

# Temperatureffekter i kalksementstabilisert leire

**Pernille Wiersholm**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Arnfinn Johannes Emdal, IBM

Medveileder: Bjørn Kristian Fiskvik Bache, NGI

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk







Oppgavens tittel: <b>Temperatureffekter i kalksementstabilisert leire</b>	Dato: <b>08.06.2018</b>
	Antall sider (inkl. bilag): <b>175</b>
	Masteroppgave x
Navn: Pernille Wiersholm	
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal	
Eksterne faglige veiledere: Bjørn Kristian Fiskvik Bache	

#### Ekstrakt:

Det har de siste årene blitt observert betydelige forskjeller i oppnådd fasthet i kalksementpeler installert i felt og kalksementprøver innblandet i laboratoriet. En av faktorene som kan ha betydning for fasthetsutviklingen er temperaturen. Det er derfor av interesse å utforske temperatureffekter i kalksementstabilisert materiale, og det har i den forbindelse blitt utført både laboratorieforsøk, feltmålinger og numeriske simuleringer i masteroppgaven.


For å forstå hvordan stivhet og skjærfasthet påvirkes av herdetemperaturen har det blitt gjennomført laboratorieforsøk med 6 leirprøver stabilisert med sement, og 10 leirprøver stabilisert med kalk herdet ved 8 °C, 41 °C og 75 °C / 77 °C, i 28 døgn. Resultatene viser at både skjærfastheten og stivheten av materialet er temperaturavhengig og at det, til tross for stor spredning, er en tydelig økning i både fasthet og stivhet ved økt herdetemperatur.

Utførte feltmålinger viser videre at temperaturen i kalksementstabilisert materiale er betydelig høyere enn jordtemperaturen, og at temperaturen også holdes høy over en svært lang periode. Etter 85 døgn viste temperaturmålingene i felt en temperatur på mellom 19 °C - 23 °C fra dybde 9 m og dypere. Temperaturforløpet i felt har også blitt beregnet ved numeriske simuleringer ved programmet, *Comsol Multiphysics*. Modellen har blitt kalibrert mot laboratoriemålinger av temperaturen i kalksementstabilisert materiale, og viser tilsvarende temperaturforløp som feltmålingene. De numeriske simuleringene viser også hvordan ulike faktorer påvirker temperaturforløpet. Oppsummert vil dekningsgrad, mengde bindemiddel, type bindemiddel, starttemperatur i leira, tid mellom ribbeinstallasjoner og materialegenskapene til leira ha betydning for temperaturutviklingen i kalksementstabilisert materiale.

Dersom temperaturforløpet i felt og sammenhengen mellom oppnådd fasthet, herdetemperatur og herdetid er kjent, kan man oppnå et mer nøyaktig estimat av skjærfastheten og stivheten. Dette vil forbedre grunnlaget for dimensjonering. Som et eksempel vil en økning i temperaturen, som følge av feltmålingene og laboratorieresultatene, bidra til en teoretisk økning i oppnådd skjærfasthet på ca. 38 %, sammenlignet med fastheten man oppnår ved herding ved 8 °C etter 28 døgn. Det er viktig å presisere at forsøkene utført i oppgaven er basert på få målepunkter, og at det ligger noen begrensninger til grunne for de numeriske beregningene. Mer arbeid og flere forsøk vil derfor være nødvendig for å verifisere og forbedre funnene.

#### Stikkord:

- |                            |
|----------------------------|
| 1. Kalksementstabilisering |
| 2. Temperatur              |
| 3. Comsol Multiphysics     |
| 4. Skjærfasthet            |

  
(sign.)





## MASTEROPPGAVE

vår 2018

for

Student: Pernille Wiersholm

### **Temperatureffekter i kalksementstabilisert leire**

*Effect of temperature on lime-cement stabilized clay*

#### **BAKGRUNN**

Oppgaven er foreslått av og utføres i samarbeid med NGI, og er en fortsettelse på prosjektoppgaven skrevet høsten 2017. Bakgrunn for oppgaven er at det er usikkerheter knyttet til hvor stor fasthet og stivhet som oppnås i felt ved kalksementstabilisering. Ofte blir fastheten for prøver herdet i laboratoriet ved 8 °C benyttet som utgangspunkt for designfastheten. Det er i midlertidig ved en rekke prosjekter observert at fastheten i felt er betydelig høyere enn fastheten som oppnås ved standard laboratorieforsøk.

Én av faktorene som kan påvirke oppnådd fasthet i felt er temperaturen. Det er derfor av interesse å utforske temperatureffekter i kalksementstabilisert materiale. Dersom betydningen av temperaturen under herding er kjent, vil det skape større forståelse rundt årsakene til at fastheten beregnet i felt og i laboratoriet er avvikende, og det vil være mulig å forbedre grunnlaget for dimensjonering av kalksementstabilisering.

#### **INNHold**

For å utforske temperatureffekter i kalksementstabilisert materiale skal det gjennomføres laboratorieforsøk, feltmålinger og numeriske simuleringer.

Laboratorieforsøk med herding av kalk- og sementstabilisert leire ved ulike temperaturer skal gjennomføres for å forstå hvordan skjærfasthet og stivhet påvirkes av herdetemperaturen.

Felt- og laboratoriemålinger skal gjennomføres for å øke forståelsen rundt hvordan temperaturen utvikles i kalksementstabilisert materiale. Det skal også utvikles et numerisk beregningsprogram som simulerer temperaturforløpet i kalksementpeler i felt. Programmet skal benyttes for å øke forståelsen rundt hvilke effekter som påvirker temperaturforløpet.

I tillegg skal nødvendig teori og tidlige utførte studier belyses.

**Hovedveileder: Arnfinn Emdal, NTNU**  
**Medveileder: Bjørn Kristian Fiskvik Bache**

---

Arnfinn Emdal (signatur)



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avsluttende del av mastergraden i geoteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), i Trondheim våren 2018. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Norges Geotekniske Institutt (NGI), og er en fortsettelse på prosjektoppgaven, skrevet høsten 2017. Prosjektoppgaven inneholdt innledende laboratorieforsøk med herding av sementstabilisert leire under ulike temperaturer, og resultatene av forsøket er sammenfattet i denne oppgaven.

Jeg ønsker å takke NGI for en interessant problemstilling og tilgang til nødvendig materiale og resultater underveis. En spesiell takk må rettes til min eksterne veileder fra NGI, Bjørn Kristian Fiskvik Bache. Han har bidratt med utallige møter, gode innspill og god oppfølging både høsten 2017 og våren 2018.

Videre vil jeg takke min veileder på NTNU, Arnfinn Emdal, for gode diskusjoner og innspill underveis. Jeg ønsker også å takke resten av geoteknikk-avdelingen som har vært svært hjelpsomme, og stilt med «åpne dører».

Til slutt ønsker jeg å takke familie og venner, som har bidratt med støtte og oppmuntring gjennom hele prosessen, og *Geogjengen 2018*, som har bidratt med mange morsomme og sosiale øyeblikk.

Trondheim, 08-06-2018



Pernille Wiersholm



## Sammendrag

Det har de siste årene blitt observert betydelige forskjeller i oppnådd fasthet i kalksementpeler installert i felt og kalksementprøver innblandet i laboratoriet. Én av faktorene som kan ha betydning for fasthetsutviklingen er temperaturen. Det er derfor av interesse å utforske temperatureffekter i kalksementstabilisert materiale, og det har i den forbindelse blitt utført både laboratorieforsøk, feltmålinger og numeriske simuleringer i masteroppgaven.

For å forstå hvordan stivhet og skjærfasthet påvirkes av herdetemperaturen har det blitt gjennomført laboratorieforsøk med 6 leirprøver stabilisert med sement, og 10 leirprøver stabilisert med kalk herdet ved  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $75\text{ }^{\circ}\text{C} / 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ , i 28 døgn. Resultatene viser at både skjærfastheten og stivheten av materialet er temperaturavhengig og at det, til tross for stor spredning, er en tydelig økning i både fasthet og stivhet ved økt herdetemperatur.

Utførte feltmålinger viser videre at temperaturen i kalksementstabilisert materiale er betydelig høyere enn jordtemperaturen, og at temperaturen også holdes høy over en svært lang periode. Etter 85 døgn viste temperaturmålingene i felt en temperatur på mellom  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  fra dybde 9 m og dypere. Temperaturforløpet i felt har også blitt beregnet ved numeriske simuleringer ved programmet, *Comsol Multiphysics*. Modellen har blitt kalibrert mot laboratoriemålinger av temperaturen i kalksementstabilisert materiale, og viser tilsvarende temperaturforløp som feltmålingene. De numeriske simuleringene viser også hvordan ulike faktorer påvirker temperaturforløpet. Oppsummert vil dekningsgrad, mengde bindemiddel, type bindemiddel, starttemperatur i leira, tid mellom ribbeinstallasjoner og materialegenskapene til leira ha betydning for temperaturutviklingen i kalksementstabilisert materiale.

Dersom temperaturforløpet i felt og sammenhengen mellom oppnådd fasthet, herdetemperatur og herdetid er kjent, kan man oppnå et mer nøyaktig estimat av skjærfastheten og stivheten. Dette vil forbedre grunnlaget for dimensjonering. Som et eksempel vil en økning i temperaturen, som følge av feltmålingene og laboratorieresultatene, bidra til en teoretisk økning i oppnådd skjærfasthet på ca. 38 %, sammenlignet med fastheten man oppnår ved herding ved  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  etter 28 døgn. Det er viktig å presisere at forsøkene utført i oppgaven er basert på få målepunkter, og at det ligger noen begrensninger til grunne for de numeriske beregningene. Mer arbeid og flere forsøk vil derfor være nødvendig for å verifisere og forbedre funnene.





## Abstract

In recent years, it has been observed that the in situ strength of lime cement columns differ from the strength achieved when stabilizing soil samples with lime and cement in the laboratory. One of the factors which may affect the strength, is the temperature. Laboratory studies, field measurements and numerical simulations have been conducted in the master thesis, to increase the understanding of how the temperature affects soil stabilization with lime and cement.

A laboratory study, where soil samples were stabilized with lime or cement, was carried out to increase the understanding of how curing temperature affects the shear strength and stiffness of the material. 6 samples stabilized with cement and 10 samples stabilized with lime, were stored at constant temperatures of  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $75\text{ }^{\circ}\text{C} / 77\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 28 days. The results show that the strength and the stiffness of stabilized material is temperature dependent. Despite some scatter in the results, the stiffness and the shear strength of the stabilized material increased when cured at higher temperatures.

Field measurements conducted in the master thesis, show that the temperature in the ground after installation of lime cement columns, is significantly higher than normal ground temperature. Furthermore, the temperature in the columns remain at a high and stable temperature for a long time. According to the measurements, the temperature was as high as  $19\text{ }^{\circ}\text{C} - 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  after 85 days, for measurements from depth  $9\text{ m}$  and lower. To simulate the temperature variations in lime cement columns by time, numerical simulations, by the program *Comsol Multiphysics*, have been performed. The input parameters of the model have been calibrated with the laboratory measurements. A verification of the model shows that the temperature simulations correspond with the field measurements. Different factors which may affect the temperature have been studied. Summarized, the following factors will affect the temperature: the degree of stabilization, the amount and type of binder, the time between installations, the temperature in the ground before installation and the material properties of the clay.

If the relation between strength, curing temperature and curing time is known, it is possible to obtain a better estimate of the shear strength and stiffness, and consequently obtain more accurate design values. For example, as a result of the laboratory tests and field measure-

ments, the theoretical shear strength will increase by 38 %, if considering the curing temperature. It is important to stress that the measurements conducted in the thesis are based on few datapoints, and that some limitations apply to the numerical simulations. More studies are necessary to improve and verify the results of the thesis.

# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	iii
Abstract . . . . .	v
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemstilling . . . . .	2
1.3 Avgrensinger . . . . .	3
1.4 Forskningsmetode . . . . .	3
1.5 Disposisjon . . . . .	3
<b>I Teori</b>	<b>5</b>
<b>2 Kalksementstabilisering</b>	<b>7</b>
2.1 Hovedprinsipper . . . . .	7
2.2 Oppnådd fasthet i kalksementpeler . . . . .	8
2.3 Forskjeller i oppnådd fasthet i felt og laboratoriet . . . . .	9
<b>3 Bindemiddel</b>	<b>11</b>
3.1 Kalk . . . . .	11
3.2 Sement . . . . .	13
3.3 Oppsummering . . . . .	16
3.4 Teoretisk varmeutvikling ved adiabatisk forhold . . . . .	16
<b>4 Temperatureffekter ved herding</b>	<b>19</b>
4.1 Oppnådd temperatur i felt . . . . .	19

4.2	Oppnådd fasthet for ulike herdetemperaturer . . . . .	23
4.3	Modningstall . . . . .	24
4.4	Bruk av modningstallet . . . . .	26
<b>II</b>	<b>Felt- og laboratorieforsøk</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Temperaturmålinger i felt</b>	<b>31</b>
5.1	Beskrivelse av installasjon og grunnforhold . . . . .	31
5.2	Plassering av temperatursensorene . . . . .	31
5.3	Resultater . . . . .	32
5.4	Diskusjon . . . . .	35
5.5	Begrensninger . . . . .	35
5.6	Oppsummering . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Herding ved ulike temperaturer i laboratorium</b>	<b>37</b>
6.1	Beskrivelse av materiale . . . . .	37
6.2	Gjennomføring av laboratorieforsøket . . . . .	39
6.3	Resultater . . . . .	41
6.4	Diskusjon . . . . .	44
6.5	Feilkilder . . . . .	46
6.6	Oppsummering . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Temperaturmålinger i laboratorium</b>	<b>51</b>
7.1	Forsøksoppsett . . . . .	51
7.2	Gjennomføring av forsøket . . . . .	52
7.3	Resultater . . . . .	53
7.4	Diskusjon . . . . .	54
7.5	Begrensninger . . . . .	54
7.6	Oppsummering . . . . .	55
<b>III</b>	<b>Numerisk modellering</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>Modelloppsett</b>	<b>59</b>

8.1	Rammeverk . . . . .	59
8.2	Oppbygging av modellen . . . . .	60
8.3	Simulering av varmeutvikling . . . . .	60
8.4	Materialparametre . . . . .	62
<b>9</b>	<b>Kalibrering mot laboratoriemålinger</b>	<b>63</b>
9.1	Modell . . . . .	63
9.2	Resultater . . . . .	65
9.3	Diskusjon . . . . .	66
<b>10</b>	<b>Simulering av feltmålinger</b>	<b>69</b>
10.1	Modell . . . . .	69
10.2	Resultater . . . . .	71
10.3	Diskusjon . . . . .	73
10.4	Usikkerheter og begrensninger . . . . .	74
10.5	Oppsummering . . . . .	76
<b>11</b>	<b>Sammenligning av ulike ribbekonfigurasjoner</b>	<b>77</b>
11.1	Modell . . . . .	77
11.2	Resultater . . . . .	78
11.3	Diskusjon . . . . .	80
11.4	Oppsummering . . . . .	82
<b>12</b>	<b>Sammenligning av oppnådd modning for ulike ribbekonfigurasjoner</b>	<b>85</b>
12.1	Beregninger . . . . .	85
12.2	Resultater . . . . .	86
12.3	Diskusjon . . . . .	87
12.4	Oppsummering . . . . .	88
<b>IV</b>	<b>Konklusjon og videre arbeid</b>	<b>89</b>
<b>13</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>91</b>
<b>14</b>	<b>Forslag til videre arbeid</b>	<b>93</b>

<b>Referanseliste</b>	<b>95</b>
<b>A Resultater av laboratorieundersøkelsene</b>	<b>99</b>
A.1 Enaksiale trykkforsøk . . . . .	99
A.2 Samleplott for enaksiale trykkforsøk . . . . .	116
A.3 Temperaturlogging av vannbad . . . . .	124
<b>B Resultater av numeriske beregninger</b>	<b>127</b>
B.1 Temperaturforløp mot tid for ulike ribbekonfigurasjoner, $D$ , og ulike dekningsgrader, $a$ . . . . .	128
B.2 Modning og skjærfasthet mot tid for ulike ribbekonfigurasjoner, $D$ , og dekningsgrader, $a$ . . . . .	130
<b>C Beregning av termiske materialparametre</b>	<b>133</b>
C.1 Varmekapasitet . . . . .	133
C.2 Varmeledningsevne . . . . .	136
C.3 Varmekapasitet- og varmeledningberegninger i excel . . . . .	137
<b>D Borprofil</b>	<b>141</b>
<b>E Pelinstallasjonsplan på Bellevue</b>	<b>145</b>
<b>F FOPS-målinger fra Bellevue, Fredrikstad</b>	<b>149</b>
<b>G Produktblad for kalk og sement</b>	<b>155</b>

# Figurliste

2.1	Illustrasjon av stabiliseringsprosessen. . . . .	7
2.2	Installasjonsmønstre for kalksementpeler . . . . .	8
3.1	Temperaturforløp, lesking av kalk . . . . .	13
3.2	Skjærfasthetsutvikling for stabilisert kvikkleire . . . . .	14
3.3	Isoterm varmeutvikling for Portland sement ved 20 °C . . . . .	15
3.4	Isoterm varmeutvikling for Portland sement ved ulike temperaturer . . . . .	16
3.5	Akkumulert varmeutvikling under adiabatisk forhold for sement . . . . .	17
4.1	Temperaturmålinger i felt, 1983 . . . . .	20
4.2	Plassering av temperatursensorer, 1983 . . . . .	21
4.3	Temperaturmålinger i felt, 1995 . . . . .	22
4.4	Installasjonsmønster og plassering av temperatursensorer, 1995 . . . . .	22
4.5	Fasthetsutvikling for herdning ved ulike temperaturer . . . . .	24
4.6	Skjærfasthet mot modning for ulike typer leirer . . . . .	26
4.7	Modningskurver for ulike herdetemperaturer . . . . .	27
5.1	Plassering av temperatursensorene . . . . .	32
5.2	Temperaturmålinger fra dybde 6 m. . . . .	33
5.3	Temperaturmålinger fra dybde 9 m. . . . .	33
5.4	Temperaturmålinger fra dybde 12 m. . . . .	34
5.5	Temperaturmålinger fra dybde 15 m. . . . .	34
6.1	Oversiktskart . . . . .	38
6.2	Plantegning . . . . .	38
6.3	Ortofoto med beskrivelse av hvor prøvematerialet er hentet fra . . . . .	38

6.4	Laboratorieforsøk, stamping av prøver . . . . .	40
6.5	Laboratorieforsøk, lagring av prøver . . . . .	40
6.6	Skjærspenning-tøyningsplott for prøve S03 . . . . .	41
6.7	Resultater av laboratorieforsøkene . . . . .	43
6.8	Estimert skjærfasthet-modningskurve for kalksementstabilisert leire . . . . .	45
6.9	Ujevn innstamping under tilvirkning av prøver . . . . .	47
7.1	Skisse av forsøksoppsettet . . . . .	52
7.2	Bilder fra gjennomføring av forsøket. . . . .	52
7.3	Temperaturmålinger fra laboratorieforsøk . . . . .	53
9.1	Modell av isolasjonsboks, 3D . . . . .	63
9.2	Modell av isolasjonsboks, 2D . . . . .	65
9.3	Temperaturforløp mot tid for Comsol-beregningene og laboratoriemålingene . . . . .	66
10.1	Modelloppsett for feltsimuleringer . . . . .	70
10.2	Simulering av temperaturutvikling i felt, T01 . . . . .	71
10.3	Simulering av temperaturutvikling i felt, T02 . . . . .	72
10.4	Simulering av temperaturutvikling i felt, T03 . . . . .	72
10.5	Temperaturfordeling rundt dobbelribbe . . . . .	74
10.6	Overlappssone for ulike ribber . . . . .	75
11.1	Modelloppsett for generelle ribbekonfigurasjoner i felt . . . . .	78
11.2	Temperaturforløp i ribbe for ulike dekningsgrader, lang tid . . . . .	79
11.3	Temperaturforløp i ribbe for ulike dekningsgrader, kort tid . . . . .	79
11.4	Temperaturforløp mellom dobbelribber . . . . .	81
11.5	Langtidstemperatur i senter av pel . . . . .	83
12.1	Modningskurve for dobbelribber . . . . .	86
12.2	Skjærfasthetskurve for dobbelribber . . . . .	86



# Tabelliste

3.1	Reaksjonshastighet, varmeutvikling og temperaturøkning ved hydratisering av kalk og sement . . . . .	16
6.1	Generell informasjon om opptak av prøvematerialet . . . . .	39
6.2	Resultater av enaksiale trykkforsøk, kalkstabiliserte prøver . . . . .	42
6.3	Resultater av enaksiale trykkforsøk, sementstabiliserte prøver . . . . .	42
7.1	Oppsummering resultater av temperaturmålinger i laboratorium . . . . .	53
8.1	Varmekapasitet og varmeledningsevne for ustabilisert og stabilisert leire fra Klett og Bellevue. . . . .	62
9.1	Inputparametre . . . . .	64
9.2	Materialparametre, isolasjon . . . . .	64
9.3	Kalibrerte parametre . . . . .	66
12.1	Oppnådd skjærfasthet beregnet for ulike situasjoner . . . . .	87



# Symbolliste

$\alpha_u$	Grad av hydratisering (-)
$\beta$	Kurveparameter (-)
$\gamma$	Tyngdetetthet ( $kN/m^3$ )
$\Delta T$	Temperaturrendring ( $^{\circ}C$ )
$\varepsilon$	Tøyning (%)
$\rho$	Densitet ( $kg/m^3$ )
$\rho_s$	Korndensitet ( $kg/m^3$ )
$\tau$	Skjærspenning ( $Pa$ )
$\tau$	Hydratiseringstid ( $h$ )
$a$	Dekningsgrad (-)
$C$	Mengde bindemiddel ( $kg/m^3$ )
$C_p$	Varmekapasitet ( $J/kgK$ )
$D$	Diameter av pel ( $m$ )
$E$	Aktiveringsenergi ( $J/mol$ )
$E_{50}$	Elastisitetsmodul ( $Pa$ )
$K$	Konstant avhengig av jordtype, bindemiddel og herdetemp. (-)
$k$	Varmeledningsevne ( $W/mK$ )

$M_T$	Modningstall (-)
$m$	Masse ( $kg$ )
$n$	Porøsitet (-)
$Q$	Varmetilførsel ( $W/m^3$ )
$Q_u, Q_\infty$	Total varmeutvikling ( $J/kg$ )
$q_u$	Enaksial trykkfasthet ( $Pa$ )
$R$	Gasskonstanten ( $J/mol$ )
$S_t$	Sensitivitet (-)
$s_u$	Udrenert skjærfasthet ( $Pa$ )
$s_{u,r}$	Omrørt skjærfasthet ( $Pa$ )
$T$	Temperatur ( $^{\circ}C$ )
$T_0, T_r$	Referansetemperatur ( $^{\circ}C$ )
$t$	Tid ( $h$ )
$V$	Volum ( $m^3$ )
$w$	Vanninnhold (%)
$w/c - tall$	Forhold mellom vann og sement (-)

## Forkortelser

<b>DAE</b>	Algebraiske differensialligninger
<b>FOPS</b>	Forinstallert omvendt pelesondering
<b>NGI</b>	Norges Geotekniske Institutt
<b>NTNU</b>	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
<b>ODE</b>	Ordinære differensialligninger

# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Kalksementstabilisering ble tatt i bruk i Norge på midten av 1970-tallet, og har siden den gang blitt benyttet i økende grad for å forbedre stabiliteten og bæreevnen til jorden. Normal prosedyre for prosjektering er å blande materiale i et laboratorium og deretter herde prøvene ved normal jordtemperatur på 8 °C. Skjærfastheten og andre materialegenskaper blir deretter testet etter et visst antall døgns herding. De siste årene har det imidlertid blitt observert betydelige forskjeller i oppnådd fasthet i kalksementpeler i felt og kalksementprøver innblandet og herdet i laboratoriet. Flere prosjekter i Norge viser høy oppnådd skjærfasthet i den stabiliserte leira, og for eksempel viser prøver tatt opp ved Møllenberg i Trondheim, 10 ganger høyere skjærfasthet enn designfastheten på 120 *kPa* (Hansson, 2012). Prøvene hadde da herdet i ca. 550 dager. Det er i dag knyttet en viss usikkerhet til hvilken fasthet som oppnås i felt, og ofte blir konservativ designfasthet, hvor fastheten er målt for prøver herdet i laboratoriet ved 8 °C, benyttet.

Tidligere studier viser at en av faktorene som kan påvirke oppnådd fasthet i felt, er herdetemperaturen. Det er ved enkelte prosjekter observert en høy varmeutvikling i jorden etter installasjon av kalksementpeler (Kujala, 1984; Enami et al., 1985; Åhnberg og Holm, 1987; Åhnberg et al., 1995), og det er videre kjent at økt temperatur vil gi en økt hastighet på reaksjonene og dermed en økt fasthet av leira (Åhnberg, 2006). Denne sammenhengen er ikke godt dokumentert for norske leirer, og mer innsikt er nødvendig for å forstå temperaturens

betydning ved kalksementstabilisering. Dersom man kan dokumentere at en høyere fasthet og stivhet oppnås i felt på grunn av høyere herdetemperatur, vil det være mulig å beregne mer nøyaktige designverdier, og dermed kutte ned på mengden stabilisering. Dette vil igjen kunne spare store kostnader, samt gi en miljøeffekt da sementproduksjon fører til store  $CO_2$ -utslipp (Olivier et al., 2017).

Dersom sammenhengen mellom herdetemperatur, herdetid og oppnådd fasthet er kjent, vil det også være mulig å gjennomføre laboratorieforsøk raskere. Man kan for eksempel beregne 28 døgns fasthet ved å herde prøvene under høyere temperatur og kortere tidsrom.

Oppsummert er en økt forståelse av temperatureffekter i kalksementstabilisert leire av interesse fordi:

- Det kan forbedre grunnlaget for dimensjonering av kalksementstabilisering. På den måten kan for eksempel mindre stabilisering være tilstrekkelig for å oppnå ønsket fasthetsøkning i jorden.
- Herding av kalksementprøver i laboratoriet kan gjennomføres raskere ved at prøvene herdes under høyere temperatur.
- Det vil, ettersom man isolerer en av flere faktorer som har betydning for fasthetsutviklingen, skape større forståelse rundt årsaken til at fastheten beregnet i laboratoriet og fastheten målt i felt er ulik.

## 1.2 Problemstilling

Formålet med masteroppgaven er å utforske temperatureffekter i kalksementstabilisert leire. Problemstillingen er tredelt, og inneholder følgende punkter:

- Hvordan påvirkes oppnådd stivhet og skjærfasthet av herdetemperaturen?
- Hvordan er temperaturforløpet i kalksementstabilisert materiale?
- Hvilke effekter påvirker temperaturutviklingen i felt?

## 1.3 Avgrensinger

I masteroppgaven har det blitt gjennomført laboratorieforsøk med leire stabilisert med kalk og sement. På grunn av tilgjengelig tid har antall variabler i laboratorieforsøkene blitt avgrenset, og forsøkene har kun blitt gjennomført for én mengde bindemiddel, én type leire og over et bestemt herdetidsrom. Det er i tillegg kun utført stabilisering med kalk og sement separat, og antall herdetemperaturer har blitt begrenset til 3 stykk for hver av forsøkene.

## 1.4 Forskningsmetode

For å utforske temperatureffekter i kalksementstabilisert leire, har det i masteroppgaven blitt gjennomført laboratorieforsøk, feltmålinger og numeriske simuleringer.

Det har blitt gjennomført laboratorieforsøk med herding av stabilisert leire under ulike temperaturer for å forstå hvordan oppnådd stivhet og skjærfasthet påvirkes av herdetemperaturen.

Videre har det blitt gjennomført feltmålinger og laboratoriemålinger for å forstå hvordan temperaturen utvikles i kalksementstabilisert materiale. Ved laboratoriemålingene ble temperaturen logget for leire stabilisert med kalk, sement og 50/50 kalk-sement under kontrollerte forhold. Temperaturforløpet har også blitt beregnet ved numeriske simuleringer, ved elementmetodeprogrammet, *Comsol Multiphysics*. Programmet ble kalibrert mot laboratoriemålingene, og ble deretter benyttet for å simulere temperaturutviklingen i felt.

Det har blitt gjennomført ulike simuleringer i *Comsol Multiphysics*, for å øke forståelsen rundt hvilke effekter som påvirker temperaturutviklingen i felt. Ulike situasjoner ble simulert for å forstå hvordan ulike parametere påvirker temperaturforløpet.

## 1.5 Disposisjon

Masteroppgaven er delt inn i 3 hoveddeler, henholdsvis teori, felt- og laboratorieforsøk og numerisk modellering. I tillegg til en avsluttende del med konklusjon og videre arbeid. Oppgaven er strukturert slik at hvert av forsøkene og simuleringene blir presenter i enkeltstående

kapitler med tilhørende resultater og diskusjon. De ulike kapitlene bygger på hverandre, og resultater fra enkelte av kapitlene blir benyttet i senere kapitler.

**Del I** omhandler teori om temperatureffekter ved herding, og inkluderer informasjon om fasthet i kalksementpeler, kalk og sement som bindemiddel og tidligere utførte studier.

**Del II** beskriver alle utførte felt- og laboratorieforsøk med kalksementstabilisert leire, og inkluderer feltmålinger av temperaturen, laboratorieforsøk med måling av temperaturen og laboratorieforsøk med måling av oppnådd fasthet ved herding under ulike temperaturer.

**Del III** omhandler numeriske simuleringer av temperaturforløpet i kalksementstabilisert leire, og inkluderer kalibrering av parametere mot laboratoriemålinger, simuleringer av ulike feltsituasjoner og sammenligning av oppnådd skjærfasthet for ulike simulerte temperaturforløp.

**Del IV** oppsummerer og konkluderer arbeidet som er utført i masteroppgaven, og gir anbefalinger til videre arbeid.



**Del I**

**Teori**



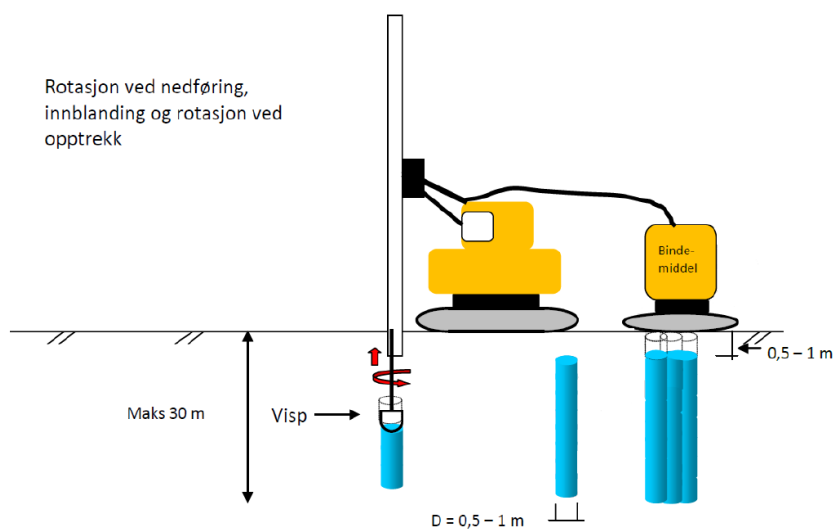
# Kapittel 2

## Kalksementstabilisering

Dette kapittelet inneholder innledende teori omkring hovedprinsipper og oppnådd fasthet ved kalksementstabilisering. Kapittelet vil gi en mer generell bakgrunn for oppgaven.

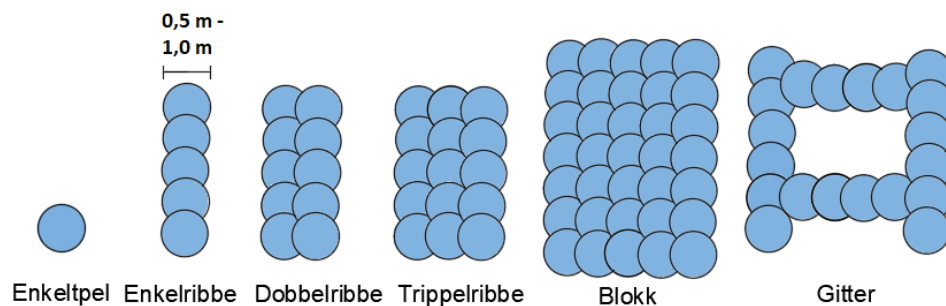
### 2.1 Hovedprinsipper

Kalksementstabilisering er en grunnforsterkningsmetode som benyttes for å bedre materialegenskapene til jorda, ofte med tanke på øking av fasthet og stivhet. Metoden benyttes i bløt til middels fast leire og kvikkleire, og har størst effekt dersom den udrenerte skjærfastheten i leira er under  $30 \text{ kPa}$  (Norsk Geoteknisk Forening, 2012).



Figur 2.1: Illustrasjon av installasjon av kalksementpeler (Norsk Geoteknisk Forening, 2012).

Kalksementpelene blir installert ved hjelp av en rigg som presser ned og roterer en visp til ønsket dybde, og deretter blander inn bindemiddel under opptrekk. Bindemiddelet reagerer kjemisk med jordmaterialet og gir økt skjærfasthet og stivhet (Statens Vegvesen, 2014). En illustrasjon av prosessen er vist i figur 2.1. Diameteren på kalksementpelene blir avgjort av diameteren på vispen, og er derfor begrenset til en størrelse på mellom 0,5 m og 1,0 m. Pelene plasseres i ulike mønstre, som vist i figur 2.2, avhengig av formålet med stabiliseringen. For eksempel vil ribber ofte bli benyttet for å forbedre skråningsstabiliteten eller for å stive av byggegrøper (Norsk Geoteknisk Forening, 2012).



Figur 2.2: Ulike installasjonsmønstre for kalksementpeler, modifisert fra (Norsk Geoteknisk Forening, 2012).

## 2.2 Oppnådd fasthet i kalksementpeler

Fastheten av kalksementpeler blir i hovedsak avgjort av:

- In situ egenskaper av jord
- Bindemiddelet
- Innblandingsforhold
- Herdebetingelser

Blant in situ egenskapene i jorden vil vanninnholdet ha stor betydning. En leire med høyt vanninnhold vil normalt oppnå en lavere fasthet enn en leire med lavere vanninnhold ved stabilisering. Dette kommer av at et lavere vanninnhold fører til at kornene fra bindemiddelet er plassert tettere, og at flere bindinger dermed kan oppstå (Åhnberg, 2006). På samme

måte vil man ved å påføre en tilleggsbelastning under herding, presse kornene i materialet tettere sammen, og dermed legge til rette for at flere bindinger mellom bindemiddelet og leira kan oppstå (Åhnberg, 2006). Videre vil innblandingsforholdene avgjøre hvor effektivt bindemiddelet blandes inn i jorden, og dermed hvor stor fasthet som oppnås (Kitazume og Terashi, 2013).

I tillegg til faktorene nevnt ovenfor vil blant annet temperaturen under herding være avgjørende. Høyere temperatur vil øke reaksjonshastighetene av kalk- og sementreaksjonene, og bidra til økt fasthet (Åhnberg, 2006).

## 2.3 Forskjeller i oppnådd fasthet i felt og laboratoriet

Erfaringer viser at fastheten man oppnår i felt ofte er ulik fastheten man oppnår ved laboratorieforsøk. Sammenhengen er frem til i dag ikke godt dokumentert for norske leirer, men samling av erfaringer viser at det er grunn til å tro at oppnådd fasthet i felt er høyere enn oppnådd fasthet i laboratorietilvirket materiale (Gavel-Solberg, 2015). Flere prosjekter i Norge viser høy oppnådd fasthet i den stabiliserte leira. Som nevnt tidligere, viste for eksempel prøver tatt opp ved Møllenberg i Trondheim, 10 ganger høyere fasthet enn designfastheten, etter herding i ca. 550 døgn (Hansson, 2012). Andre prosjekter viser lignende resultater.

Det finnes ulike teorier på hva som skyldes forskjeller i oppnådd fasthet i felt og laboratorium, og følgende faktorer kan ha betydning:

- Innblandingsforhold
- Vanninnhold i materialet
- Herdetrykk
- Herdetemperatur

I følge kalksementveilederen (Norsk Geoteknisk Forening, 2012), er det enklere å oppnå god innblanding av bindemiddelet i laboratoriet enn i felt. Videre peker Åhnberg (2006), i sin doktoravhandling, på betydningen av vanninnhold i det stabiliserte materialet. Tilsetning av tørt bindemiddel og selve hydratiseringsprosessen, som krever vann, vil føre til et avtagende vanninnhold i prøva. Forskjellen mellom vanninnholdet i felt og laboratoriet kommer

av hvordan prøvene fra laboratoriet blir oppbevart. I laboratoriet blir prøvene lagret lufttett og uten tilgang på vann, mens man i felt kan få en delvis vannmetning av prøven. Det er da grunn til å anta at vanninnholdet i laboratorietilvirket materiale er lavere enn vanninnholdet i kalksementstabilisert materiale i felt. Dersom lavt vanninnhold ikke har hatt negativ innvirkning på hydratiseringsprosessen vil et lavere vanninnhold gi økt styrke (Åhnberg, 2006).

Faktorene ovenfor tilsier at fastheten oppnådd i laboratorietilvirket materiale burde vært høyere enn fastheten oppnådd i felt. Herdetrykk og herdetemperatur derimot, har motsatt effekt. Hydratiseringsprosessen genererer varme, og en vil i felt oppnå økt temperatur i kalksementpelene. Økt temperatur vil øke reaksjonshastigheten på de kjemiske prosessene, og gi økt fasthet. På samme måte vil overliggende masser føre til at herdetrykket er større i felt enn i laboratoriet (Åhnberg, 2006). I laboratoriet er det vanlig å lagre prøver ved konstant temperatur på ca. 8 °C og med null herdetrykk, og det vil da oppstå en forskjell i oppnådd fasthet i felt og laboratorium. Det er fremdeles knyttet en viss usikkerhet i hvilken fasthet som oppnås i felt, og større innsikt er derfor nødvendig. Resten av oppgaven vil fokusere på temperatureffekter i kalksementstabilisert materiale.

# Kapittel 3

## Bindemiddel

For å forstå betydningen av temperatureffekter ved herding av kalksementstabilisert leire, er det essensielt å forstå betydningen til bindemiddelet. Det er bindemiddelet som bidrar til både fasthetsøkningen og temperaturøkningen ved tilsetning i jorden, og valg av bindemiddel vil derfor ha stor betydning for endelig resultat av kalksementpelene.

I avsnittene nedenfor beskrives hydratisering, fasthetsutvikling og varmeutvikling for de to vanligste bindemidlene, kalk og sement, samt teoretisk temperaturøkning i jorden ved innblanding av bindemiddel.

### 3.1 Kalk

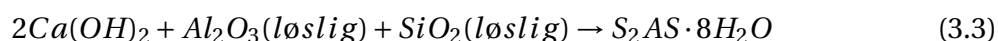
#### Hydratisering

Brent kalk produseres ved brenning av kalkstein ( $CaCO_3$ ), og består i hovedsak av kalsiumoksid ( $CaO$ ) (Johansson et al., 2006). Når kalk blandes inn i jord reagerer kalken med vann ved en hydratiseringsprosess som danner lesket kalk,  $Ca(OH)_2$ . Dette er vist i ligning 3.1. Andelen vann som forbrukes ved reaksjonen er vist i ligning 3.2 (Åhnberg et al., 1995).



$$\text{Vekt} \quad 100g + 32g \rightarrow 132g \quad (3.2)$$

Den hydratiserte kalken blir deretter løst opp i porevannet, og mengden av kalsium-ioner ( $Ca^{2+}$ ) og hydroksid ( $OH^{-1}$ ) øker. Tilførselen av hydroksid fører til høy pH i porevannet, og den høye pH'en fører videre til at silisiumdioksid og alumina fra leiren løses opp og reagerer med kalsium-ionene (Janz og Johansson, 2002). Dette kalles en pozzolanreaksjon, og det er denne reaksjonen som fører til fasthetsutviklingen for kalken (Kitazume og Terashi, 2013; Christensen et al., 1998). Ligning 3.3 viser et eksempel på reaksjonsforløpet for pozzolanreaksjonen. Mineralet Strätlingite,  $S_2AS \cdot 8H_2O$ , er et av mange mineraler som kan dannes av bestanddelene (Åhnberg et al., 1995).



### Fasthetsutvikling

Prosesen beskrevet ovenfor vil gi en langtids fasthetsutvikling, og kan gi stor spredning i oppnådd fasthet på kort sikt. Kalken vil bidra til en seigere oppførsel i den innblandede jorden, og prosessen blir begrenset av tilgangen til silisium og alumina. Reaksjonen vil ofte foregå over flere måneder (Janz og Johansson, 2002). Fastheten av kalk er avhengig av bindingene som dannes mellom leirmineralene og kalken, og innblandingsprosessen er derfor avgjørende for hvor høy fasthet som oppnås (Kitazume og Terashi, 2013).

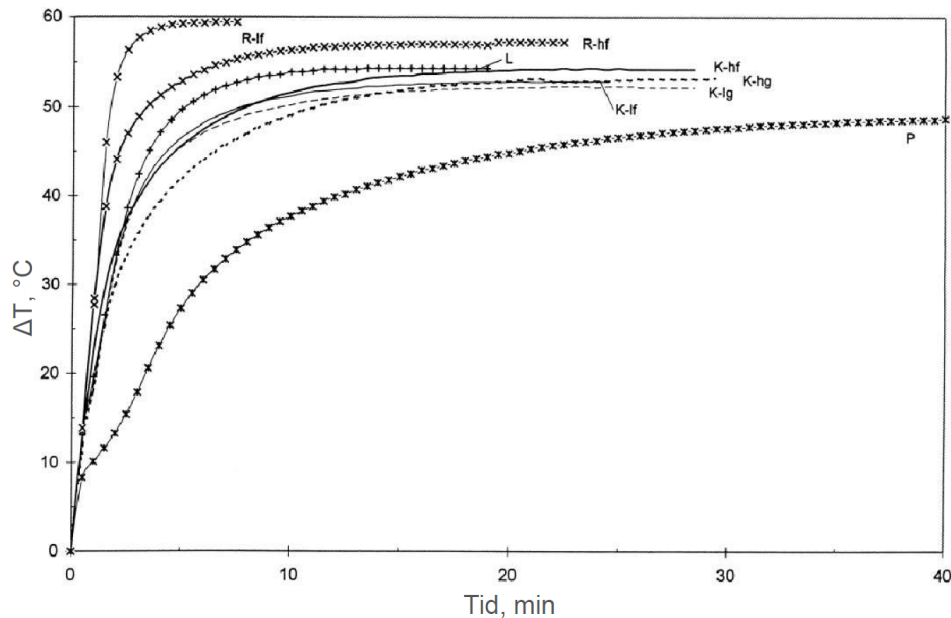
### Varmeutvikling

Reaksjonen mellom kalk og vann utvikler en stor mengde varme og totalt vil omtrent  $1163 \text{ kJ/kg}$  varme bli avgitt (Boynton, 1980). Reaksjonen skjer svært raskt, og for en medium reaktiv kalk vil reaksjonen ha nådd sitt maksimum etter 5-10 minutter (Hassibi, 1999). Figur 3.1 viser et eksempel på temperaturendring mot tid for lesking av ulike typer kalk. I forsøkene har 150 g kalk blitt blandet med 600 mL vann, og oppbevart i isoleringskanner. Figuren viser at, avhengig av kalktype, vil leskingen kunne bidra til en temperaturøkning på  $40^\circ\text{C}$  til  $60^\circ\text{C}$  (Åhnberg og Pihl, 1997). Generelt vil en løsbrent kalk gi større temperaturøkning enn en hardtbrent kalk, ettersom en høy brenningsgrad gir store krystallkorn av CaO, og dermed lavere reaktivitet (Åhnberg et al., 1995). I tillegg til brenningsgrad vil reaktiviteten og dermed temperaturøkningen være avhengig av kornstørrelsen, hvor en finmalt kalk vil gi større tem-



peraturøkning enn en grovmalt kalk.

