASTHET [30]

der

- 1 er belastningsstykke av stål;
- 2 er mellomleggslister av papp;
- L er lengden av sylindere;
- d er diameteren av sylindere.

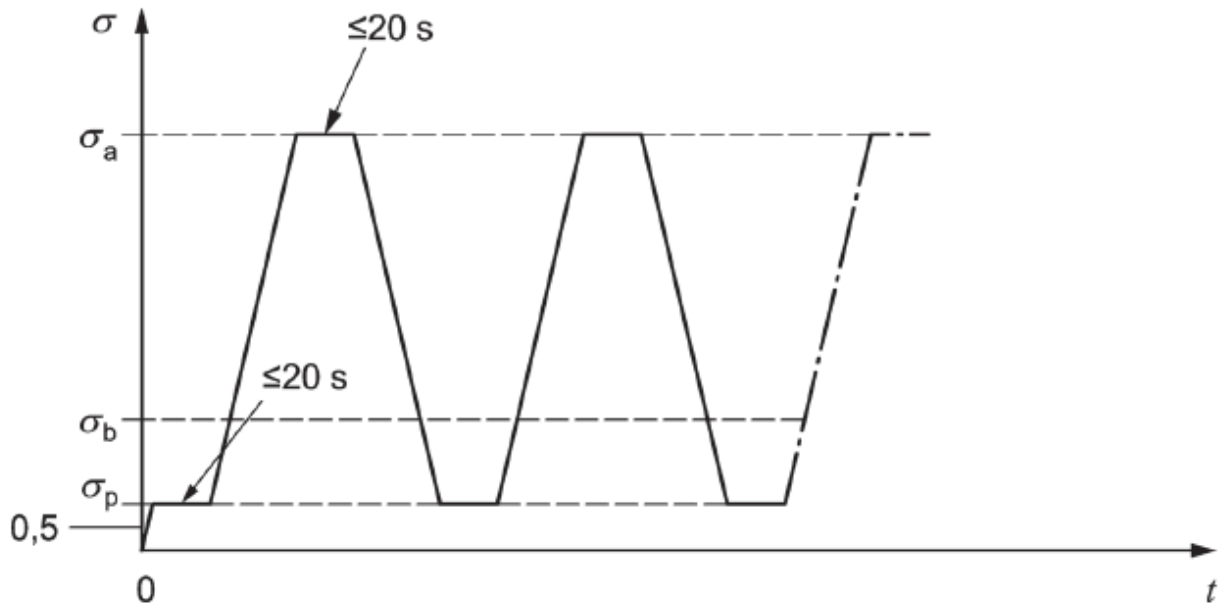
3.4.5 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodulen ble testet i henhold til NS-EN 12390-13:2013. [31] Prøvestykkene som ble testet skulle ifølge denne standarden være sylinderformede og konformere til NS-EN 12390-1. [27] Prøvene ble rengjort og partikler ble fjernet. Deretter ble extensometeret som ble brukt til å måle lengdeforandring satt på prøven. Se figur under.



FIGUR 21: PRØVESTYKKE MED EXTENSOMETER FOR MÅLING AV LENGDEFORANDRING

NS-EN 12390-13:2013 beskriver to forskjellige metoder for å bestemme elastisitetsmodulen. I denne oppgaven ble metode B brukt. Her blir det utført tre lastsykluser, se figur 22. Elastisitetsmodulen blir bestemt ved den tredje syklusen.



FIGUR 22: FREMGANGSMÅTE FOR BESTEMMELSE AV STABILISERT SEKANTMODUL AV ELASTISITET. [31]

der

σ er påført spenning i MPa;

σ_a er øvre spenningsnivå - $f_c/3$;

σ_b er laveste spenningsnivå - $0,10 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \cdot f_c$;

σ_p er forspenning - $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$;

t er tid i sekunder;

f_c er trykkfastheten.

Først ble trykkfastheten til betongen som skulle testes bestemt. Denne ble bestemt ut ifra middelveiden til tre terninger som allerede var testet. Denne middelveiden ble multiplisert med 0,8, siden det var terninger som var testet, og f_c er ca 1.25 ganger høyere enn trykkfastheten til terninger. [9]

Kunne dermed finne σ_a . Trykkpressen som ble brukt, hadde problemer med å ha lavere spenningsnivå enn 30 kN når den skulle brukes i syklisk testing, og σ_p ble derfor satt til 30 kN, noe som tilsvarer 1,7 MPa. Ved hvert spenningsnivå ble spenningen holdt i 20 sekund, og lengdeforandringen ble lest av ved enden av hvert nivå. Siden måleutstyret målte lengdeforandring og ikke tøyning måtte tøyningen regnes ut ved følgende formel:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3-3)$$

der

ε er tøyningen;

ΔL er lengdeforandringen i mm;

L_0 er opprinnelig målelengde for instrumentet i mm.

Etter at testen var utført, kunne elastisitetsmodulen regnes ut ved hjelp av formelen under:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad (3-4)$$

der

$E_{C,S}$ = er den stabilisert sekantmodulen av elastisitet;

σ_a^m er øvre registrerte spenningsnivå;

σ_p^m er laveste registrerte spenningsnivå;

$\varepsilon_{a,3}$ er tøyningen registrert ved slutten av tredje øvre spenningsnivå;

$\varepsilon_{p,2}$ er tøyningen registrert ved slutten av andre laveste spenningsnivå.

Elastisitetsmodulen skal bli angitt til nærmeste 0,1 GPa. [31]

3.4.5 Arbeidsdiagram

Arbeidsdiagrammet ble testet ved hjelp av Sintefs KS70 124 prosedyre for Arbeidsdiagram ved trykkbelastning. [32] Denne metoden bygger på bestemmelsene i NS 3473 Vedlegg A, pkt A.11.3.1.

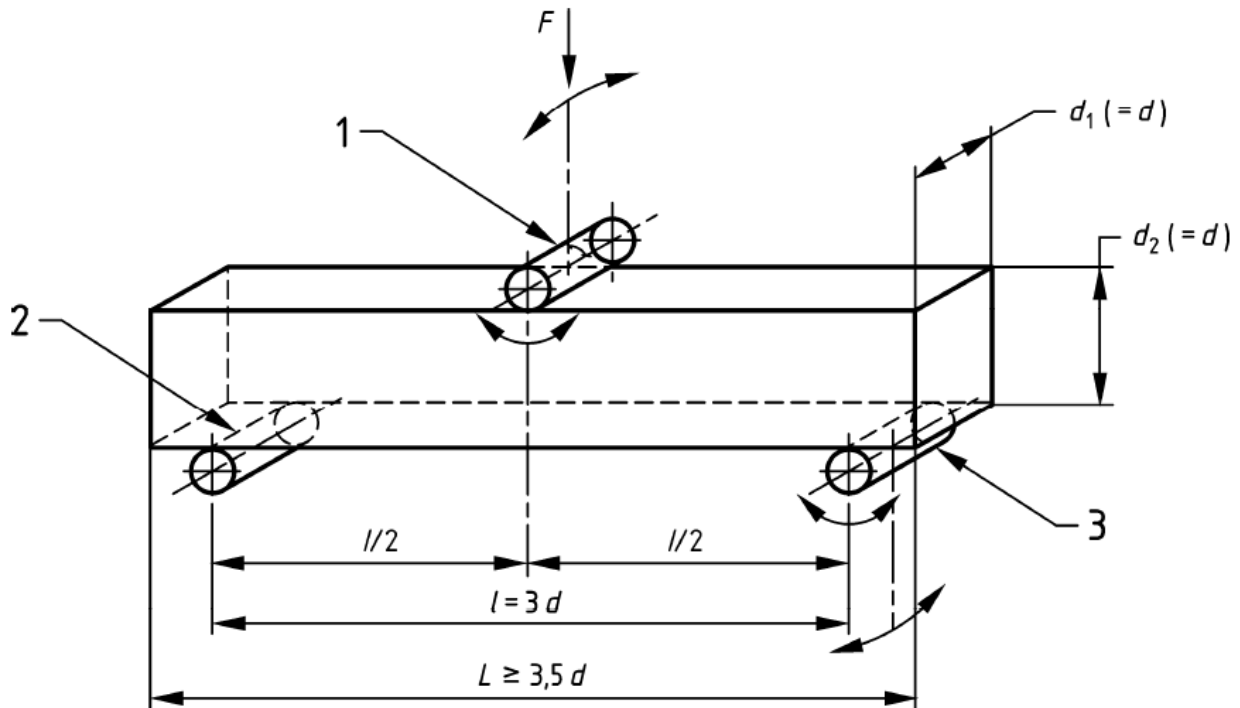
Prøven ble rengjort, og partikler fjernet, før prøvestykket ble sentrert i trykkpressen. Denne testen er deformasjonsstyrt, og prosedyren sier at deformasjonshastigheten skal være 0.3‰ per minutt. Siden høyden på sylindrerne som ble brukt var 300 mm, ble hastigheten:

$$\left(\frac{300 \cdot \text{mm} \cdot 0,3}{1000} \right) \frac{1}{\text{min}} = 0,09 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (3-5)$$

Prøvestykket ble så presset med denne hastigheten, og testen ble ikke avsluttet før lasten var tilbake til 30% av maksimal last.

3.4.6 Bøyestrekfasthet

Bøyestrekfastheten ble testet i henhold til NS-EN 12390-5:2001. [11] Bjelkene som ble testet ble rensert for partikler og satt inn i trykkpressen som skulle brukes. Appendix A i NS-EN 12390-5:2009 beskriver metoden som ble brukt i denne oppgaven. Dette er en trepunkts bøyetest, med en sentrert rulle på toppen som presser ned, og to ruller under som støtter, se figur under.



FIGUR 23: OPPSETT FOR TEST AV BØYESTREKKFASTHET [11]

der

1 er rullen som blir presset ned, som kan roteres og skråstilles;

2 er støtterulle;

3 er støtterulle som kan roteres og skråstilles;

d er bredde og høyde på bjelken, i mm;

L er lengden på bjelken.

Siden bredden og høyden på bjelken var 150 mm, ble lengden mellom de to støttene 450 mm. Etter at bjelken var plassert riktig i pressen, ble testen startet. Kraften ble påført i en

hastighet på 300 N/s, og ble påført til bjelken gikk til brudd. Bruddlasten ble da notert ned. Bøyestrekfastheten kunne deretter regnes ut ved hjelp av følgende formel:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (3-6)$$

der

f_{cf} er bøyestrekfastheten, i MPa;

F er bruddlasten, i N;

l er avstanden mellom de to støttene; i mm;

d_1 og d_2 er bredde og høyden av prøvestykket i mm.

Bøyestrekfastheten skal bli angitt til nærmeste 0,1 MPa. [11]

3.5 Utstyr brukt i forbindelse med testingen

I forbindelse med testingen ble det brukt en del forskjellig utstyr, vil i dette kapitlet kort liste opp hva som ble brukt.

3.5.1 Klimaskap

Klimaskapet som ble brukt var av typen CTS C-40 og ble brukt til å kjøle ned betongen før testing. Både temperatur og relativ luftfuktighet kan bestemmes i dette skapet.

Klimaskapet ble ellers brukt som nevnt i 3.4.2.



FIGUR 24: CTS C-40 KLIMASKAP

3.5.2 Varmeskap

For å tørke ut betongen og få riktig metningsgrad i betongen før den ble testet eller fryst ned, ble det brukt ett varmeskap. Varmeskapet var av typen Termaks. Temperaturen var her satt på 80°C, og ble ellers brukt som forklart i kap. 3.4.1.

3.5.3 Tonitech trykkpresser

Det ble brukt to forskjellige trykkpresser i testingen som ble gjort. På testingen av bøyestrekfasthet ble det brukt en trykkpresse med kapasitet på 300 kN, mens resten av testene ble gjort i en trykkpresse med kapasitet opp til 2000 kN.

3.5.4 Temperaturmåler

For å måle temperaturen til betongen etter fullført testing, ble det brukt en elektronisk temperaturmåler. Temperaturmåleren var av typen Fluke 65 infrared thermometer.

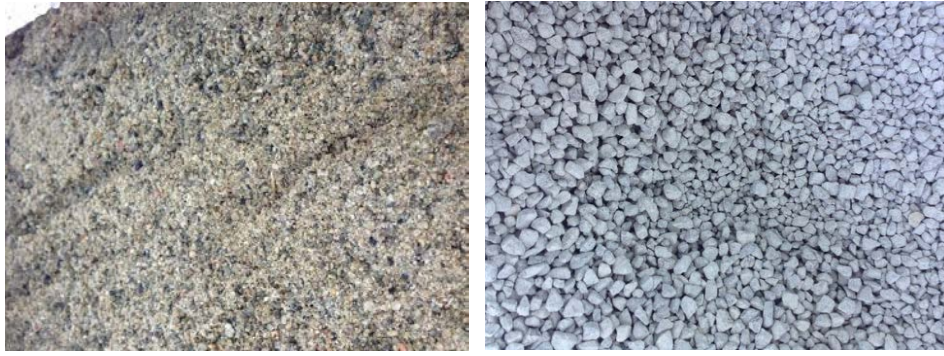
3.5.5 Komprimeringsmaskin

Som beskrevet i flere underkapitler i kap. 3.2, ble det brukt en komprimeringsmaskin for å komprimere betongen under støping.

3.6 Materialer

Det ble stort sett brukt de samme materialene for alle blandingene. Eneste forskjellen i blandingene er at lettbetongen hadde ulikt grovt tilslag i forhold til resten av betongen som ble støpt. I dette kapittelet blir de forskjellige materialene som ble brukt listet opp.

- Sement: Norcem Anleggsement FA, densitet 2,99 kg/dm³, finhet (Blaine) 390 m²/kg. Datablad er lagt ved i vedlegg.
- Superplastiserende: Dynamon SX-N fra Rescon Mapei. Densitet på 1060±20 kg/m³.
Tørrstoffinnhold på 18,5±1,0 %. Datablad er lagt ved i vedlegg.
- Gneis/granitt: Det ble brukt to forskjellige fraksjoner, siktekurver til disse er lagt ved i vedlegg.
 - Forsand 0-8 mm.
 - Velde 8-16 mm.
- Lett-tilslag: Det ble her brukt Stalite ½-toms. Datablad kan finnes i vedlegg.



FIGUR 25: FORSAND 0-8 MM TIL VENSTRE, OG VELDE 8-16 MM TIL HØYRE.

3.6.1 Stalite

Universitetet i Stavanger hadde lite erfaring i bruk av stalite. Databladet som hører til Stalite følger amerikanske standarder, og for å få god kontroll på tilslaget ble det gjort litt ekstra tester på før det ble støpt.

- Stalitens spesifikke vekt ble først testet. Den ble testet ved å fylle en Erlen Mayer kolbe $\frac{3}{4}$ -dels full med tilslag. Deretter ble resten av volumet fylt opp med vann. Alle luftbobler ble fjernet ved hjelp av risting og deretter ble vekten lest av, og man fikk dermed spesifikk vekt. Vekten av tilslaget som var fylt i var veid før testen startet. Fikk da at den spesifikke vekten av stalite var 1276 kg/m^3 .
- Siden lett-tilslagets absorpsjon kan være ett problem under støping med lett-tilslag, ble stalitens absorpsjon også testet. Her ble tilslag med kjent vekt lagt i vann i en halv time, og deretter ble staliten tørket og veiet en gang til. Tilslaget lå ikke en hel time i vann, siden en halv time bedre ville simulere hvor mye vann som ville bli absorbert under støpingen. Absorpsjonen ble da 2,6%.

3.6.2 «Speedy moisture tester»

For å finne fuktigheten i sanden ble det brukt en fuktighetsmåler. Databladet til denne er lagt ved i vedlegg. Framgangsmåten som er oppsatt i vedlegget ble fulgt, og fuktigheten til sanden kunne dermed konstateres etter relativt kort tid.

4 Eksperimentelt resultat og diskusjon

Dette kapittelet omhandler en systematisk gjennomgang av resultatene fra gjennomføringen av laboratorieprogrammet. Deretter vil resultatene bli diskutert mot hverandre og sammenlignet mot teorien fra kapittel 1. Resultatene og diskusjonene vil bli presentert i et delkapittel for hver test.

4.1 Fersk betong

Det ble gjort tre tester på den ferske betongen. Siden det ble blandet flere blandinger på hver blanding, er det i tabellen under laget ett gjennomsnitt av verdiene:

TABELL 6: RESULTAT FRA TESTING AV FERSK BETONG

Prøve	Synkmål [mm]	Densitet [kg/m ³]	Luftinnhold [%]	Dato
Normal betong	50	2380	3,2	5. og 18. feb
Umettet betong	160	2360	2,4	19. feb
Lettbetong	90	2110	3,2	24. - 26. mars

Blandeskjema for de forskjellige blandinger kan finnes som vedlegg.