Ved økt temperatur vil pozzolanreaksjonene skje raskere (Åhnberg et al., 1995), og temperaturen har derfor betydning for fasthetsutviklingen av kalk.



Figur 3.1: Temperaturforløp mot tid for lesking av ulike typer kalk (Åhnberg og Pihi, 1997).

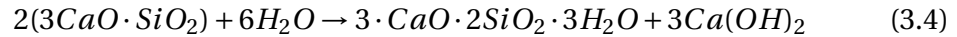
## 3.2 Sement

Sement blir dannet ved en brenning- og oppmalingsprosess hvor kalkstein er hovedråvaren. Sementen består av ulike klinkermaterialer som  $C_3S$ ,  $C_2S$  og  $C_3A$ , som i ulik grad bidrar til fasthetsutvikling (Kitazume og Terashi, 2013). I dag er Standard Portland sement den mest benyttede sementtypen for stabilisering av leire (Norsk Geoteknisk Forening, 2012).

### Hydratisering

Når sement blandes inn i jord reagerer sementen med porevannet ved en hydratiseringsprosess som danner en hard sementpasta. Dette er en eksotermreaksjon hvor varme blir frigitt. Et reaksjonsprodukt av hydratiseringsprosessen er en fast kalsium-silisium-hydrat-fase (C-S-H-fase) som bidrar til fasthet, stivhet og bestandighet i materialet (Norsk Geoteknisk Forening, 2012). I tillegg dannes kalsiumhydroksid ( $Ca(OH)_2$ ), som bidrar til pozzolanreaksjon-

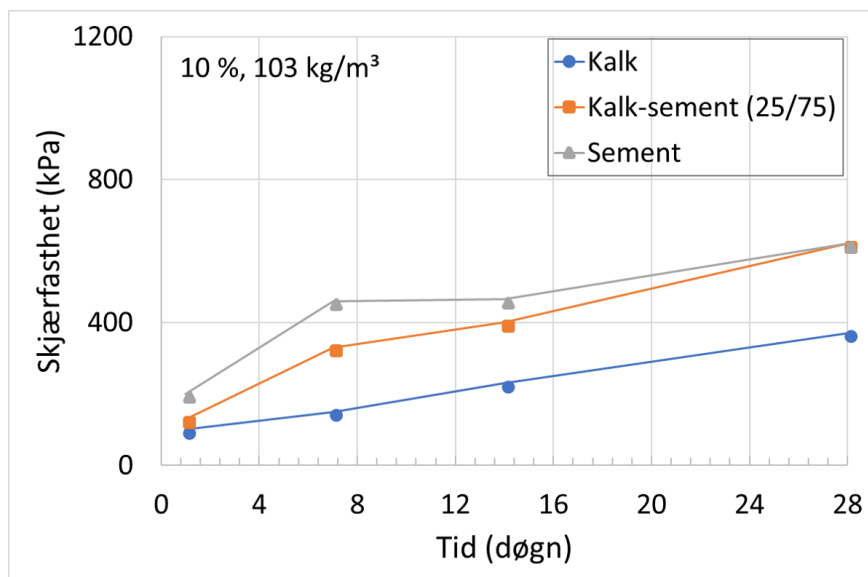
ner på samme måte som kalken. Ligning 3.4 nedenfor beskriver reaksjonen mellom sement og vann (Kitazume og Terashi, 2013), og ligning 3.5 viser andel vann som forbrukes i reaksjonen (Åhnberg et al., 1995).



$$\text{Vekt} \quad 100g \quad + \quad 25g \quad \rightarrow \quad 100g \quad + \quad 25g \quad (3.5)$$

## Fasthetsutvikling

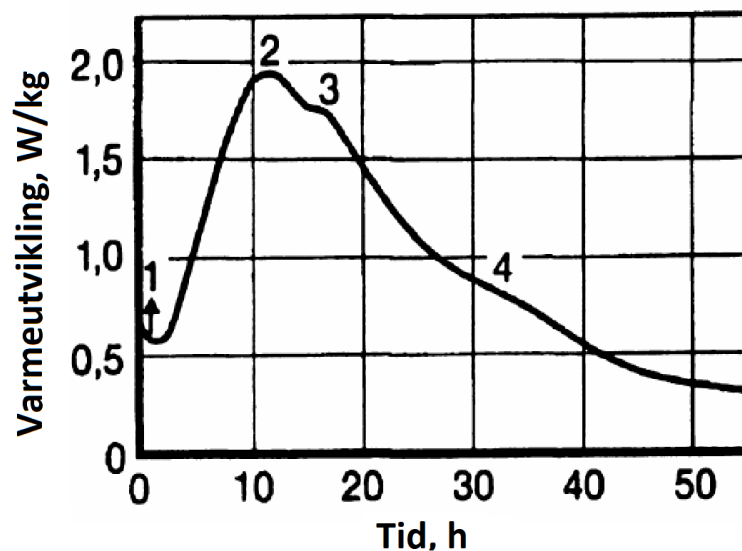
Til forskjell fra kalk danner sement en rask fasthetsutvikling hvor det meste av fastheten er oppnådd etter noen dager. På kort sikt vil derfor sementen oppnå en høyere fasthet enn kalken. Dette er blant annet vist i figur 3.2, hvor skjærfastheten har blitt målt for kvikkleire stabilisert med kalk, sement og kalksement (Åhnberg et al., 1995). Prøvene stabilisert med sement og kalksement har blitt herdet ved 8 °C, mens prøvene stabilisert med kalk har blitt herdet ved 20 °C. Reaksjonsprosessen i kalken foregår derimot over en mye lengre periode enn reaksjonsprosessen i sementen, og tidligere studier utført av Åhnberg et al. (1995), viser at kalk kan oppnå like høy fasthet som sement på lang sikt. Sementreaksjonen vil normalt være over i løpet av 1 til 3 måneder, mens kalkreaksjonen kan pågå i mange måneder, blant annet avhengig av tilgjengelig mengde silisium og alumina (Janz og Johansson, 2002).



Figur 3.2: Skjærfasthetsutvikling for stabilisert kvikkleire, forsøk utført av Åhnberg et al. (1995). Prøvene stabilisert med sement og kalksement har blitt herdet ved 8 °C, mens prøvene stabilisert med kalk har blitt herdet ved 20 °C.

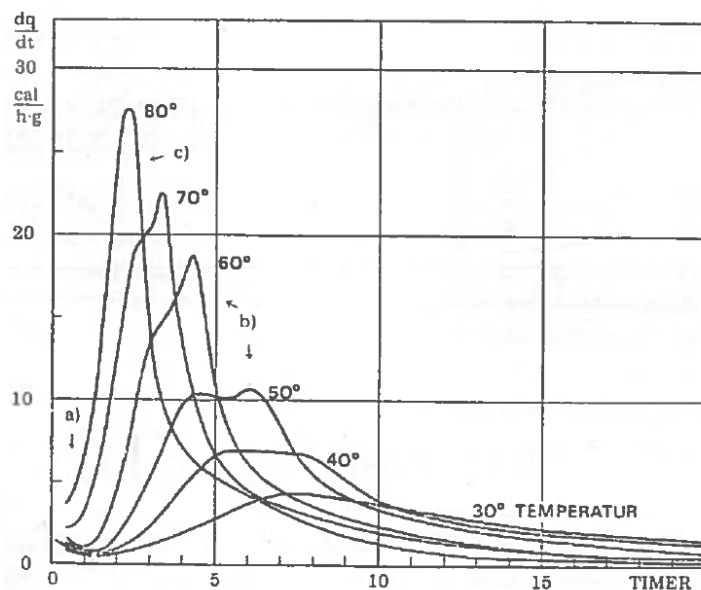
## Varmeutvikling

Sementen avgir varme ved at lettløselige salter løses opp, og totalt vil omtrent  $450 \text{ kJ/kg}$  varme bli avgitt (Boynton, 1980). Varmeutviklingen er avhengig av sammensetning og kornstørrelse av sementen, materialegenskapene til leira og temperaturen (Jacobsen et al., 2016). Figur 3.3 viser isoterm varmeutvikling for sement ved  $20^\circ\text{C}$  (Taylor, 1990). Umiddelbart etter innblanding vil reaksjonen avgi noe varme når lettløslige salter løses opp. Denne varmeutviklingen er derimot liten, og først etter noen timer vil reaksjonshastigheten øke. Etter ca. 10 timer når den sitt maksimum med en varmeutvikling på ca.  $1,9 \text{ W/kg}$ . Reaksjonen avtar deretter raskt, men vil fortsette å avgi noe varme så lenge sementen reagerer med vann. Hydratiseringen av sement vil kunne gi en temperaturøkning på ca.  $5^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}$  (Åhnberg et al., 1995).



Figur 3.3: Isoterm varmeutvikling for Portland sement ved  $20^\circ\text{C}$  (Taylor, 1990).

Reaksjonshastigheten av sementreaksjonene er avhengig av temperaturen. Dette er vist i figur 3.4, hvor økt herdetemperatur bidrar til økt hastighet på varmeutviklingen og dermed økt reaksjonshastighet (Jacobsen et al., 2016). Ettersom varmeutviklingen ved lesking av kalk er både høy og rask, se avsnitt 3.1, vil varmeutviklingen av kalkreaksjonen bidra til å øke reaksjonshastigheten i sementen, og gi en tidligere økning av fastheten (Christensen et al., 1998).



Figur 3.4: Isoterm varmeutvikling for Portland sement ved ulike temperaturer (Jacobsen et al., 2016).

### 3.3 Oppsummering

Tabell 3.1 oppsummerer egenskapene til kalk og sement ved total varmeutvikling, temperaturøkning og reaksjonshastighet. Valg av bindemiddel bør vurderes opp mot hva som er mest kritisk i hvert enkelt tilfelle, og faktorer som fasthetsutvikling, temperaturutvikling og oppnådd fasthet bør vurderes (Åhnberg, 2006).

Tabell 3.1: Reaksjonshastighet, varmeutvikling og temperaturøkning ved hydratisering av kalk og sement (Boynton, 1980; Hassibi, 1999; Åhnberg og Pihi, 1997; Åhnberg et al., 1995).

Bindemiddel	Total varmeutvikling	Tid før maksimal reaksjonshastighet	Temperaturøkning
Kalk	1163 kJ/kg	ca. 5 minutter	40 °C - 60 °C
Sement	450 kJ/kg	ca. 10 timer	5 °C - 10 °C

### 3.4 Teoretisk varmeutvikling ved adiabatisk forhold

En adiabatisk prosess beskriver en prosess hvor det ikke skjer noe varmeutveksling mellom et system og omgivelsene. En rekke forsøk har blitt utført på hydratisering av kalk og sement under adiabatisk forhold for å finne total varmeutvikling. Figur 3.5 viser et eksempel på

et forsøk utført av Åhnberg et al. (1995), hvor akkumulert varmeutvikling for en standard sement under adiabatisk forhold er vist.

Ettersom den totale varmeutviklingen i kalk og sement er kjent, se tabell 3.1, er det mulig å beregne øvre grense for temperaturøkning ved hydratisering av kalk og sement i leire. Den adiabatisk temperaturøkningen beregnes ved (Jacobsen et al., 2016):

$$\Delta T = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\delta \cdot C_p} \quad (3.6)$$

hvor

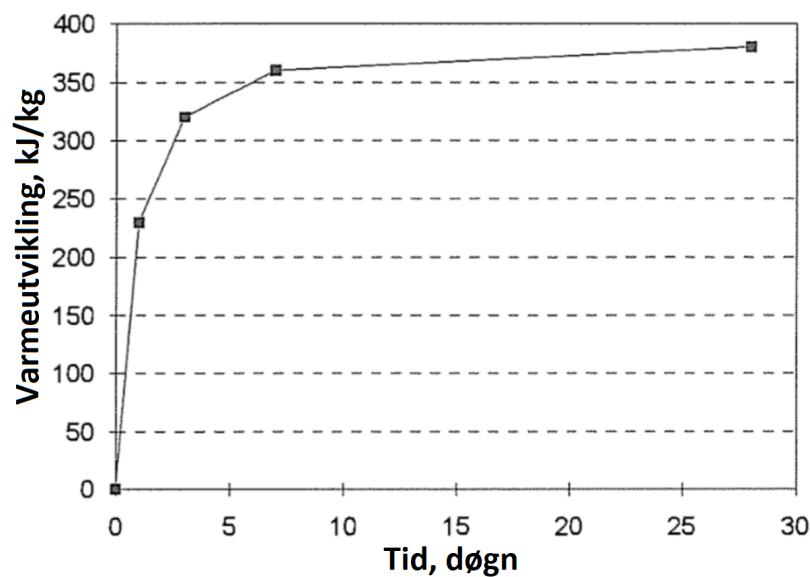
$Q_{\infty}$  = Varme per enhet kalk/ement ( $\text{kJ/kg}$ )

$\delta$  = Densitet av leire ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  = Spesifikk varmekapasitet i kalksementstabilisert leire ( $\text{kJ/kgK}$ )

$C$  = Mengde bindemiddel per  $\text{m}^3$  leire ( $\text{kg/m}^3$ )

Dersom varmekapasiteten til materialet er  $1,5 \text{ kJ/kgK}$  og densiteten til leira er  $1900 \text{ kg/m}^3$ , vil man ved tilsetning av  $80 \text{ kg}$  kalk per  $\text{m}^3$  leire, oppnå en maksimal temperaturøkning på  $33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tilsvarende vil man ved tilsetning av lik mengde sement, oppnå en maksimal temperaturøkning på  $12,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Det er dermed kalken som bidrar til det meste av temperaturøkningen i grunnen.



Figur 3.5: Akkumulert varmeutvikling under adiabatisk forhold for standard sement (Åhnberg et al., 1995).



# Kapittel 4

## Temperatureffekter ved herding

Ved installasjon av kalksementpeler reagerer bindemiddelet med jorden og det genereres varme ved en hydratiseringsprosess. Som beskrevet tidligere, fører varmen til at reaksjonene i bindemiddelene økes, og man oppnår en høyere fasthet på kortere tid. Den totale effekten av disse prosessene er derimot ikke fullstendig kjent. Dette kapitlet beskriver tidligere forskning som har blitt utført på temperatureffekter ved herding. For å oppnå en bedre forståelse er det viktig å:

1. Vite temperaturforløpet i felt
2. Forstå sammenhengen mellom herdetemperatur, herdetid og oppnådd fasthet

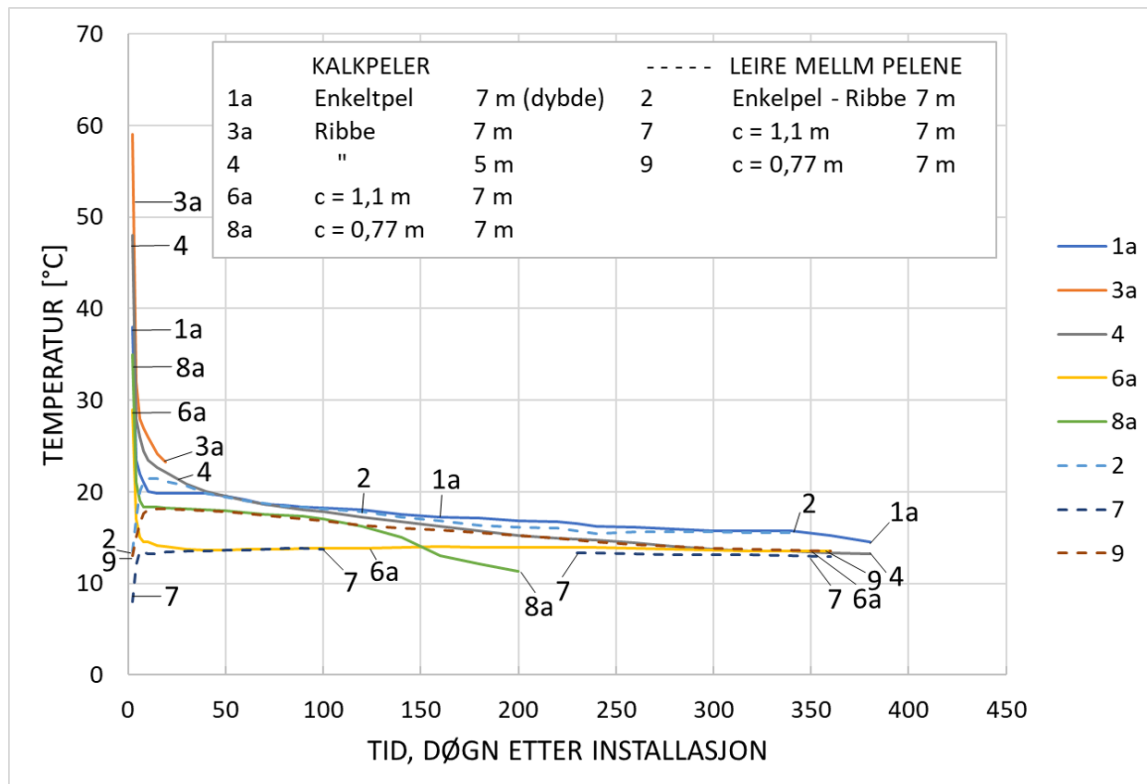
### 4.1 Oppnådd temperatur i felt

Oppnådd temperatur i felt har ved et begrenset antall forsøk opp gjennom årene blitt målt ved å sette ned temperatursensorer i og mellom kalksementpeler. I 1984 utførte Kujala (1984) et forsøk hvor temperatursensorer ble installert i kalkpeler. Rett etter installasjon ble det målt en gjennomsnittlig temperatur på ca. 100 °C. Etter 10 døgn hadde temperaturen falt til ca. 10 °C. Det er for dette forsøket ikke kjent hvor stor mengde kalk som ble benyttet.

## Forsøk utført av Åhnberg og Holm i 1983

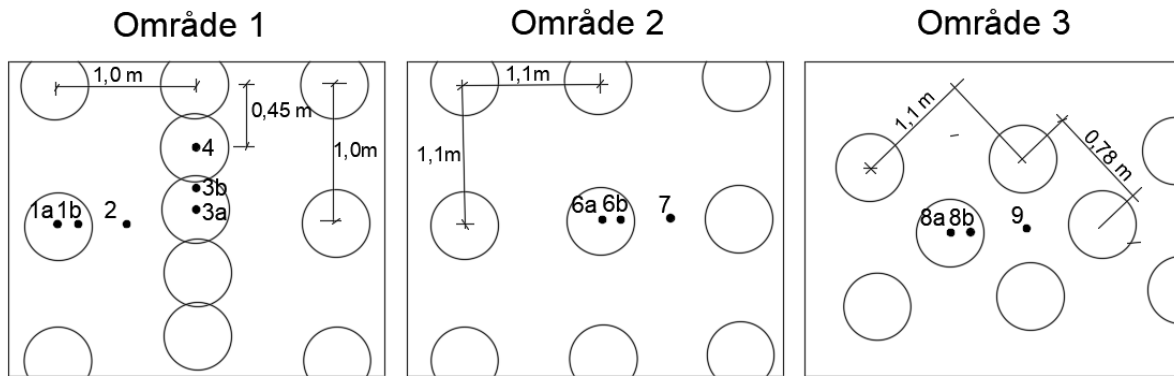
Et lignende forsøk på kalkpeler ble utført av Åhnberg og Holm (1987) i 1983. Temperaturen ble målt for tre ulike felt, med både enkelribber og singulærpeler i firkant- og trekantmønstre. Beskrivelse av installasjonsmønstre og plassering av de ulike temperatursensorene er vist i figur 4.2. For dette forsøket var kalkmengden ca.  $82 \text{ kg/m}^3$  leire, og området som ble testet bestod av bløt leire. Figur 4.1 viser resultater av målingene for sensorer plassert til halve peldybden, dvs. 7 m under bakkenivå, i og mellom pelene. Resultatene viser at den maksimale temperaturen varierte mellom  $29^\circ\text{C}$  -  $59^\circ\text{C}$ , avhengig av plassering av temperatursensorene. Sensor 3 og 4, som var plassert i senter av ribbe, oppnådde høyest temperatur.

Sammenlignet med målingene utført av Kujala (1984), ble den maksimale temperaturen i kalkpelene, relativt sett, lav. Årsaker til dette kan i følge Åhnberg og Holm (1987), være at temperatursensorene først ble installert 2 til 4 timer etter installasjon av kalkpelene. I tillegg er det sannsynlig at mengden bindemiddel er ulik for de to tilfellene. Etter ca. én uke var temperaturen i pelene og temperaturen i leira mellom pelene jevnet ut. Temperaturen holdt seg deretter relativt stabilt, og etter 8 måneder ble det målt en temperatur på  $14^\circ\text{C}$  -  $16^\circ\text{C}$ .



Figur 4.1: Temperaturutvikling i og mellom kalkpeler ved ulike tidspunkt. Modifisert fra Åhnberg og Holm (1987).



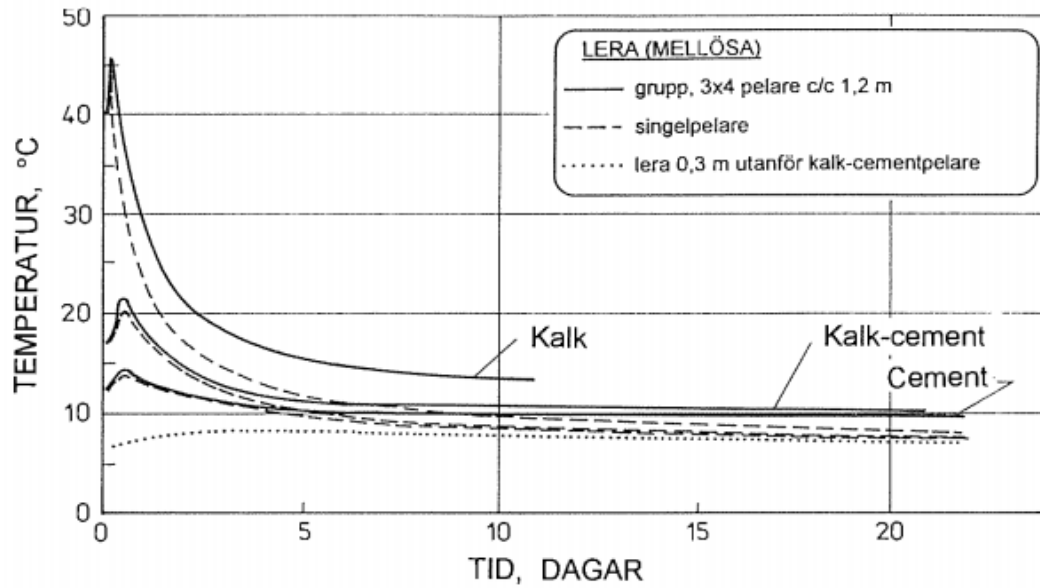


Figur 4.2: Plassering av temperatursensorene. Figur modifisert fra Åhnberg og Holm (1987).

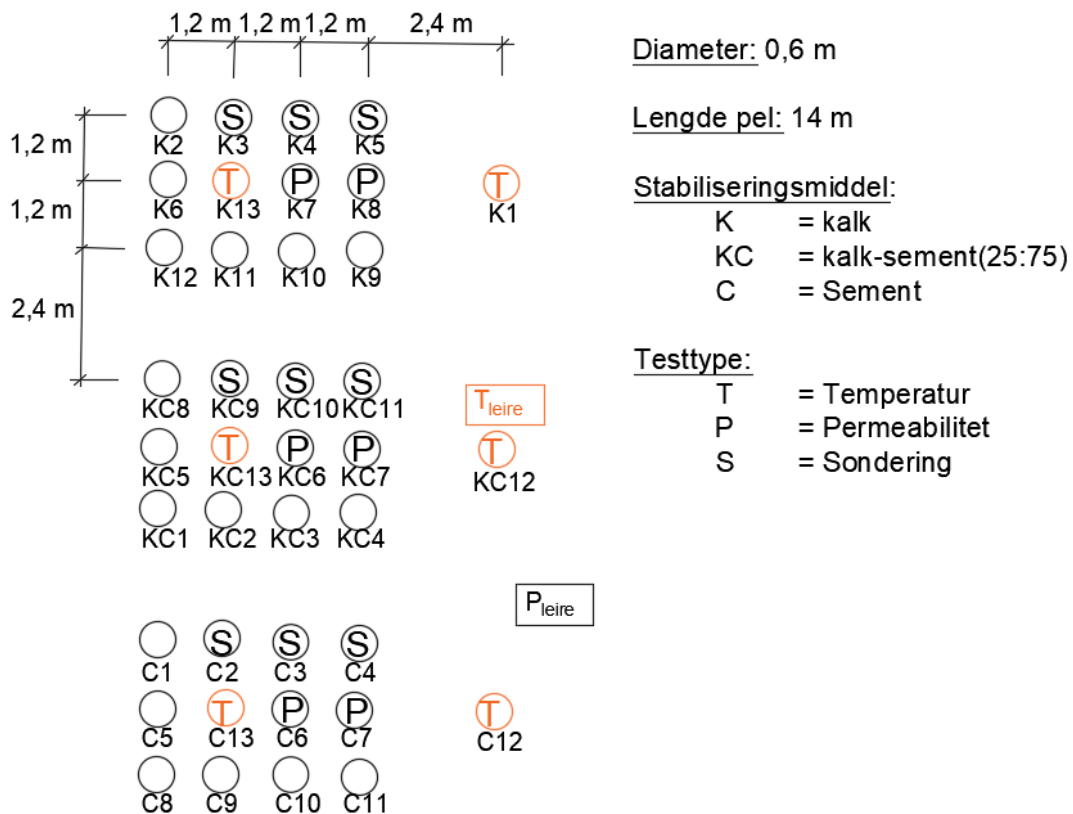
### Forsøk utført av Åhnberg m.fl i 1995

Et annet forsøk ble utført av Åhnberg et al. (1995) i 1995 på leire fra Lille Mellösa. I forsøket ble temperaturen målt for pelers stabilisert med kalk, sement og kalk-sement med blandingsforhold 25/75. Mengde innblandet bindemiddel var  $90 \text{ kg/m}^3$  for alle tilfellene, og pelene ble installert i firkantmønster eller som singulærpelers, slik figur 4.4 viser. Resultatene av dette forsøket er vist i figur 4.3, hvor temperaturen ble målt i dybde  $9 \text{ m}$ . Temperatursensorene var plassert i senter av pelene, med unntak av én sensor plassert i leiren, ca.  $0,25 \text{ m}$  utenfor en singulærpel. På samme måte som forsøket utført i 1983, viser målingene at temperaturen steg raskt de første døgnene etter installasjon. Etter ca. 5 døgn hadde temperaturen deretter sunket til en stabil temperatur på ca.  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , som ble opprettholdt over en lengre tidsperiode.

Forsøkene beskrevet ovenfor viser at det er en betydelig forskjell i temperaturen før og etter installasjon av kalksmentpelers, også etter lengre tids herding. I tillegg til forsøkene beskrevet ovenfor har det blitt utført noe forskning i Japan, blant annet av Enami et al. (1985), referert i (Kitazume og Terashi, 2013).



Figur 4.3: Temperaturutvikling i pelar stabilisert med kalk, sement og kalk-sement med blandingsforhold på 25/75. Forsøk utført av Åhnberg et al. (1995).



Figur 4.4: Installasjonsmønster og plassering av temperatursensorer. Figur modifisert fra Åhnberg et al. (1995).

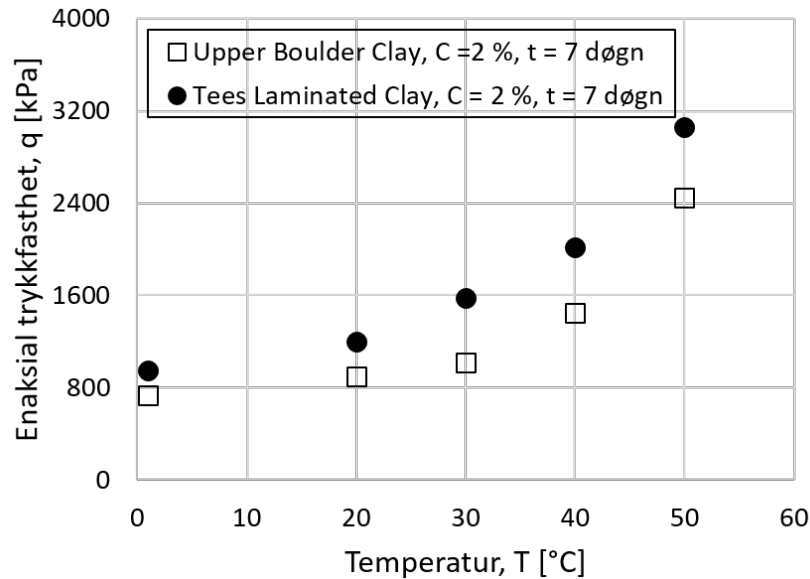
## Faktorer som påvirker temperaturforløpet

Forsøkene ovenfor viser også, til tross for en lignende trend, at det er store usikkerheter knyttet til oppnådd temperatur i jorden, og at store variasjoner fremkommer ved målinger. Dette kan skyldes at varmeutviklingen i felt er avhengig av en rekke faktorer. Blant annet vil installasjonsmønstre og plassering av kalksementpelene ha stor betydning for produksjon og lagring av varmen (Christensen et al., 1998). Dersom pelene installeres tett vil også jorden bli oppvarmet av tidligere installerte pelers, og pelene vil dermed ha en høyere starttemperatur (Åhnberg og Holm, 1987). Videre vil stabiliseringsmengde og -type være avgjørende for hvor stor varme som utvikles. Lesking av kalk vil for eksempel, som beskrevet tidligere, produsere mer varme enn sementreaksjonene. Dette er blant annet vist i figur 4.3, i forsøket utført av Åhnberg et al. (1995), hvor kalkpelene oppnådde en maksimal temperatur på 45 °C rett etter installasjon, mens sementpelene oppnådd en maksimal temperatur på 14 °C ca. et døgn etter installasjon. Mengde varmeutvikling er også avhengig av innblandingsprosessen, hvor god innblanding fører til bedre kontakt mellom kornene i bindemiddelet og leirmineralene, og dermed større reaksjonshastighet og høyere temperatur (Kitazume og Terashi, 2013). Temperaturen i den omkringliggende leira og de termiske materialparameterne til leira, vil også ha betydning for hvilken temperatur som oppnås (Åhnberg og Holm, 1987).

Det er hittil publisert et begrenset antall forsøk med måling av temperatur i kalksementpeler i felt, og flere forsøk vil være nødvendig for å få større innsikt i hvordan de ulike faktorene påvirker temperaturforløpet.

## 4.2 Oppnådd fasthet for ulike herdetemperaturer

Det er ved en rekke tilfeller utført forsøk med oppnådd fasthet i kalksementstabilisert leire herdet under ulike temperaturer (eks. Enami et al. 1985; George et al. 1992; Bell 1996). Figur 4.5 viser et forsøk utført av Bell (1996), hvor to ulike leirer fra nordøst i England har blitt stabilisert med 2 % kalk og herdet ved ulike temperaturer. Resultatene av forsøket viser at en høyere fasthet ble oppnådd for høyere herdetemperatur. Lignende forsøk med oppnådd fasthet for ulike herdetemperaturer, har videre blitt benyttet for å utvikle sammenhenger for oppnådd modning, slik neste avsnitt beskriver.



Figur 4.5: Fasthetsutvikling, ved enaksial trykkfasthet, for kalkstabilisert leire herdet under ulike temperaturer, (Bell, 1996). (Modifisert figur).

### 4.3 Modningstall

Sammenhengen mellom herdetid, herdetemperatur og oppnådd fasthet og stivhet kan beskrives ved et modningstall. Modningstallet har lenge blitt benyttet for betongteknologi, og har senere også blitt tilpasset for å gjelde for herding av kalksementstabilisert leire. Åhnberg og Holm (1987) foreslo i 1987 formel 4.1a for modningstallet, mens Babasaki et al. (1996) (referert i Kitazume og Terashi 2013), i 1996 foreslo formel 4.1b. Felles for de utarbeidede formlene er at de har en logaritmisk beskrivelse, hvor temperaturen har stor innvirkning på kort sikt, og mindre betydning på lengre sikt (Kitazume og Terashi, 2013). Modningstallet er unikt for ulike leirer og bindemidler og beskrives ved en kurve.

$$M_{T1} = [20 + (T - 20)K]^2 \cdot \sqrt{t} \quad (4.1a)$$

$$M_{T2} = 2 \cdot \exp \frac{T - T_0}{10} \cdot t \quad (4.1b)$$

hvor

$T$  = Herdetemperatur (°C)

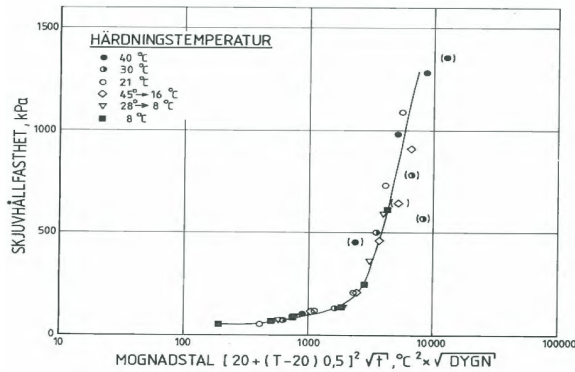
$t$  = Herdetid (døgn)

$K$  = Konstant avhengig av jordtype, bindemiddel og herdetemperatur.

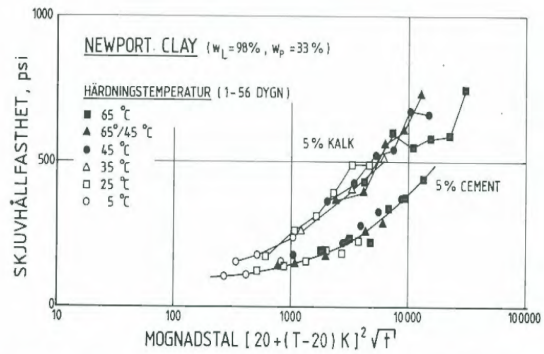
$T_0$  = Referansetemperatur (-10 °C)

Følgende avsnitt fokuserer på formelen utarbeid av Åhnberg og Holm (1987), ettersom denne er best beskrevet i teorien. Formelen er utviklet ved testing av skjærfasthet på kalkstabiliserte svenske leirer både i felt og laboratorium. Formelen har deretter blitt tilpasset slik at den også skal gjelde for andre typer leirer og andre type bindemidler. Ulike  $K$ -verdier har blitt funnet for ulike type jordarter og bindemidler ved å se på forsøk utført rundt om i verden. For leire stabilisert med sement vil en  $K$ -verdi på 0,5 stemme godt overens for både svenske leirer og leirer fra andre områder i verden. For leire stabilisert med kalk viser sammenstillingen at  $K$ -verdien varierer mellom 0,5 til 1,1 for ulike typer leirer. For svenske leirer og siltige leirer, er formelen best tilpasset for en  $K$ -verdi på 0,5. Disse  $K$ -verdiene er veldig generaliserte og basert på et lite utvalg målinger. I følge Åhnberg og Holm (1987) bør derfor flere forsøk utføres for å verifisere gyldigheten.

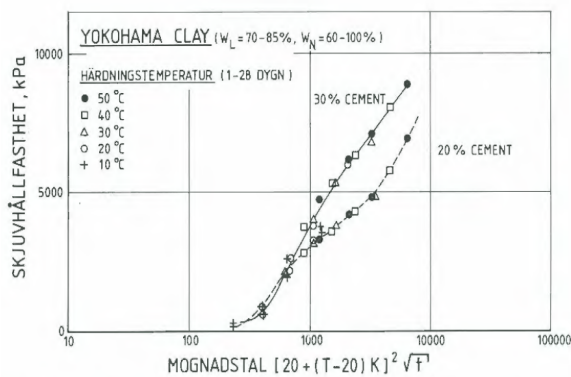
Sammenhengen mellom skjærfasthet og modningstallet er avhengig av type jordart og bindemiddel, og må bergenes for hvert enkelt tilfelle. Figur 4.6 viser sammenhengen mellom modning og skjærfasthet for fire ulike leirer fra Sverige, Australia, Japan og England (Åhnberg og Holm, 1987; Metcalf, 1963; Suzuki, 1982; Clare og Pollard, 1954). Fra figurene kan man se at forløpet for de ulike kurvene varierer, og at det også er relativt stor forskjell i oppnådd fasthet. I tillegg vil fastheten for en gitt modning være avhengig av type og mengde bindemiddel, som vist i figur 4.6b, 4.6c og 4.6d, hvor kurver med ulik mengde eller type bindemiddel er inkludert. På samme måte vil det også være mulig å oppnå en sammenheng mellom stivhet og modningstall (Åhnberg og Holm, 1987). Sammenhengen mellom modningstall og oppnådd skjærfasthet og stivhet er ikke studert for norske leirer, og det er derfor av interesse å finne ut mer om denne sammenhengen også for norske leirer.



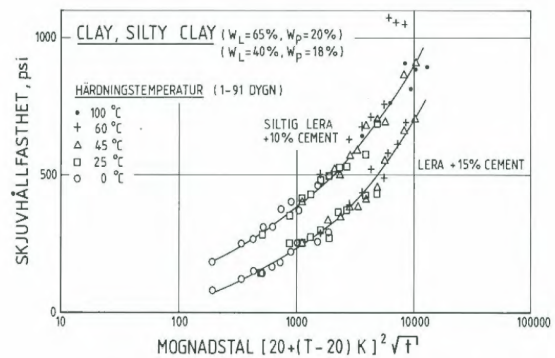
(a) Leirer fra Fittja i Sverige,  $K=0,5$ , mengde bindemiddel er 7,5 % kalk per tørrvekt av leira (Åhnberg og Holm, 1987).



(b) Leirer fra Newport, Australia (Metcalf, 1963).  $K=0,5$  (sement),  $K=0,4$  (kalk, herdetemp.  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $K=1,0$  (kalk, herdetemp.  $25\text{ }^\circ\text{C} - 65\text{ }^\circ\text{C}$ ).



(c) Leirer fra Yokohama, Japan (Suzuki, 1982).  $K=0,5$ .



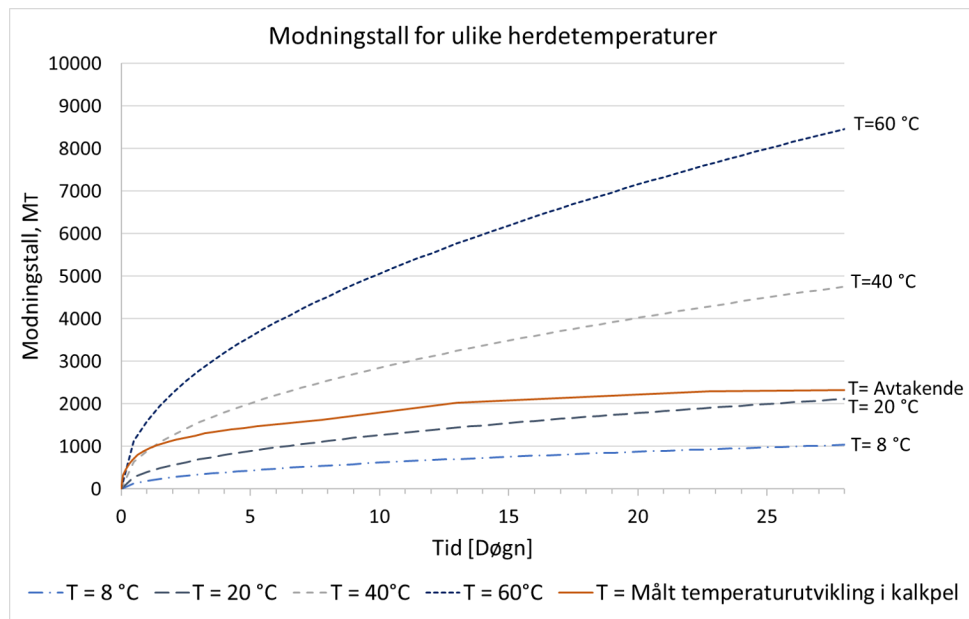
(d) Leirer fra Harmondsworth og Brockenhurst, England (Clare og Pollard, 1954).  $K=0,3$  (herdetemp.  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $K=0,5$  (herdetemp.  $25\text{ }^\circ\text{C} - 75\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Figur 4.6: Skjærfasthet mot modning for ulike type leir, hentet fra: (Åhnberg og Holm, 1987).

## 4.4 Bruk av modningstallet

Figur 4.7 viser modningstall mot tid for kurver med ulike konstante herdetemperaturer og for en kurve med avtakende herdetemperatur. Kurven med avtakende herdetemperatur er basert på feltmålinger av temperaturen til en kalkpel plassert i gruppe målt av Åhnberg et al. (1995), som vist i figur 4.3.

Grafen viser at man ved å herde en prøve ved  $8\text{ }^\circ\text{C}$  i 28 døgn får et modningstall på ca. 1030, gitt  $K=0,5$ . Det samme modningstallet oppnås ved herding i 7 døgn ved en herdetemperatur på  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Økningen i skjærfastheten for herding ved  $20\text{ }^\circ\text{C}$  er dermed ca. 4 ganger så rask som for herding ved  $8\text{ }^\circ\text{C}$ . Herding ved  $40\text{ }^\circ\text{C}$  vil på samme måte føre til over 10 ganger så



Figur 4.7: Modningskurver for konstante herdetemperaturer og for målt temperaturutvikling i felt (Åhnberg et al., 1995), ved formel 4.1a (Åhnberg og Holm, 1987).

rask økning i skjærfastheten som ved herding ved 8 °C (Åhnberg og Holm, 1987). Ved å vite sammenhengen mellom modning og skjærfasthet kan man dermed estimere standard 28-døgn fasthet på kortere tid og ved høyere temperatur.