4.1.1 Synkmål

TABELL 7: SYNKMÅL AV DEN FERSKE BETONGEN

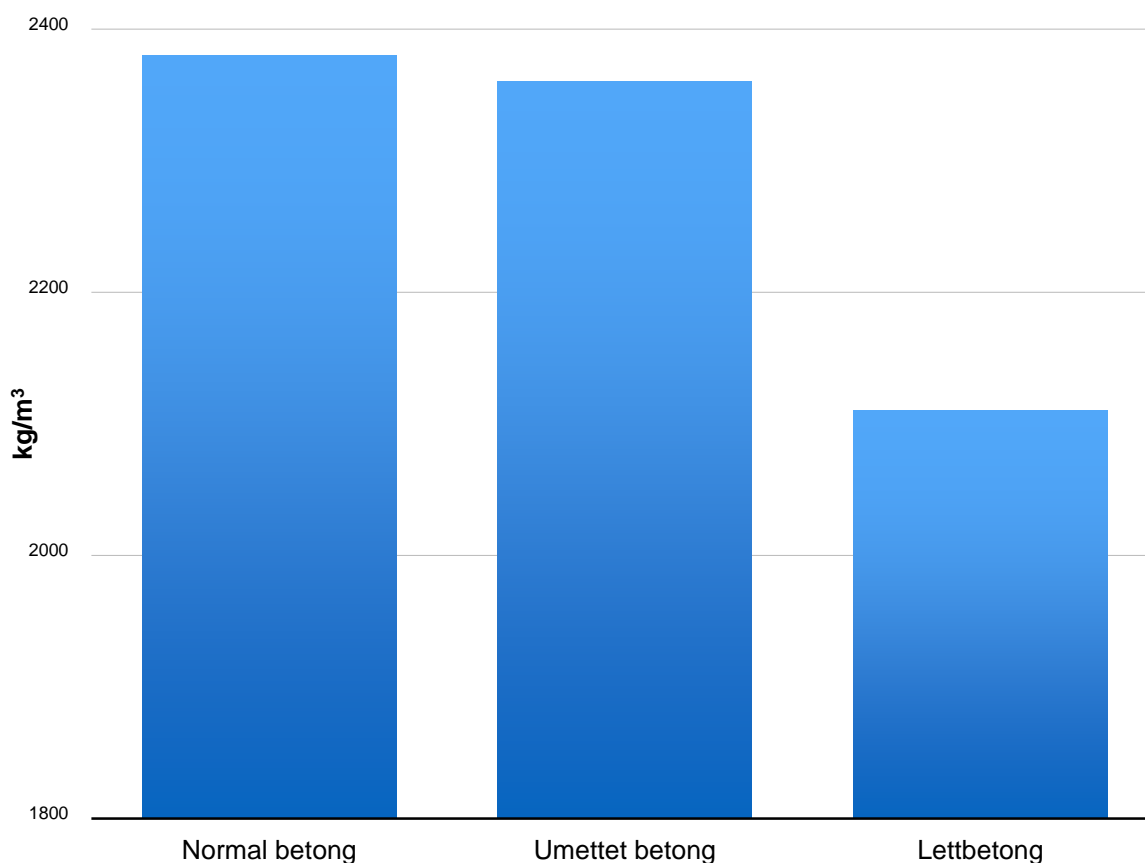
Prøve	Normal betong [mm]	Umettet betong [mm]	Lettbetong [mm]
1	50	150	30
2	60	160	30
3	50	-	150
4	50	-	170

I tabellen over er resultatene presentert for de forskjellige blandinger som er gjennomført. Blandingene er stort sett helt like. Lettbetongen har Stalite i stedet for Velde 8-16 mm som grovt tilslag, og blandinger har også noe ujevn mengde av tilsatt SP-stoff. Normal betongen har 0,5% SP-stoff tilsatt, og har veldig jevne blandinger. Ved blanding av lettbetongen, ble støpeligheten først vurdert til å være så god at det ved de to første

blandingene ikke ble tilsatt noe SP-stoff. Før den tredje blandingen ble det gjort en ny vurdering og tilsatt 0,5% SP-stoff også her, noe man også kan se på målingene av synkmål. Begge blandingene av umettet betong er tilsatt 0,65% SP-stoff.

Siden lettbetong med like mye SP-stoff som normal betong har mye høyere synkmål, så betyr det at det oppnås bedre støpelighet ved å bruke Stalite i stedet for Velde 8-16. Kan også se at det å øke SP-innholdet bare 0,15% kan ha stor innvirkning på synkmålet når w/c-tallet er så lavt som det er her. Dette kommer frem av forskjellen av synkmålet på normal og umettet betong.

4.1.2 Densitet



FIGUR 26: DENSITET

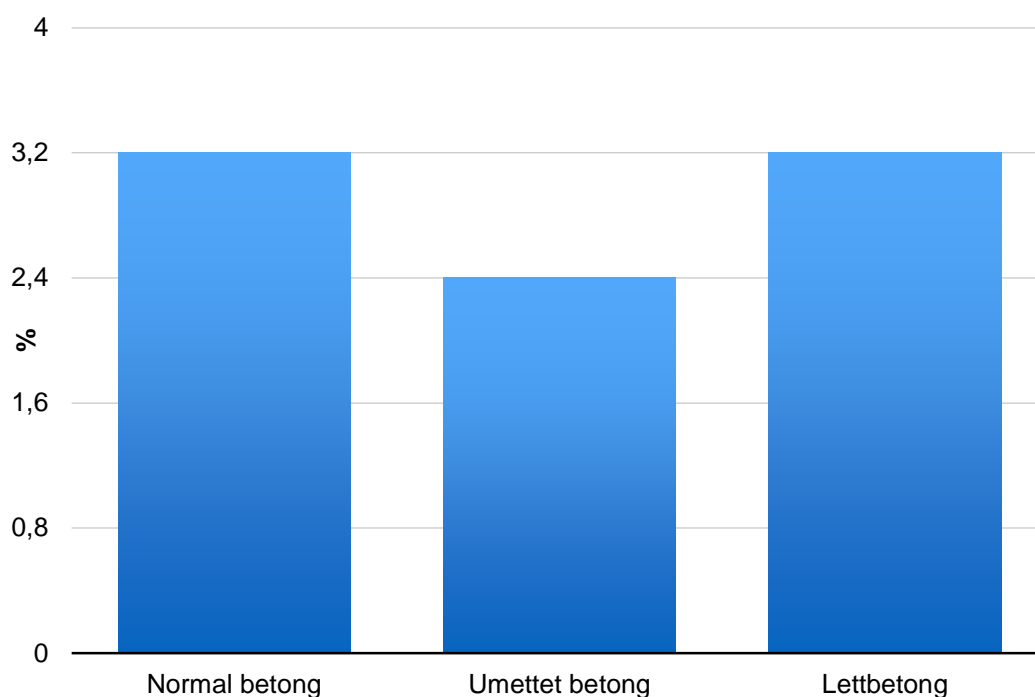
I diagrammet over er den gjennomsnittlige densiteten til de forskjellige blandingene vist. Kan se at lettbetongen har lavere densitet enn normal betongen. Dette var også forventet siden den var iblandet Stalite og ikke Velde 8-16. Normal og umettet betong skulle i teorien ha lik densitet, og de har en forskjell på 20 kg/m³. Densitet rundes av til nærmeste

10 kg/m³, så forskjellen mellom normal og umettet betong ligger nesten innenfor avrundingsmarginen.

Ifølge kap. 1.2 er lettbetong klassifisert som betong som har densitet mellom 300 og 1850 kg/m³. Denne klassifikasjonen er for luft-tørr betong. Lettbetongen som har blitt støpt i denne oppgaven har fått en densitet på 2110 kg/m³, og målingene er gjort på fersk betong. Det er ikke blitt gjort målinger på luft-tørr betong, men det kan likevel se ut som om lettbetongen som er støpt i denne oppgaven har noe høy densitet. Ifølge proporsjoneringen som ble gjort før støpingen, skulle densiteten av lettbetongen bli rundt 1950 kg/m³ med de innlagte dataene. Når densiteten ble så mye høyere, tyder det på at noe av informasjonen som ble brukt i proporsjoneringen være feil, og det kan derfor være grunn til å tro at målingene som ble gjort av stalitens spesifikke vekt ikke ble gjort riktig.

Den normale betongen har en densitet mellom 2360 og 2380 kg/m³. Ifølge proporsjoneringen skulle denne betongen få en densitet på 2390 kg/m³. Ser derfor at proporsjoneringen stemmer veldig bra med resultatene her, og dette gir derfor enda større grunn til å tro at noe ikke ble gjort riktig ved målingen av lett-tilslagets densitet.

4.1.3 Luftinnhold



FIGUR 27: LUFTINNHOLD

I proporsjoneringen ble luftinnholdet satt til å være 2%. Det ble ikke gjort noe i de forskjellige blandingene for å regulere luftinnholdet, og det burde være derfor være jevnt. Kan fra diagrammet over se at luftinnholdet er jevnt, selv om den umettede betongen har noe lavere luftinnhold.

Eneste forskjellen på den umettede og den normale betongen er at det i den umettede betongen er tilsatt 0,15% mer SP-stoff, og det kan være dette som er grunnen til at luftinnholdet er blitt lavere.

Ifølge kap. 1.1.8, vil trykkfastheten synke med 5% for hvert prosent ekstra luft, og siden normal betongen her har 0,8% ekstra luft, vil det si at trykkfastheten, ifølge denne tommelfingerregelen, skal stige med 4%.

4.2 Trykkfasthet

Trykkfastheten ble testet på terninger. Disse terningene skulle bli testet etter 7 og 28 døgn. Terningene som skulle bli fryst til -20 og -45°C ble liggende lenger i vannbad enn terningene som ble testet på 20 og 0°C.

4.2.1 7-døgns trykkfasthet

TABELL 8: 7-DØGNS TRYKKFASTHET

Prøve	Terning 1 bruddlast [kN]	Terning 2 bruddlast [kN]	Terning 3 bruddlast [kN]	Gj. snitt bruddlast [kN]	Trykkfasthet [MPa]
Normal betong	671	692	683	682	68,2
Lettbetong	526	539	514	526	52,6

Lettbetongen som ble testet her, ble testet etter 8 døgn, og ikke 7 døgn av praktiske årsaker.

Kan se at etter 7 døgn er det en klar tendens til at normal betongen har betydelig høyere trykkfasthet enn lettbetongen. Dette stemmer også overens med det som var antatt i kap. 1.2.2.1. Siden lett-tilslaget har lavere porøsitet i forhold til vanlig tilslag, vil dette medføre til

lavere fasthet. Kan ellers se at testene av trykkfasthet gir jevne resultater, som tilsier tilfredsstillende blandinger av betongen.

4.2.2 28-døgns trykkfasthet

I tabellen nedenfor er normalbetong blitt forkortet til ND, umettet betong til NDU og lettbetong til LWA. Dette blir også brukt i resten av oppgaven.

TABELL 9: 28-DØGNS TRYKKFASTHET

Prøve	Terning 1 bruddlast [kN]	Terning 2 bruddlast [kN]	Terning 3 bruddlast [kN]	Gj. snitt bruddlast [kN]	Trykkfasthet [MPa]	Økning
ND - 20°C	826	827	816	823	82,3	NA
ND - 0°C	928	938	920	929	92,9	11
ND - -20°C	1096	1137	1135	1123	112,3	30
ND - -45°C	1152	1165	1198	1172	117,2	35
NDU - 20°C	928	949	951	943	94,3	NA
NDU - 0°C	983	993	965	980	98,0	4
NDU - -20°C	1031	1063	947	1014	101,4	7
NDU - -45°C	1132	1119	1124	1125	112,5	18
LWA - 20°C	676	660	632	656	65,6	NA
LWA - 0°C	719	744	734	732	73,2	8
LWA - -20°C	926	927	933	929	92,9	27
LWA - -45°C	928	924	937	930	93,0	27

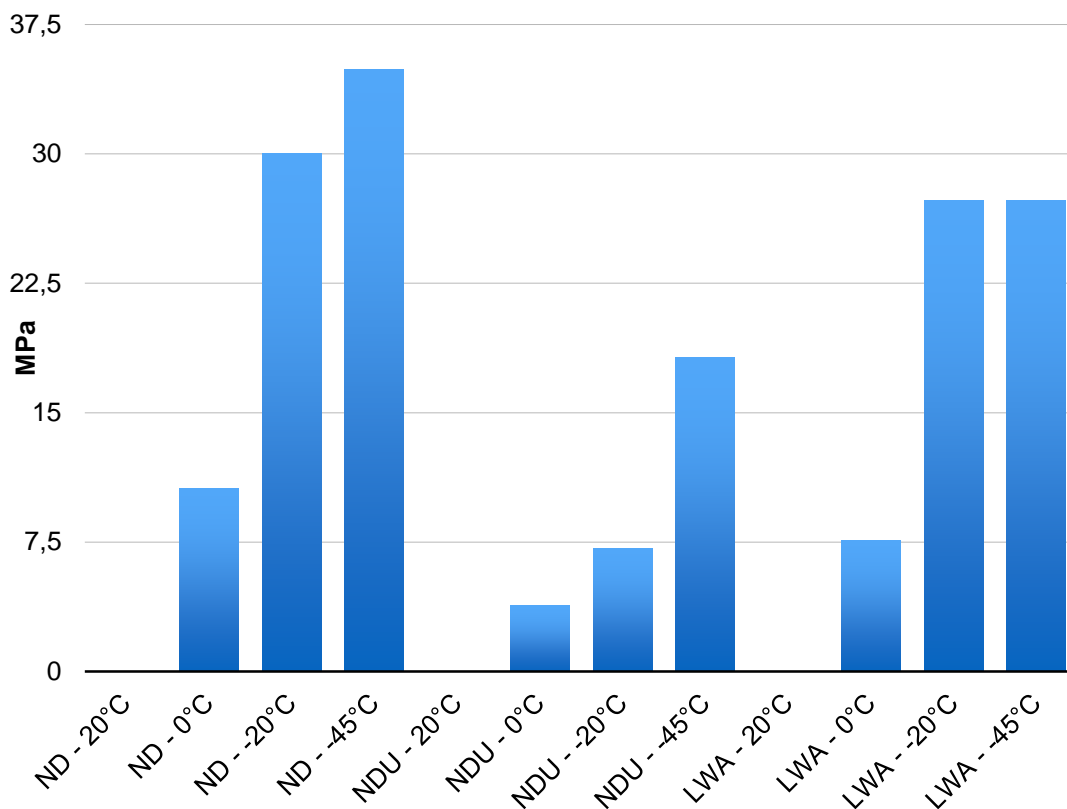
Av praktiske årsaker ble ikke den umettede betongen testet etter 28 døgn, men etter 50 døgn. Dette har ført til at trykkfastheten etter 28 døgn er en del høyere for umettet enn for normal betong. Anleggsement FA er også en sement som har treg fasthetsutvikling, og forskjellen i fastheten mellom umettet og normal betong ville nok vært lavere hvis for

eksempel Industrisement var brukt. Årsaken til dette er at Industrisement har en raskere fasthetsutvikling.

Ifølge [8] er kravet til B70 betong en $f_{ck,28døgn}$ på 85 MPa. Målet for støpingen var å støpe høyfast og helst B70 betong, og man kan se at etter 28 døgn er trykkfastheten omtrent 3 MPa ifra B70. Ifølge kap. 1.1.7 innfrir høyfast betong kravene til B60 og høyere, og her er betongen som har blitt støpt godt innenfor kravene.

Lettbetongen som har blitt støpt innfrir godt kravene til LB55 betong som er stilt av [8], og er derfor i nærheten av å innfri kravene som stilles til høyfast betong.

4.2.3 Økning av trykkfasthet



FIGUR 28: ØKNING AV TRYKKFASTHET VED NEDKJØLING

Diagrammet over viser økning av trykkfasthet i forhold til trykkfastheten til referansetesten til hver blandingen. Referansen til hver blanding er testen som ble gjort ved 20°C. Får dermed frem økningen av trykkfasthet som skjer ved nedfrysning i dette diagrammet. Kan

da se at trykkfastheten har en klar økning etterhvert som temperaturen blir lavere. Dette gjelder for alle de tre forskjellige betongene som ble testet.

Kan også se at vanninnholdet i betongen har stor innvirkning på hvor mye trykkfastheten øker etter hvert som temperaturen blir senket. Dette blir klart når man ser på hvor lite trykkfastheten øker i betongen som er blitt tørket før nedfrysning. Ser likevel at den lille fuktigheten som er igjen i betongen gjør at den umettede betongen også får en betydelig økning når temperaturen blir lav nok.

I figur 8 kan man se en graf der økningen i trykkfasthet er en funksjon av temperatur og fuktinnhold. I denne grafen har trykkfastheten en økning på 0-10 MPa når fuktinnholdet er lavt og temperaturen er mellom 0 og -45°C, men betongen som har blitt testet i denne oppgaven har en høyere økning, spesielt når temperaturen er -45°C. Dette er litt merkelig, siden betongen som har blitt testet her, har et mye lavere w/c-tall enn betongen som ble testet i figur 8. Lavere w/c tall skal ifølge teorien tilsi lavere økning, men det motsatte blir registrert her. Dette kan bety at antakelsen som har blitt gjort om hvor mye vann som var igjen i betongen etter 13 døgn ikke stemmer. Resultatene fra testene som har blitt gjort på umettet betong stemmer nemlig bedre overens med tester som har blitt gjort på betong som har ligget i en relativ fuktighet på ca 80-90% fuktighet.

I kap. 1.4.2.1 er det gitt to formler som forutsier hvor mye trykkfastheten til betong vil øke når temperaturen blir senket. I tabell 10 er det listet opp hva resultatene blir for betongen som ble støpt.

TABELL 10: TEORETISK UTREGNING AV ØKNING AV TRYKKFASTHET

Prøve	$f_{cm}(T:m)$ [MPa] Goto og Miura	$f_{cm}(T)$ [MPa] Okada og Iguro	Fuktinnhold m [%]	Målt økning i trykkfasthet [MPa]
ND - 20°C	NA	NA	7,2	NA
ND - 0°C	0,0	5,4	7,2	10,6
ND - -20°C	18,1	21,5	7,2	30,0
ND - -45°C	37,8	38,5	7,2	34,9
NDU - 20°C	NA	NA	2,3	NA
NDU - 0°C	0,0	5,4	2,3	3,8
NDU - -20°C	5,8	21,5	2,3	7,1
NDU - -45°C	12,1	38,5	2,3	18,2
LWA - 20°C	NA	NA	7,7	NA
LWA - 0°C	0,0	5,4	7,7	7,6
LWA - -20°C	19,4	21,5	7,7	27,3
LWA - -45°C	40,4	38,5	7,7	27,3

I diagrammet over er $f_{cm}(T:m)$ og $f_{cm}(T)$ regnet ut ved hjelp av henholdsvis formel (1-5) og (1-8). Fuktinnholdet til normal betongen og lettbetongen er funnet ved å finne ut hvor mange prosent vannet som er tilsatt utgjør av den målte densiteten. Se formel under:

$$\frac{\text{vann tilsatt}}{\text{målt densitet}} \times 100 \quad (4-1)$$

For den umettede betongen er fuktinnholdet regnet ut litt annerledes. Se formel under:

$$\frac{(\text{vann tilsatt} - \text{vekt mistet})}{\text{målt densitet}} \times 100 \quad (4-2)$$

Resultatene som det er kommet frem til i denne oppgaven viser en lignende tendens som formlene legger opp til. Det kan se ut som om betongen som har blitt testet her har utviklet mer fasthet mellom 0 og -20°C i forhold til det som er lagt opp til i formlene. Dette er også forventet ifølge kap. 1.4.2.1. Formlene vil nemlig gi mindre økning av trykkfastheten mellom -10 og -40°C, siden frysing av store porer vil gi en stor økning av styrke i forhold til det som blir beregnet av formlene.

Ser at ved -45°C stemmer resultatene fra formlene og resultatene fra testene bedre overens en hva de gjorde når temperaturene var høyere.

Goto og Miuras formel tar hensyn til fuktinnholdet, og kan derfor se at denne formelen stemmer rimelig godt med resultatene fra den umettede betongen. Formelen til Okada og Iguro er derimot ikke i nærheten av å estimere riktig.

4.2.4 Tilslagets påvirkning på økning av trykkfasthet

Ifølge kap. 1.4.2.1.2 tilsier tidligere testing at lettbetong vil få en lavere økning av fasthet i forhold til hva normal betong vil oppnå, selv om alle andre parametere er like.

I testingen som har blitt gjort her, er økningen i trykkfasthet for lettbetongen lavere i forhold til normal betongen, og resultatene stemmer dermed godt med teorien. Likevel er ikke forskjellene veldig betydelige, selv om forskjellen begynner å bli større når temperaturen er på det laveste. Dette kan ha sammenheng med at lett-tilslaget som har vært brukt i denne oppgaven er et relativt «tungt» lett-tilslag, og dette viser godt igjen i betongens høye densitet.

Resultatene Veen har samlet inn, viser at lettbetongen som har lavest densitet øker minst, og dette kan dermed forklare hvorfor forskjellen mellom lettbetongen og normal betongen som har blitt testet ikke er større.

4.3 Spaltestrekkfasthet

Strekkfastheten ble testet på to sylindere på hver temperatur. Disse sylindere ble testet etter 28 døgn. For normal og umettet betong ble sylindere som skulle bli fryst til -20 og -45°C liggende lenger i vannbad enn sylindere som ble testet på 20 og 0°C . For lettbetong skjedde det samme med sylindere som ble testet på 0 og -20°C .

4.3.1 Spaltestrekkfasthet resultater

TABELL 11: SPALTESTREKKFASTHET RESULTATER

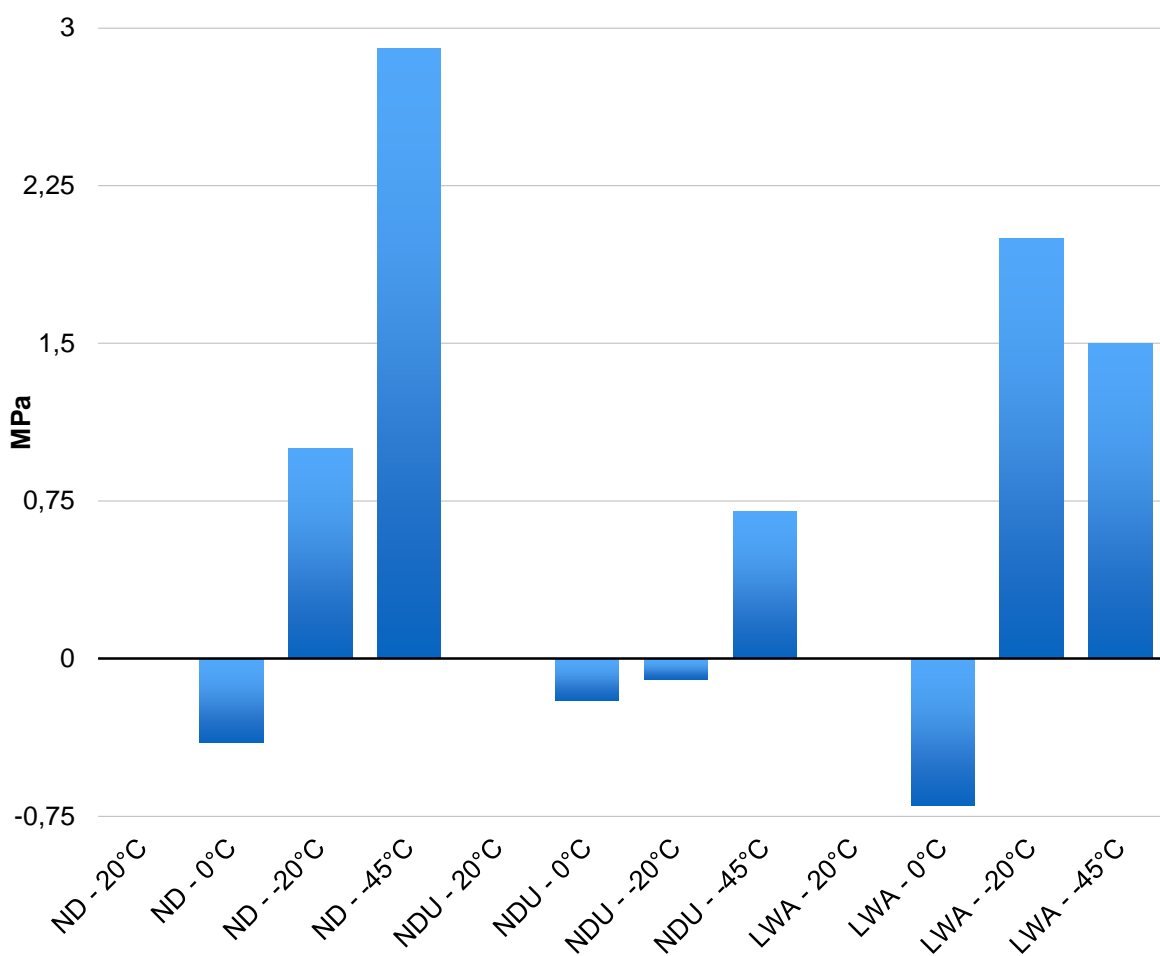
Prøve	Sylinder 1 bruddlast [kN]	Sylinder 2 bruddlast [kN]	Gj. snitt bruddlast [kN]	Spaltestrekkfasthet [MPa]	Økning	Spredning i bruddlast [kN]
ND - 20°C	306	304	305	4,3	NA	-2
ND - 0°C	247	308	278	3,9	-0,4	61
ND - -20°C	312	440	376	5,3	1,0	128
ND - -45°C	434	579	507	7,2	2,9	145
NDU - 20°C	353	339	346	4,9	NA	-14
NDU - 0°C	359	300	330	4,7	-0,2	-59
NDU - -20°C	312	371	342	4,8	-0,1	59
NDU - -45°C	365	427	396	5,6	0,7	62
LWA - 20°C	295	266	281	4,0	NA	-29
LWA - 0°C	263	205	234	3,3	-0,7	-58
LWA - -20°C	402	436	419	5,9	1,9	34
LWA - -45°C	388	392	390	5,5	1,5	4

Kan se fra tabellen over at det er stor spredning mellom de to og to sylindere som ble testet på de forskjellige temperaturene. Dette gjelder spesielt på normal betongen. Dette var den første betongen som ble testet, og testmetoden ble bedre med trening, og dette medførte dermed at resultatene ble noe jevnere etter hvert.

Ifølge NS-EN 1992-1-1: 2004: NA: 2008, er midlere aksialstrekkfasthet for B70-betong 4,6 MPa. [6] Kan se fra tabellen over at ND-betongen er 0,3 MPa under kravet i standarden, mens NDU-betongen innfrir kravet med god margin. Kravene til LB55 betong er 3,99 MPa. Ser at LWA-betongen som er testet innfrir disse kravene ved 20°C.

Grunnen til at NDU-betongen innfrir kravene til B70-betong, mens ND-betongen ikke gjør det kan være fordi NDU-betongen lå 50 døgn til herding før den ble testet. Siden Anleggsement FA utvikler fasthet seint, har disse ekstra døgnene hatt innvirkning på resultatene.

4.3.2 Økning av spaltestrekkfasthet



FIGUR 29: FORANDRING AV SPALTESTREKKFASTHET VED NEDKJØLING

Kan fra figuren over se at alle blandinger opplevde en reduksjon i spaltestrekkfastheten når temperaturen ble senket til 0°C. Ifølge kap. 1.4.2.2.1 skal mesteparten av økningen i strekkfasthet skje mellom 0 og -40°C. Dette stemmer veldig godt med grafen over, der normal betongen opplever en betydelig økning frem til -45°C. Den umettede betongen opplever som forventet mye mindre økning. Siden det er så stor spredning i resultatene kan den lille reduksjonen den opplever på -20°C regnes som ingen reduksjon.

Resultatene til lettbetongen som ble testet stemte ikke helt overens med det som ble forventet. Her tålte nemlig sylindrerne som ble testet på -20°C mer enn de som ble testet på -45°C. Ifølge kap. 1.4.2.2.1 vil ofte strekkfastheten nå sin maks ved -60°C, og deretter oppleve en liten reduksjon, men her har altså denne reduksjonen blitt observert tidligere. Det kan være at det er typen lett-tilslag som er brukt i denne oppgaven som er årsaken til dette. Sylindrerne som ble testet på -20°C ble liggende 11 dager lenger til herding, og dette har nok også påvirket økningen av spaltestrekkfasthet.

I kap. 1.4.2.2.1 er det listet opp to formler som skal kunne forutsi spaltestrekkfastheten basert på trykkfastheten. I tabellen under er disse formlene brukt for å regne ut hva den teoretiske strekkfastheten ved de forskjellige temperaturene er. Denne strekkfastheten er basert på trykkfastheten til betongen, og her er resultatene fra trykkfasthet-testen brukt i formlene.

TABELL 12: TEORETISK UTREGNING AV SPALTESTREKKFASTHET

Prøve	$f_{csp}(T)$ [MPa] Goto og Miura	$f_{csp}(T)$ [MPa] Okada og Iguro	Trykkfasthet [MPa]	Målt spaltestrekkfasthet [MPa]
ND - 20°C	NA	NA	82,3	4,3
ND - 0°C	6,4	8,0	92,9	3,9
ND - -20°C	7,4	9,1	112,3	5,3
ND - -45°C	7,6	9,4	117,2	7,2
NDU - 20°C	NA	NA	94,3	4,9
NDU - 0°C	6,7	8,3	98,1	4,7
NDU - -20°C	6,8	8,5	101,4	4,8
NDU - -45°C	7,4	9,2	112,5	5,6
LWA - 20°C	NA	NA	65,7	4,0
LWA - 0°C	5,4	6,8	73,3	3,3
LWA - -20°C	6,4	8,0	92,9	5,9
LWA - -45°C	6,4	8,0	93,0	5,5

I tabellen over er $f_{csp}(T)$ regnet ut ved hjelp av henholdsvis formel (1-9) og (1-10). Okada og Iguro sin formel er bare gyldig mellom -10 og -100°C, men her ser det ut som om denne formelen gir generelt høye resultater for alle temperaturene som har blitt testet i denne oppgaven.

Goto og Miura sin formel gjør det ikke så veldig godt når resultatene på 0°C blir sammenlignet, men på de lavere temperaturene begynner det å ligne bedre både for ND-betong og for lettbetong. Formlene er laget for vannmettet betong, og det er dermed forventet at de ikke stemmer så bra for NDU-betongen. Vil også tro at formlene hadde begynt å stemme enda bedre hvis testene var gjort for enda lavere temperaturer.

Siden det var så stor spredning i testresultatene, er det vanskelig å drive noe god sammenligning av testresultatene mot resultatene fra formlene. Den målte spaltestrekkfastheten fra tabellen over er som regel gjennomsnittet av to veldig forskjellige verdier, og derfor vanskelig å si noe veldig bestemt om hvilken verdi som er den reelle spaltestrekkfastheten for denne betongen. Burde testet tre sylindere for spaltestrekkfasthet, slik at det hadde vært enklere å forkaste resultater hvis de skilte seg veldig ut.

4.4 Elastisitetsmodul

4.4.1 Elastisitetsmodul resultater

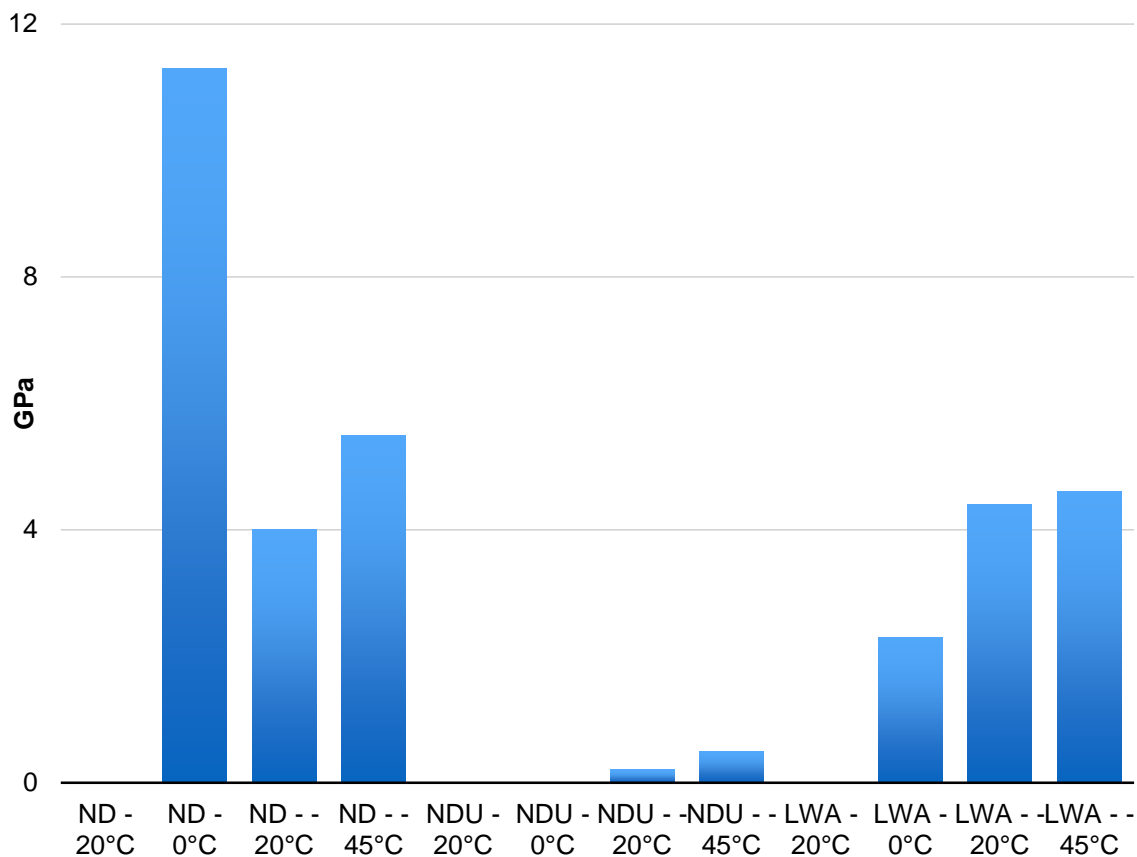
TABELL 13: ELASTISITETSMODUL RESULTATER

Prøve	Elastisitetsmodul 1 [GPa]	Elastisitetsmodul 2 [GPa]	Gjennomsnitt [GPa]	Økning
ND - 20°C	27,7	29	28,4	NA
ND - 0°C	39,7	39,5	39,6	11,2
ND - -20°C	33,4	31,4	32,4	4,0
ND - -45°C	33,7	33,9	33,8	5,4
NDU - 20°C	27,4	28,6	28,0	NA
NDU - 0°C	27,8	28,1	28,0	0,0
NDU - -20°C	28,8	27,6	28,2	0,2
NDU - -45°C	27,4	29,6	28,5	0,5
LWA - 20°C	22,9	22,2	22,6	NA
LWA - 0°C	24,6	25,1	24,9	2,3
LWA - -20°C	26,8	27,1	27,0	4,4
LWA - -45°C	27,5	26,8	27,2	4,6

Elastisitetsmodul for betong kan ifølge NS-EN 1992-1-1: 2004: NA: 2008 regnes ut teoretisk. Får da at B70-betong har en elastisitetsmodul på 41 GPa, og for LB55 betong blir den 31,5 GPa. Kan sammenligne dette med resultatene fra prøvene. En kan se fra tabellen over at resultatene som man fikk i denne oppgaven var betydelig lavere enn det standarden forventet. Fremgangsmåten som elastisitetsmodulen ble testet med kan finnes i kap. 2.4.5. Denne måten ble brukt av andre masterstudenter også, og de fikk også veldig lave verdier i sin testing. Usikkert hva som er grunnen til at resultatene ble så lave, men det kan være måleutstyret som ble brukt i testingen, eller selve testprogrammet på pc-en som ble brukt som hadde feil innstillinger. Det ble besluttet å bare fortsette testingen, selv om resultatene ble lave, siden resultatene kan sammenlignes mot hverandre.

Kan i tillegg trekke frem ND-betongen som ble testet på 0°C, resultatene her skiller seg veldig ut i forhold til resten av resultatene. ND-betong på 20°C hadde opprinnelig et liknende resultat, men ble testet på ny og fikk da resultatet som står i tabellen over. Disse to blandingene var de første som ble testet, og ble fremgangsmåten for testen ble finjustert etter at de var testet, og resultatene ble derfor høyere enn resten av testresultatene. Blandingen på 20°C ble testet på nytt, men det var ikke mulig å få testet blandingen på 0°C på nytt, og den resultatet blir derfor stående som det opprinnelig var.