Kurven med avtakende herdetemperatur, som beskriver modningstall for temperaturutvikling i felt, viser at modningstallet øker mest de første to døgnene etter installasjon. I dette intervallet er temperaturen i pelene høy, og kurven har omtrent samme stigningstall som kurven med konstant herdetemperatur på 40 °C. Deretter synker temperaturen og kurven flater ut. Etter 28 døgn er modningstallet ca. 2300. Dette tallet kan sammenlignes med oppnådd modning etter 28 døgn for 8 °C på  $M_T = 1030$ . Det er tydelig at man i felt oppnår en betydelig høyere modning, og dermed også høyere skjærfasthet og stivhet, enn fastheten og stivheten man oppnår i laboratoriet ved å herde prøver ved 8 °C.

Oppsummert kan modningstallet benyttes til å:

- Estimere 28-døgn skjærfasthet i laboratoriet ved å herde prøvene under høyere temperatur og kortere tidsrom.
- Estimere langtids fasthetsutvikling i pelen.
- Oppnå økt forståelse av sammenhengen mellom herdetemperatur, herdetid og oppnådd fasthet.

- Beregne oppnådd skjærfasthet i pelen dersom sammenhengen mellom skjærfasthet og modningstall for den aktuelle type leiren er kjent. Dette er også avhengig av at temperaturutviklingen i pelen er kjent.



## **Del II**

### **Felt- og laboratorieforsøk**



# Kapittel 5

## Temperaturmålinger i felt

I forbindelse med masteroppgaven har det blitt installert temperatursensorer i kalksementpeler for å måle temperaturutviklingen i felt.

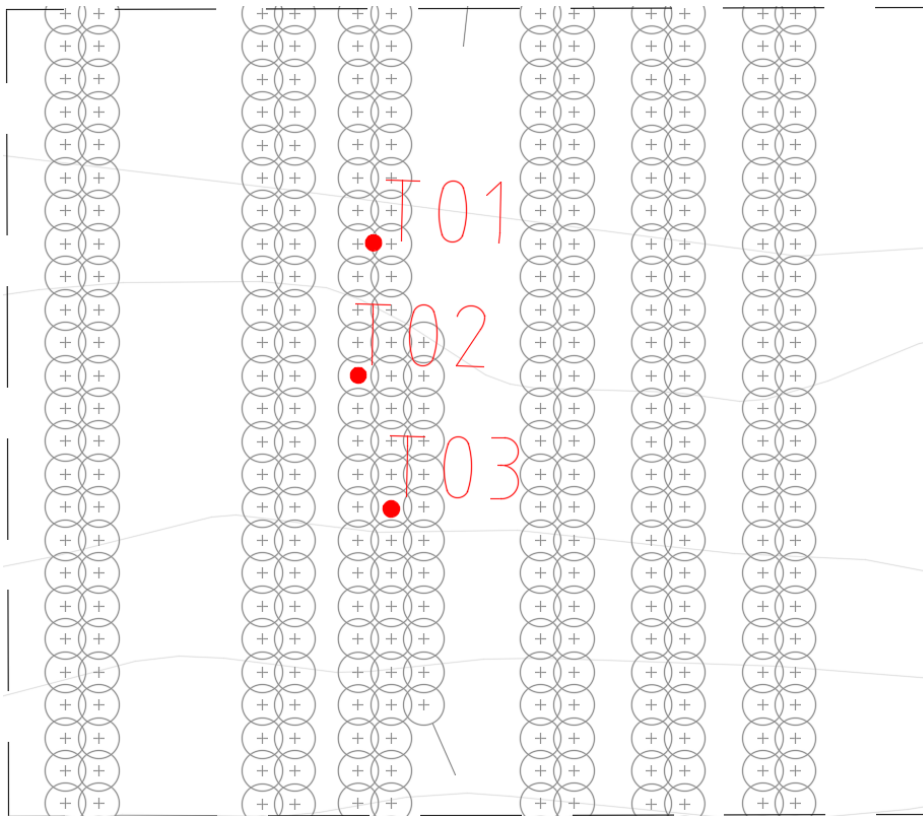
### 5.1 Beskrivelse av installasjon og grunnforhold

Temperatursensorene ble installert i forbindelse med nedsetting av kalksementpeler på et prosjekt i regi av NGI på Bellevue i Fredrikstad. Leiren på området er middels sensitiv, middels fast og har en tyngdetetthet på ca.  $17,8 \text{ kN/m}^3$ . Vanninnholdet i leira varierer og er ca. 35 % ned til dybde 10 m, og deretter ca. 42 % (Norges Geotekniske Institutt, 2017). Se vedlegg D for nærmere beskrivelse av materialet.

Det ble benyttet  $80 \text{ kg/m}^3$  bindemiddel, med 50 % kalk og 50 % sement. Pelene ble installert til ca. 20 m dybde.

### 5.2 Plassering av temperatursensorene

Figur 5.1 viser installasjonsmønster og plassering av temperatursensorene. For fullstendig pelinstallasjonsplan på Bellevue, se vedlegg E. Det ble i alt installert tre målere, hvor temperatursensor 1 (T01) er installert i senter av dobbelribbe, temperatursensor 2 (T02) i ytterkant av trippelribbe og temperatursensor 3 (T03) i senter av trippelribbe. For hver av målerne er

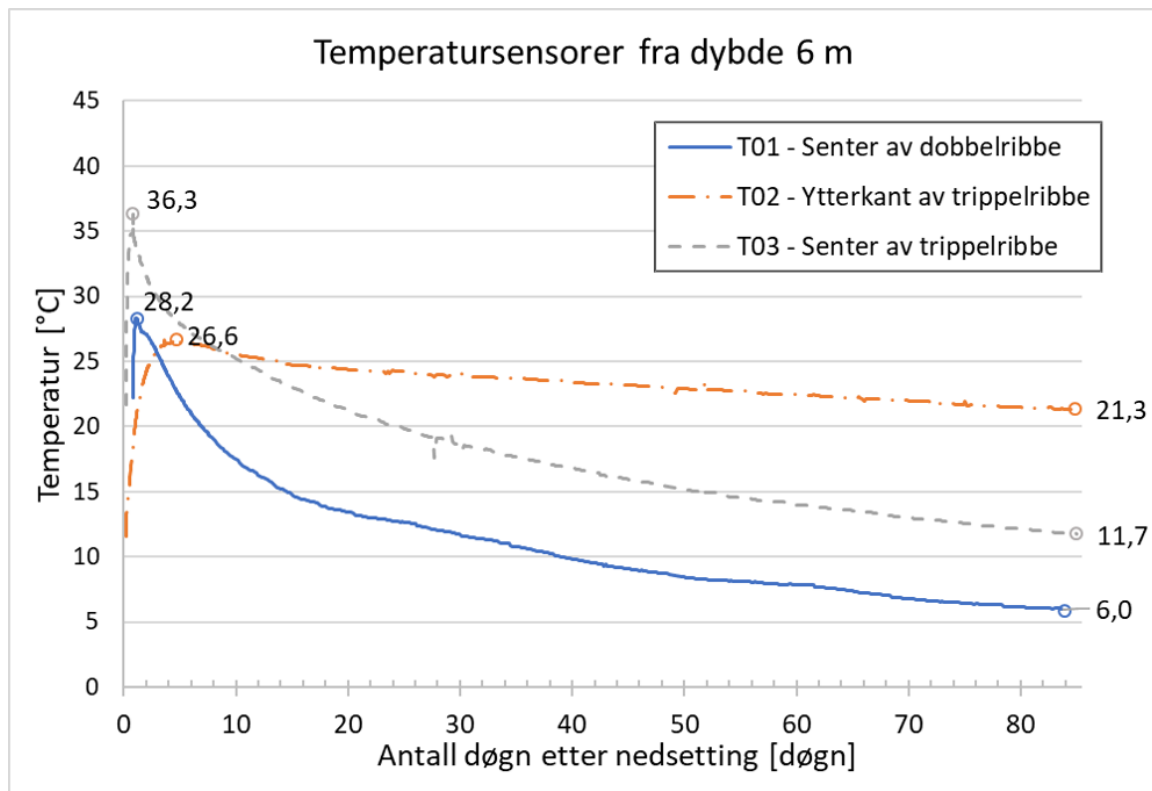


Figur 5.1: Plassering av temperatursensorer.

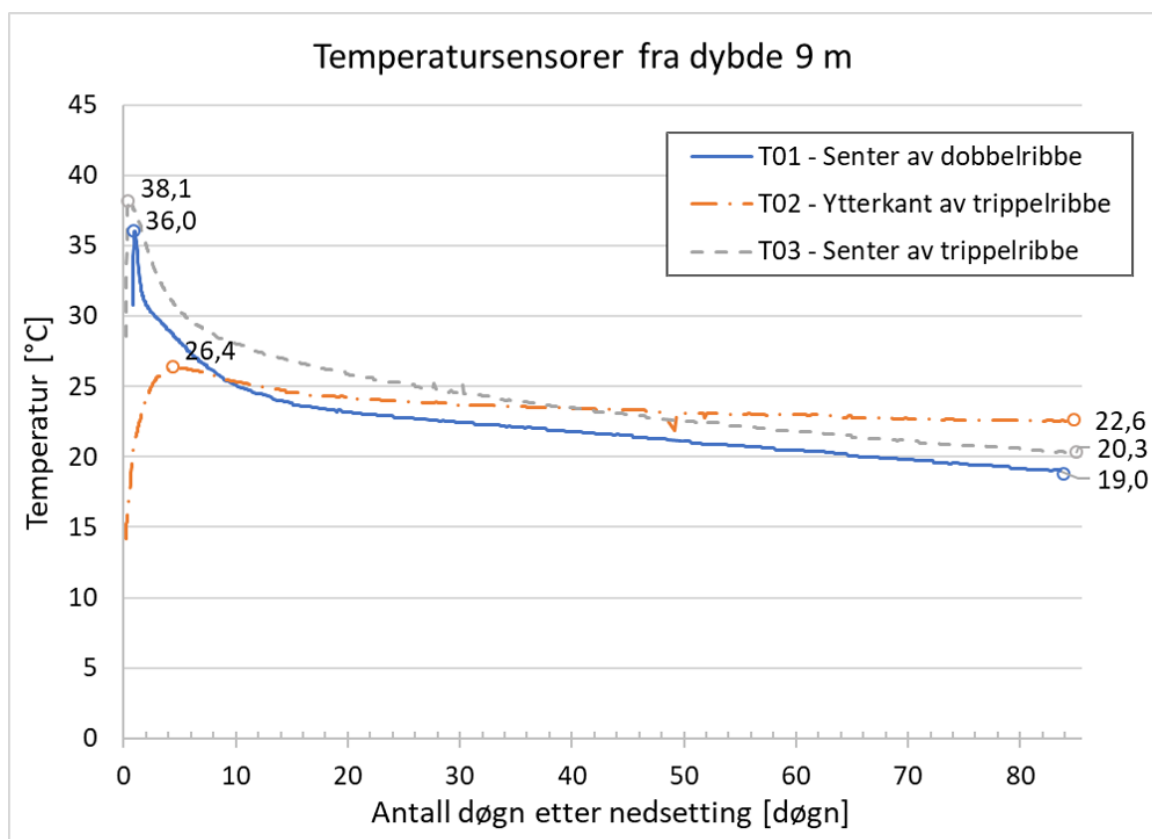
temperaturen logget i dybde 6 m, 9 m, 12 m og 15 m. Temperatursensorene ble installert 5. desember 2017, og temperaturen ble logget over en periode på ca. 85 døgn. Temperatursensor T01 ble satt ned ca. 11 timer etter installasjon av kalksementpelene, mens temperatursensor T02 og temperatursensor T03 ble satt ned ca. 5 timer etter installasjon.

### 5.3 Resultater

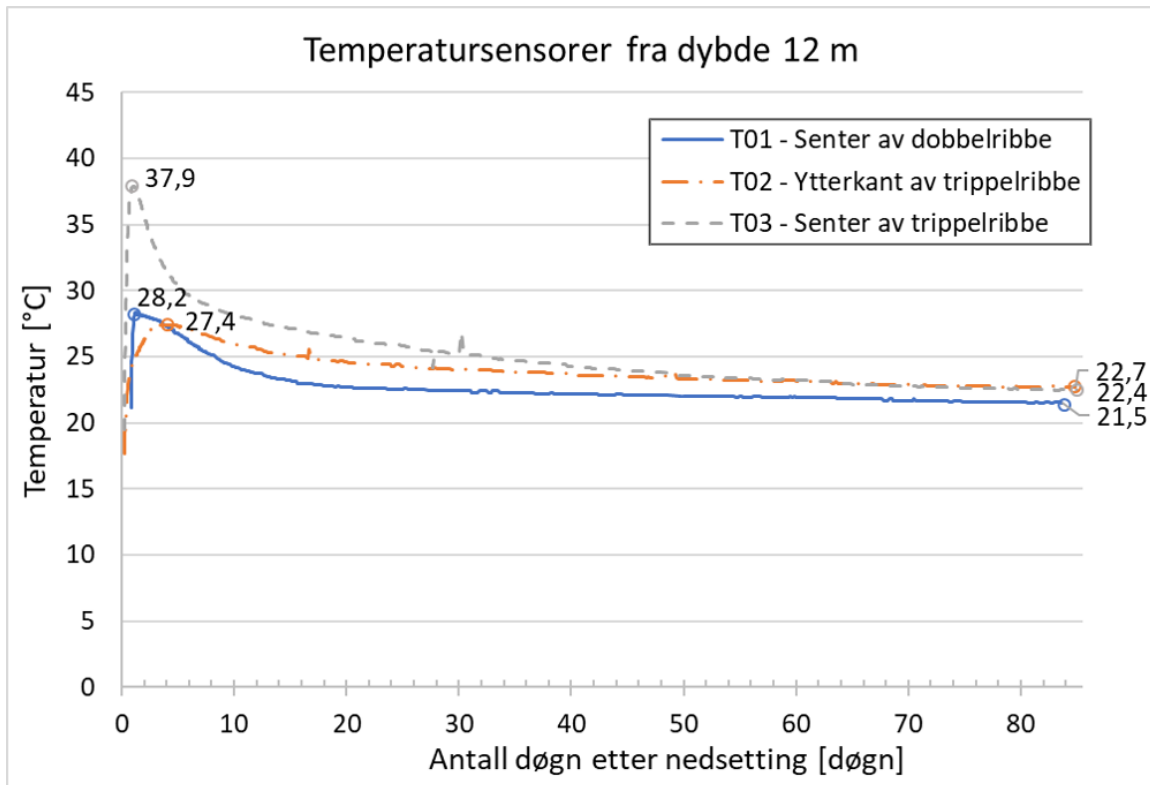
Figur 5.2, 5.3, 5.4 og 5.5 viser resultatene av temperaturmålingene for hver av de målte dybdene. Pelene oppnådde en maksimal temperatur på mellom 26 °C og 44 °C, avhengig av installasjonsmønster og dybde. For temperatursensorene installert i senter av ribbe (T01 og T03), ble maksimal temperatur oppnådd i løpet av de 2 første døgnene etter installasjon, mens temperatursensor T02, plassert i ytterkant av ribbe, oppnådde en maksimal temperatur etter ca. 5 døgn. Etter 85 døgn varierte temperaturen mellom 19 °C og 23 °C for målingene tatt i dybde 9 m og dypere. For målingene fra dybde 6 m varierte temperaturen mer, og lå på mellom 6 °C og 21 °C etter 85 døgn, avhengig av plassering av temperatursensorene.



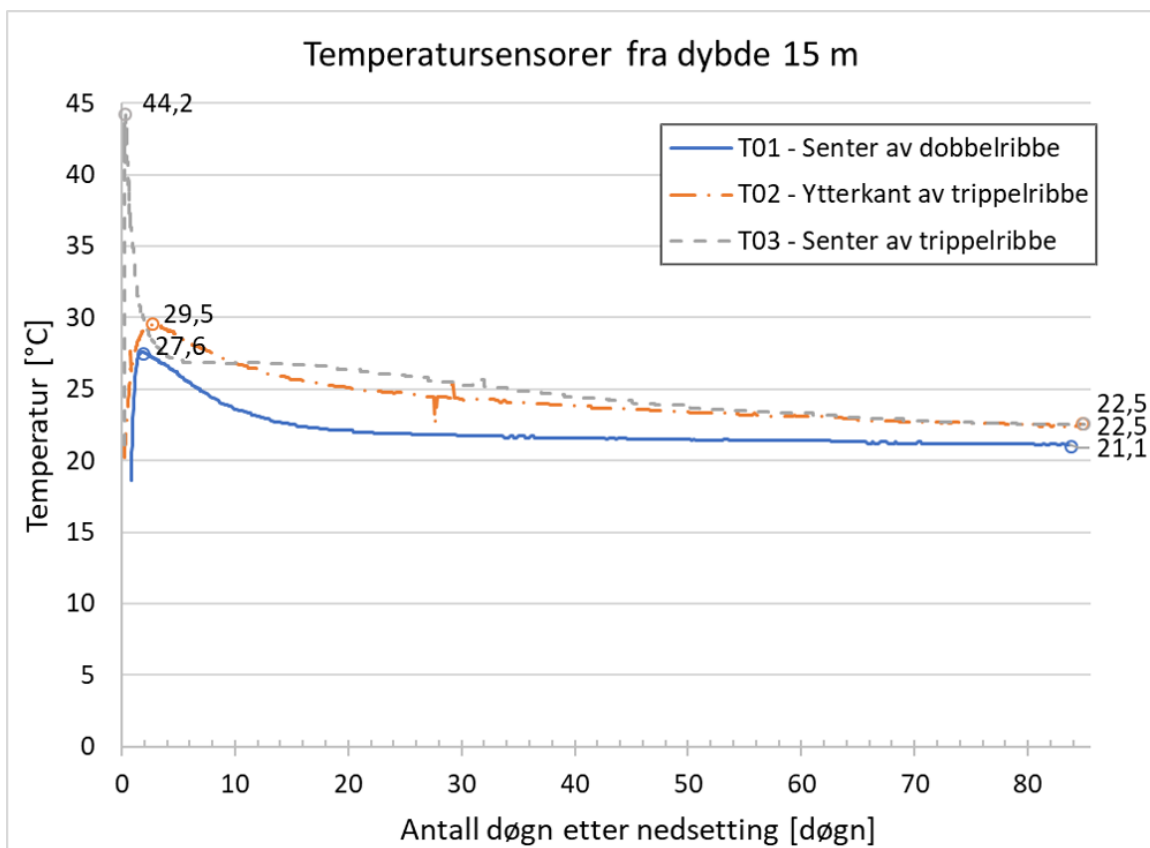
Figur 5.2: Temperaturmålinger fra dybde 6 m.



Figur 5.3: Temperaturmålinger fra dybde 9 m.



Figur 5.4: Temperaturmålinger fra dybde 12 m.



Figur 5.5: Temperaturmålinger fra dybde 15 m.

## 5.4 Diskusjon

Temperaturmålingene fra felt viser at temperaturen i kalksementpelene øker betydelig i forhold til temperaturen i grunnen. Høyest temperatur ble målt i senter av trippelribbene, hvor den maksimale temperaturen lå på mellom 36 °C og 44 °C, ca. 1-2 døgn etter installasjon. Temperatursensorene plassert i ytterkant av ribbe oppnådde lavere maksimal temperatur, og det tok også lengre tid før den maksimale temperaturen var oppnådd. Dette kommer av at varmetapet er større i ytterkant av ribben.

På sikt ble temperaturen i senter av trippelribbe og ytterkant av trippelribbe jevnet ut, og etter om lag 14 døgn var temperaturforskjellen mellom disse to liten. Temperaturen endrer seg deretter betydelig langsommere, og etter 85 døgn var temperaturen i pelene fremdeles høy. Dette tyder på at temperaturen i ribbene og i leiren mellom ribbene har blitt jevnet ut. Det vil da ikke være noe varmeutveksling mellom leira og kalksementpelene, og eneste varmetap vil være i topp og bunn av pelene. Desto lengre pelene er, jo mindre overflateareal relativt til volumet av pelen vil være eksponert, og jo mindre vil varmetapet være. Tilsvarende trend gjelder for temperaturen i senter av dobbelribbene (T01), hvor temperaturen holdes relativt stabil etter de 20 første døgnene.

Dersom man sammenligner temperaturøkningen i kalksementpelene med den teoretiske maksimale temperaturøkningen ved null varmetap, viser enkelte av målingene høyere temperatur enn hva som er teoretisk mulig. Ved null varmetap vil den maksimale temperaturendringen være 23 °C for forholdene på Bellevue. Se vedlegg C.3.1 for beregning. Det er derimot flere mulige årsaker til at temperaturøkningen i felt er høyere enn dette. For eksempel kan mengden innblandet bindemiddel mot dybden være ujevn, og det kan derfor være partier hvor mengden bindemiddel er høyere enn produksjonskravet. I tillegg vil overlapp mellom pelene føre til at den faktiske gjennomsnittlige mengden bindemiddel i realiteten er noe høyere enn 80 kg/m<sup>3</sup>.

## 5.5 Begrensninger

En begrensning ved resultatene er at temperatursensorene først ble installert 5 timer (T02 og T03) og 11 timer (T01) etter installasjon av pelene. Ettersom temperaturforløpet for de

første timene etter installasjon mangler, kan det være at temperaturen i pelene var høyere før målingene startet, og at den maksimale temperaturen dermed er høyere enn hva som vises i resultatene. Dette vil spesielt være gjeldene for temperaturen i senter av dobbelribbe (T01), hvor sensorene ikke ble installert før 11 timer etter installasjon av pelene. Ettersom temperatursensorene var kalde da de ble installert, er det naturlig å anta at det i tillegg tok noe tid før sensorene logget nøyaktig temperatur i pelene.

Temperaturmålingene fra dybde 6 m avviker fra de andre målingene, hvor både temperaturen sank raskere og temperaturen fra de ulike sensorene viste større spredning på sikt. Dette avviker fra hva man teoretisk vil forvente. Årsaken til at temperaturen sank raskere kan være at varmetapet mot overflaten er større for denne dybden, og at temperaturen i større grad blir påvirket av ytre faktorer. For eksempel er temperatursensorene plassert inni metallrør som stikker opp med ulik lengde over bakken. Ettersom sensorene er installert i desember kan kalde lufttemperaturer være noe av årsaken til den raske nedgang i temperaturen. Stor forskjell i temperaturen på sikt kan også skyldes mulige installasjonsfeil.

## 5.6 Oppsummering

Feltmålingene viser at temperaturen holdes høy over en svært lang periode, med temperaturer i grunnen på ca. 20 °C etter 85 døgn. Den høye temperaturen vil ha betydning for langtidsfastheten i kalksementpelene.



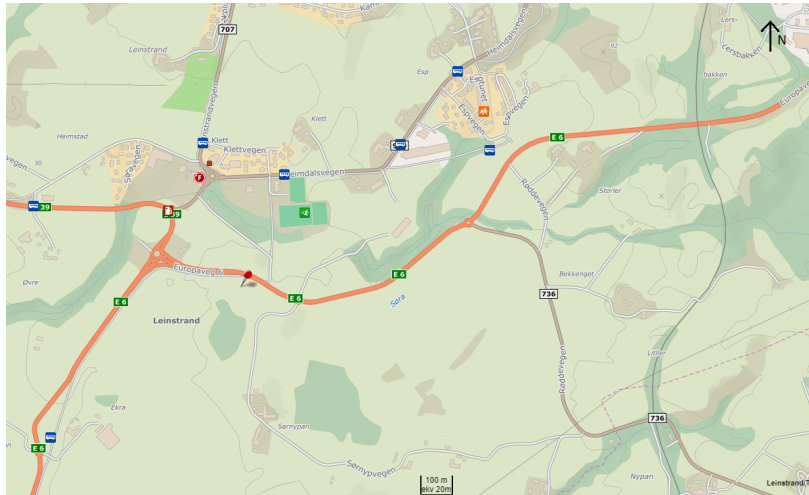
# Kapittel 6

## Herding ved ulike temperaturer i laboratorium

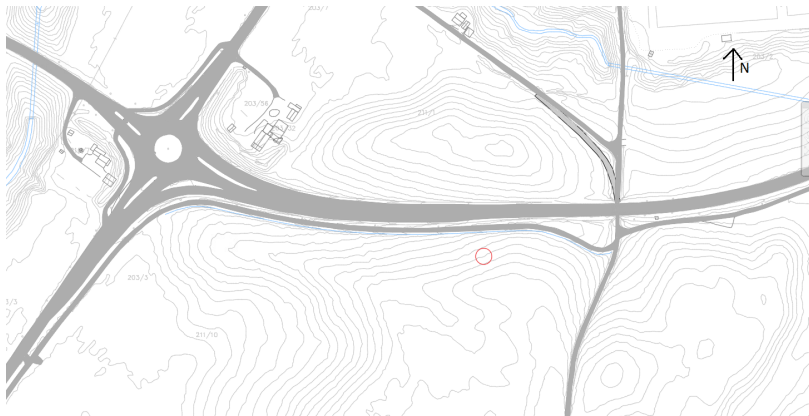
Det er gjennomført forsøk med herding av sementstabilisert og kalkstabilisert leire ved ulike temperaturer. Forsøk med herding av sementstabilisert leire ble gjennomført i prosjektoppgaven, og resultatene er sammenfattet i dette kapitlet. Formålet med forsøkene er å måle effekten av oppnådd stivhet og fasthet av det stabiliserte materialet, for herding under kontrollerte forhold ved ulike temperaturer.

### 6.1 Beskrivelse av materiale

Prøvematerialet er hentet fra anleggsområdet på Klett i forbindelse med utbygging av ny E6, ved prosjektet «E6 Trondheim-Melhus», hvor Statens Vegvesen er byggherre. Leiren er hentet fra ca. dybde 9,0 m - 9,5 m i en utgravd skråning, og er hentet i to omganger, henholdsvis i september 2017 og januar 2018. Figur 6.1 viser et oversiktskart over området hvor leiren er hentet fra. En mer detaljert plassering er vist i plantegning, figur 6.2, og ortofoto over området er vist i figur 6.3. Eksakte koordinater er beskrevet i tabell 6.1.



Figur 6.1: Leiren er hentet fra Klett. Rød markør viser i hvilket område leiren er hentet fra (Kartverket, 2017).



Figur 6.2: Plantegning av kryss på Klett i retning nord. Rød sirkel viser hvor materialet er hentet fra.



Figur 6.3: Ortofoto over utbyggingsområdet på Klett. Rød sirkel viser hvor prøvematerialet er hentet fra.

Tabell 6.1: Generell informasjon om opptak av materiale

<b>Dato for henting av materiale</b>	22.09.2017 og 29.01.2018
<b>Koordinater</b>	NORD: 7022077 ØST: 565571 (EUREF89, UTM sone 32)
<b>Dybde</b>	9,0 m - 9,5 m

Prøvematerialet er svært sensitivt og klassifiseres som kvikkleire. Den udrenert skjærfastheten er ca. 10 *kPa* - 15 *kPa*, og den omrørte skjærfastheten er ca. 0,2 *kPa*. Materialet har et vanninnhold på 35 % og en tyngdetetthet på  $\gamma = 18,8 \text{ kN/m}^3$ . Leiren er bløt og lite plastisk (Norges Geotekniske Institutt, 2014). Se vedlegg D for borprofil med nærmere beskrivelse av materialeegenskapene til leira.

## 6.2 Gjennomføring av laboratorieforsøket

Laboratorieforsøket går i hovedsak ut på å herde stabiliserte leirprøver under ulike temperaturer og måle oppnådd stivhet og fasthet i materialet etter et gitt tidsintervall. For disse forsøkene har fastheten blitt målt etter 28 døgn. Forsøkene med kalk og sement er begge utført med lik prosedyre slik at sammenligningsgrunnlaget er likt. Laboratorieforsøket består av tre deler, henholdsvis tilvirking av prøver, herding og testing av oppnådd stivhet og fasthet.

### Tilvirking av prøver

Tilvirking av prøver har blitt utført i henhold til Statens Vegvesens håndbok R210, rapport 225 - Kalksementstabilisering av leire i laboratoriet (Statens Vegvesen, 2014). Innblandet mengde bindemiddel er  $80 \text{ kg/m}^3$ , som tilsvarer 4,1 *vekt* - %. Leirmaterialet har blitt stabilisert med kalk og sement i to ulike forsøksperioder. Det har blitt benyttet «NORCEM standardsement FA Brevik» og «Hydratkalk VK», produktblad er vist i vedlegg G. For å finne nødvendig mengde bindemiddel beregnes volumet av leiren ut ifra våtvekt og tyngdetetthet.

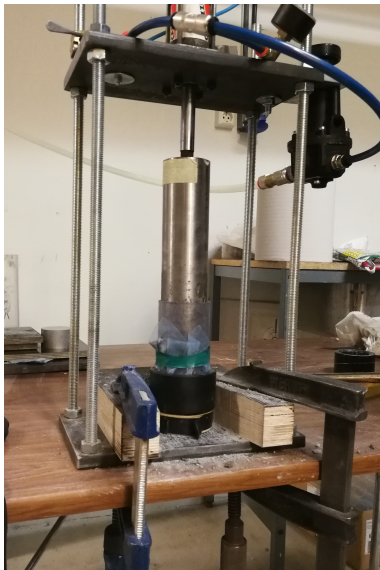
All leire og bindemiddel ble blandet sammen i en miksmaster før innstampingen startet. Prøvematerialet ble deretter stampet inn i plastsylindre med diameter 54 *mm* og høyde 10 *cm*. Innstampingen bestod av 5 lag av tilnærmet lik tykkelse hvor et trykk på 200 *kPa* ble påført ved hvert lag i 10 sekunder. Figur 6.4 viser et bilde av hvordan det stabiliserte materialet blir

stampet inn i prøvesylindrerne ved en komprimeringsmaskin. Plastsylindrerne ble smurt med vaselin på innsiden for å gjøre det enklere å skyve ut prøvene etter herding.

### Herding og testing av oppnådd styrke

Herding av prøvene har foregått ved henholdsvis  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  for sementprøvene og  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $77\text{ }^{\circ}\text{C}$  for kalkprøvene. Prøvene som herdet ved  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ble lagret i et kjølerom. For å oppnå stabile temperaturer for de høyere temperaturene ble det benyttet to varmeskap med vannfylte kjeler plassert inni. De tillagde prøvene ble pakket inn i diffusjonstett plast for å hindre at prøvene har full tilgang på vann. Dette ble gjort for at forsøket i størst mulig grad skal simulere virkelige forhold. Figur 6.5 viser hvordan prøvene herdet ved  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$  har blitt lagret.

Skjærfasthet og stivhet er målt etter 28 døgn ved enaksiale trykkforsøk. Resultatene har deretter blitt tolket.



Figur 6.4: Stamping av prøver ved en komprimeringsmaskin.

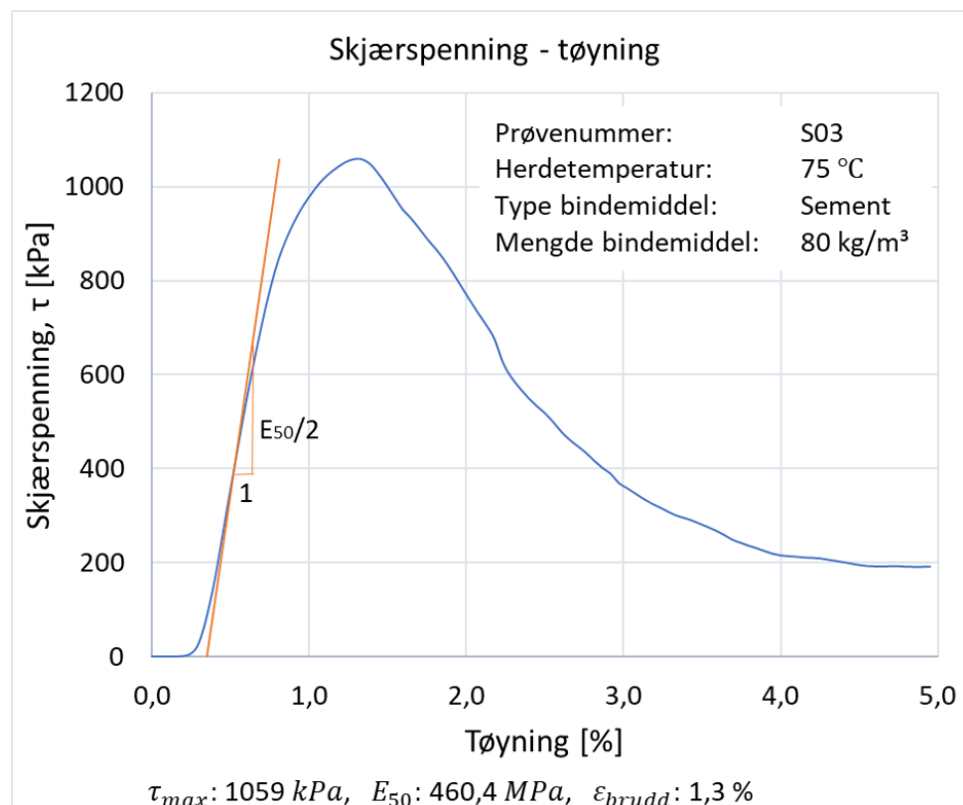


Figur 6.5: Lagring av prøver i kjele i varmeskap.

## 6.3 Resultater

Resultatene av laboratorieforsøkene, ved oppnådd skjærfasthet, stivhet og bruddtøyning fra enaksiale trykkforsøk er vist i tabell 6.2 for prøvene stabilisert med sement, og tabell 6.3 for prøvene stabilisert med kalk. Figur 6.7 viser resultatene plottet mot temperatur og modningstall. Formel 4.1a for utregning av modningstall, beskrevet i kapittel 4, har blitt benyttet. Faktoren  $K$ , har blitt valgt til 0,5 for både de kalkstabiliserte prøvene og de sementstabiliserte prøvene, ettersom denne verdien, ifølge Åhnberg og Holm (1987), er best tilpasset svenske leirer.

Skjærspenning-tøyningsforløpet for prøve S03 herdet ved 75 °C, er vist i figur 6.6. Resultatene av de andre prøvene viser tilsvarende forløp, og er vist i vedlegg A.1, tegning A1.1 til A1.6 for de sementstabiliserte prøvene, og A1.7 til A1.16 for de kalkstabiliserte prøvene. Vedlegg A.2 viser ulike samleplott for skjærspenning-tøyningsforløpet for prøvene.



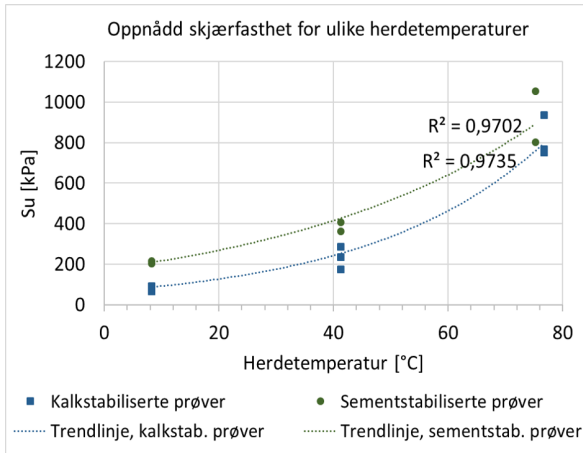
Figur 6.6: Skjærspenning-tøyningsplott for prøve S03.

Tabell 6.2: Resultater av laboratorieforsøket for sementstabiliserte prøver ved enaksiale trykkforsøk.

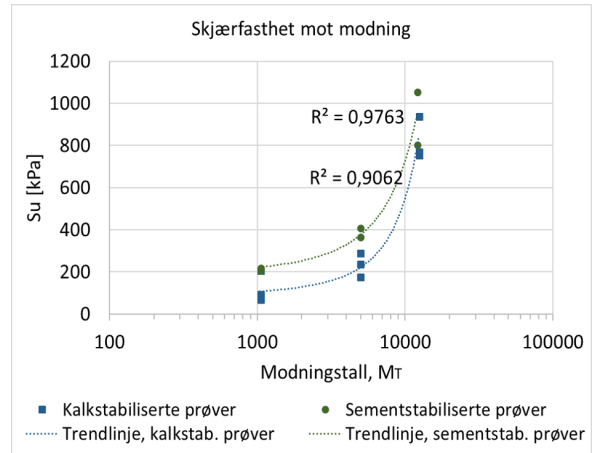
<b>Bindemiddel</b>	<b>Herdetemp. (°C)</b>	<b>Prøvenr.</b>	<b><math>S_u</math> (kPa)</b>	<b><math>E_{50}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{50}/s_u</math></b>	<b><math>\epsilon_{brudd}</math></b>
Sement	8	S02	210,1	35,0	166,7	2,2
		S05	222,8	39,1	175,4	2,1
	41	S01	370,1	97,4	263,2	1,4
		S04	413,2	121,5	294,1	1,2
	75	S03	1058,8	460,4	434,8	1,3
		S06	807,5	323,0	400,0	1,2

Tabell 6.3: Resultater av laboratorieforsøket for kalkstabiliserte prøver ved enaksiale trykkforsøk.

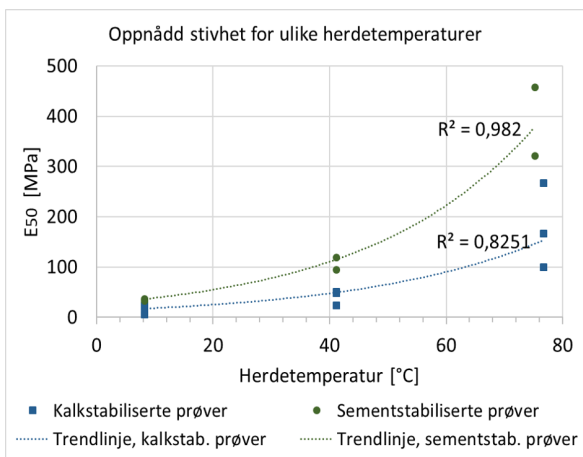
<b>Bindemiddel</b>	<b>Herdetemp. (°C)</b>	<b>Prøvenr.</b>	<b><math>S_u</math> (kPa)</b>	<b><math>E_{50}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{50}/s_u</math></b>	<b><math>\epsilon_{brudd}</math></b>
Kalk	8	K02	96,0	25,9	270,3	1,9
		K05	90,4	22,3	246,9	1,3
		K08	98,5	23,5	238,1	1,5
		K11	72,6	8,6	119,0	2,3
	41	K01	180,0	25,7	142,9	1,7
		K04	292,1	53,1	181,8	2,0
		K07	240,1	50,0	208,3	1,1
	77	K03	943,3	269,5	285,7	0,8
		K06	773,6	101,8	131,6	2,1
K09	757,7	168,4	222,2	1,7		



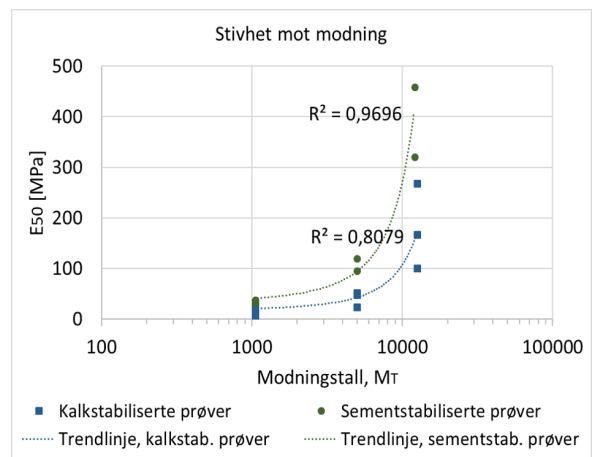
(a) Skjærfasthet mot herdetemperatur



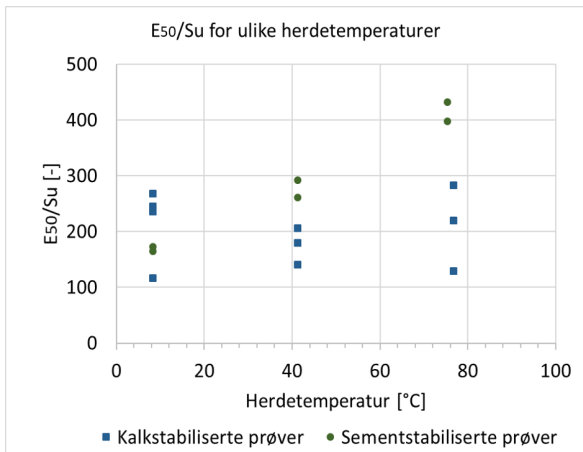
(b) Skjærfasthet mot modning



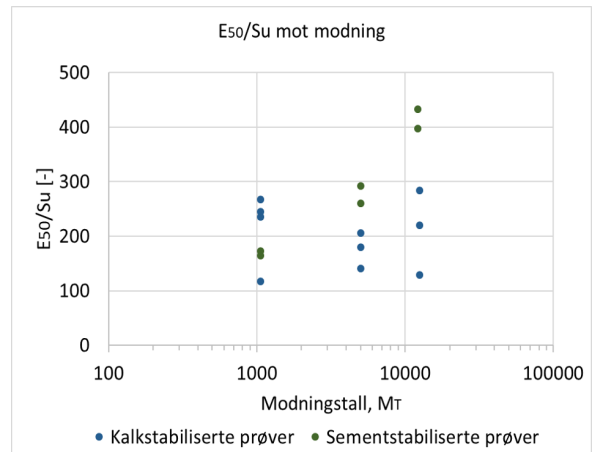
(c) Stivhet mot herdetemperatur



(d) Stivhet mot modning



(e)  $E_{50}/S_u$  mot herdetemperatur



(f)  $E_{50}/S_u$  mot modning

Figur 6.7: Resultater av laboratorieforsøkene.

## 6.4 Diskusjon

Resultatene av forsøkene viser at skjærfastheten og stivheten av materialet øker ved økt herdetemperatur både for de kalkstabiliserte prøvene og de sementstabiliserte prøvene. De kalkstabiliserte prøvene oppnådde lavere skjærfasthet og stivhet etter 28 døgn, sammenlignet med de sementstabiliserte prøvene. Dette er også vist i tidligere utførte forsøk, blant annet av Åhnberg et al. (1995), og stemmer godt overens med oppførselen til kalk og sement.

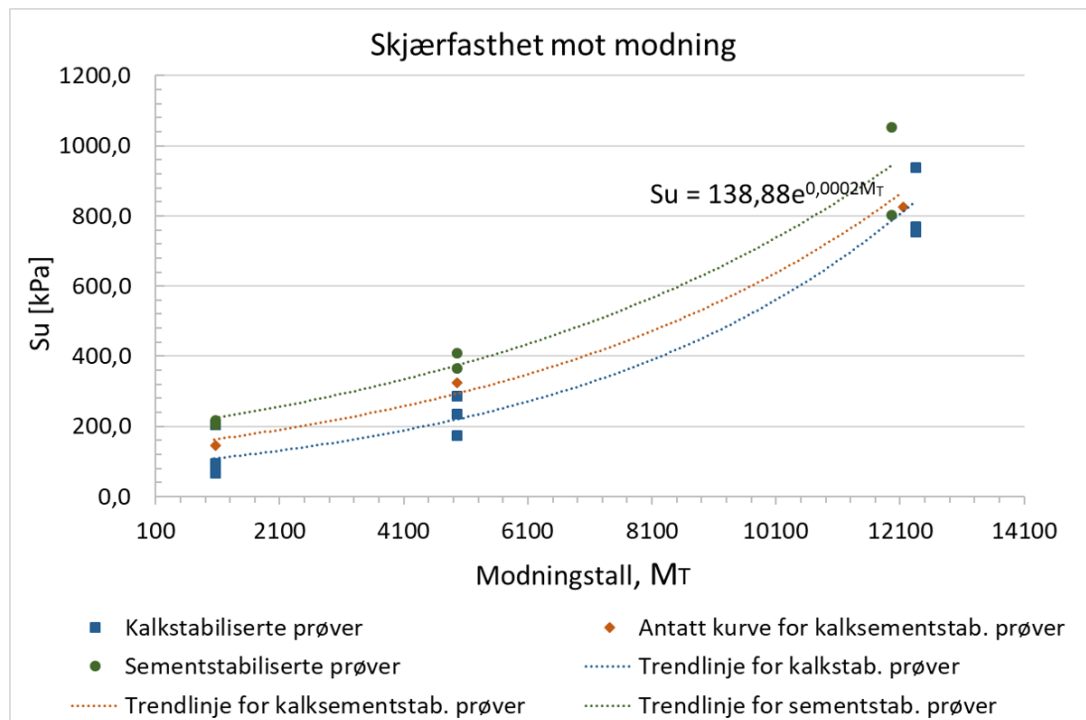
Figur 6.7e viser at det er en lineær sammenheng mellom herdetemperatur og bruddtøyning for de sementstabiliserte prøvene, hvor høyere herdetemperatur fører til avtakende bruddtøyning. Denne sammenhengen er derimot ikke gjeldene for de kalkstabiliserte prøvene, hvor herdetemperaturen, ifølge laboratorieresultatene, har liten innvirkning på bruddtøyningen. Sammenhengen mellom bruddtøyning og herdetemperatur er også vist i samleplott A2.4 og A2.8.

Figur 6.8 viser en antatt kurve for skjærfasthet mot modning for kalksementprøver stabilisert med 50 % kalk og 50 % sement. Skjærfastheten antas å være en gjennomsnittlig verdi av skjærfastheten oppnådd for kalk og skjærfastheten oppnådd for sement. Kurven har blitt tilpasset ved regresjon og er gitt ved formel 6.1:

$$S_u = 139 \cdot e^{2 \cdot 10^{-4} \cdot M_T} \quad (6.1)$$

For å illustrere forskjeller i oppnådd skjærfasthet for prøver herdet under ulike temperaturbetingelser og forskjeller i feltmålinger og laboratoriemålinger, er to eksempler vist i avsnittene nedenfor. Formel 6.1 har blitt benyttet i eksemplene.





Figur 6.8: Antatt kurve for skjærfasthet mot modning for kalksementstabilisert leire, basert på resultatene av laboratorieforsøkene for kalkstabilisert leire og sementstabilisert leire.

#### ***Prøver herdet ved ulike temperaturbetingelser***

I kapittel 4, avsnitt 4.4, ble modningsforløpet for leire herdet ved konstant temperatur på  $8^{\circ}\text{C}$  sammenlignet med modningsforløpet for et reelt temperaturforløp i felt målt av Åhnberg et al. (1995). Dersom man istedenfor benytter temperaturforløpet målt i temperatursensor T01 fra dybde 12 m på Bellevue, vil dette gi en oppnådd modning på 2624 etter 28 døgn. Ved å benytte resultatene for sammenhengen mellom skjærfasthet og gitt modning, gitt ved formel 6.1, tilsvarer dette en udrenert skjærfasthet på 235 kPa. Til sammenligning oppnår man, ved herding ved konstant temperatur på  $8^{\circ}\text{C}$ , en udrenert skjærfasthet på omtrent 170 kPa.

Ved å benytte modningstallet fra den faktiske temperaturutviklingen oppnår man dermed en økning i skjærfastheten på 38 %, i forhold til den fastheten man oppnår ved å herde kalksementprøver i laboratoriet ved  $8^{\circ}\text{C}$ . Det er dermed en betydelig høyere fasthet som oppnås ved herding under feltbetingelser enn skjærfastheten målt ved standard laboratorieforsøk. Denne sammenligningen vil i midlertidig ikke gi nøyaktige resultater for fastheten oppnådd i felt, ettersom laboratorieforsøket er gjennomført på Klett-leire mens temperaturforløpet er målt ved Bellevue i Fredrikstad. Sammenligningen er kun ment som et eksempel. Det er der-

imot kjent at leire fra Klett og Bellevue har relativt like egenskaper, hvor blant annet vanninnholdet er omtrent 35 % ned til dybde 10 *m* for begge leirene. Andre parametre som alumina- og silisiuminnhold, som også vil være med å påvirke kalk- og sementreaksjonene, er derimot ikke kjent.

### ***Sammenligning av FOPS- og laboratoriemålinger for lik modning***

I forbindelse med prosjektet på Bellevue har det blitt foretatt FOPS-målinger av kalksementpelene 3 døgn etter installasjon. Oppnådd skjærfasthet i dobbelribber ble målt til mellom 300 *kPa* og 600 *kPa*. Se vedlegg F for resultater av FOPS-målingene. Dersom man benytter temperaturkurven for temperatursensor T01 fra dybde 12 *m* fra Bellevue, vil man etter 3 døgn ha oppnådd en modning på 870. Dette tilsvarer en udrenert skjærfasthet på ca. 165 *kPa*. Det er dermed målt enda høyere fasthet i felt enn i laboratoriet, selv når man har tatt hensyn til herdetemperaturen.

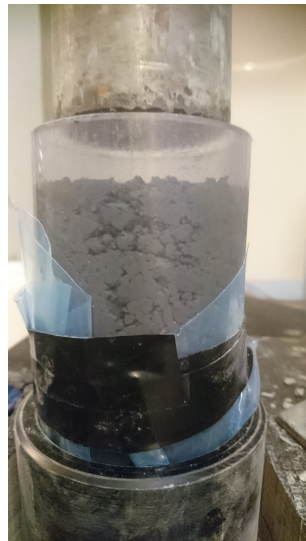
FOPS-resultatene gir ofte stor spredning i oppnådd skjærfasthet, og det forventes ikke 100 % samsvar med laboratoriemålingene. For eksempel påpeker kalksementveilederen, at dersom skjærfastheten i pelene er over 250 *kPa*, kan FOPS-målingene indikere høyere skjærfasthet enn det som er reelt (Norsk Geoteknisk Forening, 2012). Videre blir skjærfastheten ved FOPS-målinger kun tolket empirisk ut ifra motstand mot opptrekk, og tolkning av skjærfastheten bør derfor gjøres med stor forsiktighet (Christensen et al., 1998). Forskjellen i fasthet kan også skyldes ulike materialegenskaper i leiren på Bellevue sammenlignet med leiren fra Klett, som har blitt benyttet i laboratorieforsøket. Til tross for faktorene nevnt ovenfor indikerer den store forskjellen mellom laboratorieresultatene og FOPS-målingene at det er mer enn bare temperatureffekter som styrer fasthetsutviklingen. For eksempel kan herdetrykket bidra til høyere fasthet i felt enn i laboratoriet (Åhnberg, 2006).

## **6.5 Feilkilder**

Under gjennomføring av forsøkene har det oppstått ulike feilkilder som kan ha vært med på å påvirke oppnådde resultater. Mulige feilkilder av hver av fasene i laboratorieforsøket er beskrevet under.

## Tilvirkning av prøver

Ved bruk av sement som bindemiddel klumpet leiren seg raskt sammen, og etter 30 sekunder med blanding i miksmaster ble materialet så hardt og tørt at videre innblanding ikke var mulig. Innblanding av sement ble dermed ikke gjennomført korrekt. Innblanding av kalk derimot ble gjennomført etter standard prosedyre. Innblandingsarbeidet kan ha en effekt på oppnådd fasthet. Dette er blant annet vist i en studie utført av Terashi et al. (1977) (referert i Kitazume og Terashi 2013), hvor forsøk med ulik innblandingstid i kjøkkenmaskin for laboratorietilvirkede prøver ble gjennomført. Resultatene viste at lengre innblandingstid gav høyere fasthet. Materialet ble også noe ujevnt fordelt i prøvesylindrene både for prøvene blandet med kalk og prøvene blandet med sement. Figur 6.9 viser et eksempel på ujevn innstamping, hvor lagdelingen mellom de ulike stampelagene kommer tydelig fram. Det ble i midlertidig ikke observert tydelige brudd i lagene under testing av enaksial trykkfasthet. Enkelte av prøvene stabilisert med kalk hadde også en ujevn endeflate. Oppnådd maksimal skjærfasthet kan ha blitt påvirket av dette under testing.



Figur 6.9: Eksempel på ujevn innstamping under tilvirkning av prøver.

## Herding av prøvene

Etter herding av prøvene ble det observert at vann hadde trengt inn under plasten, og at prøvene herdet i vannbad dermed har stått med tilgang på vann i endene av prøvestykkene. Det er uvisst hva slags påvirkning dette kan ha på resultatene, men både kalk- og sementprøvene

har herdet under like forhold, slik at sammenligningsgrunnlaget er likt. De sementstabiliserte prøvene herdet ved 75 °C, dvs. prøve S03 og S06, stod i tørr kjele i en periode på 5 dager. Hovedfunksjonen til vannet i kjelen var å skape jevn temperatur for prøvene, og det er derfor mulig at prøvene i denne perioden har herdet ved ujevn temperatur. Se vedlegg A.3 for logging av temperaturen i vannbadene.

## Testing av styrken

Utskyvning av prøvene har blitt utført i en utskyverbenk, med unntak av prøvene herdet ved 8 °C, som ble skjøvet ut for hånd. Prøvene viste generelt liten motstand mot utskyvning, og det kan dermed antas at prøvene ikke har blitt påvirket av denne prosessen. Dette er med unntak av kalkprøve K06 og K09, herdet ved 77 °C, som viste større motstand mot utskyvning. Disse prøvene kan dermed ha blitt forstyrret og mistet noe av sin opprinnelige fasthet under utskyvning. Årsaken til vanskeligheter med å skyve ut prøvene kan være at platen i prøvesylinderne også reagerte på den høye temperaturen og utvidet seg under herding. Prøvene kan dermed ha blitt utsatt for et ytre trykk fra platen under herding. Ved å påføre en tilleggsbelastning kan man øke oppnådd fasthet (Åhnberg, 2006). Ettersom kun to av prøvene viste større motstand mot utskyvning, antas det at effekten av utvidet plast ikke har vært betydelig merkbar for de resterende prøvene.

I prosjektoppgaven ble det observert at prøvene stampet inn sist, også oppnådde lavest fasthet for sine respektive herdetemperaturer. Prøvematerialet hadde ligget åpent i omlag 1,5 time og det er stor sannsynlighet for at uttørking av materialet var årsaken til lavere oppnådd fasthet. Resultatene av disse prøvene er dermed ikke tatt med i denne oppgaven. Prosedyren ble også endret før herding av de kalkstabiliserte prøvene, hvor leire og kalk ble blandet i to omganger, for å hindre uttørking.

## 6.6 Oppsummering

Resultatene av laboratorieforsøket viser at skjærfastheten og stivheten av stabilisert leire er temperaturavhengig, og til tross for stor spredning, viser resultatene en tydelig økning i både fasthet og stivhet ved økende herdetemperatur. Ved å benytte modenhetsprinsippet kan man

ta hensyn til herdetemperatur og herdetid, og dermed oppnå en mer korrekt beregning av skjærfastheten i materialet. For eksempel kan man ved å benytte temperaturmålinger fra felt øke beregnet skjærfasthet med over 30 % i forhold til fastheten man oppnår ved herding ved 8 °C, slik standard laboratorieprosedyre blir gjennomført. I tillegg viser FOPS-målinger at fastheten man oppnår i felt er enda høyere enn fastheten man oppnår i laboratoriet, selv når man har tatt hensyn til herdetemperaturen. Andre faktorer, slik som herdetrykk, kan være med på å skape ytterligere fasthet i felt.



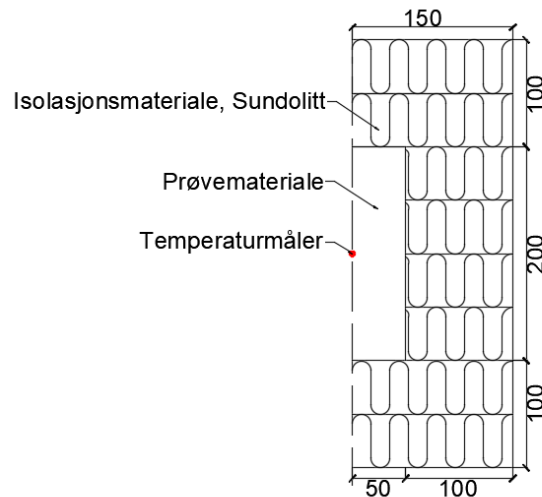
# Kapittel 7

## Temperaturmålinger i laboratorium

Det er gjennomført laboratorieforsøk med måling av temperaturutviklingen i leire stabilisert med kalk, sement og 50/50 kalk-sement. Formålet med forsøket er å måle temperaturutviklingen under kontrollerte forhold og med kjente randbetingelser. Resultatene kan da benyttes til å kalibrere parametre i et numerisk beregningsverktøy for beregning av temperaturutviklingen i kalksementpeler i felt. Forsøket vil også gi en bedre forståelse av sammenhengen mellom type bindemiddel og temperaturutvikling mot tid.

### 7.1 Forsøksoppsett

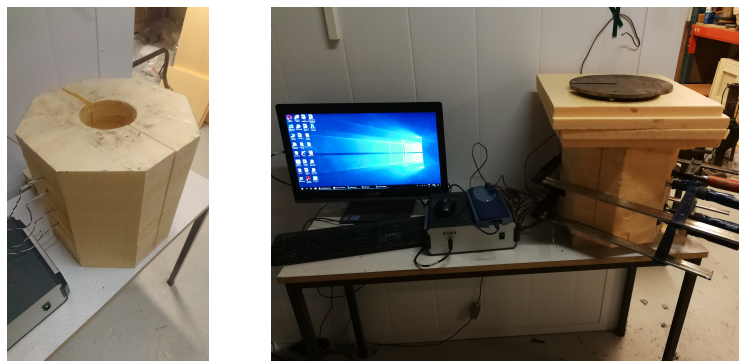
For å logge temperaturutviklingen har ferdigblandet prøvemateriale blitt stampet inn i en sylindrisk isolasjonsboks laget av «Sundolitt XPS»-plater. Ved å plassere materialet i en isolasjonsboks reduserer man varmetapet og oppnår større temperaturendringer. Figur 7.1 viser en skisse av forsøksoppsettet. Temperaturen logges ved en temperaturmåler kalt «Pico-TC-08», hvor temperatursensoren er plassert i midten av prøvematerialet, slik figur 7.1 viser. Temperaturmåleren er koblet til en datamaskin som lagrer temperaturmålingene. For å kunne benytte isolasjonsboksen til gjentatte forsøk, ble boksen delt i to og deretter klempt sammen med tvinger.



Figur 7.1: Skisse av forsøksoppsettet. Stiplet linje markerer symmetrilinje. Mål i *mm*.

## 7.2 Gjennomføring av forsøket

Forsøket består i hovedsak av å blande romtemperert leire og bindemiddel, deretter å stampe materialet raskt inn i isolasjonsboksen og til slutt logge temperaturen mot tid. I forsøket har det blitt benyttet leire tatt opp fra Klett, se avsnitt 6.1, for nærmere beskrivelse av leiren. Blandeprosedyren har blitt utført i henhold til Statens Vegvesens håndbok R210, rapport 225-Kalksementstabilisering av leire i laboratoriet (Statens Vegvesen, 2014), og forsøket har blitt gjentatt 3 ganger, med henholdsvis kalk, sement og 50/50 kalk-sement som bindemiddel. For å gjøre det enklere å fjerne prøvematerialet etter bruk, ble innsiden av isolasjonsboksen smurt med slippmiddel. I hvert av forsøkene har innblandingsmengden vært  $80 \text{ kg/m}^3$ , og temperaturen ble logget helt til temperaturen i senter av prøvematerialet var lik romtemperaturen. Figur 7.2 viser bilder fra gjennomføring av forsøket.

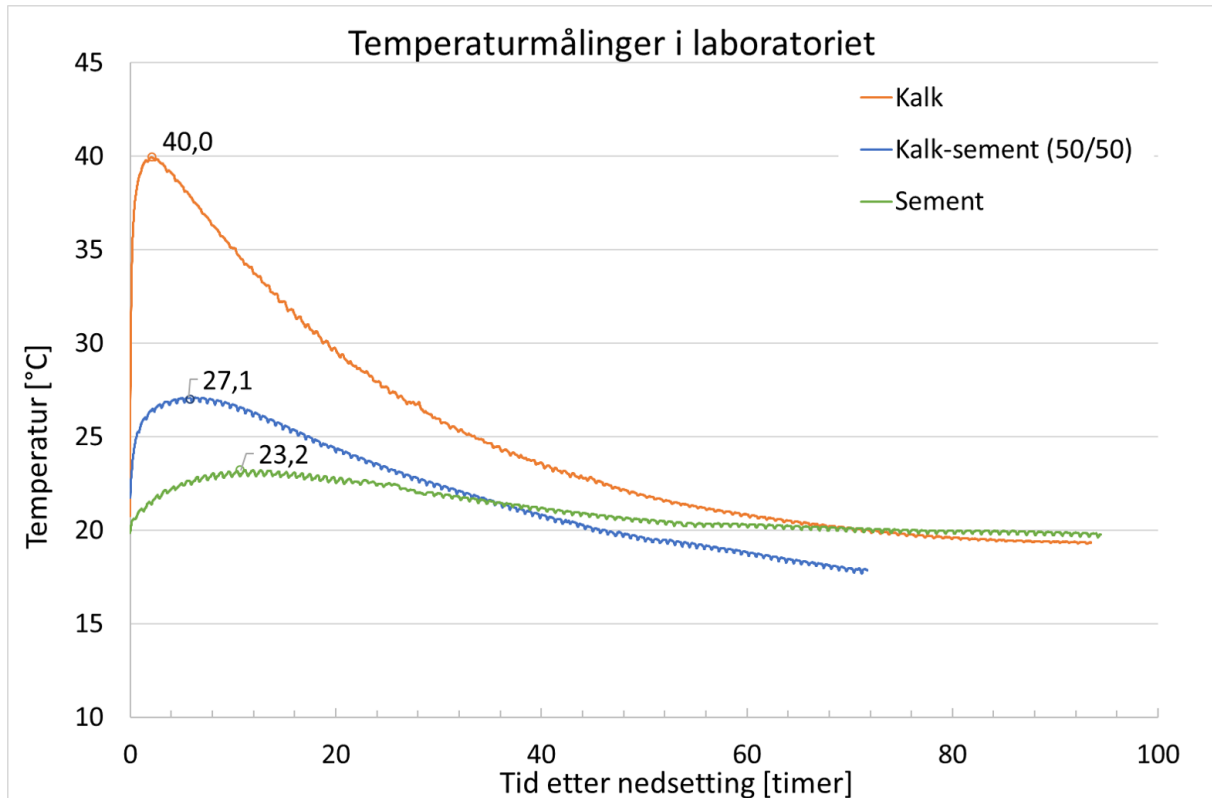


Figur 7.2: Bilder fra gjennomføring av forsøket.



## 7.3 Resultater

Figur 7.3 viser resultatene av forsøket. Temperaturendringen ved innblanding av leire med kalk, kalksement og sement ble henholdsvis 23,0 °C, 11,1 °C og 3,7 °C. Kurvene er ikke direkte sammenlignbare ettersom romtemperaturen, og dermed også starttemperaturen i leira varierte under forsøkene. Resultatene av forsøket er også vist i tabell 7.1.



Figur 7.3: Temperaturmålinger for leire stabilisert med kalk, sement og kalksement. Innblandingsmengde  $80 \text{ kg/m}^3$ .

Tabell 7.1: Oppsummering av laboratorieforsøket

Bindemiddel	Tid, innblandings- prosess (min)	Densitet av inn- stampet materiale ( $\text{kg/m}^3$ )	Starttemp. i leira (°C)	Gjennomsnittlig romtemperatur (°C)	$T_{maks}$ (°C)	Tid for $T_{maks}$ (timer)	$\Delta T$ (°C)
Kalk	3,0	1814	17,0	19,0	40,0	2,1	23,0
Sement	4,0	1916	19,5	19,0	23,2	10,7	3,7
Kalksement	3,5	1916	16,0	17,0	27,1	5,7	11,1

## 7.4 Diskusjon

Resultatene viser at det er store variasjoner i temperaturforløpet avhengig av stabiliseringsmiddelet. Forsøket med kalk som stabiliseringsmiddel oppnådde størst temperaturendring, med en total endring på  $\Delta T = 23,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Den maksimale temperaturen var oppnådd etter ca. 2 timer. Til sammenligning var temperaturendringen for leire stabilisert med sement kun  $\Delta T = 3,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , og den maksimale temperaturen ble oppnådd etter ca. 11 timer. Resultatene stemmer godt overens med egenskapene til kalk og sement, beskrevet i kapittel 3, hvor kalk har en høy og rask varmeutvikling, mens varmeutviklingen i sementen først starter etter noen timer.

Resultatene for forsøket med 50/50 kalk-sement oppnådde en temperaturendring på ca.  $11 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dette er litt under gjennomsnittet av resultatene for kalk og sement, hvor gjennomsnittlig temperaturendring er  $13,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Årsaker til dette kan være at romtemperaturen var lavere da forsøket med kalksement ble gjennomført.

Dersom prøvematerialet ikke hadde vært utsatt for noe varmetap ville temperaturen, for alle de tre forsøkene, ha steget med ca.  $9 \text{ }^\circ\text{C} - 11 \text{ }^\circ\text{C}$  mer. I tillegg til varmetapet mellom isolasjonsboksen og luften, kan begrensningene beskrevet i avsnittet nedenfor ha påvirket temperaturforløpet.

## 7.5 Begrensninger

Forsøket ble gjennomført ved hjelp av enkle midler, og det er dermed også noen begrensninger knyttet til forsøksprosedyren. Det tok for eksempel mellom 3 *min* - 4 *min* fra bindemiddelet ble blandet med leira, til materialet var ferdig innstampet i isolasjonsboksen, se tabell 7.1. I løpet av denne perioden har materialet ligget åpent, og det er svært sannsynlig at en del varme har gått tapt i denne prosessen. Som beskrevet i kapittel 3, er varmeutviklingen i kalk og sement svært ulik. Ettersom det meste av varmeutviklingen i kalk skjer de første 5 minuttene etter reaksjon med vann, er det sannsynlig at varme har gått tapt for forsøket med kalk og kalksement som bindemiddel. For sement derimot, oppstår det meste av varmeutviklingen først etter noen timer, og det er derfor naturlig å anta at varmetapet for forsøket utført med sement er mindre. Ettersom standard prosedyre for innblanding av bindemiddel består

av å mikse leire og bindemiddel i 2 ganger 30 sekunder, var det ikke mulig å gjennomføre innblandingsprosessen raskere.

Videre var det kun plass til et lite volum stabilisert materiale i isolasjonsboksen. Dette var for å sikre at alt materiale kunne blandes sammen samtidig ved hjelp av én miksmaster. Stort overflateareal kontra volum, fører til at prøven er lettere mottakelig for ytre påvirkninger. For eksempel kan sprekker mellom de to delene av isolasjonsboksen, ha bidratt til økt varmetap.

## **7.6 Oppsummering**

Laboratorieforsøket viser at temperaturutviklingen ved stabilisering av leire i stor grad er avhengig av type bindemiddel. Stabilisering med kalk oppnådde både en høyere og raskere temperaturøkning enn stabilisering med sement.



## **Del III**

# **Numerisk modellering**



# Kapittel 8

## Modelloppsett

For å beregne temperaturutviklingen i kalksementpeler ved numeriske simuleringer har elementmetodeprogrammet, *Comsol Multiphysics*, heretter kalt Comsol, blitt benyttet. Programmet kombinerer ulike fysikkbaserte grensesnitt, og kan også håndtere koblinger av ulike systemer ved differensialligninger.

### 8.1 Rammeverk

For å beregne varmetransport gjennom faste stoffer, benytter Comsol et rammeverk basert på termodynamikkens 1. lov, loven om energiens bevarelse. En variant av varmeledningstiligningen, som vist i formel 8.1 nedenfor, blir benyttet (COMSOL Multiphysics v.5.3, 2018). Variablene i ligningen er tid,  $t$ , og temperatur,  $T$ . Densiteten,  $\rho_i$ , varmekapasiteten,  $C_{p_i}$ , og varmeledningsevnen,  $k_i$ , er inputparametere for hvert materiale,  $i$ . I tillegg til dette kan man også påføre en varmekilde,  $Q_i$ , gitt i effekt per volumenhet.

$$\rho_i \cdot C_{p_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k_i \cdot \nabla T) = Q_i \quad (8.1)$$

Varmeutviklingen beregnes i Comsol ved å benytte grensesnittene:

- *Heat transfer in solids*
- *Domain ODEs and DAEs*

Grensesnittet, *Heat transfer in solids*, inneholder verktøy for å simulere ulike mekanismer innenfor varmetransport, og formel 8.1 benyttes som utgangspunkt for simuleringene. Grensesnittet, *Domain ODEs and DAEs*, er et matematikkbasert grensesnitt som åpner opp for at egne differensialligninger, gitt ved ordinære differensialligninger (ODE) eller algebraiske differensialligninger (DAE), kan inkluderes i modellen. Dette gjør det mulig å implementere egne formelverk og koble sammen ulike systemer (COMSOL Multiphysics v.5.3, 2018).

## 8.2 Oppbygging av modellen

Comsol-modellen er bygget opp slik at temperaturutviklingen i kalksementstabilisert materiale kan beskrives for ulike situasjoner. Bruk av 1D- eller 2D-modell, geometri, materialer, startbetingelser og inputparametre har blitt modellert for hver enkelt situasjon. Ettersom varmeutviklingen forandres med tiden har det blitt benyttet en tidsavhengig studie. For alle situasjonene har det blitt valgt et *mesh* med «normal» elementstørrelse.

Følgende grensebetingelser har blitt benyttet i modellen:

- **Symmetry:** Temperaturen speiles om en gitt linje. Det vil ikke være noe varmeoverføring over symmetrilinjen. Ved bruk av symmetrilinjer kan man simulere modeller med gjentakende mønster.
- **Temperature:** Temperaturen langs en valgt linje er til en hvert tid spesifisert, enten i form av en konstant temperatur eller som en funksjon gitt ved temperatur mot tid.

## 8.3 Simulering av varmeutvikling

Varmeutviklingen i kalksementpelene, som følge av de kjemiske reaksjonene mellom kalk, sement og vann, blir simulert i Comsol ved å påføre en varmekilde for hver av pelene. Varmekilden beregnes som en varmetilførsel per tidsenhet, og er basert på formler utviklet for herding av betong (Hernandez-Bautista et al., 2014). Dette er mulig ettersom Comsol åpner opp for å implementere egne formler i modellen. Varmeutviklingen,  $Q$ , er gitt ved den danske



egenskapsmodellen (Jacobsen et al., 2016), og er vist i formel 8.2:

$$Q(t_e) = Q_u \cdot \alpha_u \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta\right) \quad (J/kg) \quad (8.2)$$

hvor

$Q_u$  = Total varmeutvikling ved fullstendig hydratisering ( $J/kg$ )

$\alpha_u$  = Grad av hydratisering (-)

$\tau$  = Hydratiseringstid ( $h$ )

$\beta$  = Kurveparameter (-)

For å ta hensyn til den akselererende effekten av økt varmeutvikling ved økt temperatur, benyttes modenhetsprinsippet. En ekvivalent tid, gitt ved  $t_e$ , beskriver ekvivalent tid for en gitt referansetemperatur,  $T_r$ . Ligningen er implementert i grensesnittet, *Domain ODEs and DAEs* i Comsol, og er beskrevet ved Arrhenius-ligningen, en ligning hvor temperaturens betydning for varmeutviklingen blir tatt hensyn til (Hernandez-Bautista et al., 2014; Jacobsen et al., 2016). Ligningen er vist i formel 8.3:

$$\frac{dt_e}{dt} = \exp\left(\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (s) \quad (8.3)$$

hvor

$E$  = Aktiveringsenergi ( $J/mol$ )

$R$  = Gasskonstanten ( $8,314 J/mol$ )

Aktiveringsenergien er et mål på hvor sensitiv varmeutviklingen er på endringer i temperatur, og er blant annet avhengig av sementtype og w/c-tallet. For betongherding er aktiveringsenergien mellom  $30 kJ/mol$  og  $60 kJ/mol$  (Jacobsen et al., 2016).

I Comsol blir varmekilden implementert som en varmetilførsel per tidsenhet, og er gitt ved formel 8.4:

$$\frac{dQ}{dt} \cdot C = \frac{dQ}{dt_e} \cdot \frac{dt_e}{dt} \cdot C \quad (W/m^3) \quad (8.4)$$

hvor

$C$  = Mengde bindemiddel ( $kg/m^3$  leire)

## 8.4 Materialparametre

For å beregne temperaturutviklingen i Comsol er nødvendige materialparametre varmekapasitet, varmeledningsevne og densitet.

Varmekapasiteten er et mål på mengde varme som kreves for å heve temperaturen med  $1\text{ }^\circ\text{K}$ , og for et sammensatt materiale er varmekapasiteten avhengig av varmekapasiteten til alle komponentene materialet består av (Andersland og Ladanyi, 2004). Varmekapasiteten til det sammensatte materialet beregnes ved å se på masseforholdet av hver av disse ulike komponentene (Åhnberg et al., 1995). Det har blitt tatt hensyn til at hydratisering av kalk og sement binder opp vann, og at andelen porevann dermed er lavere for stabilisert leire enn for ustabilisert leire.

Varmeledningsevnen til materialet er et mål på hvor raskt varme blir overført fra en varm del til en kaldere del av materialet (Andersland og Ladanyi, 2004). For et sammensatt materiale er varmeledningsevnen i hovedsak avhengig av porøsiteten, og blir beregnet ut ifra mengde fast stoff og mengde vann (Åhnberg et al., 1995). Tabell 8.1 oppsummerer de termiske egenskapene til leire fra Klett og Bellevue, for ustabilisert leire og leire stabilisert med kalk, sement og 50/50 kalk-sement. Innblandingsmengden er i alle tilfellene  $80\text{ kg/m}^3$ . Se vedlegg C, for beskrivelse av beregningsmetode for varmekapasitet og varmeledningsevne.

Densiteten til materialet blir beregnet ved rutineundersøkelser. Forsøk utført av Åhnberg (2006) viser at densiteten etter stabilisering forblir omtrent det samme eller øker noe. Det er derfor antatt at densiteten av stabilisert materiale er tilnærmet lik densiteten av ustabilisert materiale. Dersom densiteten etter stabilisering er kjent, har denne verdien blitt benyttet.

Tabell 8.1: Varmekapasitet og varmeledningsevne for ustabilisert og stabilisert leire fra Klett og Bellevue.

Type leire	Bindemiddel	Varmekapasitet, $C_p$ (J/kgK)	Varmeledningsevne, $k$ (W/mK)
Klett-leire	Kalk	1525	1,47
	Sement	1537	1,45
	Kalksment	1531	1,46
Bellevue-leire	Ustabilisert	1597	1,42
	Kalksment	1530	1,50

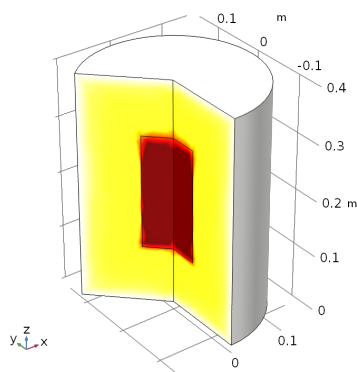
# Kapittel 9

## Kalibrering mot laboratoriemålinger

Comsol-modellen har blitt kalibrert mot laboratoriemålingene beskrevet i kapittel 7, «Temperaturmålinger i laboratorium». Parameterne  $\alpha_w$ ,  $\tau$  og  $\beta$  har blitt tilpasset slik at temperaturkurven beregnet i Comsol i størst mulig grad følger temperaturkurven fra laboratoriemålingene.

### 9.1 Modell

For å simulere laboratorieforsøket har det blitt benyttet en 1D aksesymmetrisk modell i Comsol. Figur 9.1 viser en 3D-illustrasjon av modellen, og figur 9.2 viser oppsett av modellen med grensebetingelser. For å få nøyaktige resultater ble romtemperaturen logget underveis i forsøket. Disse målingene har blitt lagt til som en randbetingelse i overgangen mellom isolasjonsboksen og luften.



Figur 9.1: 3D-modell av isolasjonsboksen.

Tabell 9.1 viser en oversikt over inputparameterne benyttet i modellen. Verdien for den totale varmeutviklingen i materialet er hentet fra teorien om maksimal varmeutvikling ved fullstendig hydratisering av kalk og sement, som beskrevet i kapittel 3 (Boynton, 1980). Dersom det benyttes både kalk og sement, er den totale varmeutviklingen en gjennomsnittsverdi av verdien for hydratisering av kalk og hydratisering av sement. Aktiveringsenergien er satt til en konstant verdi, ettersom parameterstudier viser at betydningen av aktiveringsenergien er liten så lenge den befinner seg innenfor normalområdet for aktiveringsenergien ved herdig av betong. Referansetemperaturen tilsvarer romtemperert leire, og varierer på grunn av store temperaturvariasjoner i rommet hvor forsøket ble gjennomført.

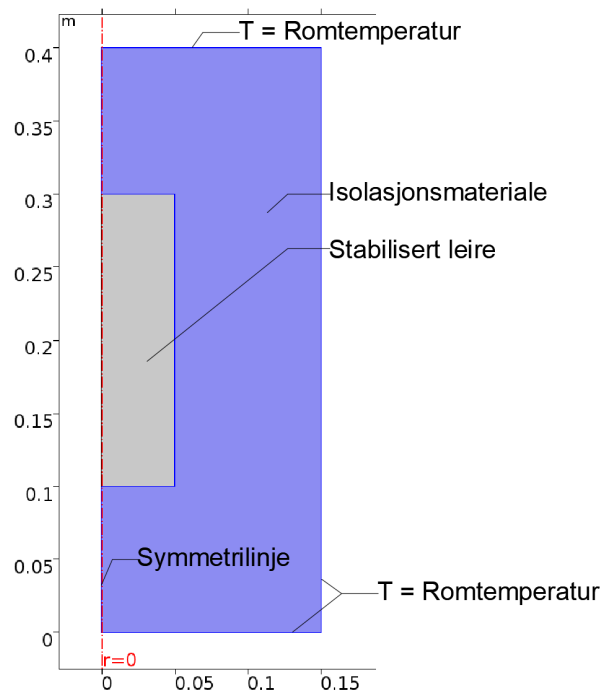
Tabell 9.1: Inputparametre

Parameter		Kalk	Sement	Kalksement
Total varmeutvikling,	$Q_u$ (kJ/kg)	1163,0	450,0	806,5
Aktiveringsenergi,	$E$ (kJ/mol)	40	40	40
Mengde bindemiddel,	$C$ (kg/m <sup>3</sup> )	80	80	80
Referansetemperatur,	$T_r$ (degC)	18	20	16

Materialparameterne for Klett-leire, stabilisert med ulike bindemidler, er beskrevet i avsnitt 8.4. Densiteten til materialet ble målt under laboratorieforsøket, og er vist i tabell 7.1. Materialparameterne for isolasjonsboksen har blitt kalibrert mot temperaturmålinger av vann i isolasjonsboksen. Ettersom vannet har kjente termiske egenskaper kunne varmekapasiteten og varmeledningsevnen av isolasjonsboksen fastsettes ved å se på varmetap mot tid. Tabell 9.2 viser de kalibrerte materialparameterne for isolasjonsboksen, i tillegg til densiteten av materialet.

Tabell 9.2: Materialparametre, isolasjon

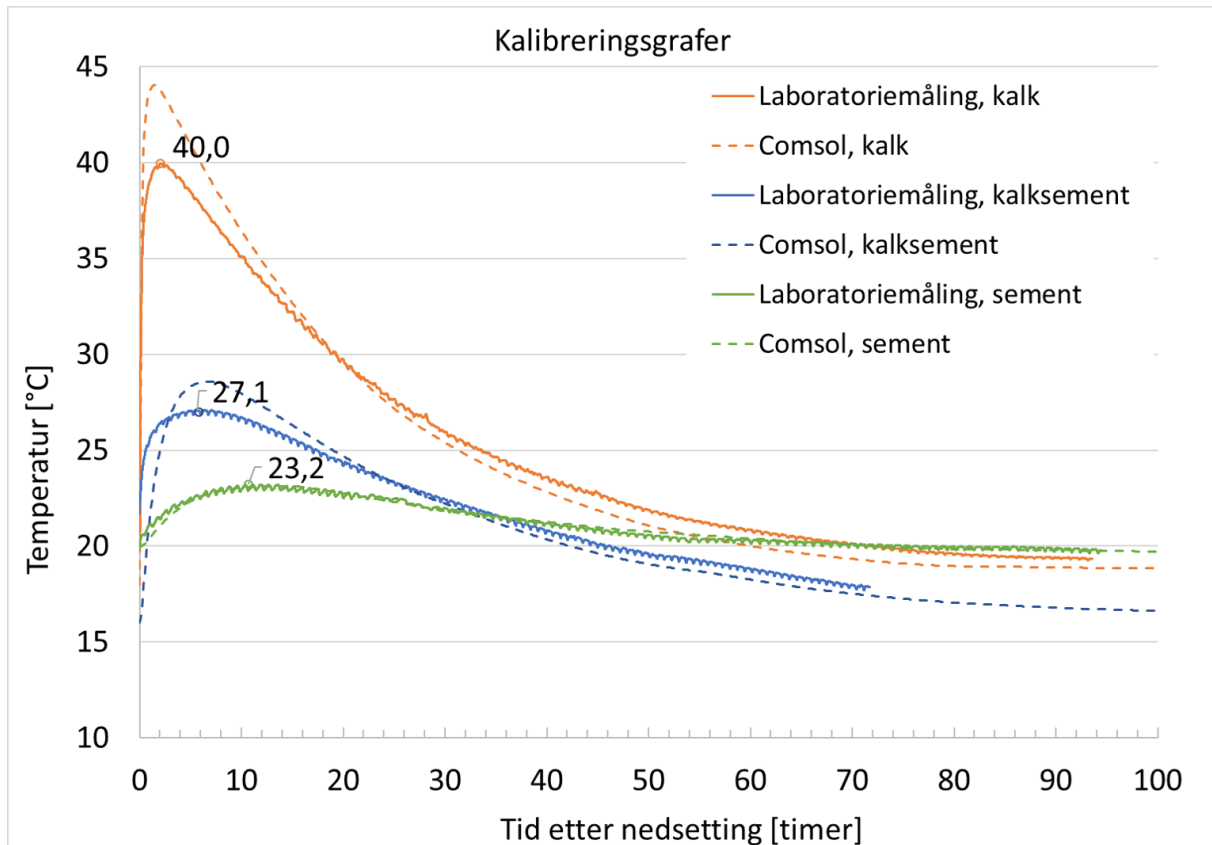
Parameter	Verdi
Varmekapasitet, $C_p$	1300 J/kgK
Varmeledningsevne, $k$	0,039 W/mK
Densitet, $\rho$	30 kg/m <sup>3</sup>



Figur 9.2: Modeloppsett med grensebetingelser

## 9.2 Resultater

Resultatene av kalibreringene, hvor  $\alpha_u$ ,  $\tau$  og  $\beta$  har blitt tilpasset, er vist i tabell 9.3. Resultatene er også vist i figur 9.3, som viser temperaturforløpet mot tid for Comsol-beregningene og laboratiemålingene. De kalibrerte parameterne er tilpasset slik at Comsol-simuleringene i størst mulig grad følger temperaturforløpet til laboratiemålingene. Samtidig har det blitt tatt hensyn til at parameterne skal ligge innenfor et forventet variasjonsområde med hensyn på de parametertilpasningene som allerede eksisterer for betong.



Figur 9.3: Temperaturforløp mot tid for Comsol-beregningene og laboratiormålingene, for leire stabilisert med kalk, sement og kalksement.

Tabell 9.3: Kalibrerte parametre

Parameter		Kalk	Sement	Kalksement
Grad av hydratisering,	$\alpha_u$ (-)	0,93	0,66	0,96
Hydratiseringstid,	$\tau$ (h)	0,1	7,0	2,0
Kurveparameter,	$\beta$ (-)	0,57	0,60	0,59

### 9.3 Diskusjon

Resultatene viser at man ved å tilpasse parameterne  $\alpha_u$ ,  $\tau$  og  $\beta$ , oppnår god overensstemmelse med laboratiormålingene. Kurvetilpasningen stemmer best overens for leire stabilisert med sement, mens kurvene for leire stabilisert med kalk og med kalksement får et høyere toppunkt og raskere temperaturnedgang for Comsol-simuleringene enn laboratiormålingene. Som beskrevet i avsnitt 7.5, om feilkilder ved temperaturmålinger i laboratorium, er

det sannsynlig at noe varme gikk tapt under blanding- og innstampingsprosessen for kalk- og kalksementforsøkene. Det er derfor sannsynlig at temperaturen ville ha steget mer og oppnådd et høyere maksimalpunkt slik Comsol-simuleringene viser. Videre kan den raskere nedgangen i temperaturen for Comsol-simuleringene skyldes at formlene for simulering av varmeutvikling er hentet fra betongteknologi, og dermed kun er utviklet for hydratisering av sement. Forskjellene i temperaturforløpet kan også skyldes at de termiske egenskapene til materialet ikke er målt, og at beregningene av varmekapasitet og varmeledningsevne dermed kan avvike noe fra faktiske verdier.

En sammenligning av de kalibrerte parameterne viser at parameterne for leiren stabilisert med kalksement ikke er et gjennomsnitt av parameterne for leire stabilisert med kalk og leire stabilisert med sement, selv om forholdet mellom kalk og sement er 50/50. Temperaturforløpet blir i størst grad påvirket av kalkreaksjonen, og hydratiseringstiden for kalksementforøket er dermed mye lavere enn gjennomsnittsverdien.





# Kapittel 10

## Simulering av feltmålinger

I dette kapitlet har Comsol-modellen blitt benyttet for å simulere varmeutviklingen i kalksementpeler installert i felt. Resultatene av simuleringene har blitt sammenlignet med temperaturmålingene fra felt, beskrevet i kapittel 5. Formålet er å kontrollere grad av samsvar mellom den numeriske-modellen og feltmålingene, samt å vurdere hvilke parametre som påvirker temperaturforløpet.