4.4.2 Økning av elastisitetsmodul



FIGUR 30: ENDRING AV ELASTISITETSMODUL VED NEDKJØLING

Kan fra kap. 1.4.2.3.1 se at vannmettet betong vil ha en økning av e-modul som er ganske betydelig og at mye av denne økningen vil skje mellom 0 og -45°C. Kan se dette igjen i resultatene over, der normal betongen opplever en økning på ca 20% fra testing av romtempererte prøver og til prøver på -45°C.

I teorikapittelet blir det også nevnt at betong som har blitt tørket i varmeskap ikke vil oppleve noe økning ved nedfrysning, og det har også blitt observert i testresultatene. Dette er altså en veldig god indikator på at økningen i e-modul i stor grad blir styrt av fuktinnholdet i prøvene.

Ifølge kap. 1.4.2.3.2 er det ikke bare fuktinnholdet som bestemmer økningen av e-modul som betongen vil oppleve ved nedfrysning. Ifølge dette kapittelet vil nemlig lettbetong oppleve mindre økning ved nedfrysning. Kan fra figur 12 vise at det har blitt observert at betong med vanlig tilslag får dobbelt så stor økning av e-modul i forhold til lettbetongen.

I testene som har blitt gjort her har det ikke blitt observert en dobbelt så stor økning av normalbetongens e-modul i forhold til lettbetongens. Lettbetongen har lavere e-modul i utgangspunktet, men opplever lignende økning som den normale betongen gjør, og faktisk høyere økning ved -20°C . Kan derfor virke som om det bare er fuktinnholdet som bestemmer økningen av elastisitetsmodul ut ifra resultatene som er fått her.

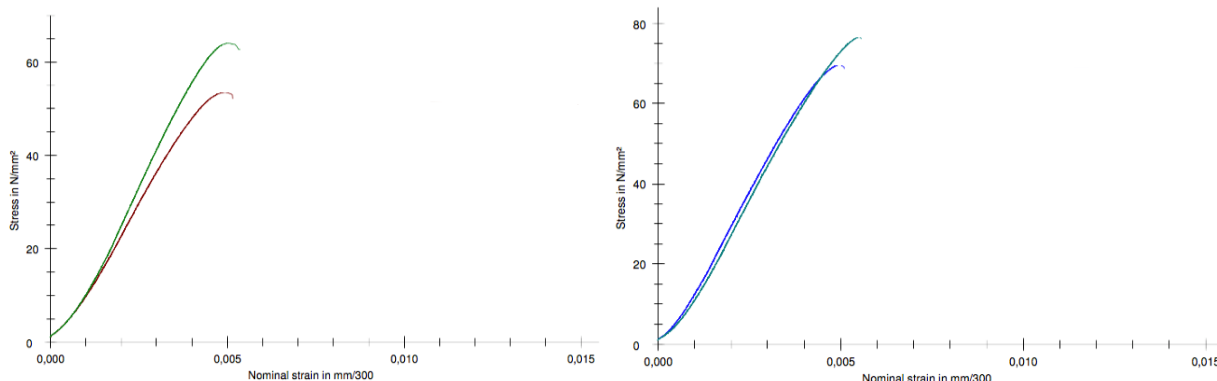
Grunnen til at lettbetongen i denne oppgaven oppfører seg annerledes i forhold til det skal gjøre ifølge teorien kan være at lettbetongen i denne oppgaven er annerledes enn letttilslaget som normalt har blitt brukt i tidligere forskning. Stalite som er brukt i denne oppgaven skal absorbere mindre vann enn vanlig letttilslag, og det kan være at dette gjør at mer vann er tilgjengelig til å fryse og dermed gjør økningen av e-modul større.

4.5 Arbeidsdiagram

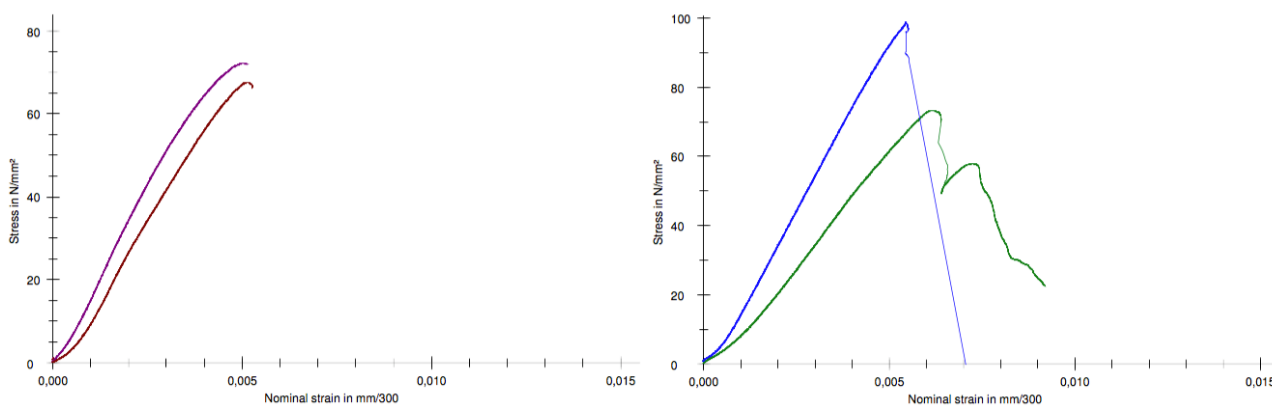
Arbeidsdiagram ble testet på to sylindere. For normal betong og lettbetong var det to egne sylindere som ble testet. For umettet betong ble arbeidsdiagrammet testet på sylindere som var testet for e-modul, etter at e-modul-testen var ferdig. For å gjøre presenteringen av arbeidsdiagram enklere, blir hver blanding presentert sammen.

Deformasjonen av sylindere ble målt i mm. For å gjøre dette om til tøyning i grafene nedenfor, ble deformasjonen delt på høyden av cylinderen, 300 mm.

4.5.1 Normal betong



FIGUR 31: ARBEIDSDIAGRAM FOR NORMALBETONG. 20°C TIL VENSTRE OG 0°C TIL HØYRE



FIGUR 32: ARBEIDSDIAGRAM FOR NORMALBETONG. -20°C TIL VENSTRE OG -45°C TIL HØYRE

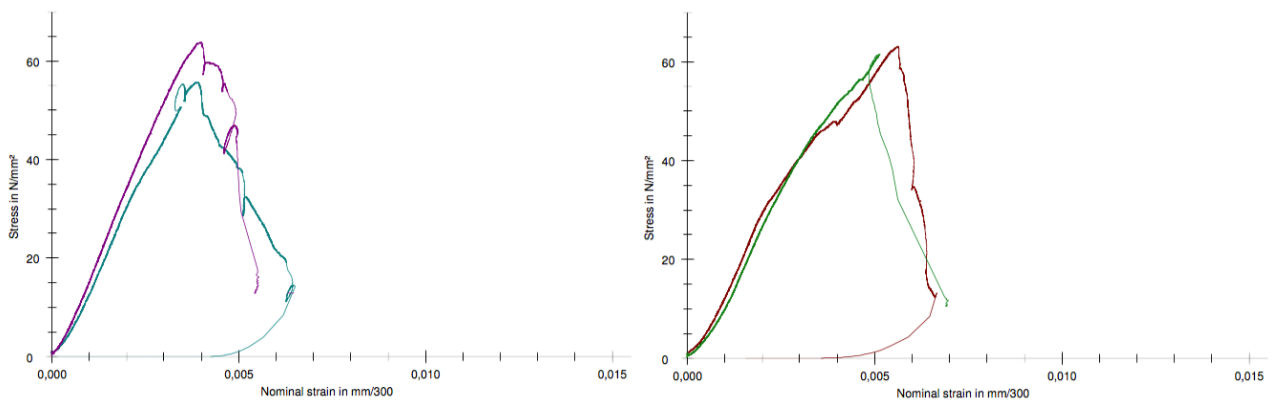
For de tre første temperaturene som normal betong ble testet på, ble testene avsluttet like etter at maks last var oppnådd. Før testene på -45°C ble utført, ble det gjort en forandring i prøveprosedyren. Nå ble ikke testen avsluttet før last påført var tilbake på 30% av maks påført last.

Dette gjør at det er vanskelig å si noe om hvor duktile normalbetongen er. Kan likevel se at maks påført last stiger når betongen blir nedfryst, og dette stemmer godt med hva som er lagt frem i kap. 1.4.2.4. For betongen testet på -45°C var det stor forskjell på de to sylindrene som ble testet. Den andre sylindren som ble testet tålte ca 450 kN mer i maks last enn den første sylindren, og gikk rett til brudd og nærmest eksploderte da maks last var oppnådd. Se figur 33. Den første sylindren derimot tålte mye tøying etter at maks last var nådd, og det kan ha sammenheng med at maks last var mye lavere.

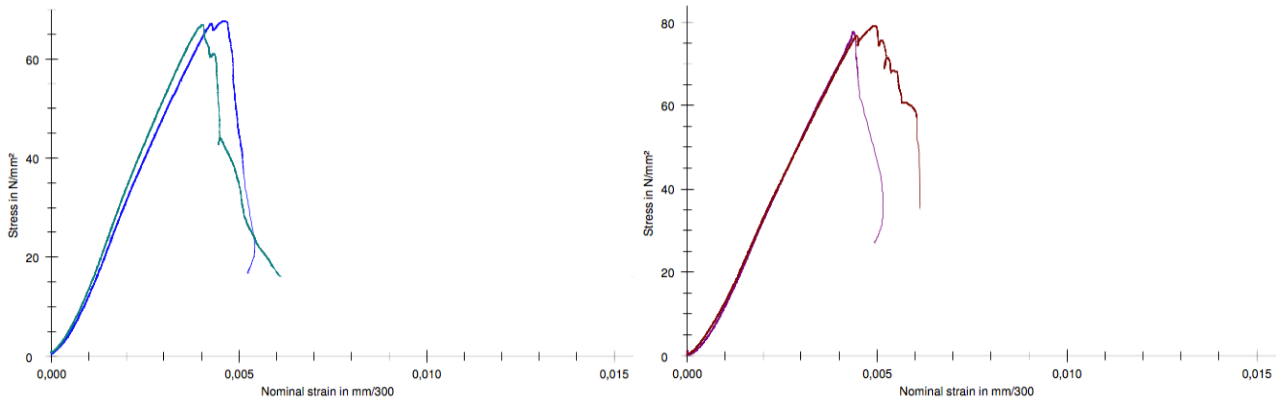


FIGUR 33: SYLINDER SOM EKSPLODERTE UNDER ARBEIDSDIAGRAMTEST

4.5.2 Umettet betong



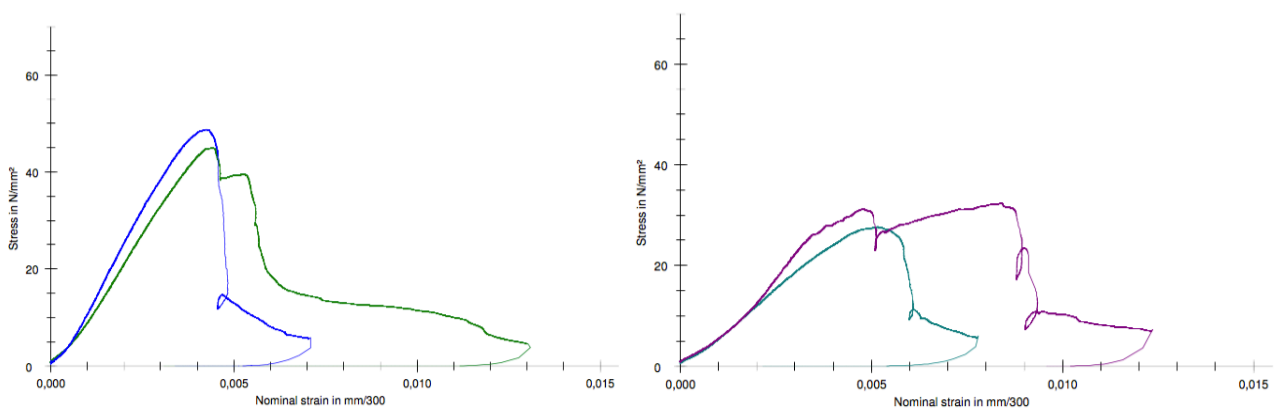
FIGUR 34: ARBEIDSDIAGRAM FOR UMETTET BETONG. 20°C TIL VENSTRE OG 0°C TIL HØYRE



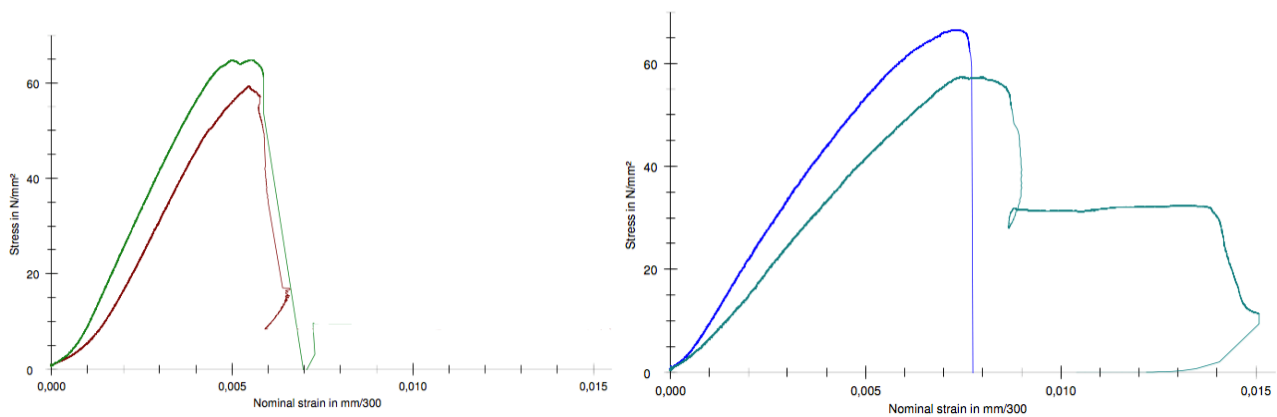
FIGUR 35: ARBEIDSDIAGRAM FOR UMETTET BETONG. -20°C TIL VENSTRE OG -45°C TIL HØYRE

Ifølge kap. 1.4.2.4 vil prøvestykker som er tørket normalt tåle lavere last, men vil få mer plastisk deformasjon enn vannmettede prøvestykker. Den umettede betongen lå 50 dager til herding før testingen av disse ble startet, og skulle derfor i utgangspunktet ha høyere fasthet og tåle større maks last enn normal betongen. Ser likevel at teorien stemmer med resultatene, og den umettede betongen har lavere maks last påført. Etter at maks last er påført, tåler den tørkede betongen noe mer plastisk deformasjon før den går til brudd.

4.5.3 Lettbetong



FIGUR 36: ARBEIDSDIAGRAM FOR LETTBETONG. 20°C TIL VENSTRE OG 0°C TIL HØYRE



FIGUR 37: ARBEIDSDIAGRAM FOR LETTBETONG. -20°C TIL VENSTRE OG -45 TIL HØYRE

Kan se at lettbetongen som ble testet hadde mindre maks kraft påført enn normal betongen. Ifølge kap. 1.2.2.3 er lettbetong mindre duktil enn vanlig betong, og vil derfor tåle mindre tøyning etter at maks last er oppnådd. Ifølge testene som her er gjort, kan man se at når stalite blir brukt tåler betongen likevel en del tøyning etter at maks last er nådd.

Når betong blir nedkjølt blir betongen mindre duktil. Dette kan godt sees i grafene for lettbetong over. Testene som har blitt gjort på -20 og -45°C går stort sett rett til brudd etter at maks last er påført. Det er et unntak, og det er den andre sylindere som ble testet på -45°C. Denne sylindere hadde en markant lavere makslast enn den første sylindere som ble testet. Dette kan ha hatt innvirkning på at den andre sylindere tålte nesten dobbelt så mye tøyning i forhold til den første sylindere.

4.6 Bøystrekkfasthet

Bøystrekkfastheten ble testet på to bjelker på hver temperatur for normal betong og lettbetong. Det ble ikke støpt bjelker for testing av umettet betong.

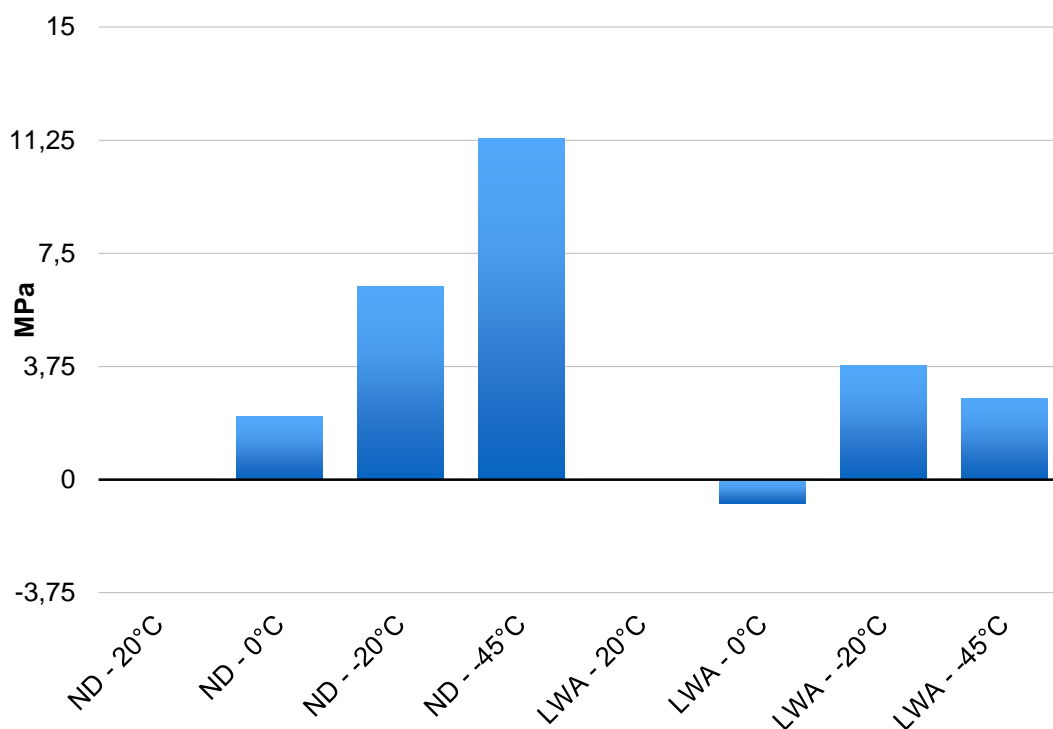
4.6.1 Bøyestrekfasthet resultater

TABELL 14: BØYESTREKKFASHET RESULTATER

Prøve	Bjelke 1 bruddlast [kN]	Bjelke 2 bruddlast [kN]	Gjennomsnitt bruddlast [kN]	Bøyestrekfasthet [MPa]	Økning [MPa]
ND - 20°C	30,1	26	28,1	5,6	NA
ND - 0°C	33,9	42,8	38,4	7,7	2,1
ND - -20°C	63,9	55,9	59,9	12,0	6,4
ND - -45°C	83,4	86,1	84,8	17,0	11,4
LWA - 20°C	33,8	31,6	32,7	6,6	NA
LWA - 0°C	29,3	27,8	28,6	5,7	- 0,9
LWA - -20°C	50,1	53,2	51,7	10,3	3,7
LWA - -45°C	44,2	47,8	46,0	9,2	2,6

Det viste seg å være vanskelig å finne teori om hvordan bøyestrekfastheten ville bli påvirket når betong ble fryst ned, så hadde lite forventninger til hvordan bøyestrekfastheten ville oppføre seg. Trodde likevel at den ville oppføre seg sammenlignbart med de andre egenskapene som har blitt testet i oppgaven, og at den derfor ville øke en del etter hvert som temperaturen ble senket, og at lettbetongen ville oppleve en mindre økning enn normal betongen.

4.6.2 Økning av bøyestrekfasthet



FIGUR 38: FORANDRING AV BØYESTREKKFASTHET VED NEDKJØLING

Resultatene fra testene stemmer ganske godt overens med forventningene. Normal betongen hadde en jevn stigning etter hvert som temperaturen ble senket, og økte med ca 300% fra romtemperatur til -45°C.

Lettbetong hadde som forventet en mindre økning i bøyestrekfasthet. Det var ikke forventet at bøyestrekfastheten skulle reduseres ved 0°C, men det har blitt registrert ved testing av spaltstrekfastheten at også denne fikk en reduksjon ved testing på 0°C. Som ved testingen av spaltstrekfastheten oppnår lettbetongen høyere resultater ved -20°C enn ved -45°C. Dette er ikke som forventet, og noe av grunnen kan være at -45°C ble testet 11 dager før -20°C. Betongen som ble testet på -20°C fikk dermed herdet 11 dager lenger.

Selv om lettbetongen på -45°C herdet kortere enn lettbetongen på -20°C, forklarer ikke dette hvorfor den opplever en mye lavere økning enn den normale betongen som er testet på samme temperatur. Kan se ut som om økningen av bøyestrekfasthet som betong med

lett-tilslag opplever, flater ut mellom -20 og -45°C. Dette er i motsetning til normal betong, der økningen bare blir enda større en den var mellom 0 og -20°C.

4.7 Temperaturmåling

Etter at tester for spaltetrekkfasthet og bøyestrekfasthet var gjort på henholdsvis sylindere og bjelker ble temperaturen målt på disse prøvestykkene. Disse testene var tester som splittet prøvestykkene, og det var derfor mulig å måle temperaturen på innsiden av prøvestykkene. Temperaturen ble målt for å sjekke at prøvene holdt den temperaturen de ifølge prøveprogrammet skulle holde. Under følger resultatene fra temperaturmålingene som ble gjort.

4.7.1 Temperatur resultater

Siden hver prøvestykke ble splittet, og dermed fikk to eksponerte flater, ble temperaturen målt på begge sidene. Gjennomsnittet av disse målingene blir presentert her for hvert prøvestykke.

TABELL 15: TEMPERATUR RESULTATER

Prøve	Sylinder 1 [°C]	Sylinder 2 [°C]	Bjelke 1 [°C]	Bjelke 2 [°C]
ND - -20°C	-22	-20	-20	-21
ND - -45°C	-46	-45	-47	-45
NDU - -20°C	Sprakk ikke	-22	NA	NA
NDU - -45°C	-47	-50	NA	NA
LWA - -20°C	-22	-21	-22	-23
LWA - -45°C	-49	-50	-47	-48

Kan fra tabellen over se at alle temperaturene som er målt er i nærheten av temperaturen testene skal være utført på. Noen av testene som er gjort på -45°C er blitt målt til å være enda kaldere når de er testet. Usikkert på hvorfor disse prøvestykkene har blitt kaldere enn -45°C, siden klimaskapet de ble kjølt ned i ikke kunne oppnå kaldere temperaturer enn -45°C.

4.7 Feilkilder

- Stalites spesifikke vekt. Som nevnt tidligere er det grunn til å stille spørsmålstegn ved målingen av stalitens spesifikke vekt.
- Testen for arbeidsdiagram er deformasjonsstyrt, og deformasjonen burde bli målt med hjelp av strekkklapper. Dette var ikke praktisk mulig.
- På grunn av praktiske problemer på labben ble flere blandinger liggende lenger enn 28 døgn til herding, dette førte til at det ble vanskelig å sammenligne blandingsene.
- Betongen som ble ovnstørket burde ha ligget lenger enn 13 dager i ovnen. Kunne da fått enda lavere vannmetningsgrad av denne betongen.
- Prøver av spalttestrekkfasthet hadde stor spredning av resultater. Sylinderne burde ha vært merket slik at det var enklere å se hvor papplisten skulle plasseres.

5 Konklusjon

Formålet med denne oppgaven var å undersøke hvordan høyfast betong ble påvirket av lave temperaturer. Spesielt de mekaniske egenskapene til betong skulle undersøkes. I tillegg skulle det gjennomføres ett litteraturstudie om hva som er kjent fra før på dette området. Etter at oppgaven er gjennomført kan følgende konklusjoner trekkes:

1. Trykkfastheten øker betraktelig ved nedkjøling. Økningen av trykkfasthet er i stor grad bestemt av fuktinnholdet i betongen ved nedfrysningen. Umettet betong får mindre økning enn vannmettet betong. Typen tilslag i betongen påvirker også økningen av trykkfastheten. Betong med lett tilslag får mindre økning enn betong med vanlig tilslag.
2. Spaltestrekkfastheten øker også ved nedkjøling. Resultatene viser at lettbetong øker mindre ved -45°C . Umettet betong viser liten økning. Ellers vanskelig å konkludere noe fra testene av spaltestrekkfasthet på grunn av mye spredning av resultater, men kan se en klar tendens til økning av spaltestrekkfasthet ved lavere temperaturer.
3. Den umettede betongen har bortimot ingen økning av elastisitetsmodul ved nedkjøling. I motsetning til umettet betong har vannmettet lett- og normal betong merkbar økning. Denne økningen er ca like stor mellom betongtypene, og kan dermed si at økningen i elastisitetsmodul blir bestemt av fuktinnholdet av betongen ved nedkjøling.
4. Umettet betong får liten forandring i arbeidsdiagram når den blir nedkjølt. Normal betong tåler mer trykk, og viser tegn til å bli mindre duktil når temperaturen blir -45°C . Betong med stalite som lett-tilslag blir merkbart mindre duktil når temperaturen blir lavere enn 0°C .
5. Normal betong opplever en markant økning i bøyestrekfasthet når betongen blir nedkjølt. Lettbetong opplever også en økning, men mye lavere. I tillegg virker det som om lettbetongens økning stagnerer mellom -20 og -45°C .
6. Formlene, som i denne oppgaven har blitt brukt for å estimere økning i trykkfasthet ved nedfrysning, estimerer en for liten økning i forhold til resultatene i denne oppgaven mellom 0 og -45°C .
7. Goto og Miura sin formel (1-9) for å estimere spaltestrekkfasthet gir et godt estimat for hva spaltestrekkfastheten vil være ved en gitt temperatur.

Referanser

- [1] S. Jacobsen, Concrete Technology, Trondheim: NTNU, 2014.
- [2] P. Gjerp, M. Opsahl og S. Smepllass, Grunleggende betongteknologi, Lillestrøm: Byggenæringens forlag, 2004.
- [3] BSI, «BS EN 934-2; Admixtures for concrete, mortar and grout. Concrete admixtures. Definitions, requirements, conformity, marking and labelling,» BSI, 2001.
- [4] C. Veen, «Properties of concrete at very low temperatures; A survey of the litterature,» Delft University of Technology, 1987.
- [5] A. M. Neville, Properties of Concrete, Pearson Education, 1995.
- [6] Norsk Standard, «NS-EN 1992-1-1; Prosjektering av betongkonstruksjoner. Del 1-1 Almenne regler og regler for bygninger,» Norsk Standard, 2004.
- [7] B. Sjøpler, Betongboka, Oslo: Norcem: Gyldendal undervisning, 2004.
- [8] Norsk Standard, «NS-EN 206-1; Betong. Del 1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar,» Norsk Standard, 2000.
- [9] Statens Vegvesen, «14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder,» Statens vegvesen, 1997.
- [10] Høgskolen i Gjøvik, «www.hig.no,» [Internett]. Available: <https://www.ansatt.hig.no/livt/Nettforelesninger/Fasthet/Materialers%20fasthetsegenskaper%20S.pdf>.
- [11] Norsk Standard, «NS-EN 12390-5; Prøving av herdnet betong - Del 5: Prøvelegemers bøyestrekfasthet,» Norsk Standard, 2001.
- [12] R. D. Browne og P. B. Bamforth, «The use of concrete for cryogenic storage: a summary of research, past and present,» *First International Conference on Cryogenic Concrete*, pp. 135-166, 1981.
- [13] F. H. Turner, Concrete and Cryogenics, Wexham Springs: Cement and Concrete Association, 1979.
- [14] N. Stockhausen, H. Dorner, B. Zech og M. I. Setzer, «Untersuchung von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA,» *Zement and Concrete Research* 9, pp. 783-794, 1979.
- [15] T. Miura, «The properties of concrete at very low temperatures,» *Materials and Structures*, pp. 243-254, 1989.
- [16] Y. Goto og T. Miura, «Experimental studies on properties of concrete cooled to about minus,» *Technology Reports, Tohoku University*, pp. 359-381, 1979.

- [17] Y. Goto og T. Miura, «Mechanical properties of concrete at very low temperatures,» *Proceedings 21h Japanese Congress on Material Research*, pp. 157-159, 1978.
- [18] T. Okada og M. Iguro, «Bending behaviour of prestressed concrete beams under low,» *Journal of Japanese Prestressed Concrete Engineering Association, Special Issue*, 1978.
- [19] G. Tognon, «Behaviour of mortars and concretes in the temperature range from +20°C to,» *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, pp. 229-249, 1968.
- [20] G. Wiedemann, «Zum einfluss tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton,» *Dissertation Technische Universität Braunschweig*, 1982.
- [21] D. Berner, B. C. Gerwick og M. Polivka, «Static and cyclic behaviour of structural lightweight concrete at cryogenic,» *Proceedings, Symposium on Temperature Effects on Concrete*, 1983.
- [22] D. Berner, M. Polivka, B. C. Gerwick og D. Pirtz, «Behaviour of prestressed lightweight concrete subjected to high-intensity,» *Annual Convention of the American Concrete Institute*, 1983.
- [23] G. E. Monfore og L. A. E, «Physical properties of concrete at very low temperatures»,» *Journal of the PCA*, pp. 33-39, 1962.
- [24] Norsk Standard, «NS-EN 12350-2; Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål,» Norsk Standard, 2009.
- [25] Norsk Standard, «NS-EN 12350-7; Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold - Trykkmetoder,» Norsk Standard, 2000.
- [26] Norsk Standard, «NS-EN 12350-6; Prøving av fersk betong - Del 6: Densitet,» Norsk Standard, 2000.
- [27] Norsk Standard, «NSEN 12390-1; Prøving av herdnet betong - Del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former,» Norsk Standard, 2000.
- [28] Norsk Standard, «NS-EN 12390-2; Prøving av herdnet betong - Del 2: Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving,» Norsk Standard, 2012.
- [29] Norsk Standard, «NS-EN 12390-3; Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet,» Norsk Standard, 2009.
- [30] Norsk Standard, «NS-EN 12390-6; Prøving av herdnet betong - Del 6: Prøvelegemers spaltestrekfasthet,» Norsk Standard, 2009.

- [31] Norsk Standard, «NS-EN 12390-13; Prøving av herdnet betong - Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elasticitet under trykk,» Norsk Standard, 2013.
- [32] Sintef, «KS70 124; Arbeidsdiagram ved trykkbelastning,» Sintef, 1996.

Figurliste

Figur 1: Forskjellige tilslagssammensetninger: 1) Bra gradering, 2) Middels Gradering, 3) Dårlig gradering [2].....	12
Figur 2: Fasthetsutvikling av Anleggsement FA basert på w/c-tall [databled].....	13
Figur 3: Volum av de forskjellige fasene i betongen utifra v/c-tallet [1]	15
Figur 4: Spenning-tøyning diagram for lett tilslag. A) Kun lett tilslag, B) Leca klinker og naturlig sand [5].....	18
Figur 5: Forskjellige arbeidsdiagram. A) Rettlinjet elastisk, B) Ikke rettlinjet elastisk, C) Sprøtt materiale, D) Svakt duktilt materiale, E) Duktilt materiale [10]	20
Figur 6: Frysepunkt som funksjon av porestørrelse og relativ fuktighet [4]	22
Figur 7: Økning av trykkfasthet av vannmettet betong ved nedfrysning [4]	24
Figur 8: Økningen i trykkfasthet som funksjon av temperatur og fuktinnhold [4].....	26
Figur 9: Økning i strekkfasthet som funksjon av herdebetingelser og temperatur [4]	28
Figur 10: Økning i strekkfasthet med forskjellige tilslag mot temperatur [4]	29
Figur 11: Innflytelse fra herdebetingelser på elastisitet versus temperatur [4].....	30
Figur 12: Økning i E-modul mot temperatur, normal betong og lettbetong [4]	31
Figur 13: Arbeidsdiagram av vannmettet betong som funksjon av temperatur [20]	32
Figur 14: Synkkjegle og komprimeringsstav til venstre og Måling av synk til høyre [24]	35
Figur 15: Beholder og apparat for trykk-gauge-metoden [25].....	36
Figur 16: Nominelle størrelser for terninger [27]	37
Figur 17: Nominelle størrelser for sylindre [27].....	38
Figur 18: Nominelle størrelser for bjelker [27].....	39
Figur 19: Tilfredstillende bruddformer [29]	41
Figur 20: «Jig» for sylindere under testing av spaltestrekkfasthet [30].....	41
Figur 21: Prøvestykke med extensometer for måling av lengdeforandring.....	42
Figur 22: Fremgangsmåte for bestemmelse av stabilisert sekantmodul av elastisitet. [31].....	43
Figur 23: Oppsett for test av bøyestrekfasthet [11].....	45
Figur 24: CTS C-40 klimaskap	46
Figur 25: Forsand 0-8 mm til venstre, og velde 8-16 mm til høyre.....	48
Figur 26: Densitet.....	50
Figur 27: Luftinnhold.....	51
Figur 28: Økning av trykkfasthet ved nedkjøling	54
Figur 29: Forandring av spaltestrekkfasthet ved nedkjøling.....	59
Figur 30: Endring av elastisitetsmodul ved nedkjøling	63

Figur 31: Arbeidsdiagram for normalbetong. 20°C til venstre og 0°C til høyre	65
Figur 32: Arbeidsdiagram for normalbetong. -20°C til venstre og -45°C til høyre.....	65
Figur 33: Sylinder som eksploderte under arbeidsdiagramtest.....	66
Figur 34: Arbeidsdiagram for umettet betong. 20°C til venstre og 0°C til høyre.....	66
Figur 35: Arbeidsdiagram for umettet betong. -20°C til venstre og -45°C til høyre	67
Figur 36: Arbeidsdiagram for lettbetong. 20°C til venstre og 0°C til høyre.....	67
Figur 37: Arbeidsdiagram for lettbetong. -20°C til venstre og -45 til høyre	68
Figur 38: Forandring av bøyestrekfasthet ved nedkjøling	70

Tabell liste

Tabell 1: Faser i Portlandsement [1]	10
Tabell 2: Fasthetsklasser for lettbetong [8].....	17
Tabell 3: Fasthetsklasser for normalbetong [8].....	19
Tabell 4: Prøveprogram	33
Tabell 5: Fordeling av betongen	33
Tabell 6: Resultat fra testing av fersk betong	49
Tabell 7: Synkmål av den ferske betongen	49
Tabell 8: 7-døgns trykkfasthet	52
Tabell 9: 28-døgns trykkfasthet	53
Tabell 10: Teoretisk utregning av økning av trykkfasthet	56
Tabell 11: Spaltestrekkfasthet resultater	58
Tabell 12: Teoretisk utregning av spaltestrekkfasthet	60
Tabell 13: Elastisitetsmodul resultater	62
Tabell 14: Bøyestrekfasthet resultater.....	69
Tabell 15: Temperatur resultater.....	71

Vedlegg

Vedlegg	1
Vedlegg datablad.....	2
Tilslag siktekurver.....	2
Stalite datablad.....	3
Anleggsement.....	4
Superplastiserende tilsetningstoff	8
Speedy moisture tester	11
Vedlegg proporsjonering.....	15
ND-betong.....	15
NDU-betong.....	16
Lettbetong	17
Vedlegg testverdier	18
Trykktest	18
Spaltestrekkfasthet	20
Arbeidsdiagram.....	21
Bøyestrekkfasthet	22
Elastisitetsmodul	23
Vannmetningslogg	29