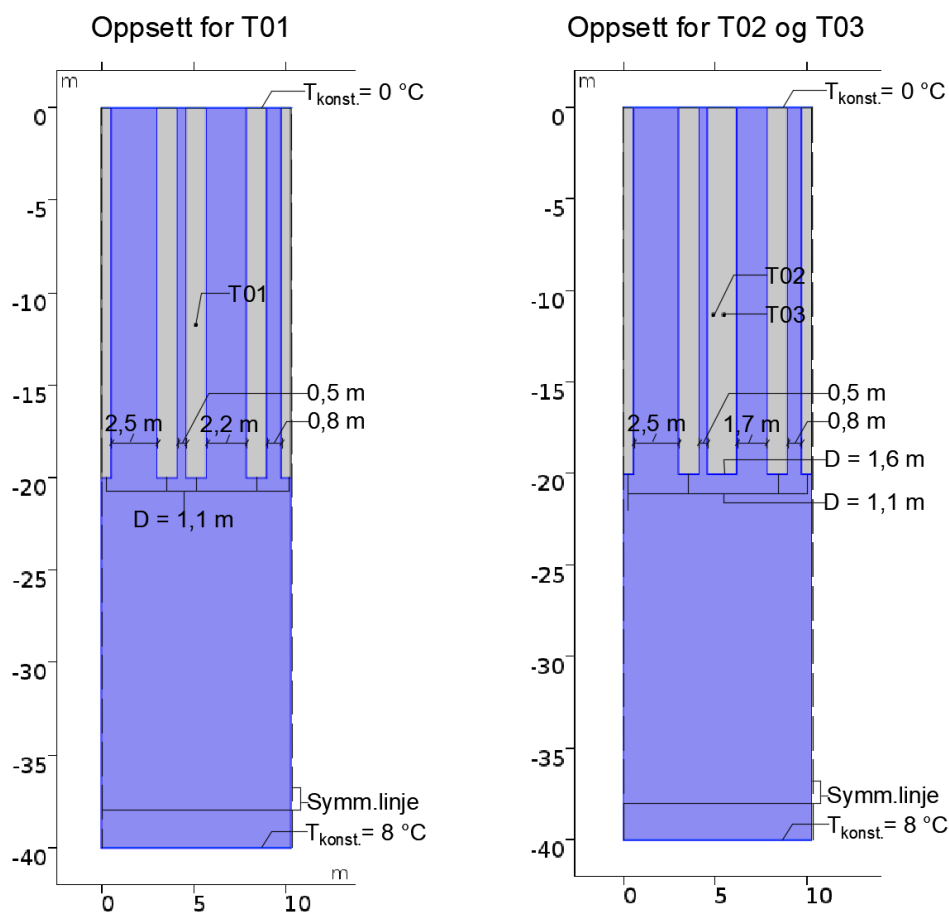
### 10.1 Modell

For å simulere temperaturutviklingen i kalksementpeler i felt, har det blitt benyttet en 2D-modell, hvor varmetapet inn og ut av planet er neglisjert. Modellen består av ribber plassert i tilsvarende avstand og med lik bredde som ribbene installert i felt ved Bellevue. Figur 10.1 viser modelloppsettene som skal simulere varmeutviklingen ved temperatursensor T01, T02 og T03. Modellen består av et avgrenset jordvolum med konstant temperatur på  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i overgangen mellom jord og luft, og konstant temperatur på  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  langs den nedre randen av jordvolumet. Langs de to resterende rendene er det benyttet symmetrilinjer, slik at modellen representerer en uendelig lang rekke med ribber. Densiteten til materialet er  $1845\text{ kg/m}^3$ , både for den kalksementstabiliserte leira og den ustabiliserte leira. Varmekapasiteten og varmeledningsevnen til materialet er beskrevet i avsnitt 8.4, tabell 8.1. De kalibrerte parameterne for  $\alpha$ ,  $\tau$  og  $\beta$ , beskrevet i kapittel 9, har blitt benyttet som inputparametre for simulering av varmeutviklingen.

Ettersom det er forventet at temperaturspredning fra nærliggende ribber kan påvirke nabo-ribber har man, for å få større innsikt i effekten av ulike faktorer, simulert temperaturforløpet for 3 ulike situasjoner:

1. Alle ribbene blir installert samtidig, og starttemperaturen i jordvolumet er  $8^{\circ}\text{C}$ .
2. Ribbene blir installert med 4 døgns mellomrom, og starttemperaturen i jordvolumet er  $8^{\circ}\text{C}$ .
3. Ribbene blir installert med 4 døgns mellomrom, og starttemperaturen i jordvolumet er  $10^{\circ}\text{C}$ .

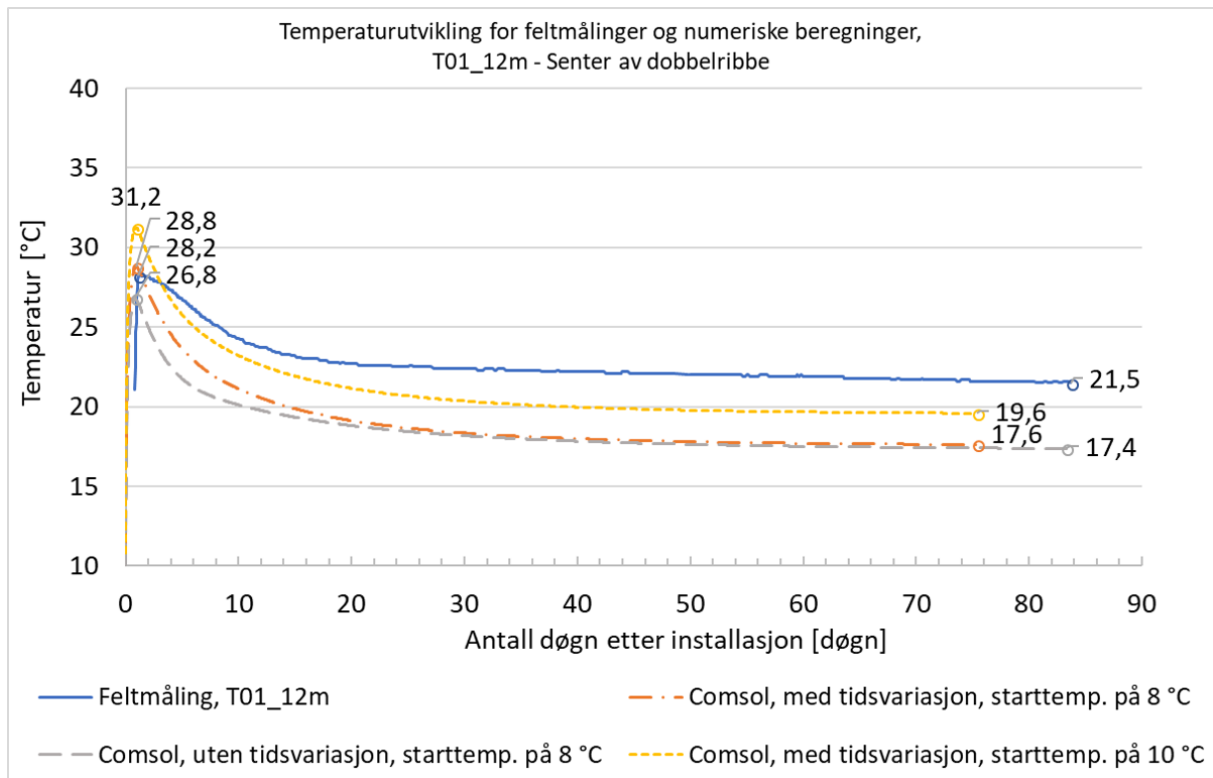
For situasjonene hvor ribbene er installert med 4 døgns mellomrom blir varmekilden først aktivert for ribben lengst til venstre. De resterende ribbene blir deretter aktivert fra venstre mot høyre med 4 døgns mellomrom. Dette simulerer en situasjon hvor ribbene på Bellevue blir installert fra sør mot nord.



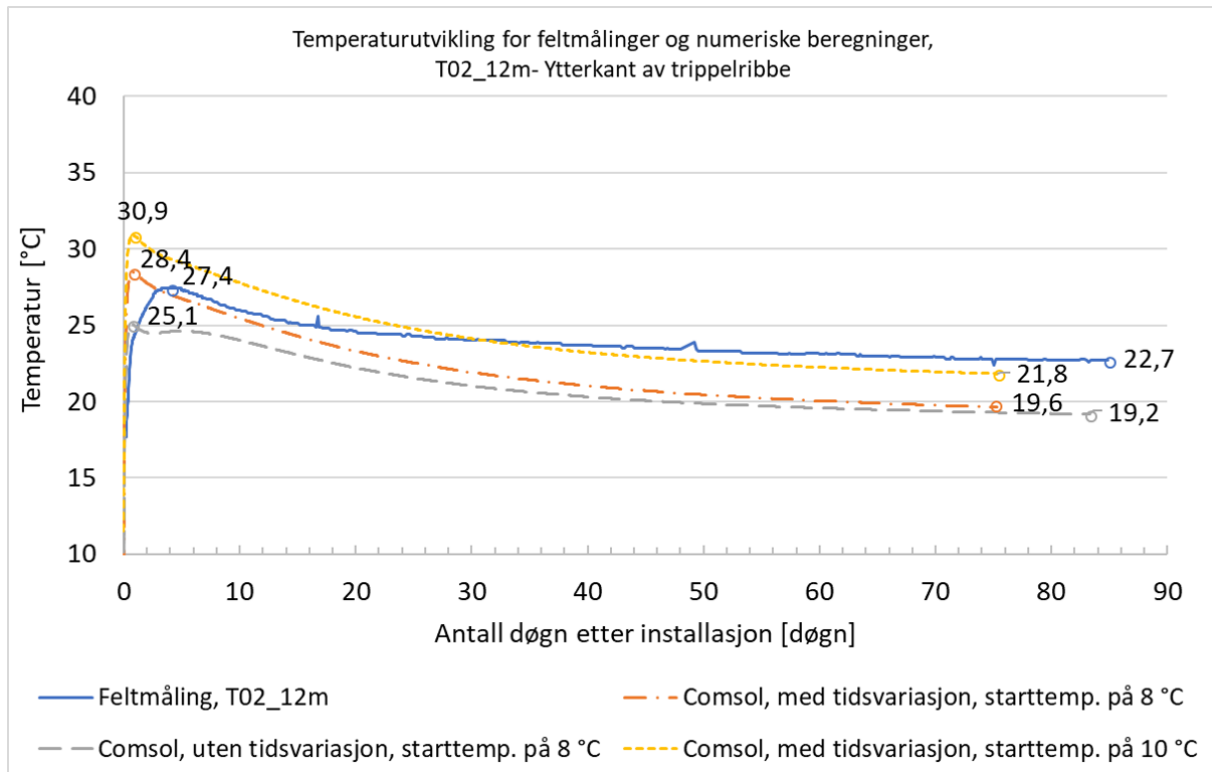
Figur 10.1: Modelloppsett for feltsimuleringer

## 10.2 Resultater

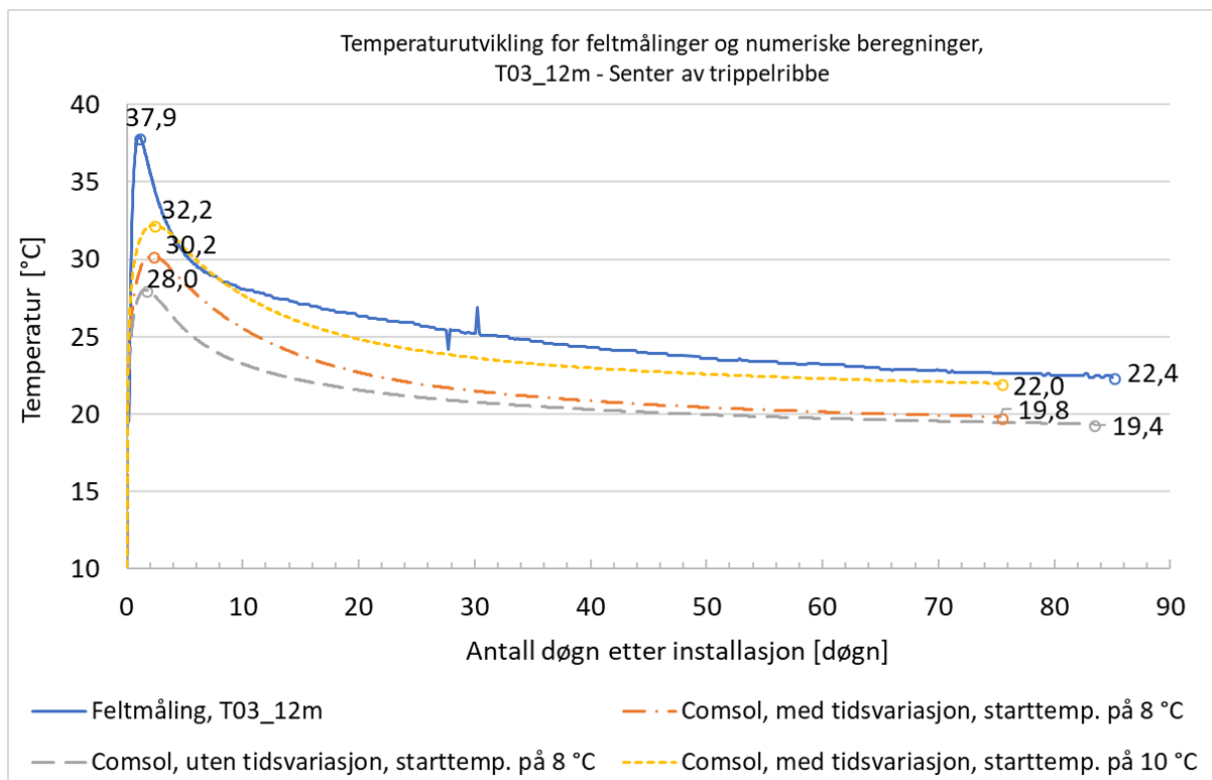
Resultatene av simuleringene av temperaturforløpet i felt er vist i figur 10.2, 10.3 og 10.4. Figurene inkluderer temperaturforløpet for de 3 ulike situasjonene beskrevet ovenfor, i tillegg til feltmålingene fra Bellevue for temperatursensor T01, T02 og T03 fra dybde 12 m.



Figur 10.2: Temperaturutvikling for feltmålinger og numeriske beregninger for dybde 12 m, ved temperatursensor T01.



Figur 10.3: Temperaturutvikling for feltmålinger og numeriske beregninger for dybde 12 m, ved temperatursensor T02.



Figur 10.4: Temperaturutvikling for feltmålinger og numeriske beregninger for dybde 12 m, ved temperatursensor T03.

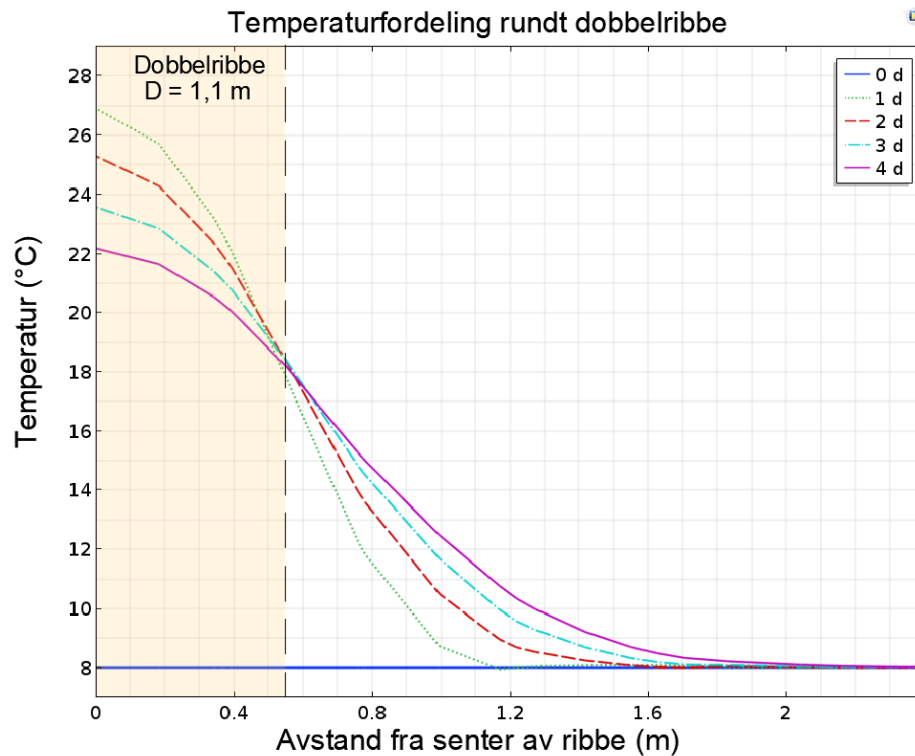
## 10.3 Diskusjon

Resultatene viser at det er godt samsvar mellom temperaturutviklingen målt i felt og temperaturutviklingen simulert ved numeriske beregninger i Comsol. Samtidig viser resultatene at temperaturforløpet avhenger av faktorer som starttemperatur i leira og tidsvariasjon mellom installasjonene. Generelt er temperaturen målt i felt høyere enn temperaturen beregnet ved Comsol, og på sikt er forskjellen omtrent  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  til  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  for beregningene med starttemperatur på  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dersom man antar at det tar 4 døgn mellom installasjon av hver ribbe, slik den oransje kurven i diagrammet viser, vil varmen fra den foregående ribben påvirke starttemperaturen i området hvor den neste ribben installeres. Dette er illustrert i figur 10.5, som viser temperaturfordeling ved ulike tidspunkt rundt en dobbelribbe. Økt starttemperatur på grunn av varme fra naboribben vil gi en høyere maksimal temperatur i kalksementpelene, men vil ikke føre til noe betydelig høyere temperatur på sikt. Dette er vist ved forskjellen mellom grå og oransje kurve i diagrammene. Videre viser grafene også at dersom man antar at starttemperaturen i jordvolumet er  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  istedenfor  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vil dette føre til at temperaturkurven løftes med  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I tillegg til disse faktorene vil inputparametre som varmekapasitet, varmeledningsevne og mengde og type bindemiddel påvirke temperaturforløpet. Oppsummert kan følgende faktorer ha betydning for temperaturforløpet i modellen:

- Tid og avstand mellom installasjon av ribbene
- Starttemperatur i leira
- Varmekapasitet og varmeledningsevne til materialet
- Type og mengde bindemiddel

For å oppnå høyere sluttemperatur og bedre overensstemmelse med feltnmålingene, vil det derfor være nødvendig å endre faktorene ovenfor. Ettersom erfaringer viser at jordtemperaturen varierer mellom  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , og situasjonen med tidsinnstilt variasjon tar hensyn til temperaturspredning fra nærliggende ribber, er det derimot ikke noen grunn til å anta at starttemperaturen i leira er høyere enn  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Situasjon 2 antas dermed å være mest korrekt. Eventuelle avvik i kurven kan skyldes usikkerheter og begrensninger beskrevet i neste avsnitt.



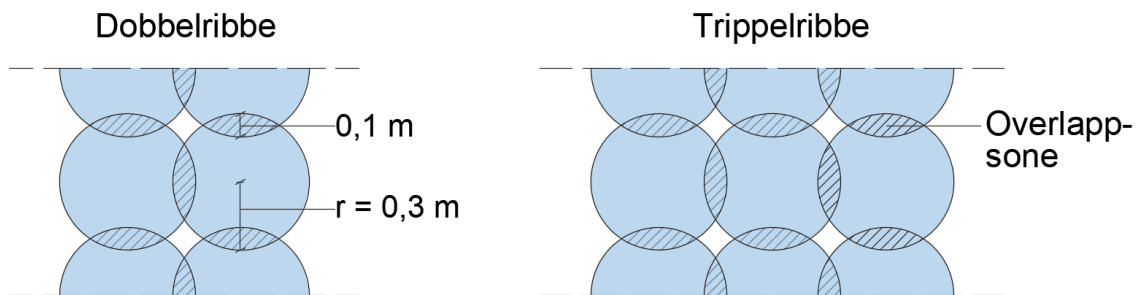
Figur 10.5: Temperaturfordeling rundt dobbelribbe de 4 første døgnene etter installasjon ( $d$  = døgn).

## 10.4 Usikkerheter og begrensninger

Modellen som har blitt benyttet for å simulere temperaturforløpet i felt er en forenklet modell, som ikke tar hensyn til alle aspektene som skjer i felt. For eksempel er installasjonsforløpet i felt uvisst. Ettersom pelprotokollen fra installasjonene ikke har vært tilgjengelig, er det usikkert i hvilken rekkefølge ribbene på Bellevue har blitt installert, og også usikkert hvor lang tid det tok mellom installasjon av hver ribbe. Comsol-modellen simulerer en uendelig lang rekke av ribber, hvor i realiteten mange ribber blir satt ned samtidig på grunn av symmetrilinjene. Modellen samsvarer dermed ikke nøyaktig med feltsituasjonen, og avvik mellom simulert temperaturforløp og målt temperaturforløp i felt, kan skyldes disse forskjellene.

Videre er modellen basert på kalibreringer mot laboratoriemålinger. Dersom varmeutviklingen ved hydratisering av kalk og sement i laboratorieprøvene avviker fra varmeutviklingen produsert i felt, vil dette påvirke temperaturforløpet beregnet i Comsol. Forskjeller i varmeutvikling i felt og laboratorieprøver kan blant annet skyldes at det kan være enklere å oppnå bedre innblanding i felt enn i laboratoriet (Kitazume og Terashi, 2013).

Det er også usikkerheter rundt hvor stor mengde bindemiddel som faktisk har blitt installert i felt. I Comsol-simuleringene og laboratoriemålingene, har det blitt benyttet en mengde bindemiddel på  $80 \text{ kg/m}^3$ . Dette har også vært produksjonskravet i felt, men ettersom pelene installeres med  $10 \text{ cm}$  overlapp både i lengde- og bredderetning, vil dette i realiteten bidra til en noe større innblandingsmengde. Figur 10.6 illustrerer overlappsonene for dobbel- og trippelribbe med peler med diameter på  $0,6 \text{ m}$  og overlapp på  $0,1 \text{ m}$ .



Figur 10.6: Overlappsoner ved installasjon av dobbelribber og trippelribber.

Dersom man tar hensyn til at pelene overlapper, vil gjennomsnittlig mengde bindemiddel øke med  $13,5 \%$  i dobbelribbene og  $15,3 \%$  i trippelribbene. Til sammenligning viser feltmålingene ca.  $13 \%$  -  $16 \%$  høyere temperatur enn simuleringene for dobbelribbene og ca.  $22 \%$  høyere temperatur for trippelribbene. En økt gjennomsnittlig mengde bindemiddel vil bidra til økt temperatur i grunnen. Det er grunn til å anta at det er en tilnærmet lineær sammenheng mellom mengde bindemiddel og langtidstemperatur, ettersom økt mengde bindemiddel bidrar til økt total varmeutvikling. Det er dermed sannsynlig at forskjellen i temperatur ved felt og Comsol-simuleringene skyldes usikkerheter rundt installert mengde bindemiddel i felt.

En annen viktig faktor er varmekapasiteten og varmeledningsevnen. Ettersom disse parameterne er beregnet og ikke målt, kan det, som beskrevet tidligere, være at parameterne avviker fra reell varmekapasitet og varmeledningsevne.

## 10.5 Oppsummering

Resultatene viser at det er godt samsvar mellom temperaturutviklingen målt i felt og temperaturutviklingen beregnet ved Comsol. Comsol kan dermed benyttes som et numerisk verktøy for å simulere temperaturutviklingen i felt. Modellen passer godt for å sammenligne ulike ribbekonfigurasjoner, og for å forstå mer om hvilke parametre som påvirker temperaturforløpet. Det er samtidig viktig å forstå begrensningene til modellen, og det kan for eksempel være vanskelig å simulere reelle feltsituasjoner på grunn av mange ukjente påvirkende faktorer i felt.



# Kapittel 11

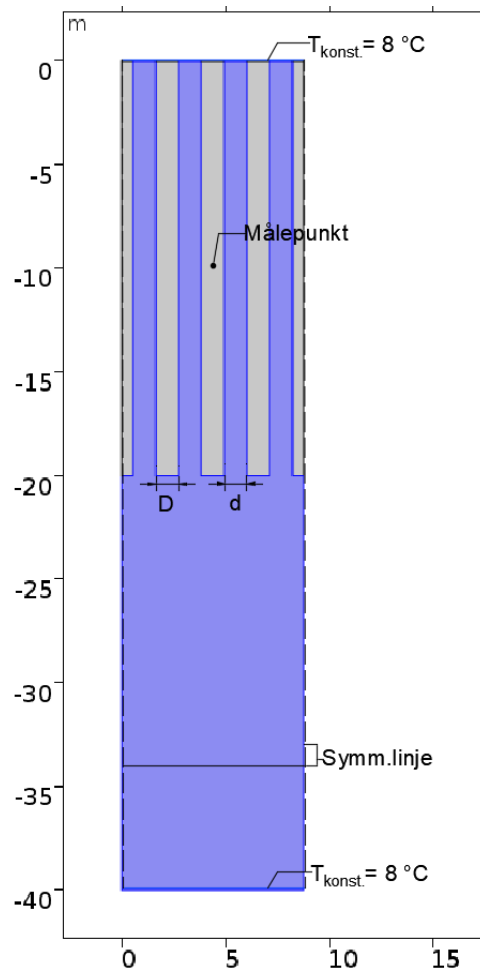
## Sammenligning av ulike ribbekonfigurasjoner

For å forstå hvilken betydning dekningsgraden av kalksementpeler har å si for temperaturutviklingen, har ulike ribbekonfigurasjoner blitt sammenlignet ved bruk av Comsol.

### 11.1 Modell

For å simulere temperaturforløpet for ulike ribbekonfigurasjoner, har det blitt benyttet en tilsvarende modell som i kapittel 10, «Simulering av feltmålinger», hvor både materialparameterne og inputparameterne er uendrede. Temperaturen langs den øvre og nedre randen er i dette tilfellet konstant på  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Videre består modellen av 5 ribber plassert med lik avstand,  $d$ , og lik bredde,  $D$ . Tiden mellom installasjonene er 4 døgn, og ribben lengst til venstre blir aktivert først. Figur 11.1 viser et oppsett av modellen.

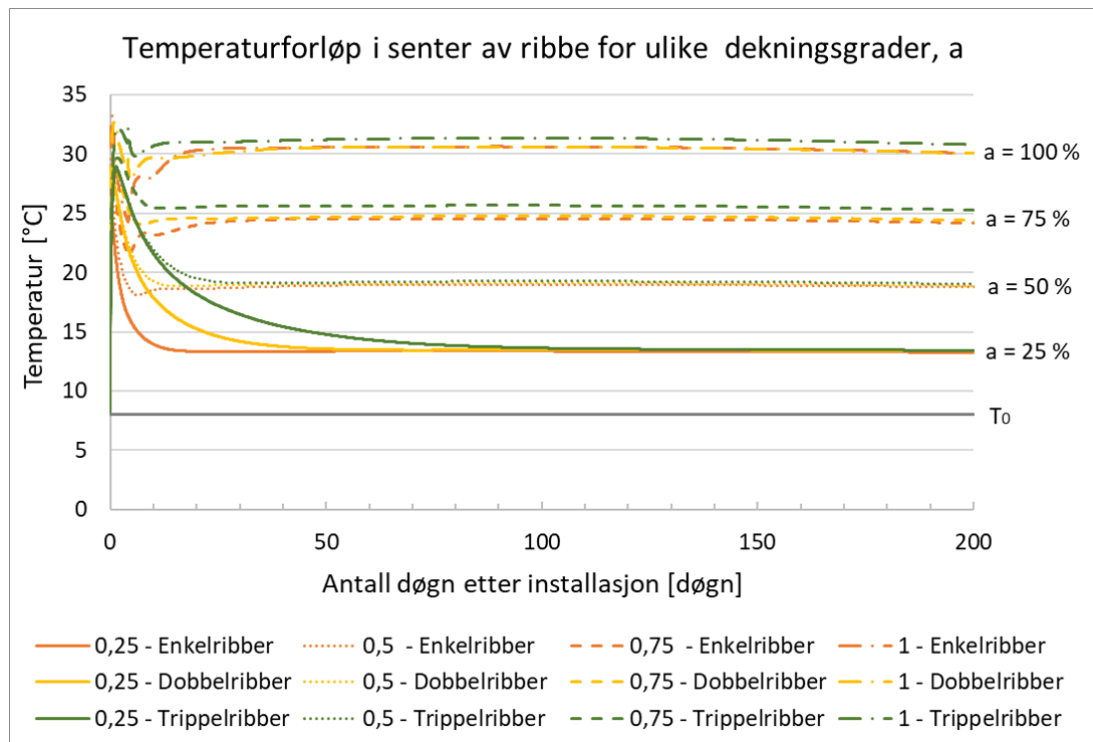
Simuleringene har blitt gjennomført med ulike avstander mellom ribbene, og for enkel-, dobbel- og trippelribber, med ribbebredde,  $D$ , på henholdsvis  $0,6\text{ m}$ ,  $1,1\text{ m}$  og  $1,6\text{ m}$ .



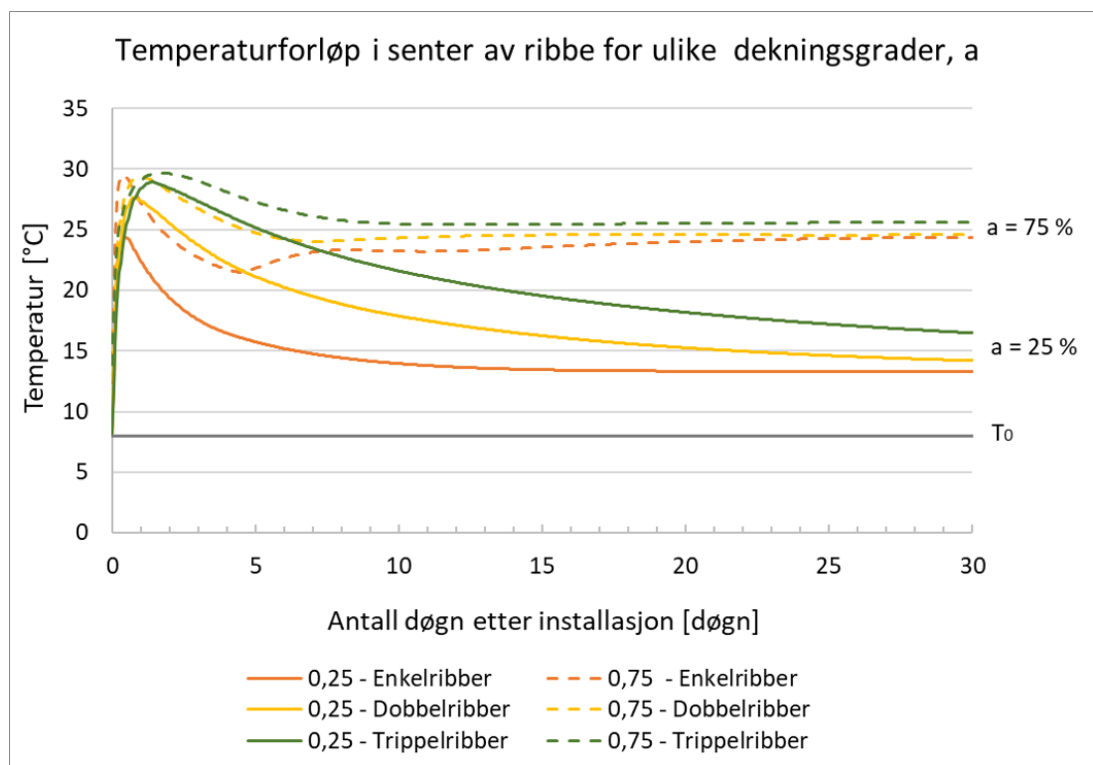
Figur 11.1: Modelloppsett for ribbekonfigurasjoner i felt.

## 11.2 Resultater

Resultatene av simuleringene er vist i figur 11.2 og 11.3. Figur 11.2 viser temperaturutviklingen for ulike ribbekonfigurasjoner for et langt tidsperspektiv, mens figur 11.3 viser temperaturutviklingen for installasjoner med 25 % og 75 % dekningsgrad den første måneden etter installasjon. Alle resultatene er plottet for temperaturforløpet i den midterste ribben. Supplerende plott er vist i vedlegg B.1



Figur 11.2: Temperaturforløp i senter av ribbe for ulike dekningsgrader, de 200 første døgnene etter installasjon.



Figur 11.3: Temperaturforløp i senter av ribbe for 25 % og 75 % dekningsgrad, den første måneden etter installasjon.

### 11.3 Diskusjon

Sammenligningen av ulike ribbekonfigurasjoner viser at det er klare trender mellom temperaturforløpet og dekningsgraden. På kort sikt vil maksimal temperatur være større for større ribbebredde,  $D$ , og maksimal temperaturen er derfor avhengig av om det blir installert enkel-, dobbel- eller trippelribber. Samtidig viser plottene at det på kort sikt er liten forskjell i temperaturen for de ulike dekningsgradene, ved sammenligning av like ribbebredder,  $D$ . Resultatene viser også at det er noe forskjell i temperaturforløpet for ribbene med 100 % dekningsgrad, avhengig av ribbebredden  $D$ . Dette kommer av at simuleringene viser resultater hvor ribber med ulik bredde har blitt installert samtidig. I virkeligheten vil temperaturforløpet for blokkinstallasjon være avhengig av rekkefølgen pelene installeres i.

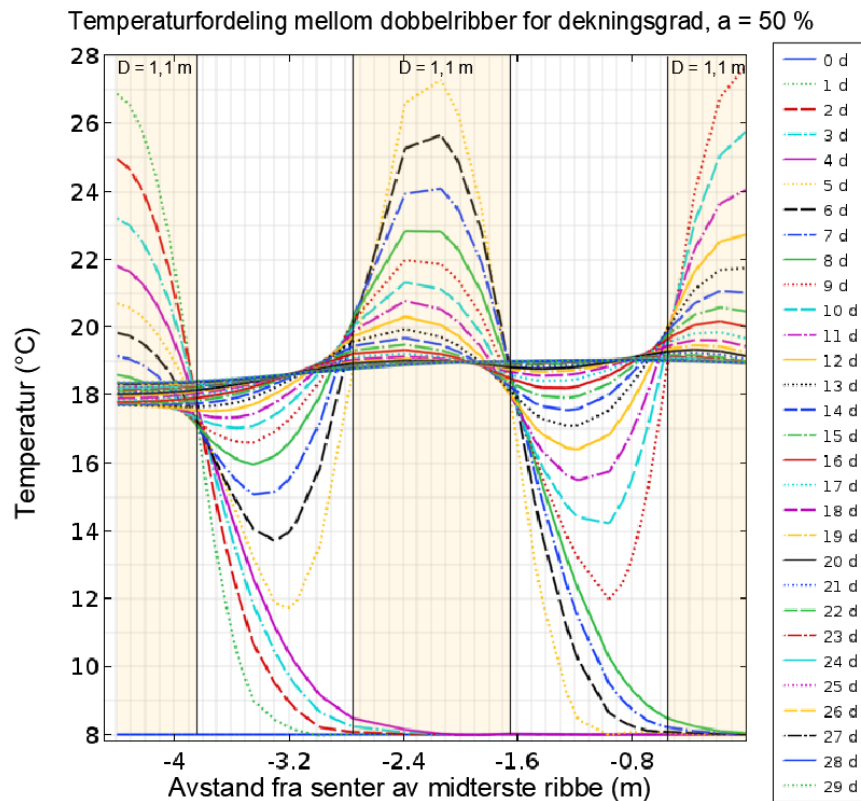
På lang sikt vil temperaturforløpet være tilnærmet uavhengig av om det er installert enkel-, dobbel- eller trippelribber. Temperaturen holdes stabil over en svært lang periode, og selv etter 200 døgn vil temperaturen i pelen være betydelig høyere enn temperaturen før installasjon. Resultatene viser også at det er en lineær sammenheng mellom langtidstemperaturen og dekningsgraden. Dersom dekningsgraden økes med 25 %, vil temperaturen øke med  $5^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$ .

Figur 11.4 viser temperaturen i 10 m dybde ved ulike tidspunkt for 3 dobbelribber, installert med 4 døgn mellomrom og med dekningsgrad på 50 %. Figuren viser at temperaturen etter omtrent 21 døgn har stabilisert seg på ca.  $18^{\circ}\text{C}$ . Desto tettere ribbene er installert, jo høyere temperatur vil jordvolumet stabilisere seg på. Etter at temperaturen har jevnet seg ut, vil eneste varmetap være i topp og bunn av pel. Kurvene viser også at for en dekningsgrad på 50 %, vil starttemperaturen i området hvor neste ribbe installeres i liten grad bli påvirket av varme fra den foregående ribben.

Basert på diskusjonen ovenfor kan man observere at:

1. For 100 % dekningsgrad vil eneste varmetap være i topp og bunn av pelene, og varmetapet i senter av pelene er derfor svært lite.
2. Temperaturvariasjonen mellom de ulike dekningsgradene er tilnærmet lineær.

Observasjonene ovenfor gjør det mulig å estimere langtidstemperaturen for ulike dekningsgrader og ulike mengder bindemiddel. Basert på observasjonene kan man anta at det er til-



Figur 11.4: Temperaturforløp mellom dobbelribber de første 29 døgnene etter installasjon i dybde 10 m.

nærmet null varmetap i senter av pel ved 100 % dekningsgrad. Formel 3.6, for adiabatisk varmeutvikling (Jacobsen et al., 2016), kan derfor benyttes for å beregne temperaturendringer ved 100 % dekningsgrad og ulike mengder bindemiddel:

$$\Delta T = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\delta \cdot C_p} \quad (3.6)$$

hvor

$Q_{\infty}$  = Varme per enhet kalk/semest ( $kJ/kg$ )

$\delta$  = Densitet av leire ( $kg/m^3$ )

$C_p$  = Spesifikk varmekapasitet i kalksementstabilisert leire ( $kJ/kgK$ )

$C$  = Mengde bindemiddel per  $m^3$  leire ( $kg/m^3$ )

Ved antakelsen om lineær sammenheng mellom temperatur og dekningsgrad, vil det også være mulig å beregne langtidstemperaturen for ulike dekningsgrader. Figur 11.5 viser beregninger av langtidstemperaturen i senter av pel for ulike dekningsgrader og ulike mengder

bindemiddel. Temperaturendringene er beregnet for grunnforhold som på Bellevue, og kurver med  $80 \text{ kg/m}^3$ ,  $100 \text{ kg/m}^3$  og  $120 \text{ kg/m}^3$  bindemiddel er vist. I tillegg inkluderer også figuren verdier for simulert temperatur i senter av dobbelribbe etter 80 døgn herding. Sammenligning av den utregnede kurven og Comsol-simuleringene, for  $80 \text{ kg/m}^3$  bindemiddel, viser at antakelsene om «lineær sammenheng mellom temperatur og dekningsgrad» og «adiabatiske forhold», gir god tilnærming. De teoretisk beregnede kurvene kan dermed benyttes som utgangspunkt for å estimere langtidstemperaturen i senter av kalksementpeler. Formel 11.1 nedenfor kan benyttes for å gjøre overslagsberegninger:

$$T_{\text{langtid}} = T_0 + \Delta T \cdot a \quad (11.1)$$

hvor

$T_0$  = Starttemperaturen i leira ( $^{\circ}\text{C}$ )

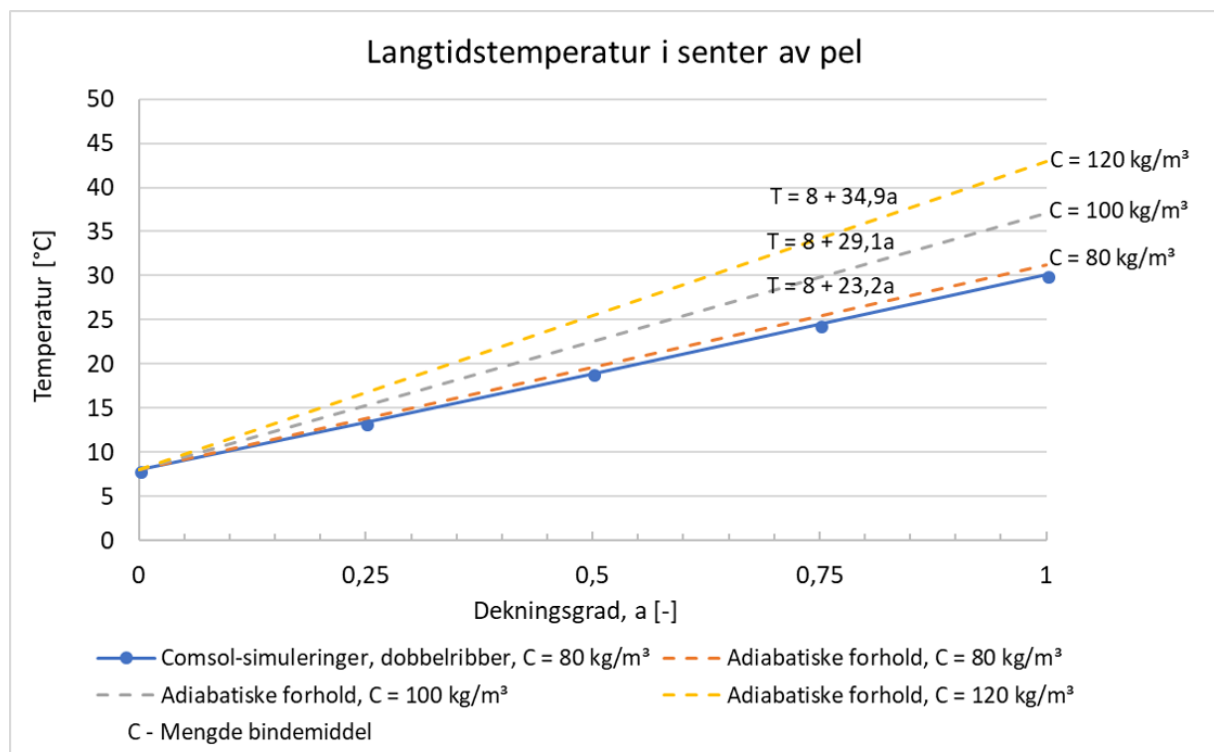
$\Delta T$  = Maksimal teoretisk temperaturendring ( $^{\circ}\text{C}$ )

$a$  = Dekningsgrad (-)

Langtidstemperaturen vil være et mål på temperaturen etter om lag 80 døgn herding. Det er viktig å presisere at sammenhengen kan benyttes for å gjøre overslagsberegninger, og ikke gi nøyaktige svar. Figuren viser at mengde bindemiddel vil ha direkte betydning for langtidstemperaturen i kalksementpelene.

## 11.4 Oppsummering

Sammenligningen av ulike ribbekonfigurasjoner viser at temperaturen holdes høy over en svært lang periode. Langtidstemperaturen er i hovedsak kun avhengig av dekningsgraden, og forholdet mellom dekningsgrad og temperatur er på sikt tilnærmet lineær. Sammenhengen gjør det mulig å estimere langtidstemperaturen også for andre mengder bindemiddel. På kort sikt vil temperaturen være omtrent lik uavhengig av dekningsgrad.