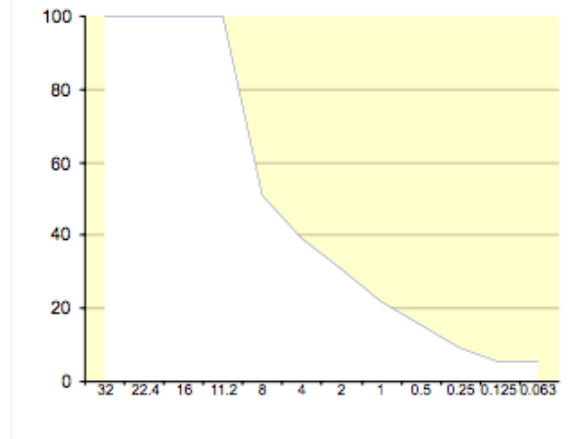
Vedlegg datablad

Tilslag siktekurver

Forsand 0-8 mm

Type:	Forsand 0/8 mm nat. vask.
Dato:	29/8/12
FM =	4,79

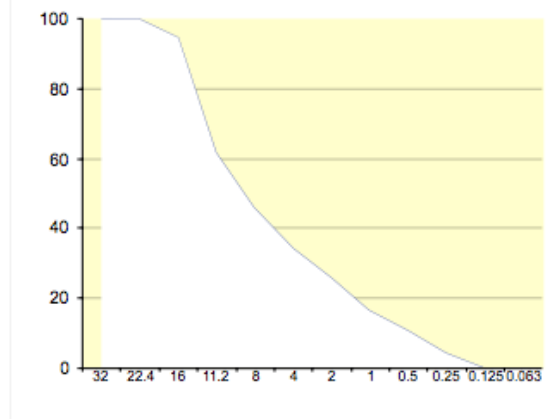
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	895	895	48,8	51,2
4	1112	1112	60,7	39,3
2	1264	1264	69,0	31,0
1	1430	1430	78,0	22,0
0,5	1543	1543	84,2	15,8
0,25	1659	1659	90,5	9,5
0,125	1738,0	1738,0	94,8	5,2
0,063	1738,0	1738,0	94,8	5,2
Bunn	1833	1833		



Velde 8-16 mm

Type:	Velde 8/16 mm nat. Vask
Dato:	21/11/08
FM =	5,17

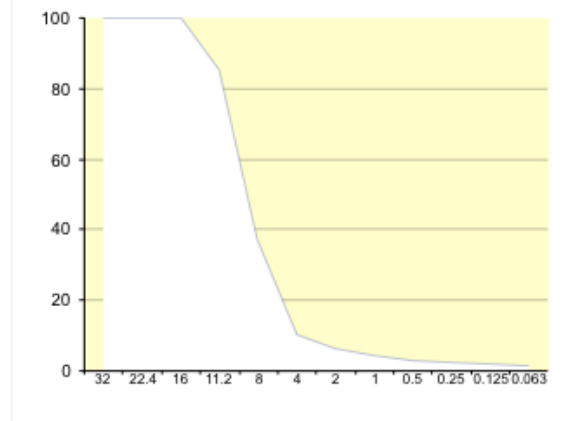
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	95	95	5,2	94,8
11,2	700	700	38,2	61,8
8	990	990	54,0	46,0
4	1207	1207	65,8	34,2
2	1359	1359	74,1	25,9
1	1525	1525	83,2	16,8
0,5	1638	1638	89,4	10,6
0,25	1754	1754	95,7	4,3
0,125	1833	1833	100,0	0,0
0,063	1833	1833	100,0	0,0
Bunn	1833	1833		



Stalite 1/2-toms

Type:	Stalite
Dato:	18/2/15
FM =	5,85

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	389	220	14,6	85,4
8	1455	1162	62,6	37,4
4	1993	1760	89,8	10,2
2	2065	1849	93,7	6,3
1	2107	1896	95,8	4,2
0,5	2135	1914	96,9	3,1
0,25	2161	1917	97,6	2,4
0,125	2187	1917	98,2	1,8
0,063	2210	1917	98,8	1,2
Bunn	2262	1917		

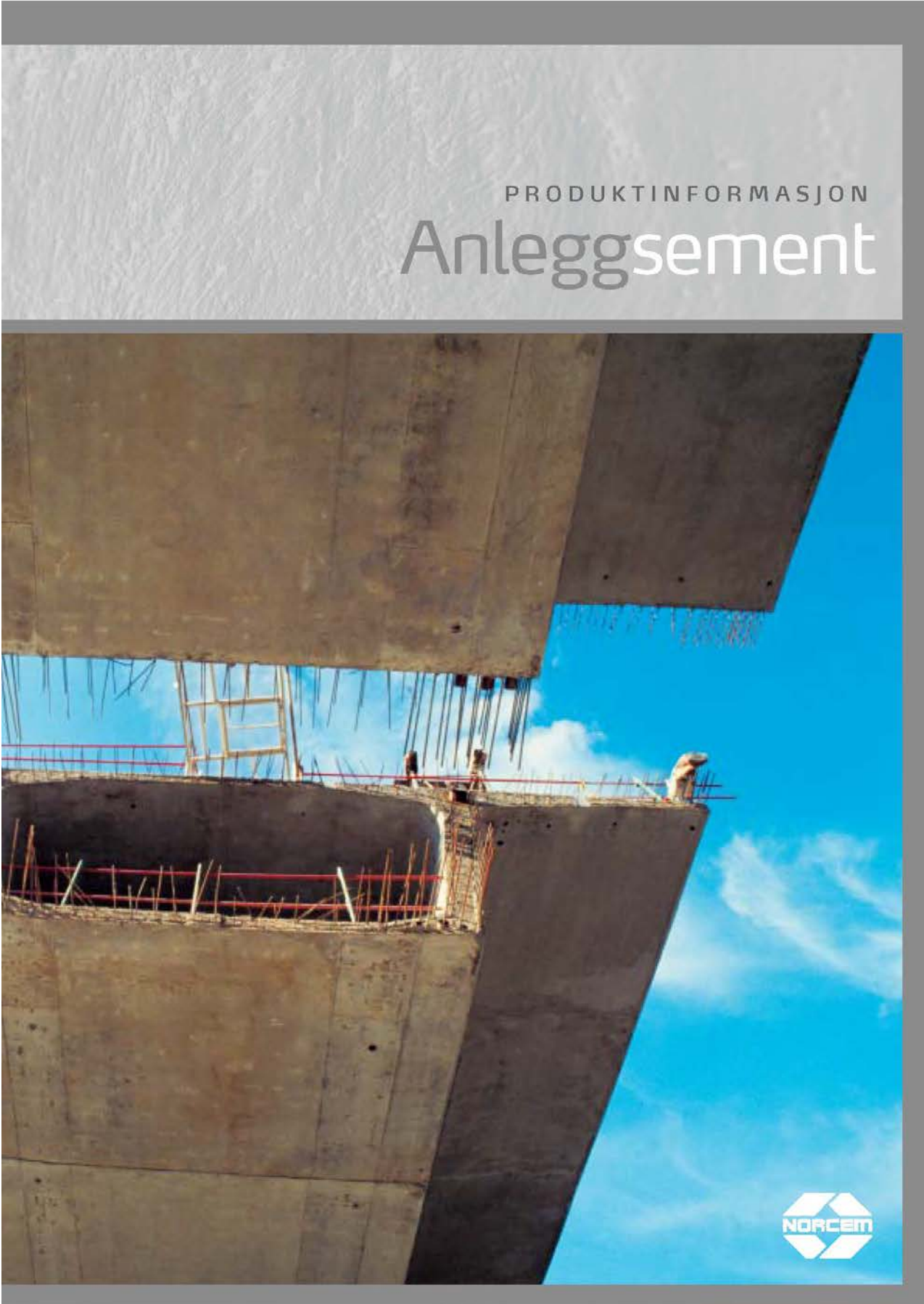


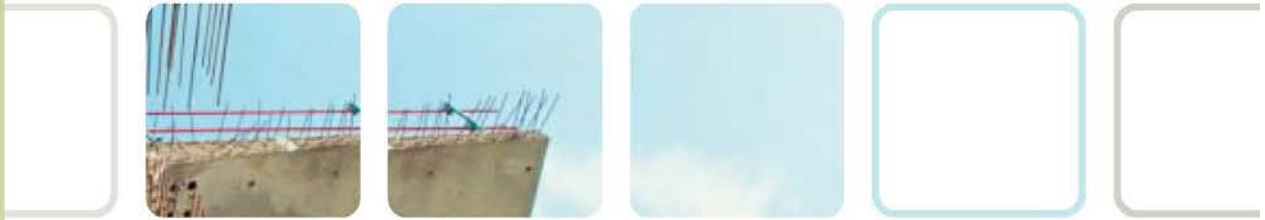
STALITE Lightweight Aggregate

Physical Characteristics for Structural Applications

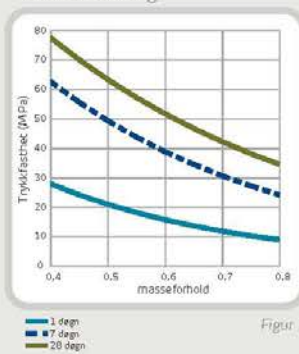
Absorption	
Saturated Surface Dry (ASTM C 127)	6.0%
1 Hour Boil In Water	8.0%
Under high pumping pressure of 150 psi (1033 kPa)	9.4%
Soundness (% Loss)	
Magnesium Sulfate (ASTM C 88)	0 - 0.01%
Sodium Sulfate (ASTM C 88)	0 - 0.23%
25 Cycles Freezing and Thawing (AASHTO T 103)	0.22 - 0.80%
Toughness	
Los Angeles Abrasion (AASHTO T 96)	25 - 28%
Stability	
Angle of Internal Friction (Loose)	40° - 42°
Angle of Internal Friction (Compacted)	43° - 46°
Impurities	
Clay Lumps (ASTM C 142)	0
Organic Impurities (ASTM C 40)	0
Popouts (ASTM C 151)	0
Electrical Resistance	
Lab (AASHTO T 288)	30,000 - 40,000 ohm-cm
Field (ASTM G 57)	More than 500,000 ohm-cm
Aggregate Chemical Characteristics	
Ignition Loss (ASTM C 114)	0
Stains (ASTM C 641)	None
Sulfur Trioxide	Less Than 0.05 ppm
Chlorides (NaCl)	0.60 - 7.0 ppm
Soluble Salts	0.28 mmhos/cm
pH	7 - 9

Certified test reports available





Fasthetsutvikling

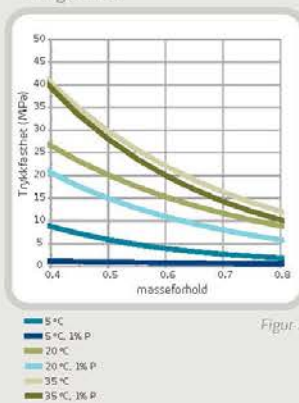


Figur 1

Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdeforhold (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist trykfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong med Norcem Anleggsement.

Tidligfasthet



Figur 2

Tidligfasthet

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Anleggsement. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

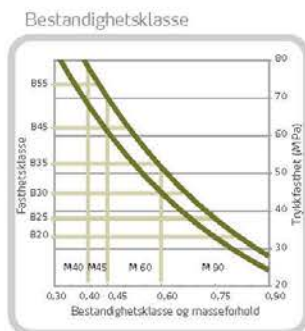
Fasthetsklasse – masseforhold

Med normal, god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca. 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Anleggsement gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,68	0,60	0,51	0,42

Tabell 1

Norcem Anleggsement er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen er tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere, og i konstruksjoner med krav til høy slutfasthet. Anleggsementen har lavt alkalinnhold, og kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Sementen har relativt høy tidligfasthet, høy slutfasthet, moderat varmeutvikling, meget god støpelighet og veldokumenterte bestandighetsegenskaper.



Figur 3

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens maksimale masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalte kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsgivende verdier for største masseforhold i de ulike fasthetsklassene er gitt i tabell 1. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighetsklasse og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger. Figuren gjelder for betong med Anleggsement uten luftinnføring.

Anbefalte kombinasjoner

Bestandighetsklasse M60	Fasthetsklasse B30 eller høyere
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B55 eller høyere

Tabell 2

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)

Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	*	*	*	*	*	*
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		*	*	*	*	*
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			*	*	*	*
XF2, XF3, XF4				*		*
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					*	*
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold $v/(c+g_{kp})$	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40

*Minst 4% luft

Tabell 3



Deklarerte data

Norcem Anleggsement tilfredsstiller kravene til Portlandsement

EN 197-1-CEM I 52,5 N

Kjemiske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	360m ² /kg	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O)	0,6 %	≤ 0,6%
Mineralske tilsetninger	4%	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	0,5%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3-4%	≤ 4%
Klorid	< 0,085 %	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	3,14 kg/dm ³	

Fysikalske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1 *
Trykkfasthet 1 døgn	18 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	30 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	46 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	60 MPa	≥ 52,5 MPa
Begynnende bindetid	120 min	≥ 45 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm





Dynamon SX-N

08.07

Superplastiserende tilsetningsstoff

PRODUKTBESKRIVELSE

Dynamon SX-N er et svært effektivt superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer.

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapeiutviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers) der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål.

Dynamonsystemet er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

BRUKSOMRADE

Dynamon SX-N er et tilnærmet allround-produkt som er anvendelig i all betong for å øke støpeligheten og/eller redusere tilsatt vannmengde.

Noen spesielle bruksområder er:

- Vann tett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206-1.
- Selvkomprimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker – f.eks. **Viscofluid TA**.
- Til produksjon av frostbestandig betong – da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - f.eks. **Mapeair L** eller **Mapeair 25**. Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.
- Til golvstøp for å oppnå en smidig betong med bedret støpelighet. Store doseringer og lave temperaturer kan retardere betongen noe.

Dynamon SX-N skiller seg vesentlig fra superplastiserende tilsetningsstoffer basert på sulfonerte melaminer eller naftalener, og også fra første generasjon akrylbaserte polymerer både gjennom sin effektivitet som vannreducerer og sin forlenging av åpentid/slumptid.

Den doseringsmengde som trengs for å oppnå en bestemt støpelighet vil derfor være lavere for **Dynamon SX-N** enn for tidligere SP-stoffer. Med forlengingen av åpentiden vil det nå ved vanlige leveranser være mulig å gjøre betongen ferdig på betongstasjonen, og "oppfrisking" med SP-stoffer på byggeplass blir mindre aktuelt.

Det er likevel ikke noe problem å etterdosere stoffet direkte i automikser. Doseringstidspunktet for **Dynamon SX-N** er mindre viktig, men dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandedvannet er inne, vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandedtstyr.



Produsent:
Rescon Mapei AS
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99
post@resconmapei.no
www.resconmapei.com



EGENSKAPER

Dynamon SX-N er en vannløsning av aktive akrylpolymerer som effektivt dispergerer (løser opp) sementklaser.

Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpelighet. Lavere v/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheten sammenlignet med betonger med samme v/c-forhold. Fastheten forblir dermed den samme, men muliggjør forenklet utstøping.
3. For å redusere både vann og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke. Gjennom denne metoden kan en blant annet redusere kostnadene (mindre sement), redusere betongens svinnpotensial (mindre vann) og redusere faren for temperaturgradienter på grunn av lavere hydrasjonsvarme. Spesielt er denne siste effekten viktig ved betonger med større sementmengder.

VÆR OPPMERKSOM PÅ

Dynamon SX-N lar seg kombinere med andre Rescon Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks. styrkningsakselererende stoffer som **Mapequick SA** og styrkningsretarderende stoffer som **Mapetard R**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer for produksjon av frostbestandig betong, f.eks. **Mapeair L** eller **Mapeair 25**.

Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.

EMBALLASJE

Dynamon SX-N leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, i 1000 liters containere og i bulk. Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C og bevarer sine egenskaper i minst ett år i lukket emballasje. Fargenyanser kan oppstå i produksjon av polymerene som inngår i **Dynamon EX**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper. Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent og likevirkende produkt. Produktet bør ikke utsettes for sollys.

TEKNISKE SPESIFIKASJONER		
Form:	Væske	
Farge:	Gulbrun	
Viskositet:	Lettflytende; <30 mPa · s	
Tørrestoffinnhold, %:	18,5 ± 1,0	
Spesifikk vekt, g/cm ³ :	1,06 ± 0,02	
pH-verdi:	6,5 ± 1	
Kloridinnhold, %:	< 0,01	
Alkaliinnhold (Na ₂ O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGENSKAPER I BETONG		
<i>Som vannreducerende stoff (lik konsistens) T 3.1</i>		
Sementmengde kg/m ³ (Norcem standard)	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt)	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall)	0,51	0,41
Vannreduksjon (%)	-	20
Trykkfasthet (i N/mm ²):		
1døgn	26	41
7døgn	42	60
28døgn	52	68
<i>Som SP-stoff (slumpforbedrer) T 3.2</i>		
Sementmengde, kg/m ³ (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall):	0,48	0,48
Luftinnhold:	2,1	1,8
Konsistens, mm:		
- synkmål, 5 min	30	220
- synkmål, 30 min	20	200
- synkutbedrelse, 5 min		420
- synkutbedrelse, 30 min		380

Produsent:

Rescon Mapei AS
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99
post@resconmapei.no
www.resconmapei.com



DOSERING

Dynamon SX-N tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpelighet, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,3 og 2,0% av sementmengden.

Ved øket dosering økes også betongens åpentid, dvs. tiden betongen lar seg bearbeide.

Større doseringsmengder og lave betongtemperaturer gir en retardert betong. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametere.

Til forskjell fra konvensjonelle melamin- eller naftalenbaserte superplastiserende tilsetningsstoffer, utvikler **Dynamon SX-N** maksimal effekt uavhengig av tilsetnings-tidspunkt, men tilsetningstidspunktet kan påvirke nødvendig blandetid.

Dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandevannet er inne vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandeutstyr.

Dynamon SX-N kan også tilsettes direkte i automikser på bygg- eller anleggsplass. Betongen bør da blandes med maksimal hastighet på trommelen i minst 5 minutter, pluss ett minutt pr. m³ betong i lasset.

VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget HMS-datablad. HMS-databladene finnes på www.resconmapei.com

MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.

All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse

Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Rescon Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.

Produsent:
Rescon Mapei AS
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99
post@resconmapei.no
www.resconmapei.com



Speedy moisture tester

Large Size Speedy – Moisture Test Procedure



The test procedure is simple to follow and takes a just few minutes for most materials. To ensure accurate and consistent results the procedure should be followed precisely.

1. **Clean the Speedy Vessel.** Prior to using the speedy tester ensure that the inside of the Speedy cap and vessel are empty and clean. Use the bristle brush to remove any residues from previous tests as shown.



2. **Select and prepare the sample.** Ensure that the sample to be weighed and placed in the Speedy is representative of the material that is under investigation. Some materials, such as free-flowing powders and sands, need no preparation whereas others may need to be ground prior to testing or pulverised during the test – please refer to the Sample Preparation Table for further information.

3. **Weigh the sample.** Place the empty measuring beaker on the electronic scale and zero the scale – Refer to the electronic balance user instructions for further details. Add small amounts of material from the sample until the correct sample weight is reached. The sample weight is determined by the size and measurement range of the Speedy that is being used as detailed below:



Part No.	Vessel Size	Measurement Range H ₂ O%W/W	Sample weight (g)
L2000C	Large	0 – 10	40g
L2000D	Large	0 – 20	20g
L2000G	Large	0 – 50	8g

4. **Add the sample to the Speedy vessel.** Pour the sample into the chamber of the Speedy vessel as shown. Place pulverising balls into the chamber if required – refer to Sample Preparation Table.



5. **Add the reagent to the Speedy cap.** Using the metal scoop, add a minimum of two full scoops of reagent to the Speedy cap cavity as shown.



6. **Seal the Speedy.** Hold the Speedy horizontally and position the cap as shown. Swing the stirrup into position and tighten the top screw to seal.



- 7. Mix the sample with the reagent.** Hold the Speedy vertically with the pressure gauge facing the ground and shake vigorously for 5 seconds. Rotate the Speedy through 180° so that the pressure gauge faces the sky, tap the sides of the Speedy to ensure the sample falls into the cap cavity and prop or hold the Speedy in this position for 1 – 2 minutes.

Alternatively, if the pulverising balls are being used, hold the Speedy horizontally and shake it in an orbital motion to make the balls spin around the inside of the Speedy vessel. Do this for 20 seconds and then rest for 20 seconds. Repeat this process two or three times. The spinning balls pulverise the sample to give a more reliable measurement.

- 8. Take the reading.** Hold the Speedy horizontally and at eye level and take the moisture content reading directly from the pressure gauge.



- 9. Release the pressure.** Hold the Speedy vertically with the pressure gauge facing the ground. Locate the arrow on the flange of the cap and point this away from yourself and other people in your vicinity. Unscrew the top screw slowly to vent the gas that may have been generated within the Speedy.



- 10. Remove the sample and reagent.** Tip the contents of the Speedy directly into a clean and dry open container and dispose of in accordance with **Section 13** of the Calcium Carbide **Material Safety Data Sheet**.

- 11. Clean the Speedy.** Clean the Speedy vessel and cap and measuring beaker in preparation for the next moisture measurement.

User Guidance Notes

Proportional Test Technique

If the moisture content of the material exceeds the measurement range of the Speedy being used then the Proportional Test Technique may be used to obtain measurements. This involves halving the normal sample weight and doubling the gauge value. For example:

Assume a L2000D Speedy with a measurement range of 0 – 20 H₂O%W/W is being used to test soil with a nominal moisture content of 30%. The sample is prepared as required and half the normal weight – 10g – is weighed and placed in the Speedy. The test procedure is followed and a gauge value of 14.7% is recorded. This value is then doubled to give the actual moisture content of 29.4%.

The proportional test may also be used to obtain clearer readings in very dry material by doubling the sample size and halving the gauge value.

Temperature

For optimum performance the Speedy tester and sample should be at 20°C (68°F) when used. If this is not practical, take at least three tests in quick succession to equilibrate temperatures as far as possible. Ignore the first and second test results and record the later results.

Correction Factors

When compared with oven test results, Speedy readings may be low if the material under investigation contains volatile components other than water as these may evaporate with the water at elevated temperatures. Correction factors for given materials can be established by plotting graphs of Speedy test results against oven test results.

Measuring Liquids

Speedy testers may be used to measure the moisture content of certain liquids (most commonly oils) by adapting the test procedure as follows:

1. Weigh the liquid sample as normal
2. Place the liquid in a clean mixing vessel and add two to four scoops of **dry** sand. Mix thoroughly and place the mixture in the Speedy vessel.
3. Continue with the test as detailed in the Moisture Test Procedure.

Wet Weight to Dry Weight Conversion

The pressure gauges used with the Series 2000 Speedy testers are calibrated to give the moisture content expressed as a percentage of the sample's wet weight. If required, the measured value (M_{ww}) can be expressed as a percentage of the sample's dry weight (M_{dw}) by using the following formula:

$$M_{dw} = \frac{100 \times M_{ww}}{100 - M_{ww}}$$

Fault Diagnosis

Suspect Low Reading

If gauge readings are lower than you expect or anticipate check the following:

1. Test procedure has not been followed correctly. Ensure correct sample weight is used. Ensure sample is placed in the Speedy vessel and reagent is placed in the Speedy cap. Ensure Speedy vessel and cap are united and sealed in the horizontal plain to prevent premature contact of reagent and sample.
2. Inadequate cleaning of Speedy vessel and cap between tests. Ensure all residues from previous tests have been removed from the cap and vessel before starting a new test.
3. Insufficient reagent. Repeat the test using an additional scoop of reagent.
4. Ineffective reagent. Ensure that the reagent is fresh. Note that the colour of fresh reagent is dark grey; ineffective reagent (that has been exposed to moisture in the air or other sources) will have turned light grey in colour.
5. Inadequate sample preparation or sample-reagent mixing. Consider grinding the sample prior to weighing and/or (for Large Speedy only) using pulverising balls.
6. Temperature effects. Low readings may be recorded if the Speedy is used in very low temperatures. Take numerous readings in quick succession to raise the operating temperature of the Speedy.
7. Pressure loss. Visually check the cap washer for signs of holes or leak paths. Remove pressure gauge and visually check pressure gauge washer. Visually check Speedy vessel and cap for hairline cracks.
8. Defective pressure gauge. Does the needle sweep smoothly across the scale plate? If not, replace the gauge, or return the Speedy tester to an authorised distributor for service.

Suspect High Reading

If gauge readings are higher than you expect or anticipate check the following:

1. Ensure correct sample weight is used.
2. Ensure Speedy is held in the horizontal plain at eye level when reading the pressure gauge.
3. Temperature effects. High readings may be recorded if the Speedy is used in very high temperatures. If the Speedy is warm/hot to touch as a result of taking many readings in quick succession, allow time for it to cool down before taking more tests.
4. Defective pressure gauge. Does the needle return to zero after releasing pressure from the Speedy? If not, replace the gauge, or return the Speedy tester to an authorised distributor for service.

Recommended Spares and Consumables

It may be wise to consider having the following spares and consumables to hand when using the Speedy tester, especially in remote locations:

Batteries for the electronic scale, 3-off AA/LR6 1.5V

Speedy cap washer

Pressure gauge washer

Pressure gauge (note the measurement range)

Cleaning brushes

Other spares parts for the Speedy vessel are available on request.

Sample Preparation Table

Material Type	Recommended Preparation
Aggregate	Check maximum sample size; crush if larger than maximum recommended particle size
Dust	None required
Liquids	Mix with dry sand – see User Guidance Notes
Powders	None required
Sand	None required
Soils	Grind with mortar and pestle prior to testing, or use pulverising balls. Refer to Large Size Speedy – Moisture Test Procedure

Vedlegg proporsjonering

ND-betong

Prosj./id.:	Navn på serie / blandingsnummer
-------------	---------------------------------

Blandevolum:	345 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	515,7	177,928			177,928
Elkem Microsilica	0,0	0,000	50	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	170,2	58,716		-7,319	51,397
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	868,8	299,728	2,2	6,594	306,322
Årdal	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16 mm nat. Vask	834,7	287,974	0,0	0,000	287,974
Årdal	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	2,6	0,890	81,5	0,725	0,890
	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
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

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

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	15				
150x300 sylindre	24				
100x200 sylindre					
Bjelker	8				

Delark "Blandeskjema"

NDU-betong

Prosj./id.:	Navn på serie / blandingsnummer
-------------	---------------------------------

Blandevolum:	140 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt** %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	515,7	72,203			72,203
Elkem Microsilica	0,0	0,000	50	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	170,2	23,827		-2,970	20,857
Absorbent vann	0,0	0,000			0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	868,8	121,629	2,2	2,676	124,305
Årdal	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16 mm nat. Vask	834,7	116,859	0,0	0,000	116,859
Årdal	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	2,6	0,361	81,5	0,294	0,361
	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
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	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					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	12				
150x300 sylindre	16				
100x200 sylindre					

Delark "Blandeskjema"

Lettbetong

Prosj./id.:	Navn på serie / blandingsnummer
--------------------	----------------------------------------

Blandevolum:	310 liter
Dato:	
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	494,6	153,323			153,323	
Elkem Microsilica	0,0	0,000	50	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	163,2	50,597		-4,148	46,449	49,731
Absorbert vann	10,6	3,283			3,283	
Forsand 0/8 mm nat. vask.	880,3	272,901	1,5	4,148	277,049	
Årdal	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Stalite	407,3	126,251	0,0	0,000	126,251	
Årdal	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	0,0	0,000	81,5	0,000	0,000	
	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	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	15				
150x300 sylindre	24				
100x200 sylindre					
Bjelker	8				

Delark "Blandeskjema"

Vedlegg testverdier

Trykktest

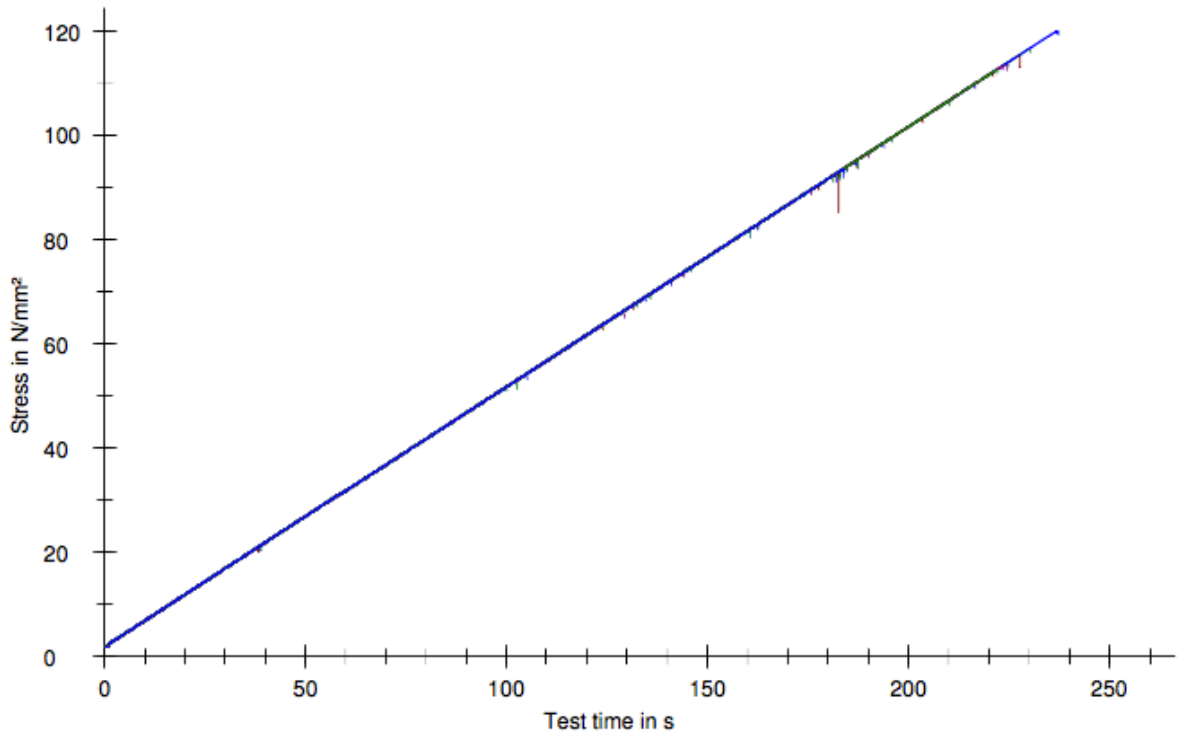


Simple standard protocol

11.05.2015

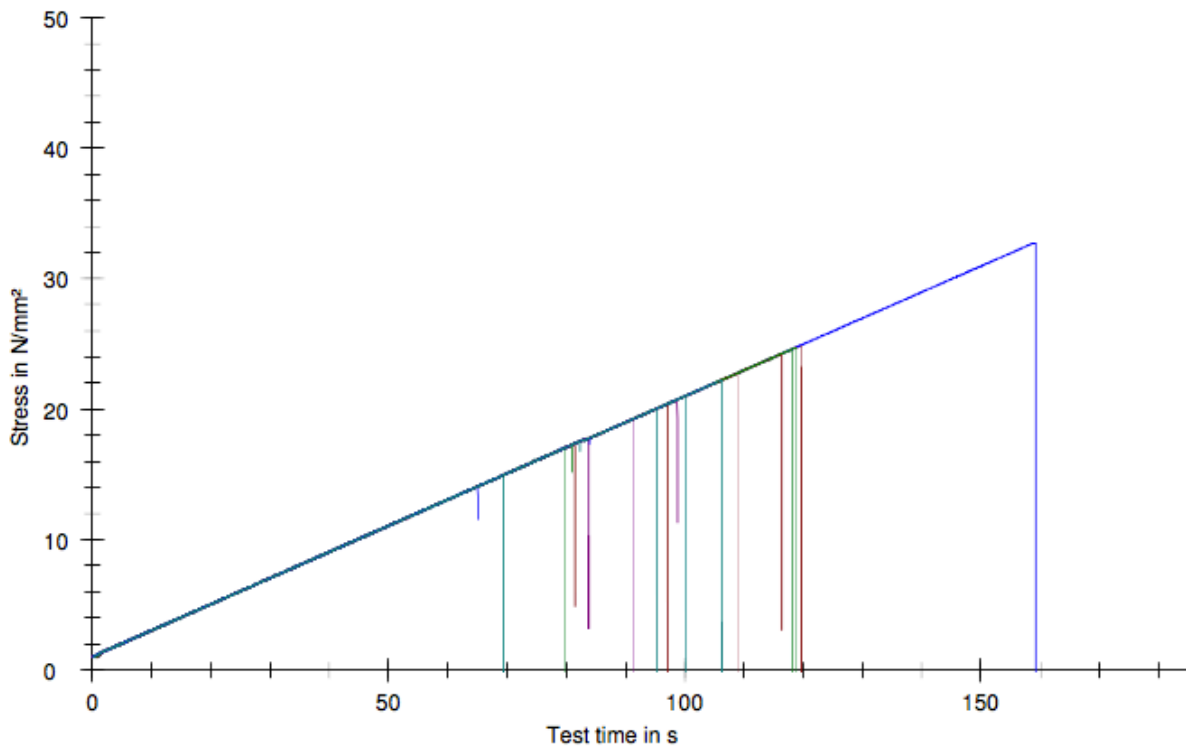
Results:

Nr	Date	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
1	02/12/2015	7-døgn test - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	671,07	67,11
2	02/12/2015	7-døgn test - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	692,29	69,23
3	02/12/2015	7-døgn test - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	686,29	68,63
4	03/04/2015	7-døgn test lettbetong - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	208,44	20,84
5	03/04/2015	7-døgn test lettbetong - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	204,81	20,48
6	03/04/2015	7-døgn test lettbetong - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	206,24	20,62
7	03/05/2015	28-døgn - ND-betong 20 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	826,03	82,60
8	03/05/2015	28-døgn - ND-betong 20 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	827,34	82,73
9	03/05/2015	28-døgn - ND-betong 20 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	816,13	81,61
10	03/09/2015	28-døgn - ND-betong 0 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	928,22	92,82
11	03/09/2015	28-døgn - ND-betong 0 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	938,04	93,80
12	03/09/2015	28-døgn - ND-betong 0 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	920,61	92,06
13	03/24/2015	28-døgn - ND-betong -20 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	1096,54	109,65
14	03/24/2015	28-døgn - ND-betong -20 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	1137,96	113,80
15	03/24/2015	28-døgn - ND-betong -20 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	1135,56	113,56
16	03/28/2015	28-døgn - ND-betong -40 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	1152,28	115,23
17	03/28/2015	28-døgn - ND-betong -40 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	1165,41	116,54
18	03/28/2015	28-døgn - ND-betong -40 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	1198,84	119,88
19	03/28/2015	51-døgn - ND-betong 20 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	933,65	93,36
20	03/28/2015	51-døgn - ND-betong 20 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	893,15	89,31
21	03/28/2015	51-døgn - ND-betong 20 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	901,67	90,17
22	03/31/2015	8-døgn - Lettbetong - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	526,71	52,67
23	03/31/2015	8-døgn - Lettbetong - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	539,13	53,91
24	03/31/2015	8-døgn - Lettbetong - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	514,26	51,43
25	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	928,76	92,88
26	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	949,29	94,93
27	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	951,07	95,11
28	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	983,33	98,33
29	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	993,37	99,34
30	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	965,02	96,50
31	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	1031,12	103,11
32	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	1063,27	106,33
33	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	947,89	94,79
34	04/21/2015	28-døgn - Lettbetong - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	676,36	67,64
35	04/21/2015	28-døgn - Lettbetong - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	660,29	66,03
36	04/21/2015	28-døgn - Lettbetong - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	632,94	63,29
37	04/24/2015	28-døgn - Lettbetong - -45 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	928,08	92,81
38	04/24/2015	28-døgn - Lettbetong - -45 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	924,07	92,41
39	04/24/2015	28-døgn - Lettbetong - -45 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	937,70	93,77
40	04/24/2015	28-døgn umettet - -45 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	1132,43	113,24
41	04/24/2015	28-døgn umettet - -45 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	1119,01	111,90
42	04/24/2015	28-døgn umettet - -45 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	1124,20	112,42
43	04/30/2015	28-døgn - Lettbetong - 0 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	719,02	71,90
44	04/30/2015	28-døgn - Lettbetong - 0 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	744,52	74,45
45	04/30/2015	28-døgn - Lettbetong - 0 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	734,34	73,43
46	05/05/2015	28-døgn - Lettbetong - -20 grader - 1	100,0	100,0	10000,0	100,0	926,88	92,69
47	05/05/2015	28-døgn - Lettbetong - -20 grader - 2	100,0	100,0	10000,0	100,0	927,17	92,72
48	05/05/2015	28-døgn - Lettbetong - -20 grader - 3	100,0	100,0	10000,0	100,0	933,77	93,38