Figur 11.5: Langtidstemperatur i senter av pel for ulike mengder bindemiddel og dekningsgrader for materialparametre fra Bellevue.





## Kapittel 12

# Sammenligning av oppnådd modning for ulike ribbekonfigurasjoner

Dette kapitlet sammenligner oppnådd modning for ribbekonfigurasjonene beskrevet i kapittel 11. Formålet er å forstå hvilken betydning dekningsgraden har å si for oppnådd modning, og dermed skjærfastheten, i kalksementpelene. Samt å sammenligne oppnådd skjærfasthet i felt og laboratoriet, hvor prøvene blir herdet ved konstant temperatur på 8 °C.

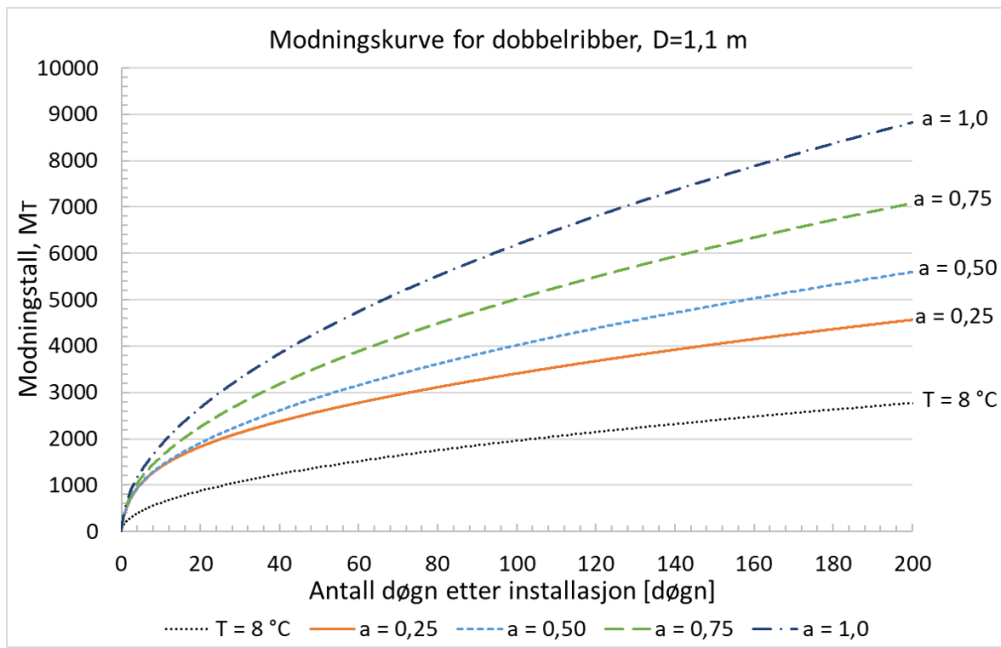
### 12.1 Beregninger

For å beregne modning har formel 4.1a, med K-verdi på 0,5, beskrevet i kapittel 4, blitt benyttet. For å beregne antatt skjærfasthet for en gitt modning har formel 6.1 blitt benyttet. Formelen er basert på resultatene av enaksiale trykkforsøk for laboratorieforskene med herding under ulike temperaturer, og er som følger:

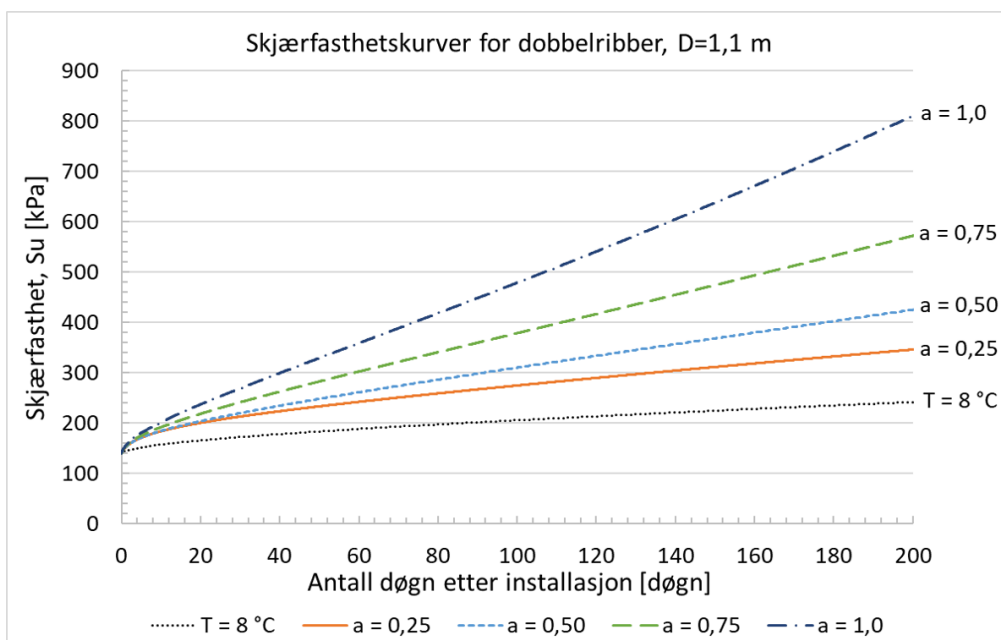
$$S_u = 139 \cdot e^{2 \cdot 10^{-4} \cdot M_T} \quad (6.1)$$

## 12.2 Resultater

Modningskurvene for temperaturforløpet for dobbelribber med ulik dekningsgrad, er vist i figur 12.1. Tilsvarende er skjærfastheten for modningsforløpet vist i figur 12.2. Supplerende grafer for enkel- og trippelribber er vist i vedlegg B.2.



Figur 12.1: Modningskurver for feltinstallasjoner med ulike dekningsgrader, samt modningskurve for herding ved konstant temperatur på 8 °C.



Figur 12.2: Skjærfasthetskurve for feltinstallasjoner med ulike dekningsgrader, samt skjærfasthetskurve for herding ved konstant temperatur på 8 °C.

## 12.3 Diskusjon

Sammenligningen av oppnådd modning for ulike ribbekonfigurasjoner viser at modningen øker betraktelig for installasjoner med høyere dekningsgrad. Forskjellen mellom oppnådd modning for de ulike dekningsgradene er derimot liten de første døgnene etter installasjon. Dette kommer av at temperaturen i pelene varierer lite uavhengig av dekningsgrad, slik figur 11.3 også viser. På lengre sikt vil forskjellen mellom de ulike dekningsgradene derimot bli større og større.

En sammenligning av oppnådd skjærfasthet for herding ved konstant temperatur på 8 °C, og herding ved temperaturforløpet simulert for dobbelribber med dekningsgrad på 25 % og 75 %, er vist i tabell 12.1. I tabellen er det inkludert verdier for herding i 14, 28 og 60 døgn. På kort sikt vil forskjellen i oppnådd skjærfasthet mellom dekningsgradene være liten. Forskjellen øker derimot med tiden, og etter 60 døgn vil man ved en dekningsgrad på 75 % oppnå ca. 26 % høyere skjærfasthet enn ved en dekningsgrad på 25 %.

Dersom man sammenligner oppnådd skjærfasthet for de simulerte temperaturkurvene i felt med oppnådd skjærfasthet ved herding ved 8 °C, er forskjellene enda større. Allerede etter 14 døgn vil oppnådd skjærfasthet for temperaturforløpet gitt ved 75 % dekningsgrad være 26 % høyere, og etter 60 døgn er forskjellen hele 61 %. Forskjellen mellom oppnådd skjærfasthet ved laboratorieforhold og temperaturforløp som i felt, er også beskrevet tidligere i kapittel 6. Begge sammenligningene understreker at dagens standard, hvor skjærfastheten testes for prøver herdet under konstant temperatur på 8 °C, underestimerer fastheten som oppnås i kalksementpeler i felt.

Tabell 12.1: Oppnådd skjærfasthet beregnet for ulike situasjoner.

Installasjonstype	Dekningsgrad	Skjærfasthet [ <i>kPa</i> ]		
		14 døgn	28 døgn	60 døgn
Dobbelribber	25 %	191	210	240
	75 %	203	237	302
Herding ved konstant temp. på 8 °C		161	171	188

Dersom man tar hensyn til at ulike ribbekonfigurasjoner fører til ulike temperaturforløp i felt, vil det være mulig å forbedre dimensjoneringsgrunnlaget. For eksempel kan man sammenligne oppnådd skjærfasthet ved de ulike konfigurasjonene, og komme frem til hvilken dekningsgrad som er nødvendig for å oppnå tilstrekkelig skjærfasthet. Mer nøyaktig dimensjonering vil kunne spare kostnader i form av mindre installasjonsarbeid og tilstrekkelig mengde bindemiddel. Det er viktig å nevne at eksempelet ovenfor kun er gjeldene for leire fra Klett og leirer med lignende egenskaper, ettersom laboratorieforsøkene har blitt gjennomført med leire fra Klett.

## 12.4 Oppsummering

Sammenligning av ulike ribbekonfigurasjoner og oppnådd modning gir økt forståelse rundt hvilken skjærfasthet som kan oppnås i kalksementpeler. Ved å ta hensyn til at dekningsgraden får betydning for fastheten, og at dagens standard med herding på 8 °C underestimerer skjærfastheten i felt, kan man oppnå en mye mer nøyaktig dimensjonering. Dette vil videre kunne bidra til å spare store kostnader i form av nødvendig installasjonsarbeid og nødvendig mengde bindemiddel.

## **Del IV**

### **Konklusjon og videre arbeid**



# Kapittel 13

## Konklusjon

Resultatene av laboratorieforsøkene med herding av stabilisert leire ved ulike temperaturer, viser at både skjærfastheten og stivheten av materialet er temperaturavhengig. Til tross for stor spredning, viser resultatene en tydelig økning i både fasthet og stivhet ved økende herdetemperatur. Som et eksempel økte skjærfastheten i gjennomsnitt med ca. 150 *kPa* - 175 *kPa* for prøver herdet ved 41 °C, sammenlignet med prøver herdet ved 8 °C ved herding i 28 døgn. Ved å benytte modenhetsprinsippet kan man ta hensyn til herdetemperatur og herdetid, og dermed oppnå en mer korrekt beregning av skjærfastheten og stivheten.

Ved nedsetting av kalksementpeler i grunnen viser både utførte feltmålinger og laboratorieforsøk at temperaturen øker betraktelig i forhold til jordtemperaturen. Feltmålingene fra Bellevue i Fredrikstad, viser at temperaturen i kalksementpelene økte raskt, og at en maksimal temperatur på mellom 26 °C og 44 °C var oppnådd etter 1 til 5 døgn. Etter en rask nedgang, holdt temperaturen seg stabil over en svært lang tidsperiode, og etter 85 døgn viste temperaturmålingene en temperatur på mellom 19 °C og 23 °C, i dybde 9 *m* og dypere. Temperaturforløpet i felt har også blitt beregnet ved numeriske simuleringer. Modellen har blitt utarbeidet med utgangspunkt i laboratoriemålingene, og viser godt samsvar med feltmålingene fra Bellevue, hvor temperaturforløpet viser lignende trend og modellen spesielt underbygger den høye, stabile temperaturen på lang sikt.

Resultatene av de numeriske simuleringene viser også hvordan ulike effekter påvirker temperaturutviklingen i felt. Simuleringene viser at langtidstemperaturen i kalksementpeler i stor grad er avhengig av dekningsgraden, og at sammenhengen mellom dekningsgrad og

langtidstemperatur er tilnærmet lineær. En økning i dekningsgraden på 25 % vil føre til en endring i langtidstemperaturen på  $5^{\circ}\text{C}$  -  $6^{\circ}\text{C}$ , gitt en innblandingmengde på  $80\text{ kg/m}^3$ . Denne sammenhengen gjør det også mulig å estimere langtidstemperaturen for andre mengder bindemiddel, hvor en økning i mengde bindemiddel vil føre til en økning i temperaturen. Laboratorieforsøket med måling av temperaturen i leire stabilisert med ulike bindemidler, viser at temperaturutviklingen ved stabilisering i stor grad er avhengig av type bindemiddel. Stabilisering med kalk oppnådde både en høyere og raskere temperaturøkning enn stabilisering med sement. I tillegg til effektene nevnt ovenfor har starttemperaturen i grunnen før stabilisering, tiden mellom ribbeinstallasjoner og varmekapasiteten og varmeledningsevnen til materialet betydning for temperaturforløpet.

Ved å ta hensyn til resultatene i oppgaven vil det være mulig å forbedre grunnlaget for dimensjoneringen av kalksementstabilisering, og oppnå et mer nøyaktig estimat av både skjærfastheten og stivheten. Dette vil kunne bidra til kostnadsbesparelser i form av at høyere fasthet vil kunne dokumenteres, og at stabilisering med mindre mengde bindemiddel vil være tilstrekkelig. For eksempel vil man ved å benytte temperaturmålingene fra Bellevue og laboratorieresultatene, oppnå en teoretisk økning i skjærfastheten på ca. 38 %, sammenlignet med fastheten man oppnår ved herding ved  $8^{\circ}\text{C}$  etter 28 døgn. Man vil også kunne benytte sammenhengen mellom oppnådd modning og skjærfasthet og stivhet til å gjennomføre laboratorieforsøk raskere, ved å herde prøvene under høyere temperatur. Resultatene har også bidratt til en større forståelse rundt årsaken til at fastheten oppnådd i felt ofte er ulik fastheten beregnet i laboratoriet.

Det er viktig å presisere at forsøkene utført i oppgaven er basert på få målepunkter, og at det ligger noen begrensninger til grunne for de numeriske beregningene. Mer arbeid og flere forsøk vil være nødvendig for å verifisere og forbedre funnene. Med hensyn på dette er anbefalinger til videre arbeid diskutert i neste kapittel.



# Kapittel 14

## Forslag til videre arbeid

I masteroppgaven har det blitt gjennomført et begrenset antall forsøk og beregninger på grunn av tidsbegrensning. Forslag til videre arbeid vil derfor i hovedsak være å utvide antall forsøk for å verifisere og forbedre funnene i masteroppgaven. Det er på sikt ønskelig at temperatureffekter i kalksementstabilisert leire tas med som en avgjørende faktor ved design av materialeegenskapene i kalksementpeler. Avsnittene nedenfor er derfor anbefalinger til videre arbeid.

### **Opparbeide erfaringsdatabase for norske forhold**

Sammenhengen mellom skjærfasthet og herdetemperatur er avhengig av type jordart og bindemiddel, og må derfor testes for hvert enkelt tilfelle. Ved å gjennomføre laboratorietester med herding under ulike temperaturer for ulike typer leirer, kan man på sikt opparbeide en erfaringsdatabase for modningstall og skjærfasthet for typiske leirer fra forskjellige områder i landet. Laboratorietestene bør også inkludere testing av ulike mengder bindemiddel og ulik herdetid. Erfaringsdatabasen kan benyttes som basis for beregning av oppnådd fasthet og stivhet i kalksementpeler, og vil gi større innsikt i hvilke faktorer som påvirker fasthet- og stivhetsutviklingen ved herding under ulike temperaturer.

### **Gjennomføre flere temperaturmålinger i felt**

Det finnes i dag et begrenset antall målinger av temperaturforløpet i kalksementpeler i felt. Flere målinger vil gi større innsikt i hvor høy temperatur som oppnås i felt, og hvilke faktorer som påvirker forløpet.

### **Gjennomføre flere temperaturmålinger i laboratoriet**

Det er av interesse å gjennomføre flere laboratorieforsøk med måling av temperaturutviklingen i stabilisert leire. Ved å måle temperaturutviklingen for ulike innblandingsmengder og ulike sammensetninger av bindemiddel, vil det være mulig å opparbeide en sammenheng mellom temperaturforløp og mengde og type bindemiddel. Sammenhengen vil kunne benyttes for å tilbakeregne temperaturen for ulike situasjoner.

### **Modellere temperaturutviklingen for flere ulike situasjoner**

Det vil være av stor nytte å modellere temperaturforløpet ved numeriske simuleringer, også for andre situasjoner enn de som er beskrevet i denne oppgaven. For eksempel kan det være aktuelt å simulere effekten av nedkjøling, som følge av grunnvannsstrømning i permeable lag.

# Referanseliste

- Andersland, O. B. og Ladanyi, B. (2004). *Frozen ground engineering*. John Wiley & Sons, inc, New Jersey.
- Babasaki, R., Terashi, M., Suzuki, T., Maekawa, A., Kawamura, M., og Fukazawa, E. (1996). Japanese geotechnical society technical committee reports: Factors influencing the strength of improved soil. *Proc. of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 2:913–918.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4):223–237.
- Boynton, R. S. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. John Wiley & Sons, inc.
- Christensen, S., Watn, A., Nordal, S., og Emdal, A. (1998). *Grunnforsterkning med kalksementpeler*. SINTEF Bygg og Miljøteknikk, Trondheim.
- Clare, K. E. og Pollard, A. E. (1954). The effect of curing temperature on the compressive strength of soil-cement mixtures. *Geotechnique*, IV.
- COMSOL Multiphysics v.5.3 (2018). *COMSOL Documentation, Theory for heat transfer in solids*. COMSOL Multiphysics.
- Enami, A., Yoshida, M., Hibino, S., Takahashi, M., og Akitani, K. (1985). In situ measurement of temperature in soil cement columns and influence of curing temperature on unconfined compressive strength of soil cement. *Proc. of the 20th Annual Conference of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pages 1937–1940. (På japansk).

- Gavel-Solberg, V. (2015). *Egenskaper av kalksementstabilisert leire, Oppnådd skjærfasthet i leire med felt- og laboratorieinnblanding av kalksement*. NGI, Trondheim.
- George, S. Z., Ponniah, D. A., og Little, J. A. (1992). Effect of temperature on lime-soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 6(4):247–252.
- Hansson, S. (2012). *Kalksementstabilisering ved E6 Trondheim – Stjørdal, parsell Trondheim dagsone vest*. (mastergradsavhandling), Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- Hassibi, M. (1999). An overview of lime slaking and factors that affect the process. In *Presentation to 3rd International Sorbalit Symposium*.
- Hernandez-Bautista, E., Bentz, D. P., Sandoval-Torres, S., og Cano-Barrita, P. d. J. (2014). *Modeling Heat and Moisture Transport During Hydration of Cement-Based Materials in Semi-Adiabatic Conditions*. Proceedings of the 2014 COMSOL Conference, Boston.
- Jacobsen, S., Maage, M., Smepllass, S., Kjellsen, K., Sellevold, E., Lindgård, J., Cepuritis, R., Myrdal, R., Bjøntegaard, Ø., og Geiker, M. (2016). *Hydration, Curing technology*. Concrete Technology 1 TKT 4215. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Janz, M. og Johansson, S. (2002). *The function of different binding agents in deep stabilization*. (9th Report). Linköping, Sweden: Swedish Deep Stabilization Research Centre.
- Johansson, S., Åhnberg, H., og Pihi, H. (2006). *Kemiska reaktioner vid stabilisering av jord*. (Arbetsrapport 38), Lindköping: Swedish Deep Stabilization Research Centre.
- Kartverket (2017). Norgeskart.no. Hentet fra: <http://norgeskart.no/#!?project=seeiendom&layers=1002&zoom=13&lat=7030253.81&lon=265771.24>. (30.10.2017).
- Kitazume, M. og Terashi, M. (2013). *The deep mixing method*. London: CRC Press.
- Kujala, K. (1984). Faktorer som inverkar på djupstabiliserade jordars mekaniska egenskaper. *Proc. NGM-84*, 2:895–902.
- Metcalf, J. B. (1963). *The Effect of High Curing Temperature on the Unconfined Compressive Strength of a Heavy Clay stabilized with Lime and with Cement*. Proc. 4th Australian-New Zealand Conf. on SMFE, Adelaide.

- Norges Geotekniske Institutt (2014). *Grunnundersøkelser -Datarapport, Miljøpakken-E6 Jaktøyen-Storler*. NGI, Trondheim.
- Norges Geotekniske Institutt (2017). *Grunnundersøkelser -Datarapport, Bellevue Brygge*. NGI, Trondheim.
- Norsk Geoteknisk Forening (2012). *Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler*. NGE, Oslo.
- Olivier, J., Schure, K., og Peters, J. (2017). *Trends in global CO<sub>2</sub> and global greenhouse gas emissions: 2017 Report*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Hentet fra: <http://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2017-report>.
- Statens Vegvesen (2014). 225 kalksementstabilisering av leire i laboratoriet. In *Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser*. pp. 176-182. Oslo: Vegdirektoratet.
- Suzuki, Y. (1982). *Deep Chemical Mixing Method Using Cement as Hardening Agent*. Symp . on Soil and Rock Improvement Techn. including Geotextiles. Reinforced Earth and Modern Piling Methods, Bangkok.
- Taylor, H. F. W. (1990). *Cement Chemistry*. Academic Press, London.
- Terashi, M., Okumura, T., og Mitsumoto, T. (1977). Fundamental properties of lime-treated soils. *Port and Harbour Research Institute*, 16(1):3-28. (På japansk).
- Åhnberg, H. (2006). *Strength of stabilized soils: A laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder*. PhD thesis, Lund, Sweden: Swedish Deep Stabilization Research Center.
- Åhnberg, H., Johansson, S., Retelius, A., Ljungcrantz, C., Holmquist, L., og Holm, G. (1995). *Cement och kalk för djupstabilisering av jord, En kemisk-fysikalisk studie av stabiliserings-effekter*. (SGI Rapport, 48), Statens Geotekniska Institut. Linköping.
- Åhnberg, H. og Holm, G. (1987). *Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk-och cementstabiliserad jord*. pp. 93-146, (SGI Rapport 30), Statens Geotekniska Institut. Linköping.

Åhnberg, H. og Pihi, H. (1997). *Kalktypans inverkan på stabiliseringsresultatet. Förstudie.* (Rapport 2), Swedish Deep Stabilization Research Centre. Linköping, Sweden.

# Vedlegg A

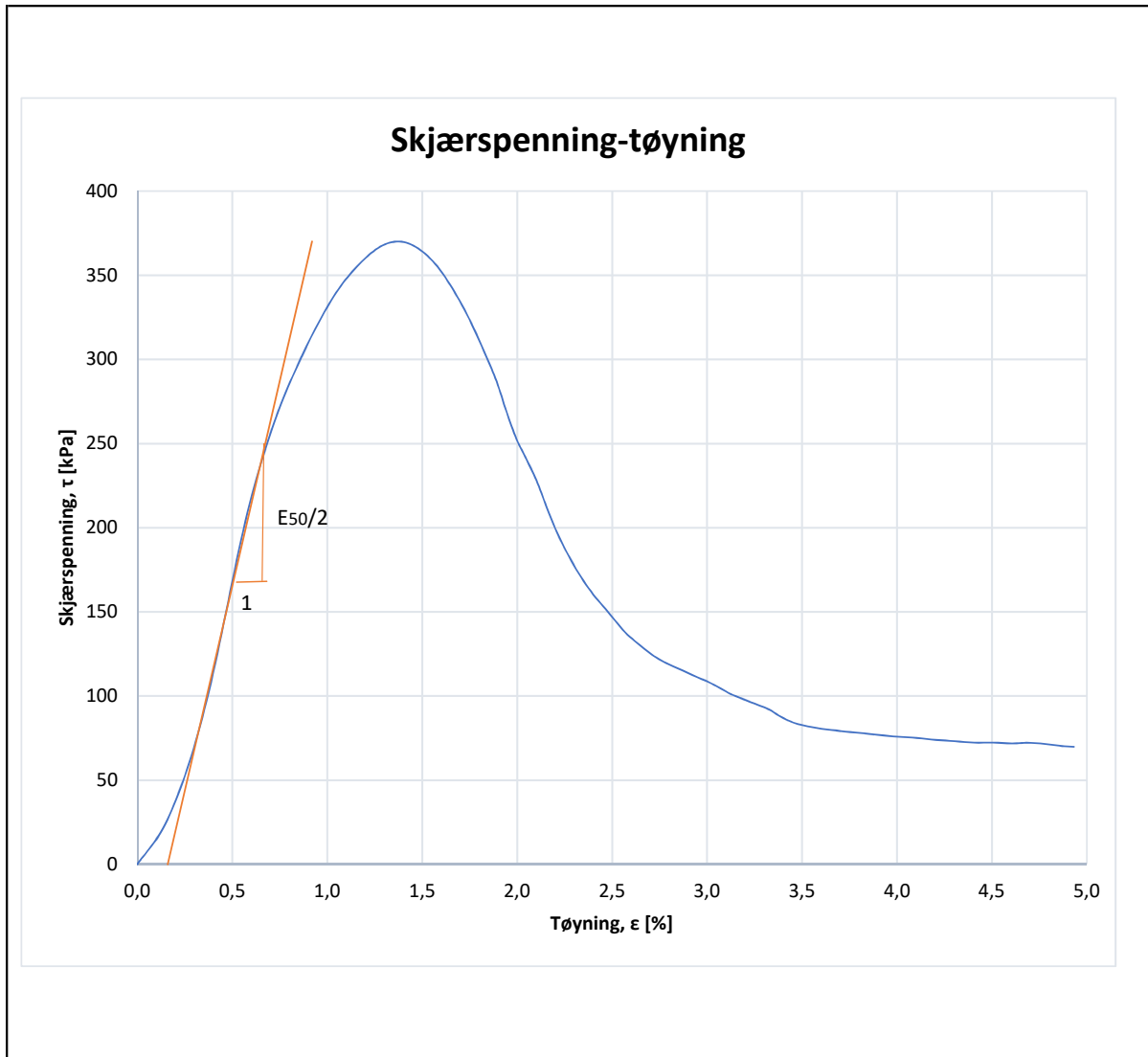
## Resultater av laboratorieundersøkelsene

### A.1 Enaksiale trykkforsøk

Tabell A.1: Oversikt over vedlegg fra resultater av enaksiale trykkforsøk

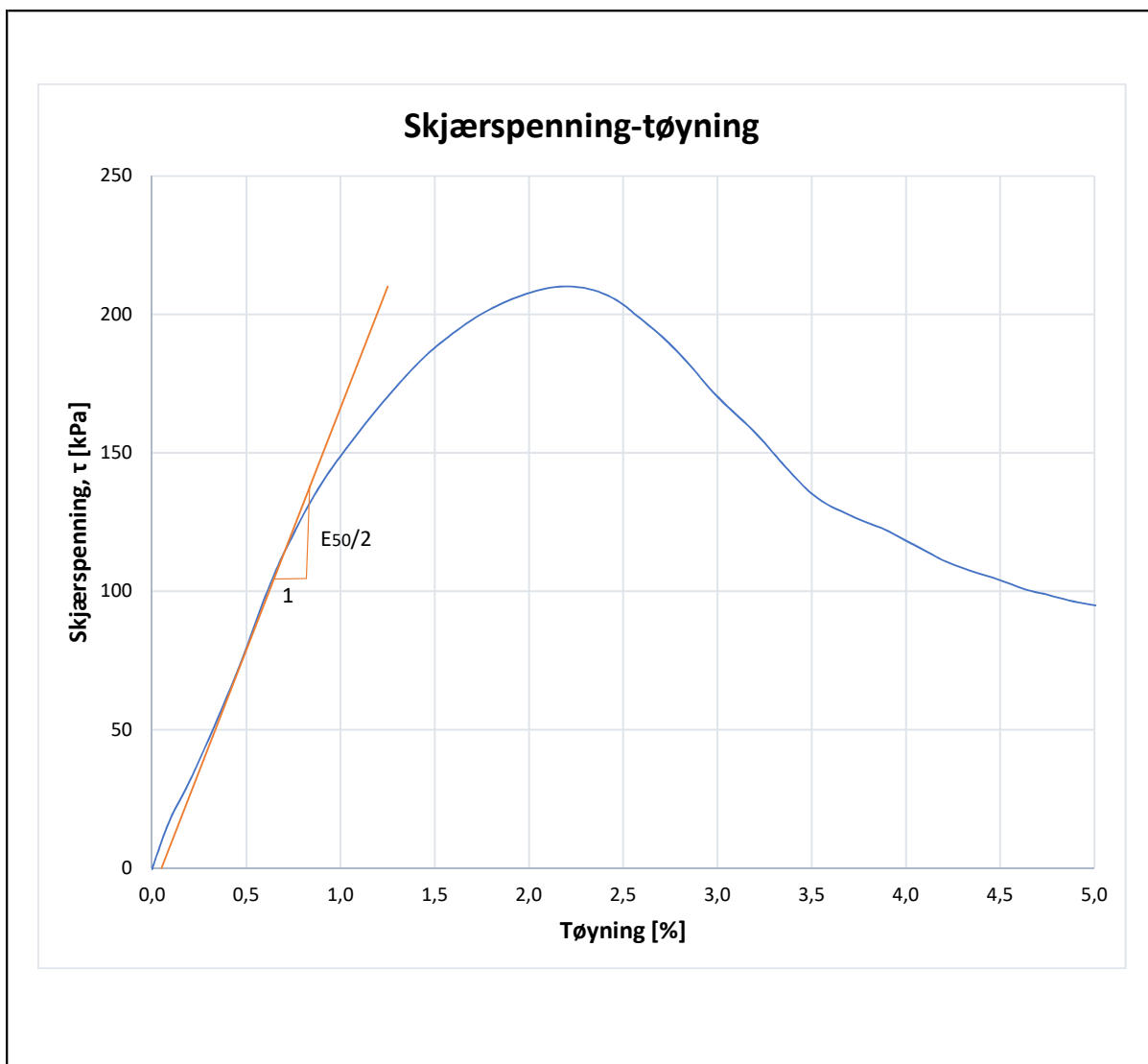
Tegningsnummer	Prøvenummer	Herdetemperatur (°C)
A1.1	S01	41
A1.2	S02	8
A1.3	S03	75
A1.4	S04	41
A1.5	S05	8
A1.6	S06	75
A1.7	K01	41
A1.8	K02	8
A1.9	K03	77
A1.10	K04	41
A1.11	K05	8
A1.12	K06	77
A1.13	K07	41
A1.14	K08	8
A1.15	K09	77
A1.16	K11	8

### A.1.1 Sementstabiliserte prøver

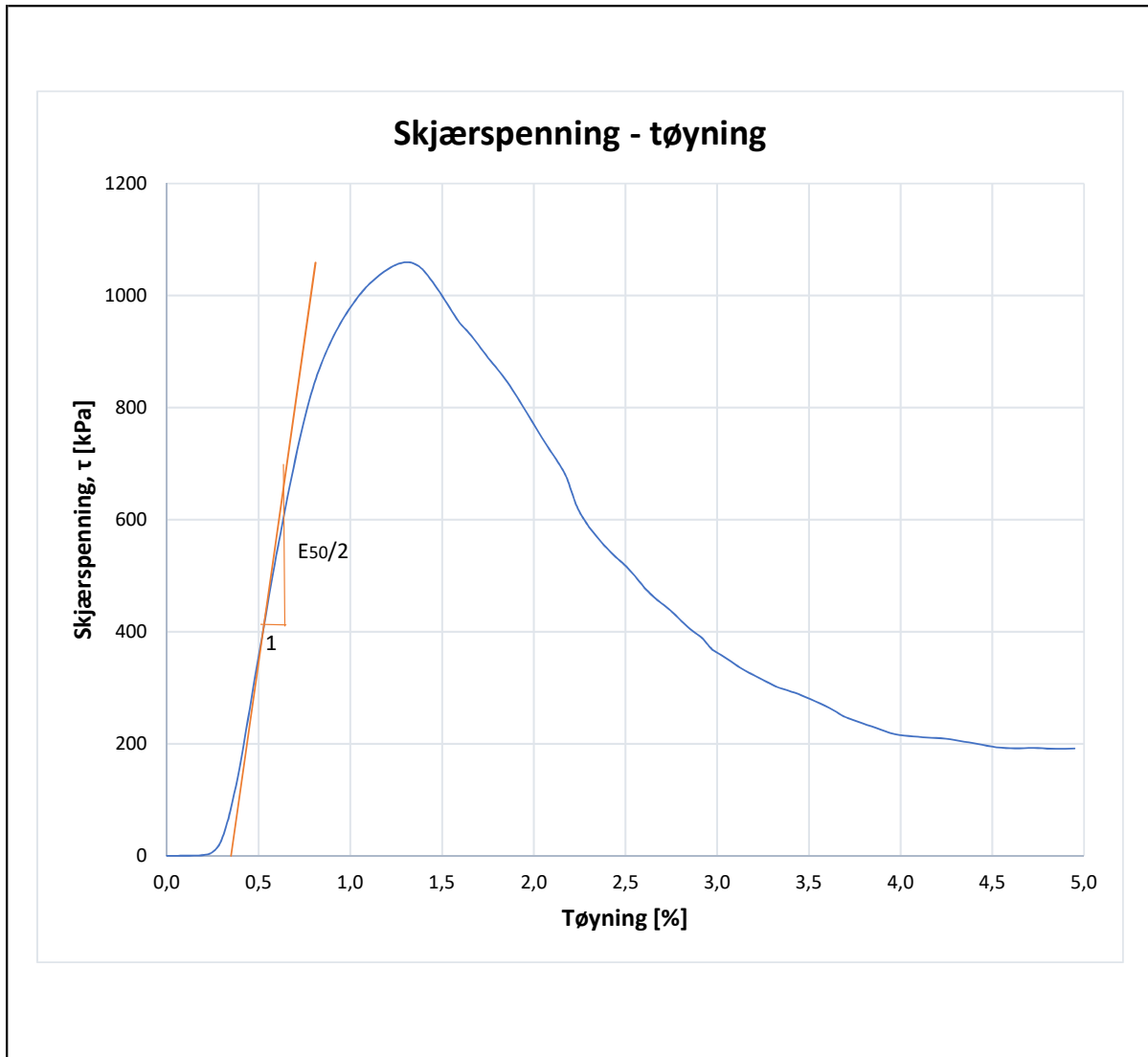


Tegningsnr: A1.1	Leire hentet fra: Klett		
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Dybde: 9,5m	Type bindemiddel: Sement	Bruddtøyning: $\varepsilon_{brudd} = 1,4 \%$
Prøvenr.: S01	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Maksimal skjærfasthet: $\tau_{max} = 370,1 \text{ kPa}$
Dato: 09.11.2017	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	Herdetid: 28 døgn	Stivhet: $E_{50} = 97,40 \text{ MPa}$
Tegnet av: PW	Tyngdetetthet etter stab.: $\gamma_{stab.mat.} = 19,3 \text{ kN/m}^3$	Herdetemperatur: 41 °C	$\frac{E_{50}}{\tau_{max}} = 263,2$

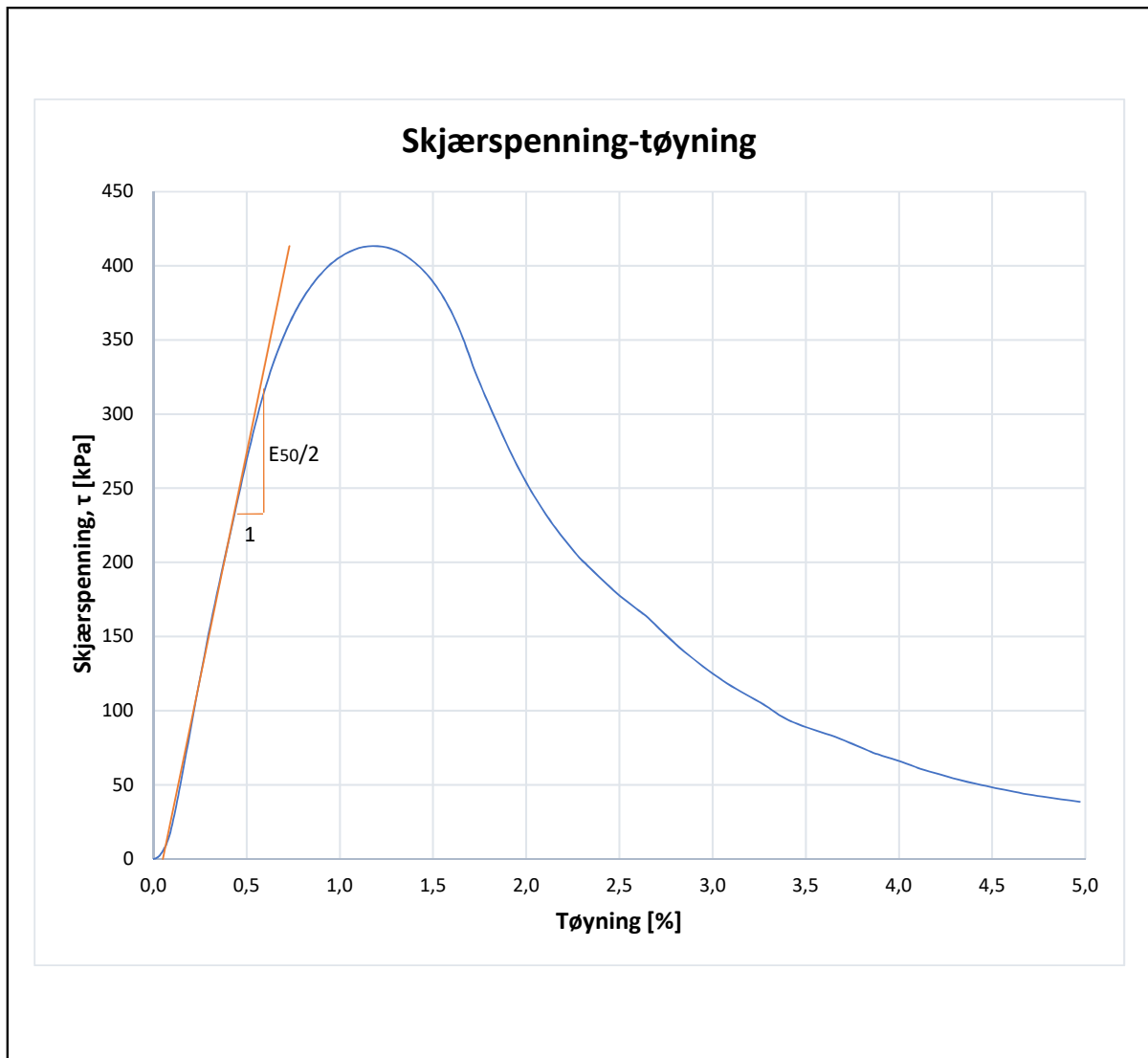




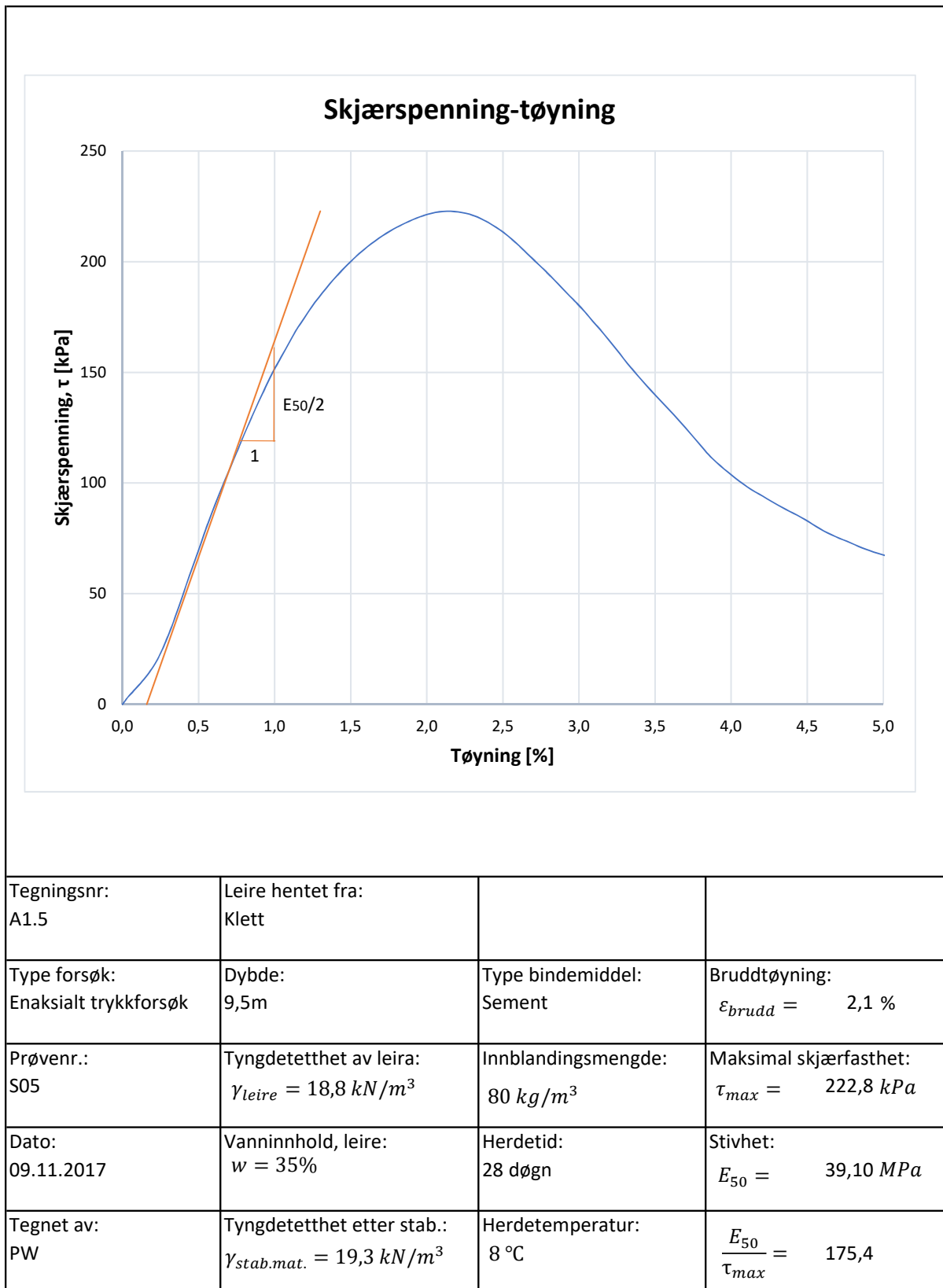
Tegningsnr: A1.2	Leire hentet fra: Klett		
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Dybde: 9,5m	Type bindemiddel: Sement	Bruddtøyning: $\varepsilon_{brudd} = 2,2 \%$
Prøvenr.: S02	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Maksimal skjærfasthet: $\tau_{max} = 210,1 \text{ kPa}$
Dato: 09.11.2017	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	Herdetid: 28 døgn	Stivhet: $E_{50} = 35,00 \text{ MPa}$
Tegnet av: PW	Tyngdetetthet etter stab.: $\gamma_{stab.mat.} = 19,2 \text{ kN/m}^3$	Herdetemperatur: $8 \text{ }^\circ\text{C}$	$\frac{E_{50}}{\tau_{max}} = 166,7$