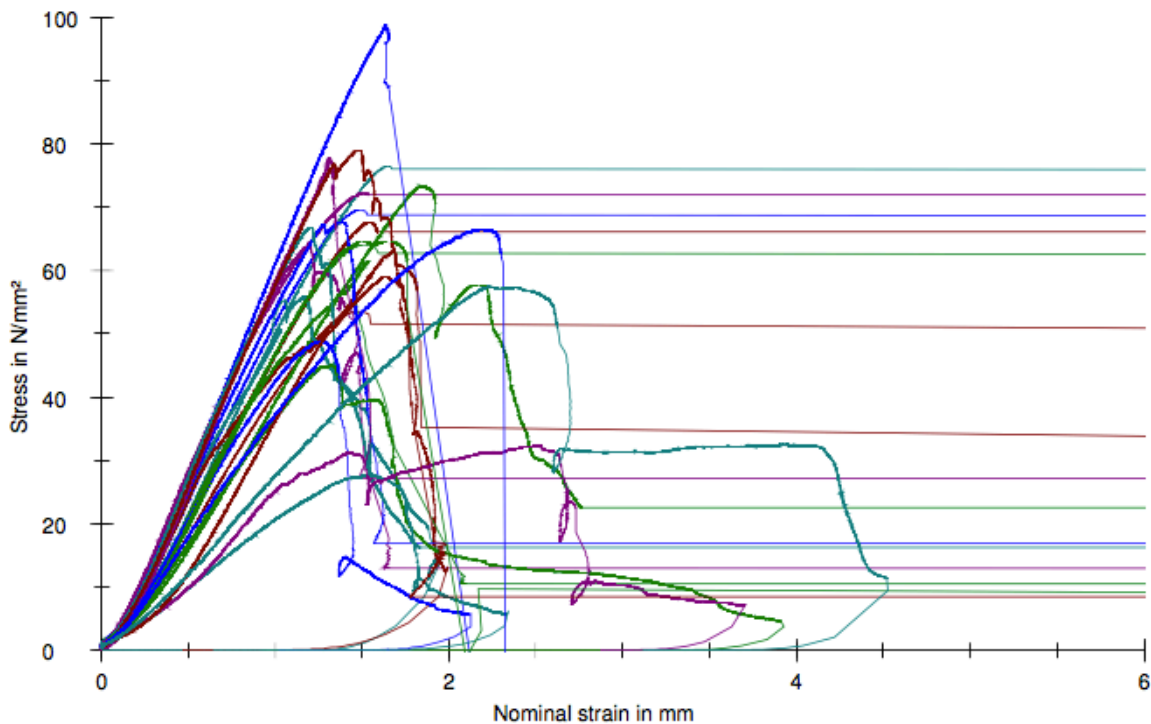
Spaltestrekkfasthet

Nr	Date	ID	d mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
1	03/05/2015	ND-betong 28-døgn 20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	306,21	17,33
2	03/05/2015	ND-betong 28-døgn 20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	304,01	17,20
3	03/09/2015	ND-betong 28-døgn 0 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	247,80	14,02
4	03/09/2015	ND-betong 28-døgn 0 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	308,64	17,47
5	03/24/2015	ND-betong 28-døgn - -20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	312,93	17,71
6	03/24/2015	ND-betong 28-døgn - -20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	440,00	24,90
7	03/28/2015	ND-betong 28-døgn - -45 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	434,70	24,60
8	03/28/2015	ND-betong 28-døgn - -45 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	579,39	32,79
9	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	353,53	20,01
10	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	339,82	19,23
11	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	359,80	20,36
12	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	300,22	16,99
13	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	312,32	17,67
14	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	371,21	21,01
15	04/24/2015	28-døgn - umettet - -45 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	365,19	20,67
16	04/24/2015	28-døgn - umettet - -45 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	427,89	24,21
17	04/21/2015	28-døgn - Lettbetong - 20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	295,56	16,73
18	04/21/2015	28-døgn - Lettbetong - 20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	266,35	15,07
19	04/30/2015	28-døgn - Lettbetong - 0 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	263,02	14,88
20	04/30/2015	28-døgn - Lettbetong - 0 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	205,50	11,63
21	05/05/2015	28-døgn - Lettbetong - -20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	402,82	22,79
22	05/05/2015	28-døgn - Lettbetong - -20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	436,76	24,72
23	04/24/2015	28-døgn - Lettbetong - -45 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	388,25	21,97
24	04/24/2015	28-døgn - Lettbetong - -45 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	392,24	22,20



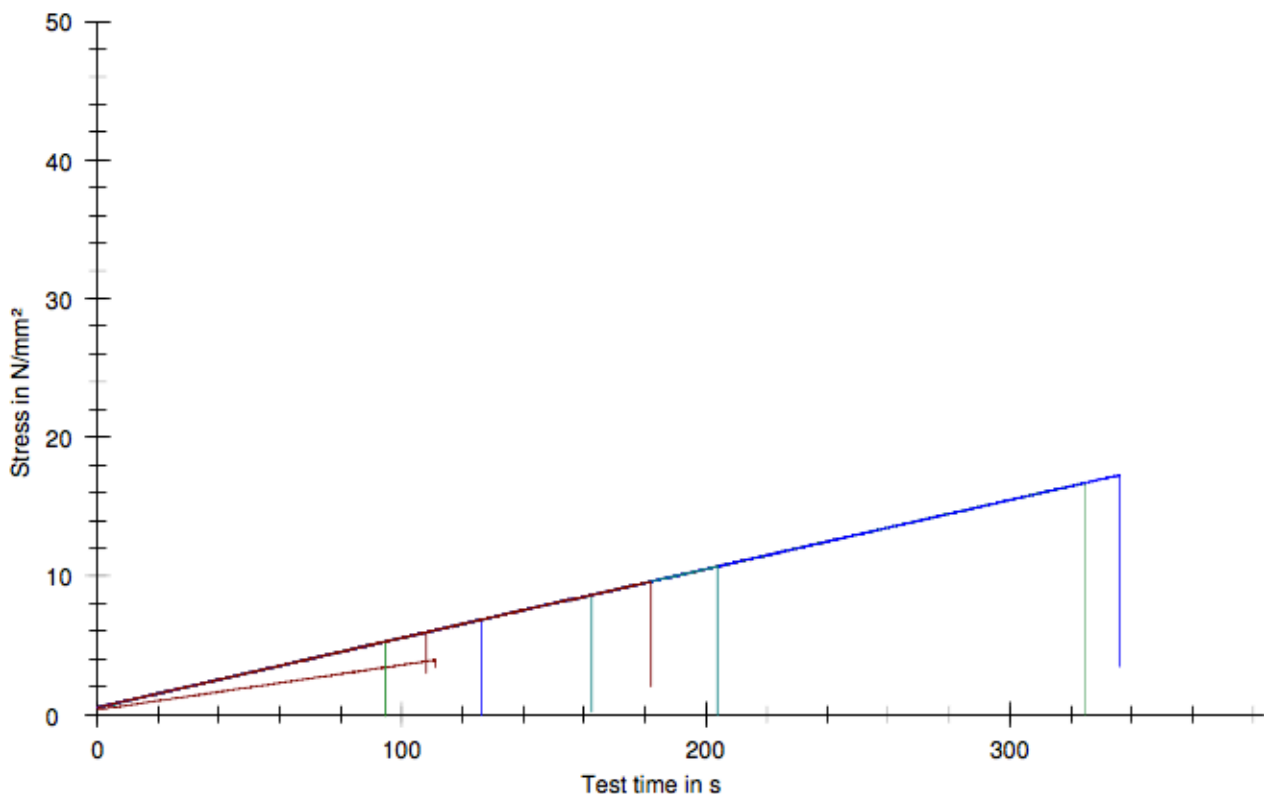
Arbejdsdiagram

Nr	Date	ID	d mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
1	03/05/2015	ND-betong- 28-døgn 20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	945,17	53,49
2	03/05/2015	ND-betong - 28-døgn 20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1132,25	64,07
3	03/09/2015	ND-betong - 28-døgn 0 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1230,29	69,62
4	03/09/2015	ND-betong - 28-døgn 0 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1352,49	76,54
5	03/24/2015	ND-betong - 28-døgn -20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1277,53	72,29
6	03/24/2015	ND-betong - 28-døgn -20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1194,48	67,59
7	03/28/2015	ND-betong - 28-døgn - -45 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1296,27	73,35
8	03/28/2015	ND-betong - 28-døgn - -45 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1748,43	98,94
9	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	983,99	55,68
10	04/10/2015	28-døgn umettet - 20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1127,91	63,83
11	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1115,48	63,12
12	04/14/2015	28-døgn umettet - 0 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1088,73	61,61
13	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1197,01	67,74
14	04/18/2015	28-døgn umettet - -20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1184,24	67,01
15	04/24/2015	28-døgn umettet - -45 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1378,00	77,98
16	04/24/2015	28-døgn umettet - -45 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1397,20	79,07
17	04/21/2015	Lettbetong - 28-døgn - 20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	794,70	44,97
18	04/21/2015	Lettbetong - 28-døgn - 20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	861,50	48,75
19	04/30/2015	Lettbetong - 28-døgn - 0 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	-	-
20	04/30/2015	Lettbetong - 28-døgn - 0 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	570,86	32,30
21	05/05/2015	Lettbetong - 28-døgn - -20 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1047,40	59,27
22	05/05/2015	Lettbetong - 28-døgn - -20 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1145,72	64,83
23	04/24/2015	Lettbetong - 28-døgn - -45 grader - 1	150,0	17671,5	300,0	1176,16	66,56
24	04/24/2015	Lettbetong - 28-døgn - -45 grader - 2	150,0	17671,5	300,0	1013,71	57,36



Bøystrekkfasthet

Nr	Date	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
1	03/06/2015	ND-betong 28-døgn - 20 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	30,12	3,88
2	03/06/2015	ND-betong 28-døgn - 20 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	26,08	5,22
3	03/09/2015	ND-betong 28-døgn - 0 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	33,99	6,80
4	03/09/2015	ND-betong 28-døgn - 0 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	42,82	8,56
5	03/24/2015	ND-betong 28-døgn - -20 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	63,92	12,78
6	03/24/2015	ND-betong 28-døgn - -20 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	55,95	11,19
7	03/28/2015	ND-betong 28-døgn - -45 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	83,41	16,68
8	03/28/2015	ND-betong 28-døgn - -45 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	86,16	17,23
9	04/25/2015	Lettbetong 28-døgn - 20 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	33,89	6,78
10	04/25/2015	Lettbetong 28-døgn - 20 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	31,62	6,32
11	05/01/2015	Lettbetong 28-døgn - 0 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	29,37	5,87
12	05/01/2015	Lettbetong 28-døgn - 0 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	27,87	5,57
13	05/05/2015	Lettbetong 28-døgn - -20 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	50,15	10,03
14	05/05/2015	Lettbetong 28-døgn - -20 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	53,21	10,64
15	04/24/2015	Lettbetong 28-døgn - -45 grader - 1	150,0	550,0	82500,0	150,0	44,23	8,85
16	04/24/2015	Lettbetong 28-døgn - -45 grader - 2	150,0	550,0	82500,0	150,0	47,83	9,57



Elastisitetsmodul

ND – 20 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
σ_a	19,59	19,59
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,156	0,139
ϵ_{a2}	0,158	0,14
ϵ_{a3}	0,159	0,14
ϵ_{p1}	0,028	0,0162
ϵ_{p2}	0,03	0,0168
ϵ_{p3}	0,03	0,017
E	27736,434	29042,207

ND – 0 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
σ_a	24,36	24,36
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,135	0,13
ϵ_{a2}	0,133	0,129
ϵ_{a3}	0,131	0,128
ϵ_{p1}	0,0191	0,0141
ϵ_{p2}	0,017	0,0134
ϵ_{p3}	0,015	0,012
E	39754,385	39546,247

ND - -20 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
σ_a	29,96	29,96
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,182	0,2
ϵ_{a2}	0,181	0,199
ϵ_{a3}	0,180	0,197
ϵ_{p1}	0,012	0,02
ϵ_{p2}	0,011	0,017
ϵ_{p3}	0,01	0,015
E	33443,786	31400

ND - -45 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
σ_a	31,26	31,26
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,185	0,203
ϵ_{a2}	0,183	0,207
ϵ_{a3}	0,181	0,21
ϵ_{p1}	0,01	0,033
ϵ_{p2}	0,006	0,036
ϵ_{p3}	0,003	0,036

E	33782,857	33977,011
---	-----------	-----------

NDU – 20 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
--	-----------------	----------------

σ_a	25,15	25,15
------------	-------	-------

σ_p	1,7	1,7
------------	-----	-----

ϵ_{a1}	0,205	0,191
-----------------	-------	-------

ϵ_{a2}	0,213	0,195
-----------------	-------	-------

ϵ_{a3}	0,218	0,198
-----------------	-------	-------

ϵ_{p1}	0,04	0,031
-----------------	------	-------

ϵ_{p2}	0,047	0,034
-----------------	-------	-------

ϵ_{p3}	0,052	0,036
-----------------	-------	-------

E	27426,900	28597,560
---	-----------	-----------

NDU – 0 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
--	-----------------	----------------

σ_a	26,15	26,15
------------	-------	-------

σ_p	1,7	1,7
------------	-----	-----

ϵ_{a1}	0,21	0,185
-----------------	------	-------

ϵ_{a2}	0,208	0,185
-----------------	-------	-------

ϵ_{a3}	0,206	0,185
-----------------	-------	-------

ϵ_{p1}	0,0318	0,011
-----------------	--------	-------

ϵ_{p2}	0,0305	0,011
-----------------	--------	-------

$\epsilon p3$	0,0285	0,01
E	27863,247	28103,448

NDU - -20 grader

Første cylinder Andre cylinder

σa	27,92	27,92
σp	1,7	1,7
$\epsilon a1$	0,2	0,223
$\epsilon a2$	0,1965	0,218
$\epsilon a3$	0,1935	0,215
$\epsilon p1$	0,015	0,028
$\epsilon p2$	0,012	0,025
$\epsilon p3$	0,0095	0,021
E	28892,561	27600

NDU - -45 grader

Første cylinder Andre cylinder

σa	30	30
σp	1,7	1,7
$\epsilon a1$	0,218	0,213
$\epsilon a2$	0,218	0,21
$\epsilon a3$	0,218	0,207
$\epsilon p1$	0,013	0,02

ϵ_{p2}	0,012	0,016
ϵ_{p3}	0,011	0,013
E	27475,728	29633,507

LWA – 20 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
σ_a	17,51	17,51
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,145	0,155
ϵ_{a2}	0,146	0,157
ϵ_{a3}	0,147	0,158
ϵ_{p1}	0,008	0,014
ϵ_{p2}	0,009	0,016
ϵ_{p3}	0,009	0,016
E	22913,043	22267,605

LWA – 0 grader

	Første cylinder	Andre cylinder
σ_a	19,54	19,54
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,153	0,149
ϵ_{a2}	0,152	0,149
ϵ_{a3}	0,152	0,149

ϵ_{p1}	0,0076	0,007
ϵ_{p2}	0,007	0,007
ϵ_{p3}	0,059	0,007
E	24606,896	25126,760

LWA - -20 grader

Første cylinder Andre cylinder

σ_a	24,78	24,78
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,187	0,18
ϵ_{a2}	0,184	0,178
ϵ_{a3}	0,181	0,178
ϵ_{p1}	0,012	0,01
ϵ_{p2}	0,009	0,008
ϵ_{p3}	0,005	0,006
E	26837,209	27152,941

LWA - -45 grader

Første cylinder Andre cylinder

σ_a	24,8	24,8
σ_p	1,7	1,7
ϵ_{a1}	0,176	0,2
ϵ_{a2}	0,179	0,21

εa3	0,184	0,217
εp1	0,013	0,038
εp2	0,016	0,045
εp3	0,017	0,049
E	27500	26860,465

Vannmetningslogg

	Vekt før	1 dag	2 dager	3 dager	4 dager	5 dager	6 dager	7 dager	8 dager	10 dager	11 dager
Terning	2461	2404	2384	2381	2372	2367	2363	2360	2357	2352	2349
Sylinder	12897	12717	12648	12626	12603	12581	12562	12535	12534	12508	12495

12 dager	13 dager	16 dager	17 dager	18 dager	19 dager	20 dager	21 dager	Før test (0grader)
2347	2346	2341	2339	2338	2338	2337	2336	2338
12485	12476	12446	12440	12433	12426	12422	12416	

	Vekt mistet	Vekt mistet etter 13 dager	% mistet etter 13 dager
Terning	125	115	92
Sylinder	481	421	87,5259875259