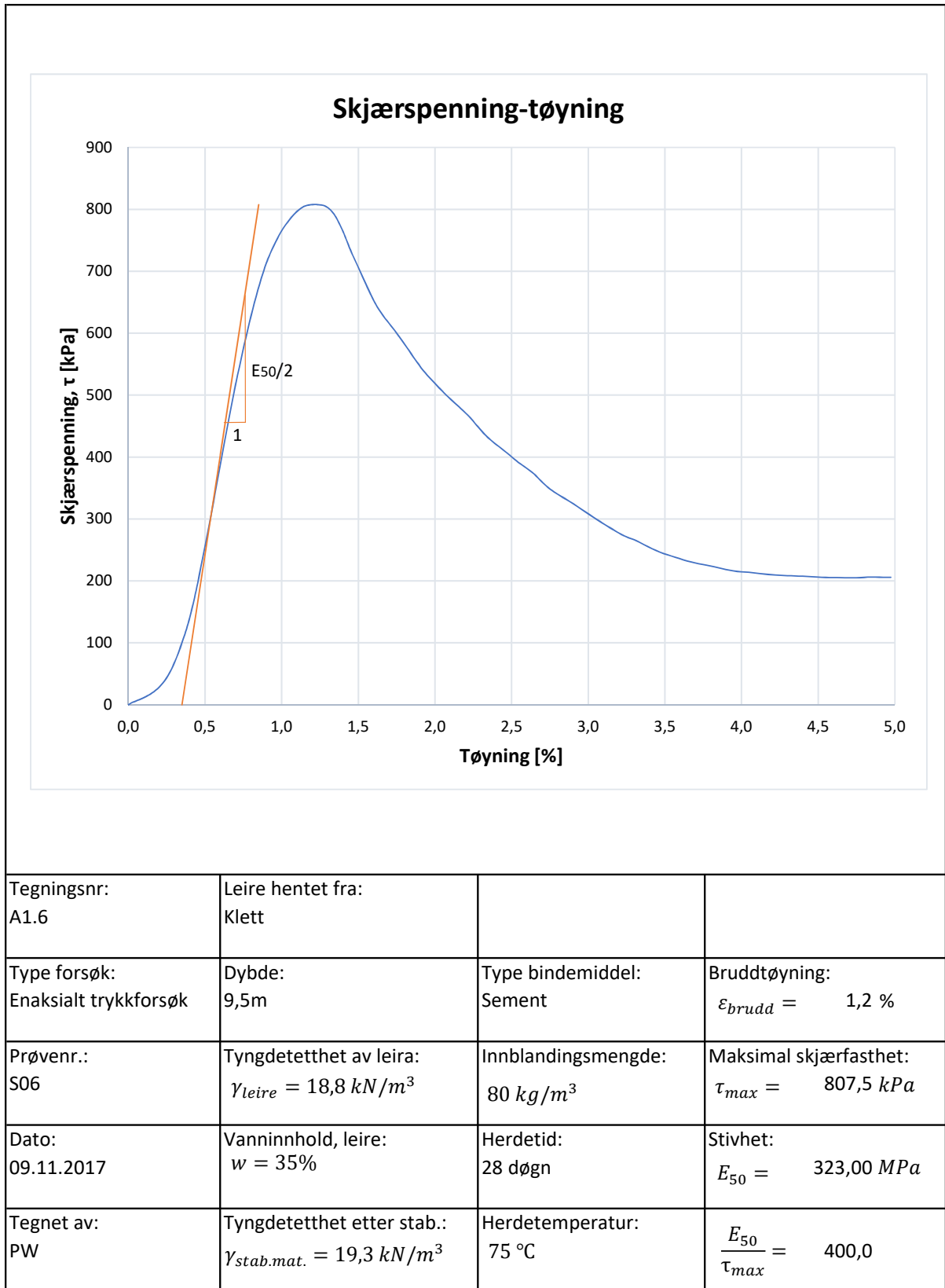


Tegningsnr: A1.3	Leire hentet fra: Klett		
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Dybde: 9,5m	Type bindemiddel: Sement	Bruddtøyning: $\epsilon_{brudd} = 1,3 \%$
Prøvenr.: S03	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Maksimal skjærfasthet: $\tau_{max} = 1058,8 \text{ kPa}$
Dato: 09.11.2017	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	Herdetid: 28 døgn	Stivhet: $E_{50} = 460,40 \text{ MPa}$
Tegnet av: PW	Tyngdetetthet etter stab.: $\gamma_{stab.mat.} = 19,3 \text{ kN/m}^3$	Herdetemperatur: $75 \text{ }^\circ\text{C}$	$\frac{E_{50}}{\tau_{max}} = 434,8$

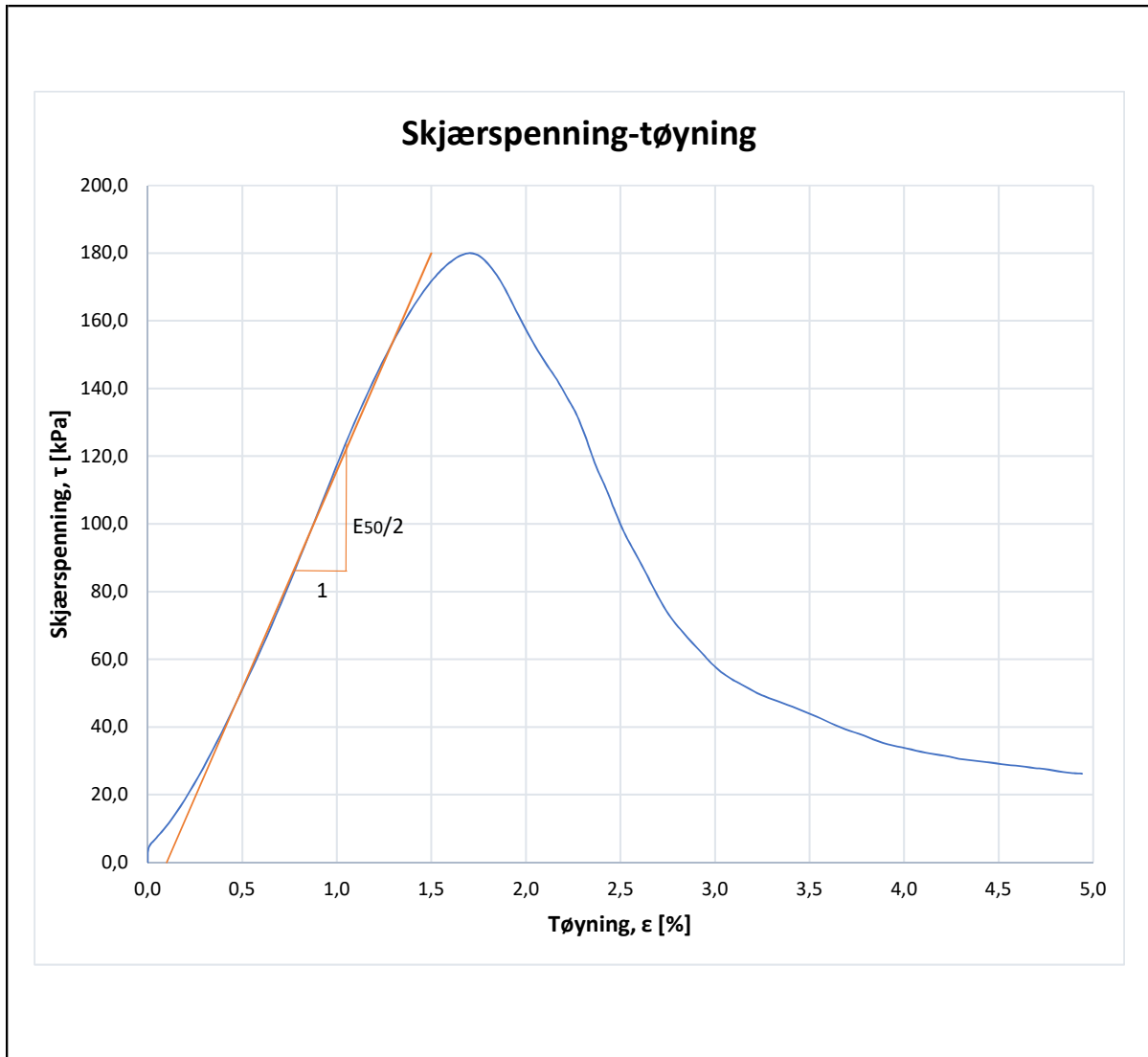


Tegningsnr: A1.4	Leire hentet fra: Klett		
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Dybde: 9,5m	Type bindemiddel: Sement	Bruddtøyning: $\varepsilon_{brudd} = 1,2 \%$
Prøvenr.: S04	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Maksimal skjærfasthet: $\tau_{max} = 413,2 \text{ kPa}$
Dato: 09.11.2017	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	Herdetid: 28 døgn	Stivhet: $E_{50} = 121,50 \text{ MPa}$
Tegnet av: PW	Tyngdetetthet etter stab.: $\gamma_{stab.mat.} = 19,4 \text{ kN/m}^3$	Herdetemperatur: 41 °C	$\frac{E_{50}}{\tau_{max}} = 294,1$

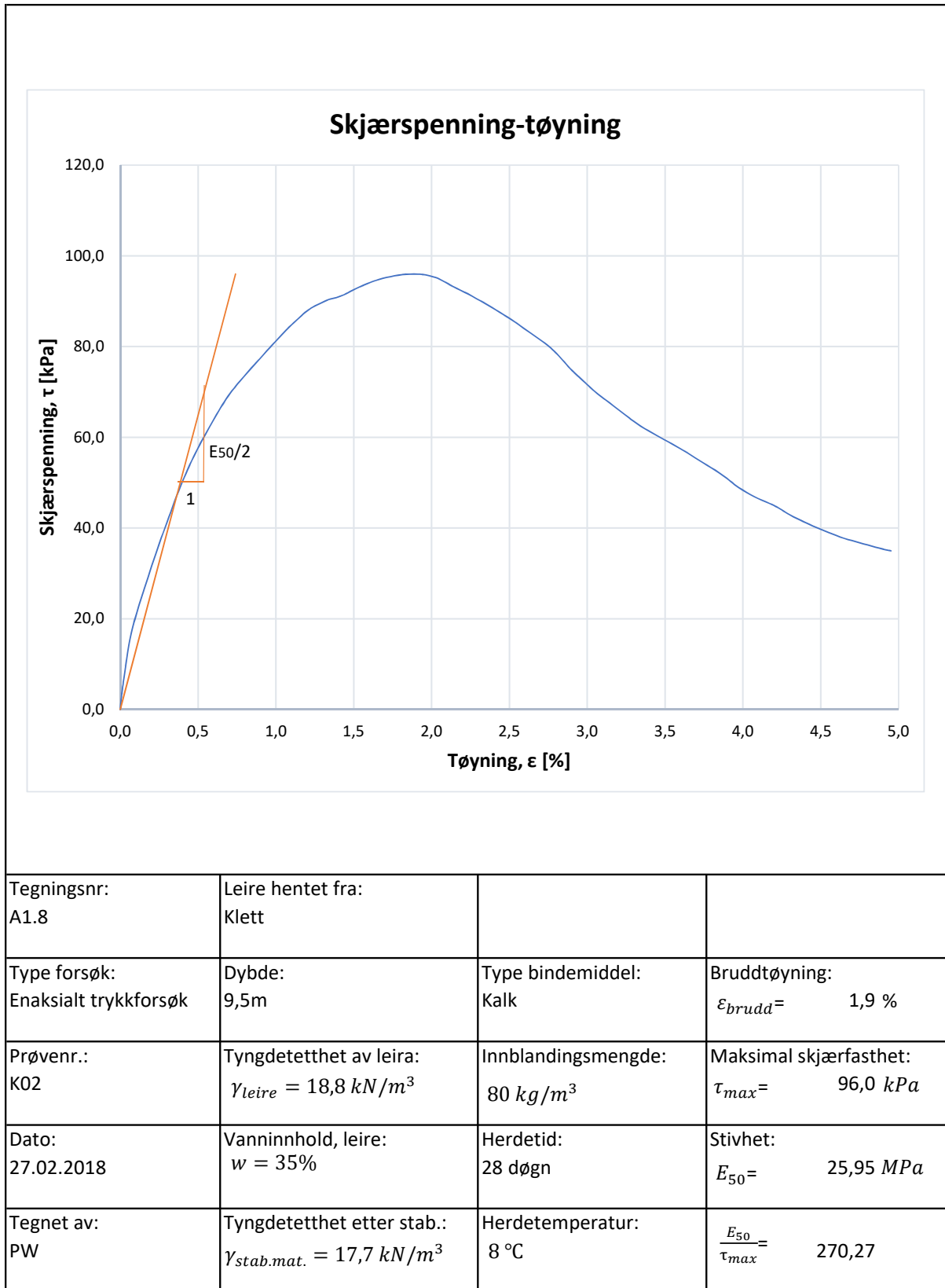


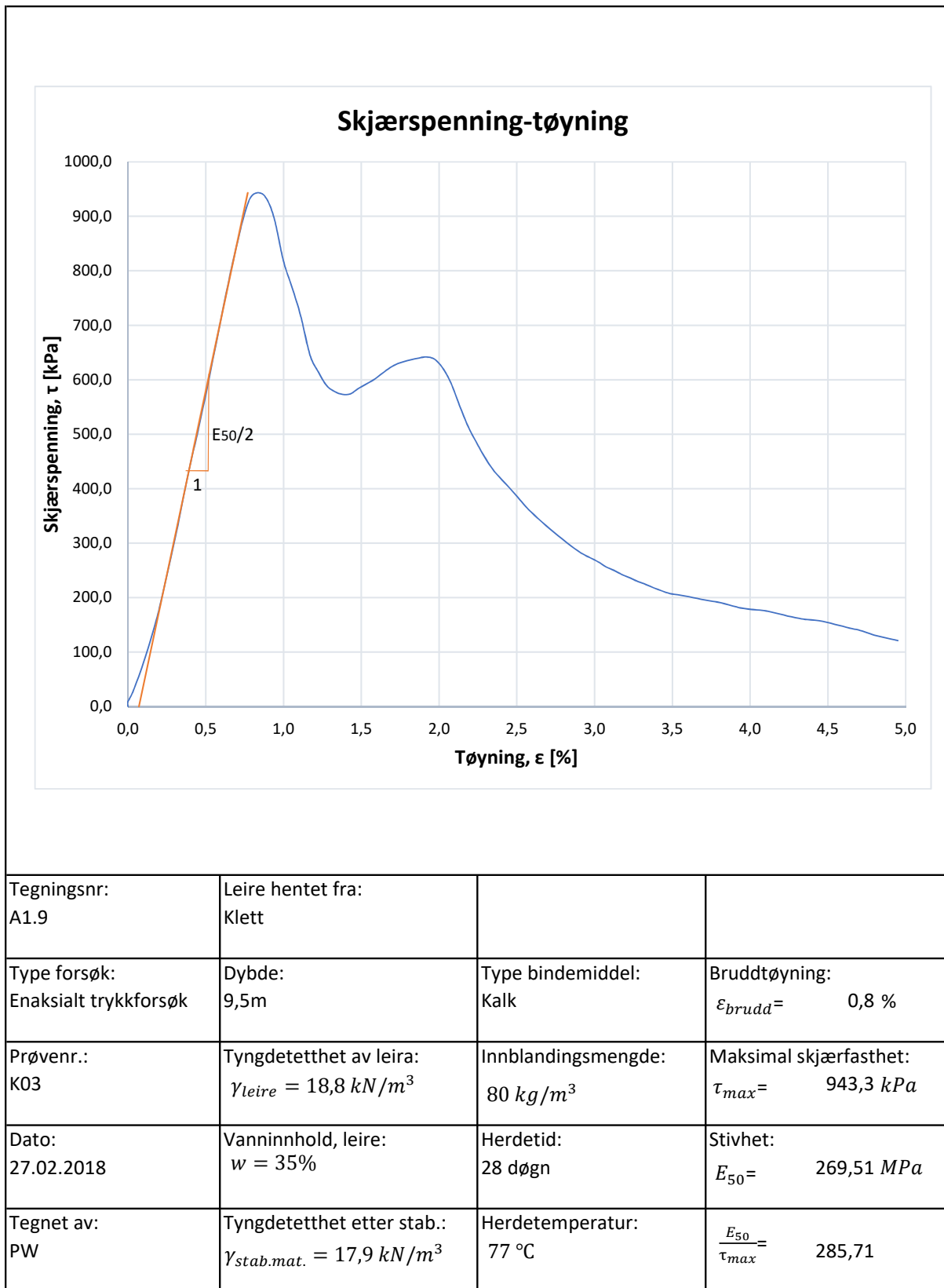


### A.1.2 Kalkstabiliserte prøver

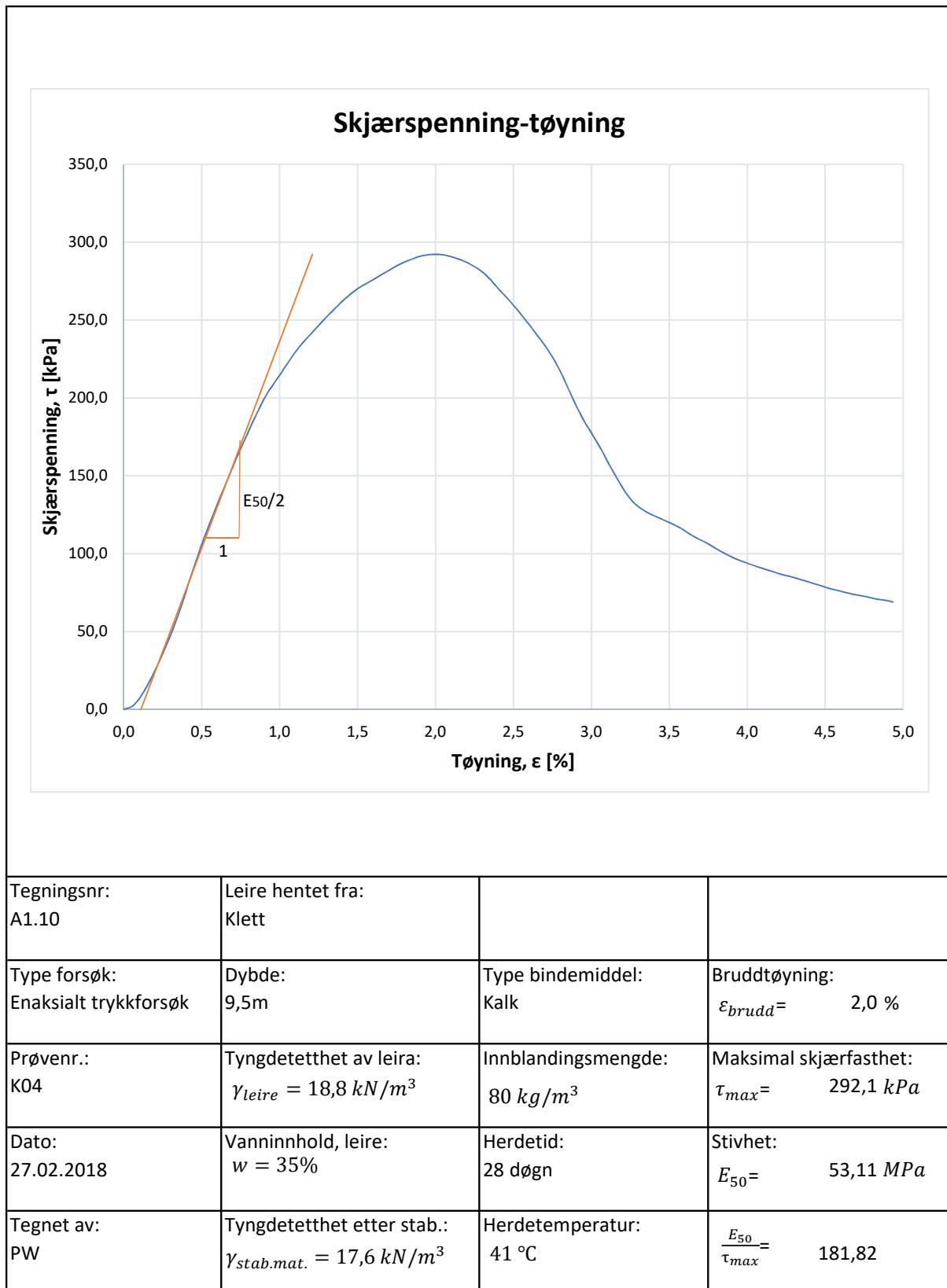


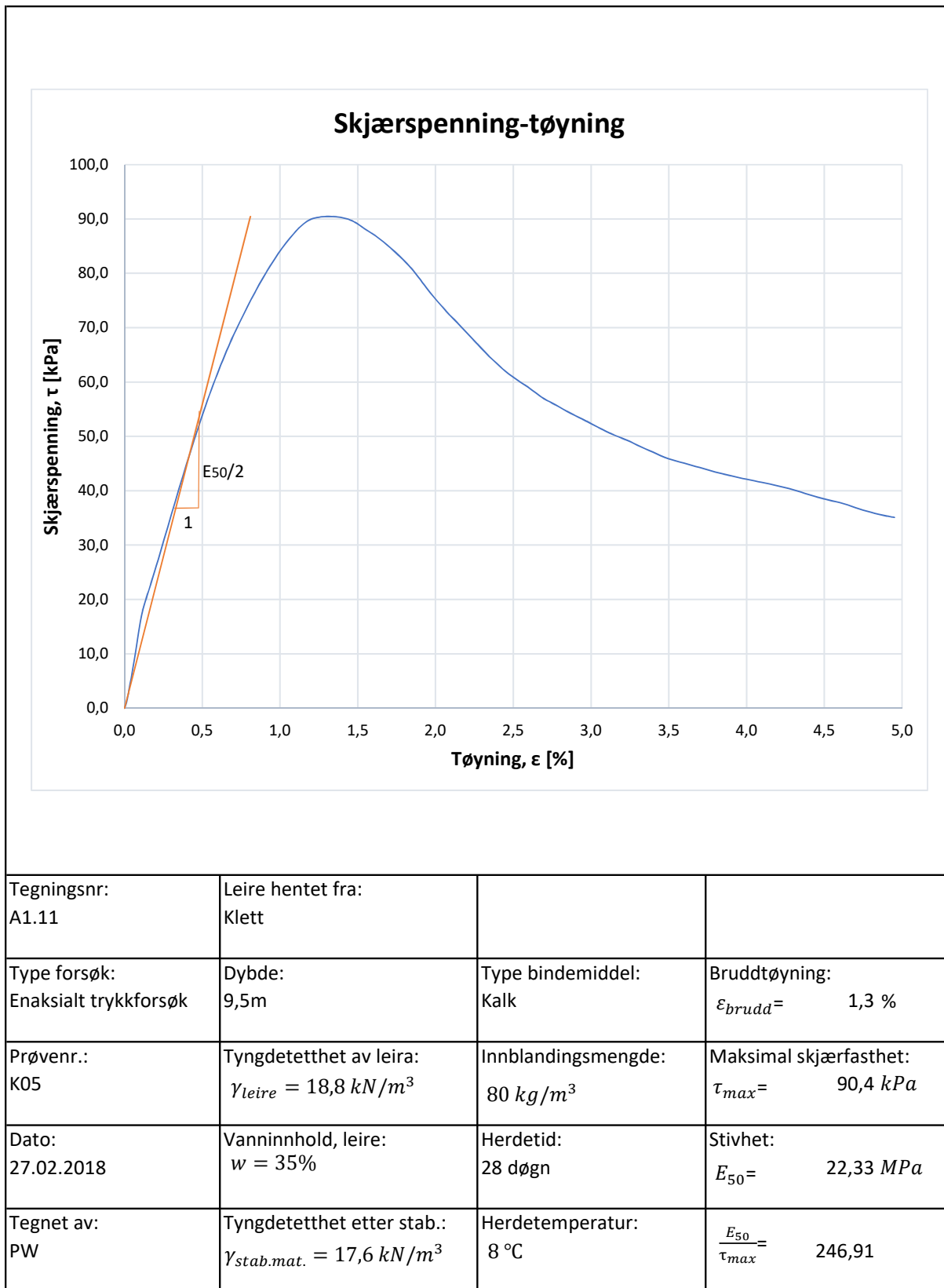
Tegningsnr: A1.7	Leire hentet fra: Klett		
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Dybde: 9,5m	Type bindemiddel: Kalk	Bruddtøyning: $\varepsilon_{brudd} = 1,7 \%$
Prøvenr.: K01	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Maksimal skjærfasthet: $\tau_{max} = 180,0 \text{ kPa}$
Dato: 27.02.2018	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	Herdetid: 28 døgn	Stivhet: $E_{50} = 25,71 \text{ MPa}$
Tegnet av: PW	Tyngdetetthet etter stab.: $\gamma_{stab.mat.} = 17,8 \text{ kN/m}^3$	Herdetemperatur: 41 °C	$\frac{E_{50}}{\tau_{max}} = 142,86$

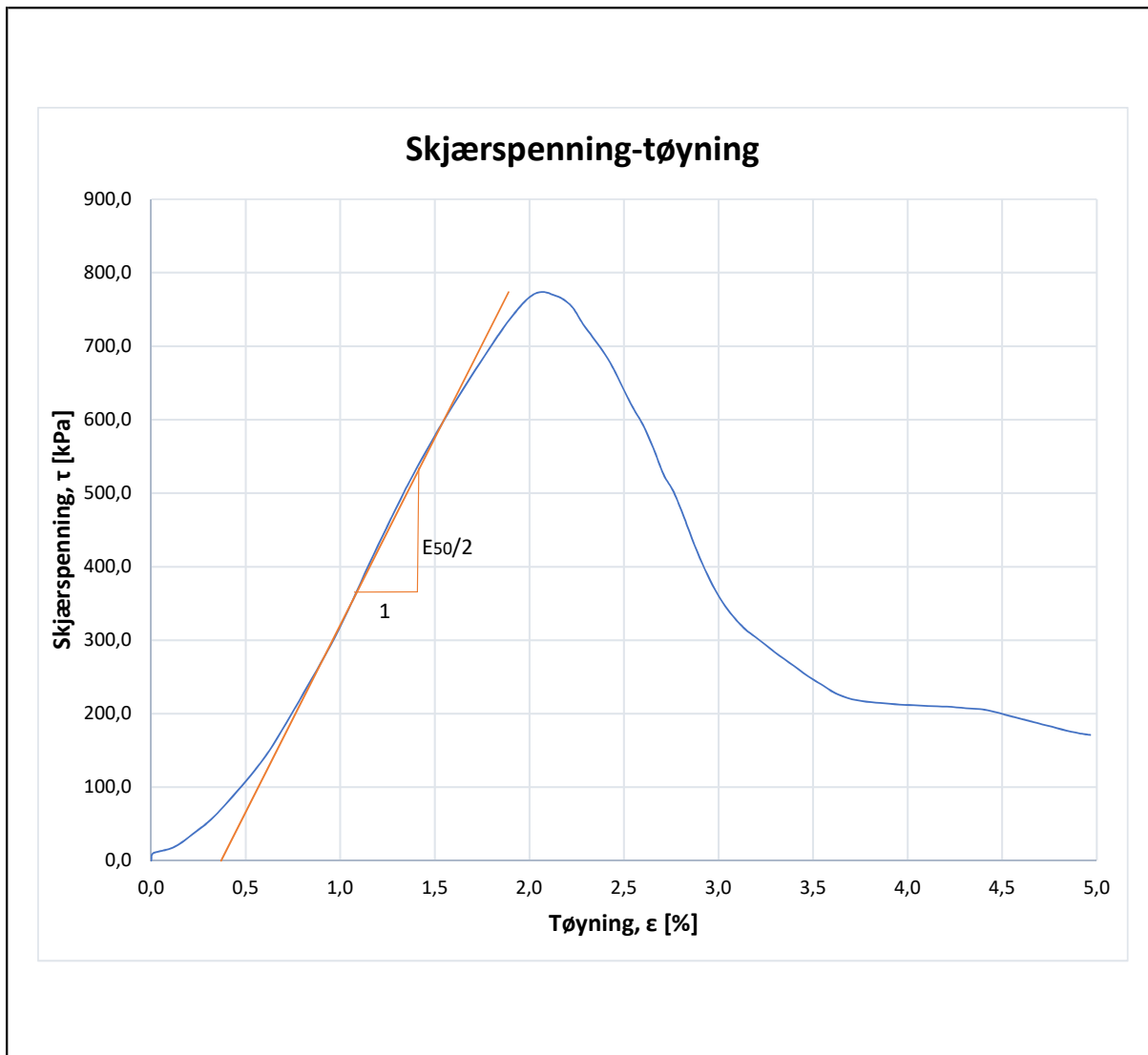




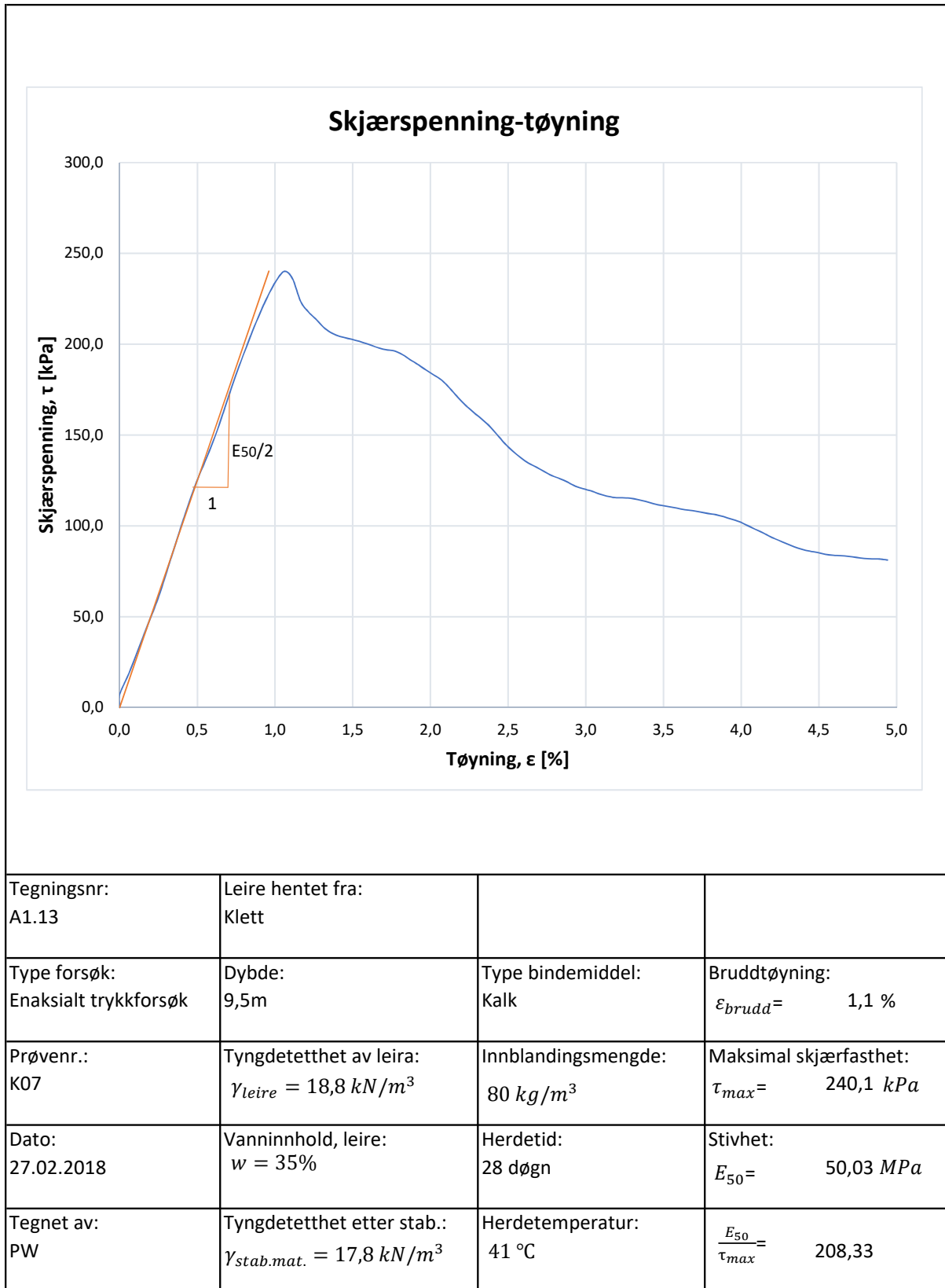


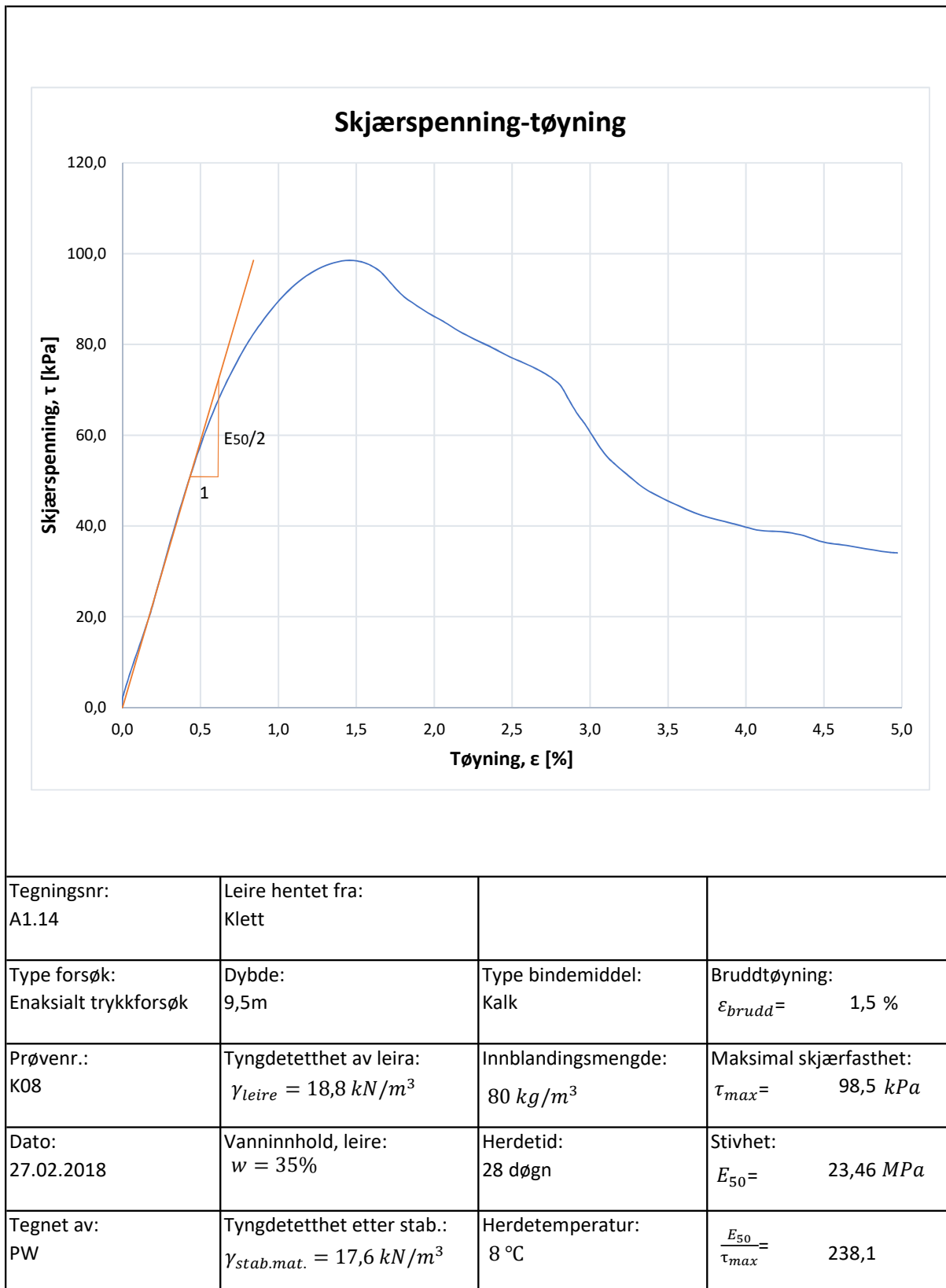


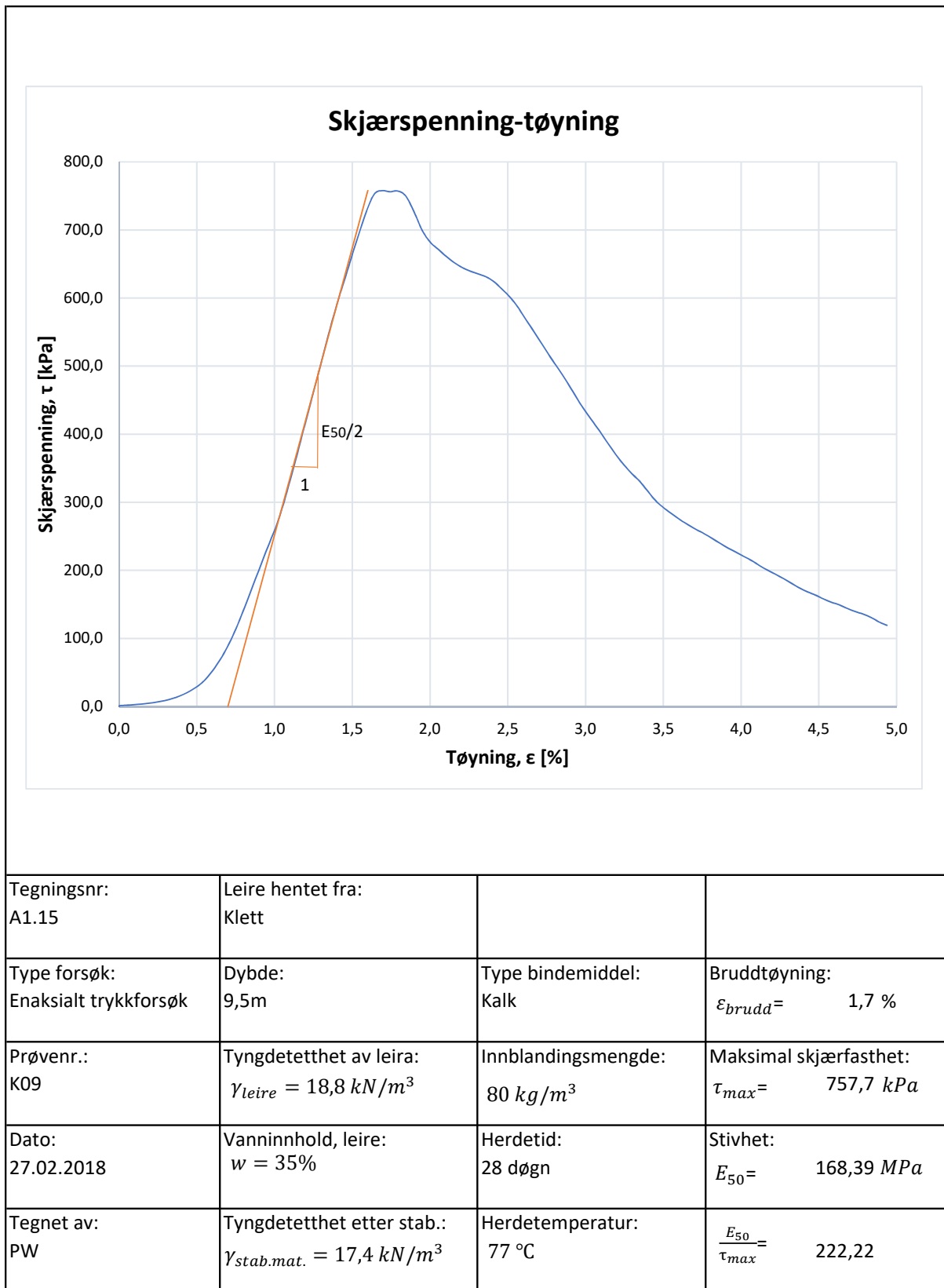


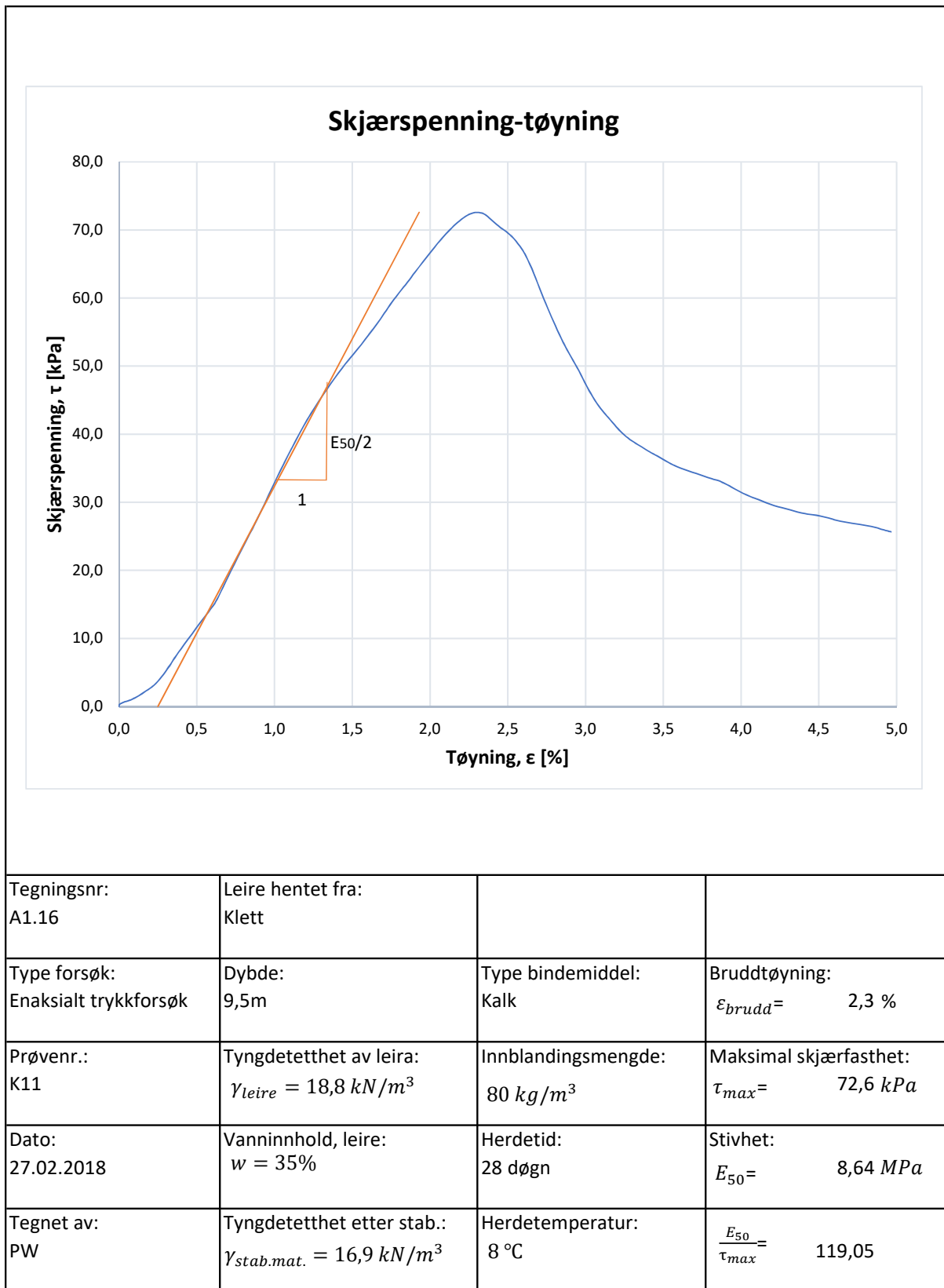


Tegningsnr: A1.12	Leire hentet fra: Klett		
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Dybde: 9,5m	Type bindemiddel: Kalk	Bruddtøyning: $\varepsilon_{brudd} = 2,1 \%$
Prøvenr.: K06	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Maksimal skjærfasthet: $\tau_{max} = 773,6 \text{ kPa}$
Dato: 27.02.2018	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	Herdetid: 28 døgn	Stivhet: $E_{50} = 101,79 \text{ MPa}$
Tegnet av: PW	Tyngdetetthet etter stab.: $\gamma_{stab.mat.} = 17,4 \text{ kN/m}^3$	Herdetemperatur: 77 °C	$\frac{E_{50}}{\tau_{max}} = 131,58$



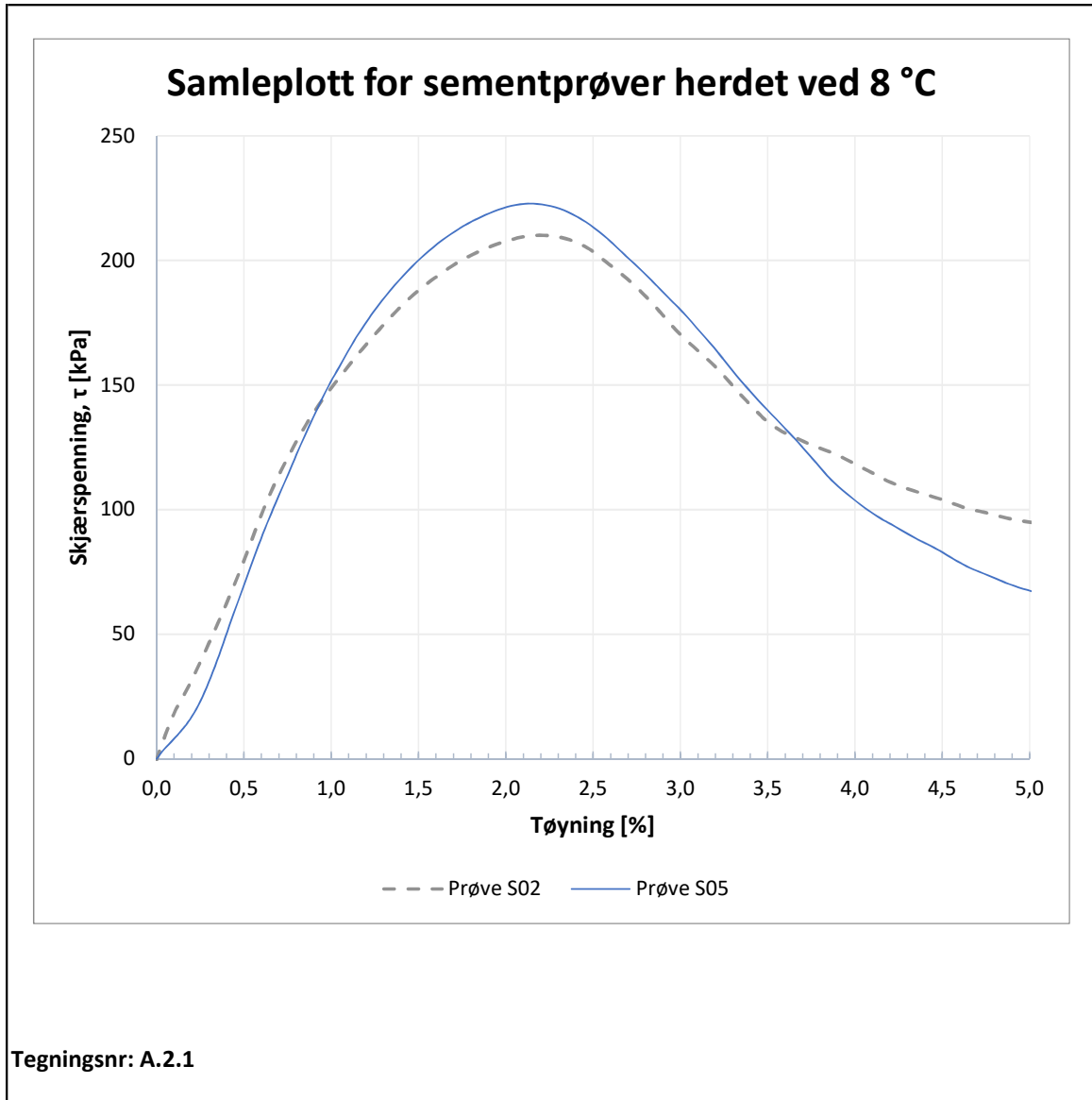






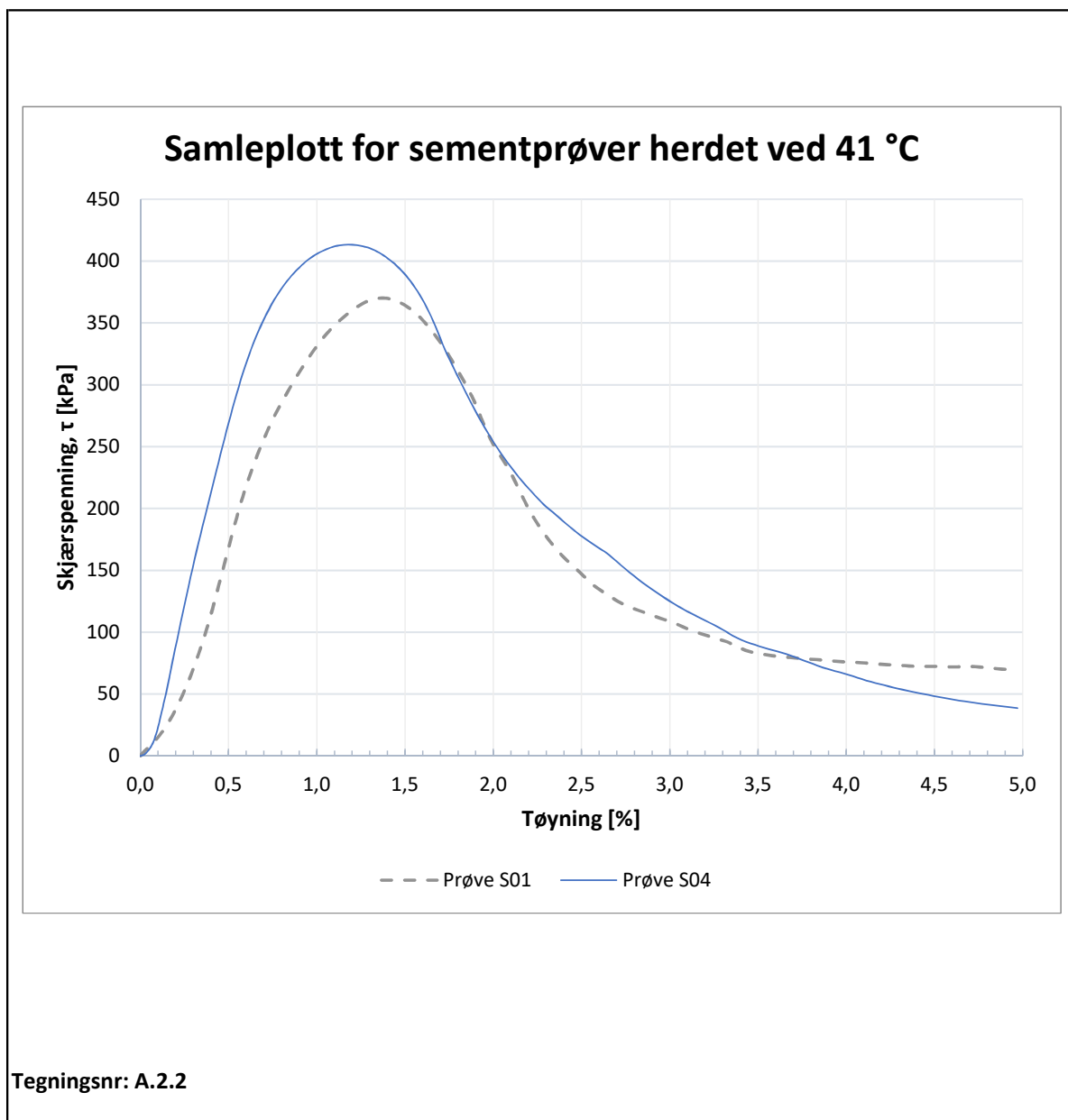
## A.2 Samleplott for enaksiale trykkforsøk

### A.2.1 Sementstabiliserte prøver

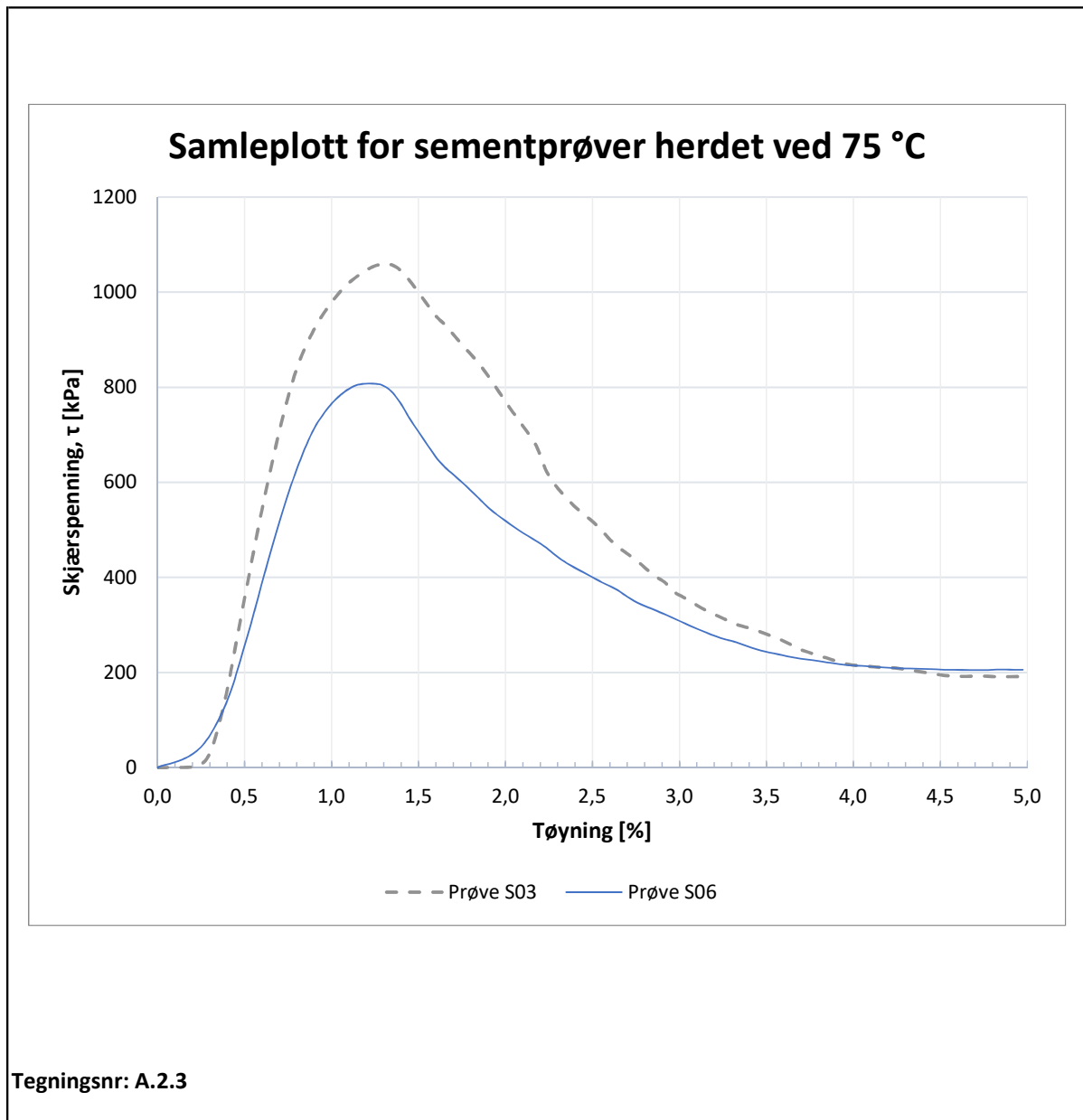


Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Sement	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: S02 og S05	Innblandingsmengde: 80 kg/m <sup>3</sup>	Dybde: 9,5m	
Dato: 09.11.2017	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 8 °C	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	



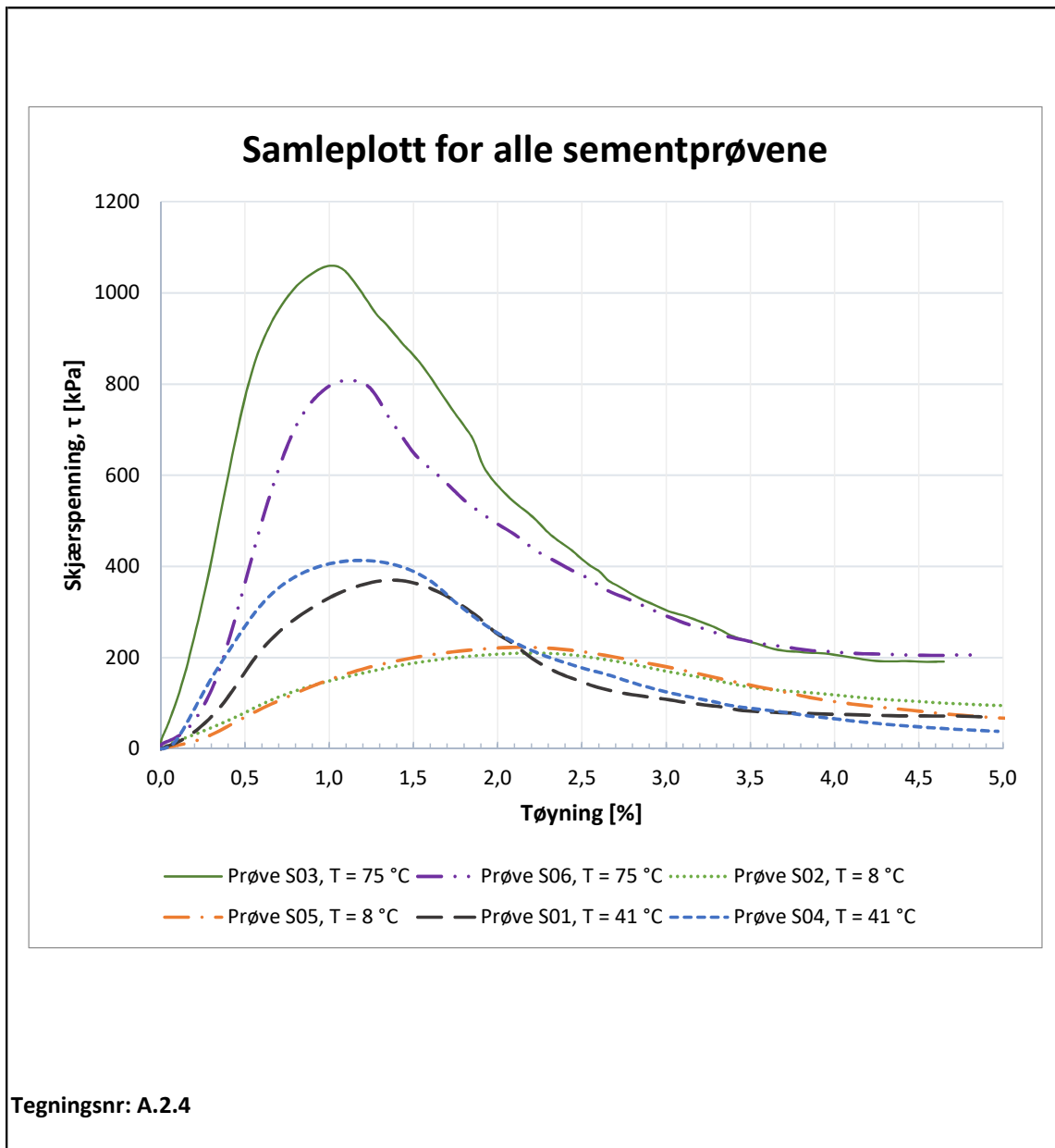


Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Sement	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: S01 og S04	Innblandingsmengde: 80 kg/m <sup>3</sup>	Dybde: 9,5m	
Dato: 09.11.2017	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 41 °C	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	



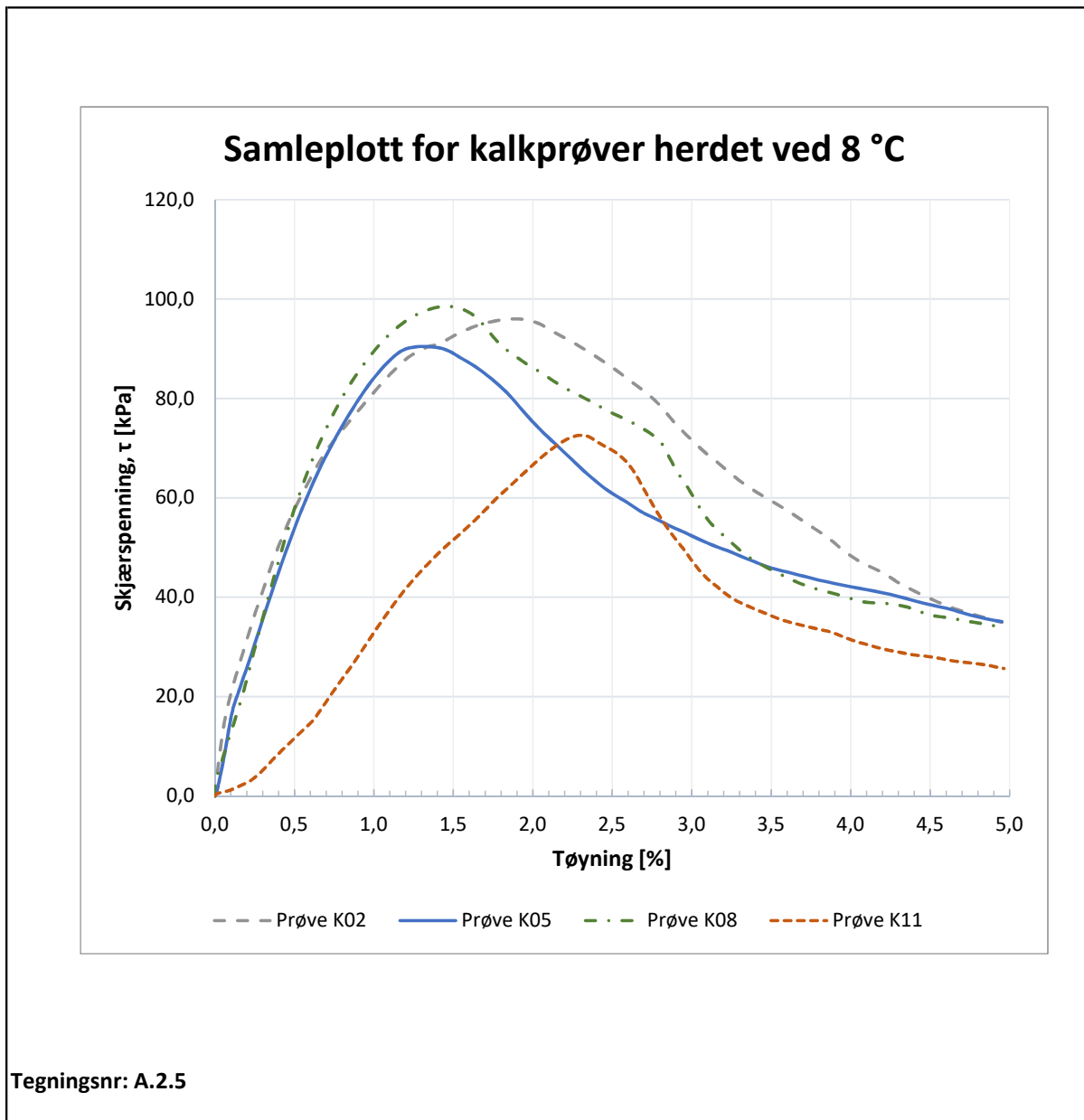
Tegningsnr: A.2.3

Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Sement	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: S03 og S06	Innblandingsmengde: $80 \text{ kg/m}^3$	Dybde: 9,5m	
Dato: 09.11.2017	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 75 °C	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	



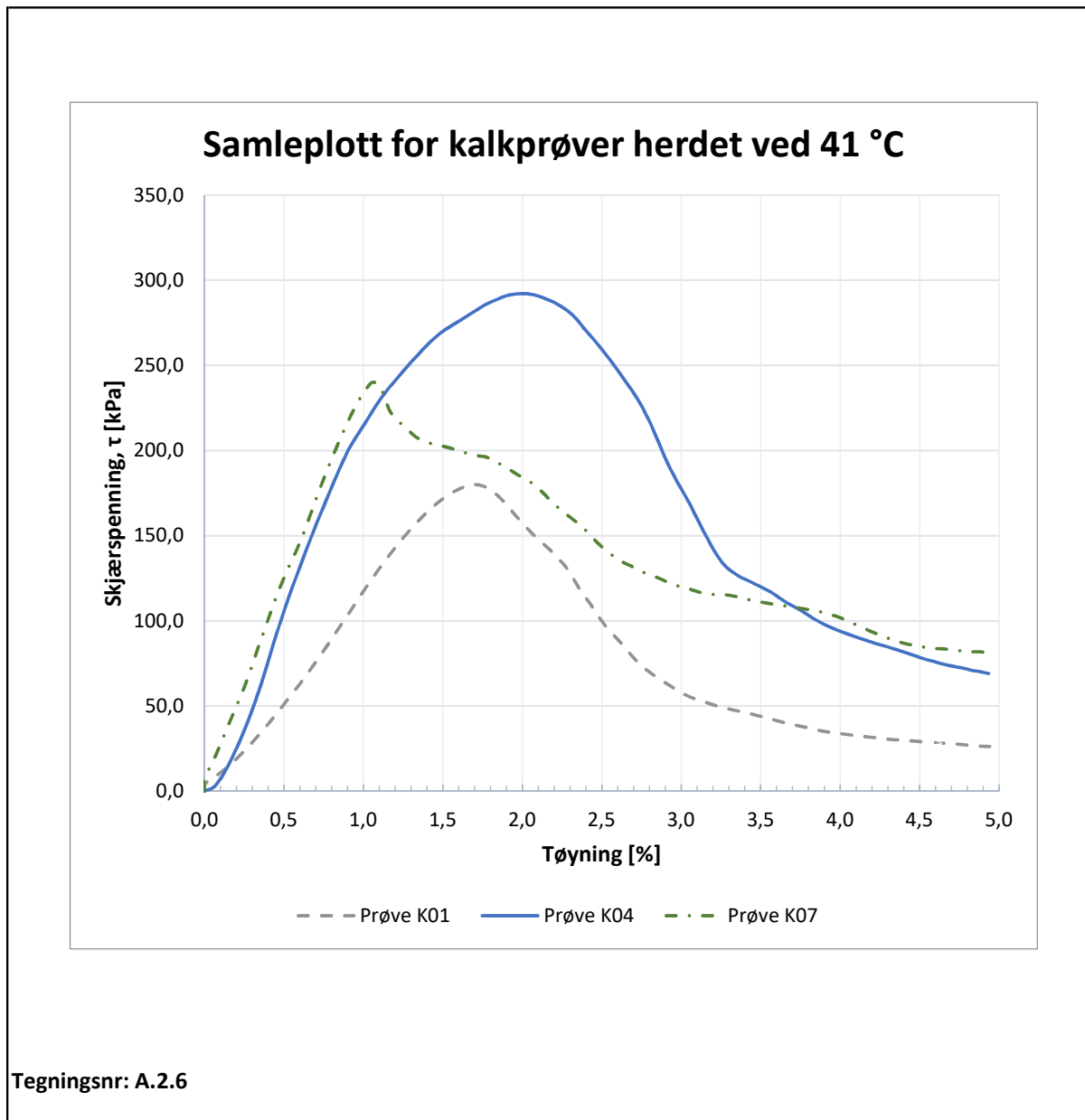
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Sement	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: S01, S02, S03, S04, S05, S06	Innblandingsmengde: 80 kg/m <sup>3</sup>	Dybde: 9,5m	Prøver herdet ved 8 °C: S02, S05
Dato: 09.11.2017	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	Prøver herdet ved 41 °C: S01, S04
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 8 °C, 41 °C, 75 °C	Vanninnhold, leire: w = 35%	Prøver herdet ved 75 °C: S03, S06

## A.2.2 Kalkstabiliserte prøver



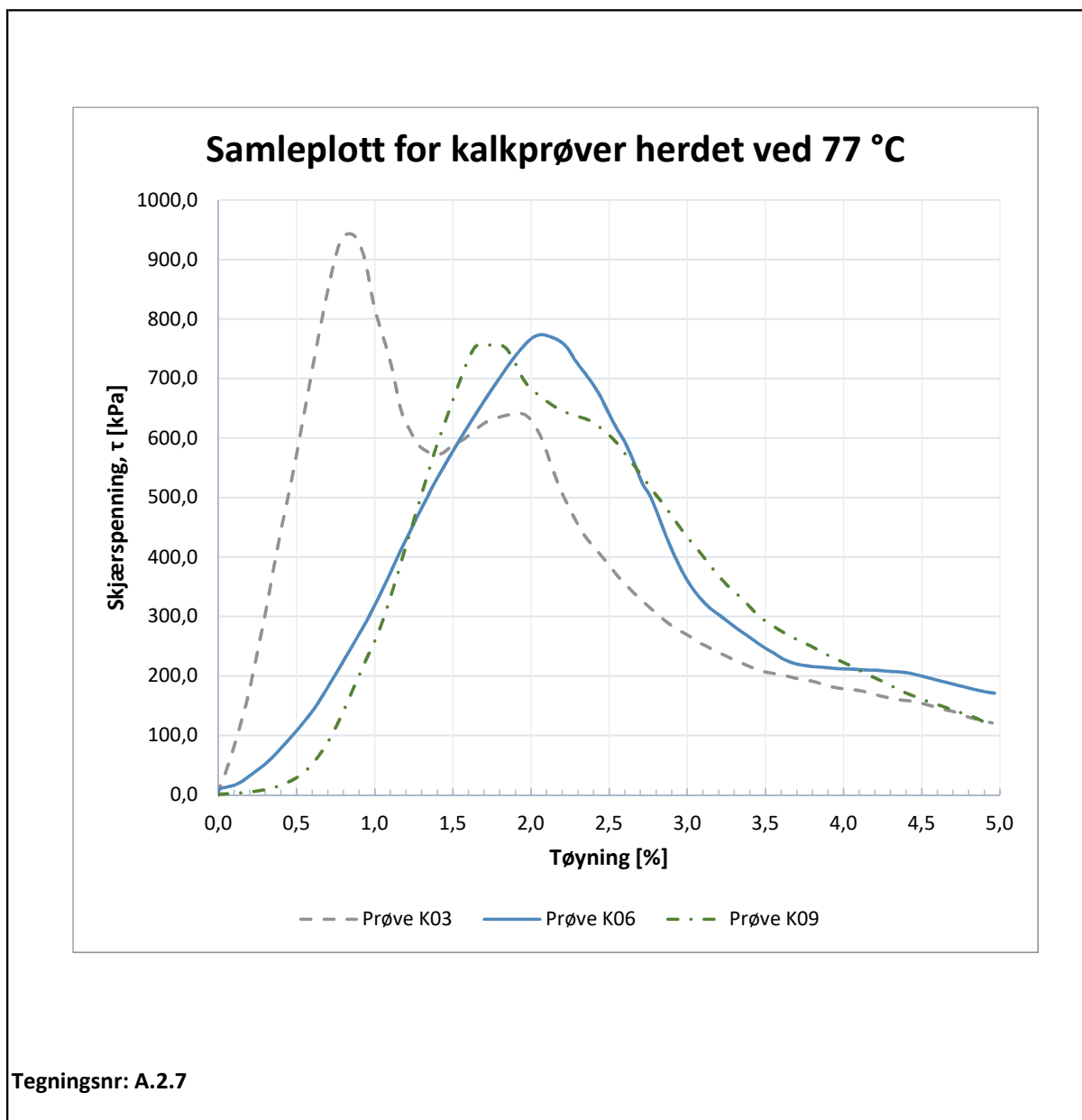
Tegningsnr: A.2.5

Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Kalk	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: K02, K05, K08 og K11	Innblandingsmengde: 80 kg/m <sup>3</sup>	Dybde: 9,5m	
Dato: 27.02.2018	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 8 °C	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	



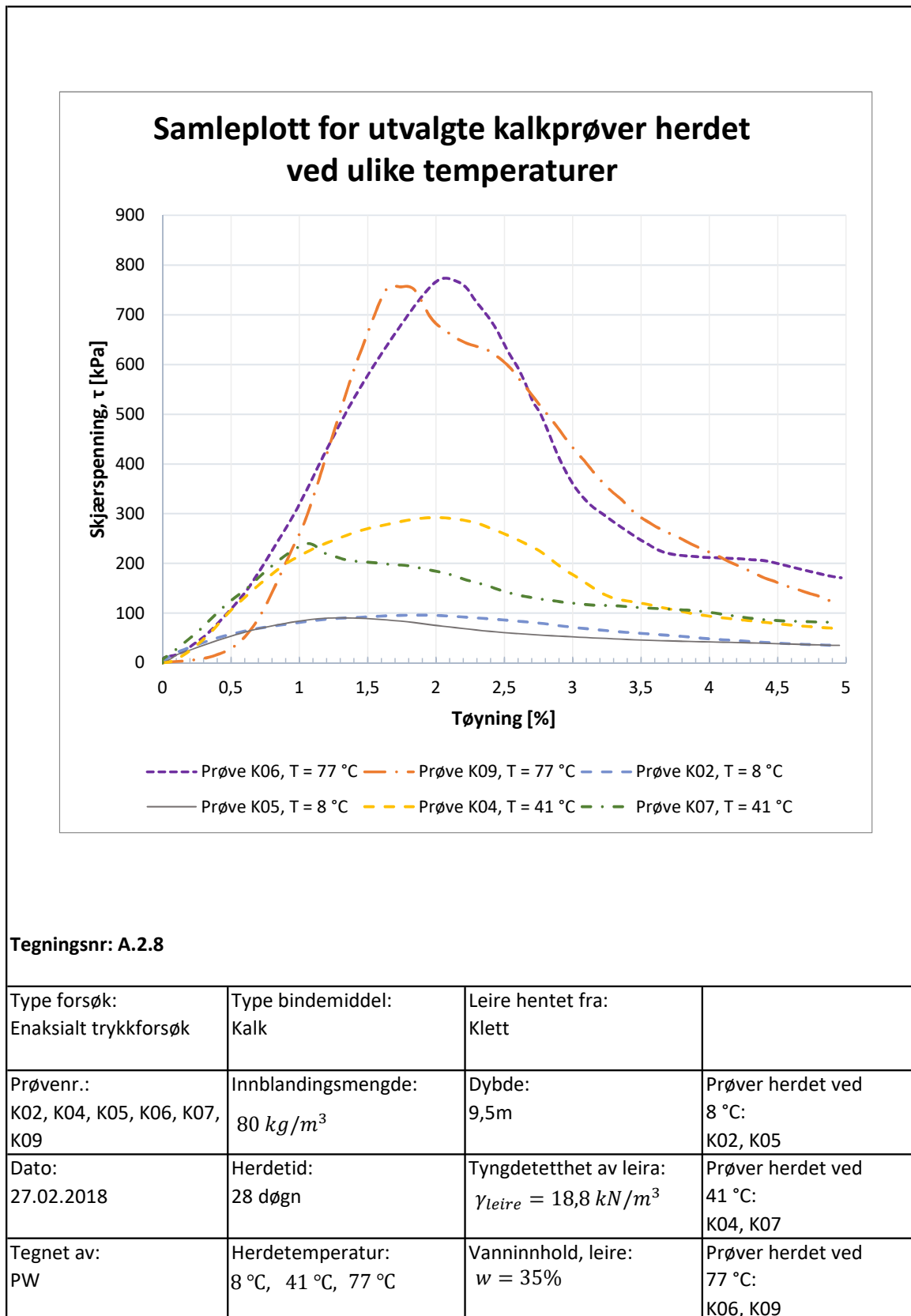
Tegningsnr: A.2.6

Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Kalk	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: K01, K04 og K07	Innblandingsmengde: 80 kg/m <sup>3</sup>	Dybde: 9,5m	
Dato: 27.02.2018	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 41 °C	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	

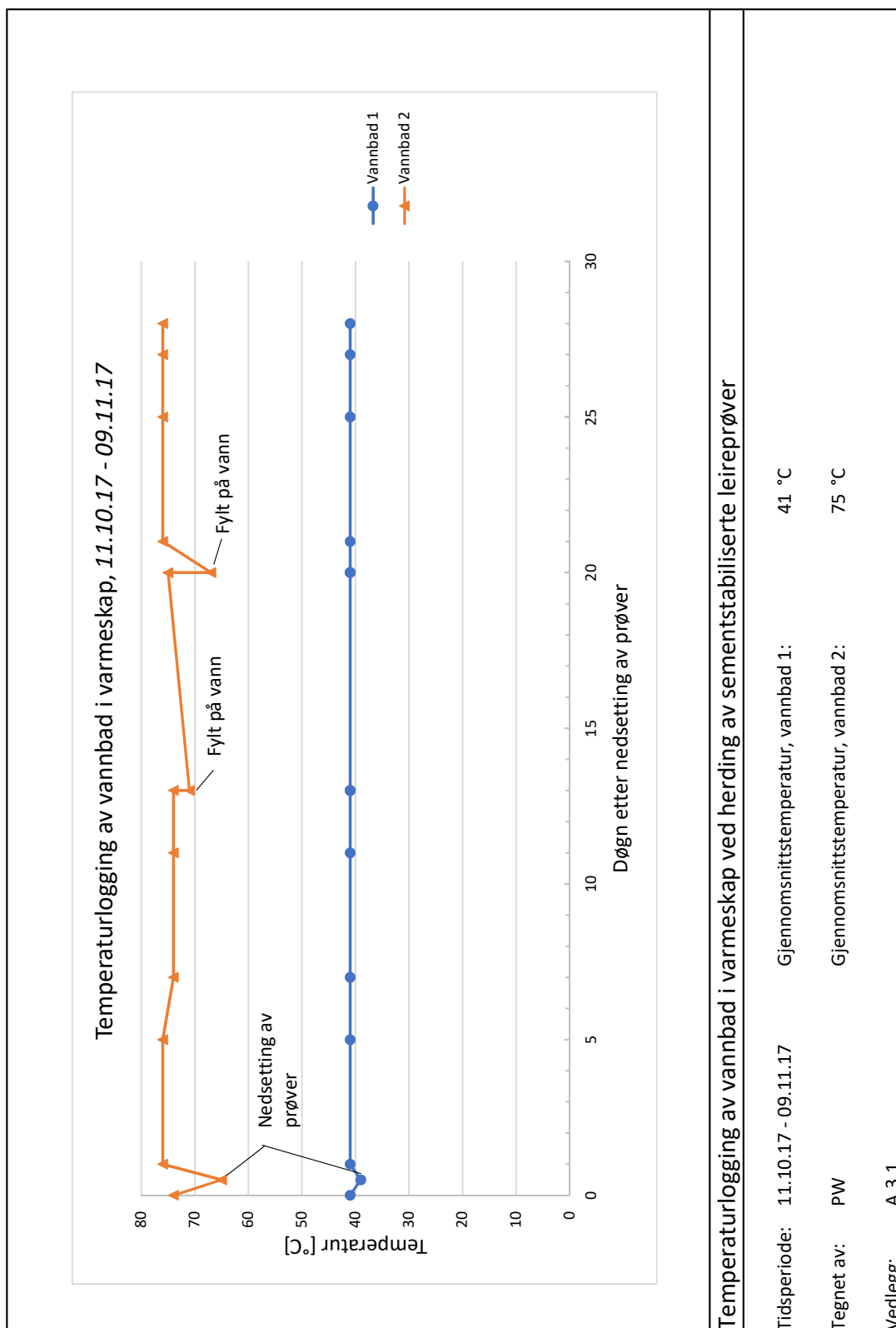


Tegningsnr: A.2.7

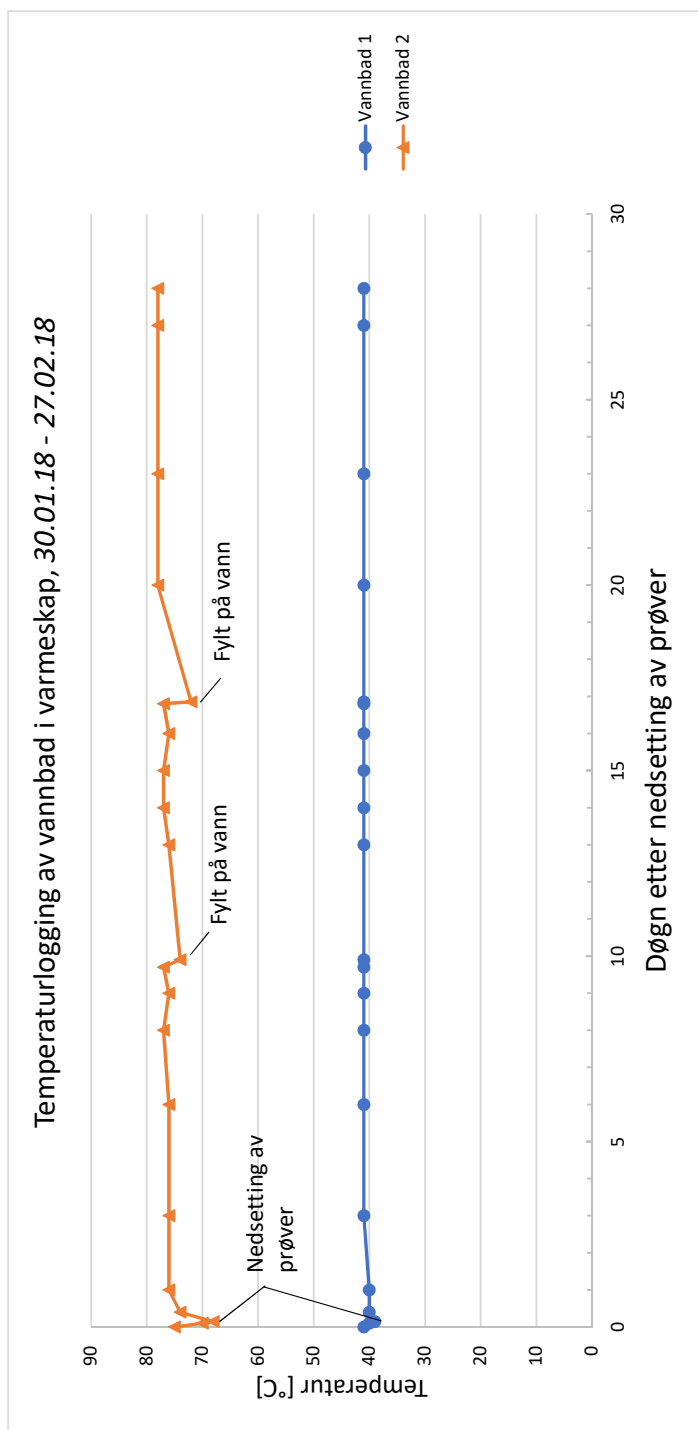
Type forsøk: Enaksialt trykkforsøk	Type bindemiddel: Kalk	Leire hentet fra: Klett	
Prøvenr.: K03, K06 og K09	Innblandingsmengde: 80 kg/m <sup>3</sup>	Dybde: 9,5m	
Dato: 27.02.2018	Herdetid: 28 døgn	Tyngdetetthet av leira: $\gamma_{leire} = 18,8 \text{ kN/m}^3$	
Tegnet av: PW	Herdetemperatur: 77 °C	Vanninnhold, leire: $w = 35\%$	



### A.3 Temperaturlogging av vannbad







Temperaturlogging av vannbad i varmeskap ved herding av kalkstabiliserte leireprøver

Tidsperiode: 30.01.18 - 27.02.18      Gjennomsnittstemperatur, vannbad 1: 41 °C

Tegnet av: PW      Gjennomsnittstemperatur, vannbad 2: 77 °C

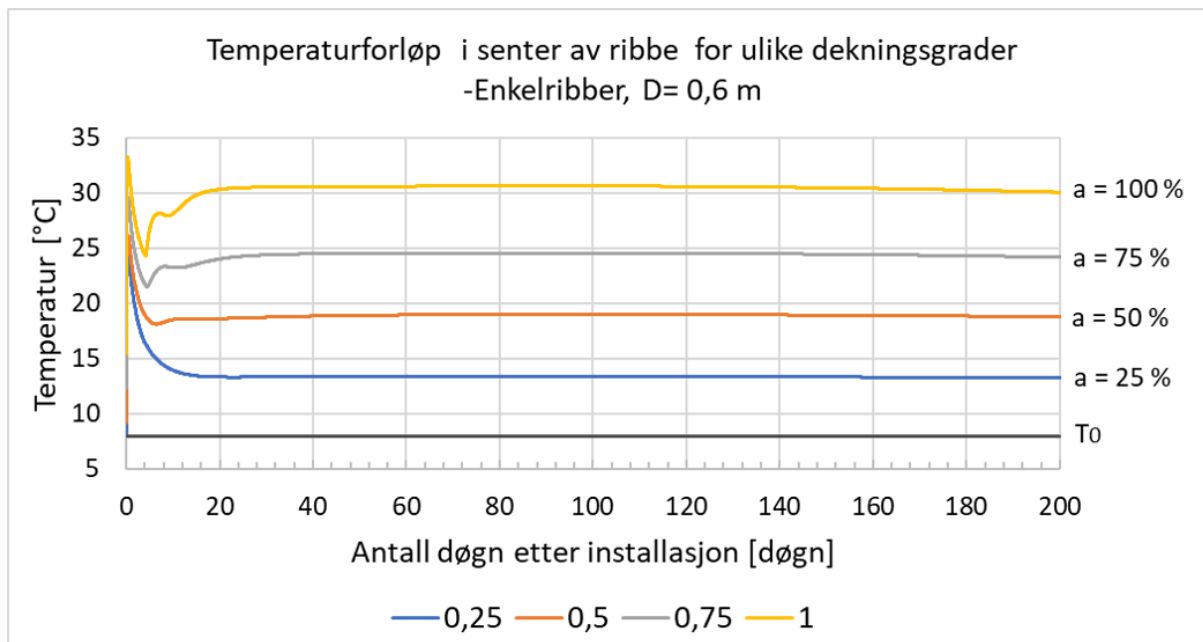
Vedlegg: A.3.2



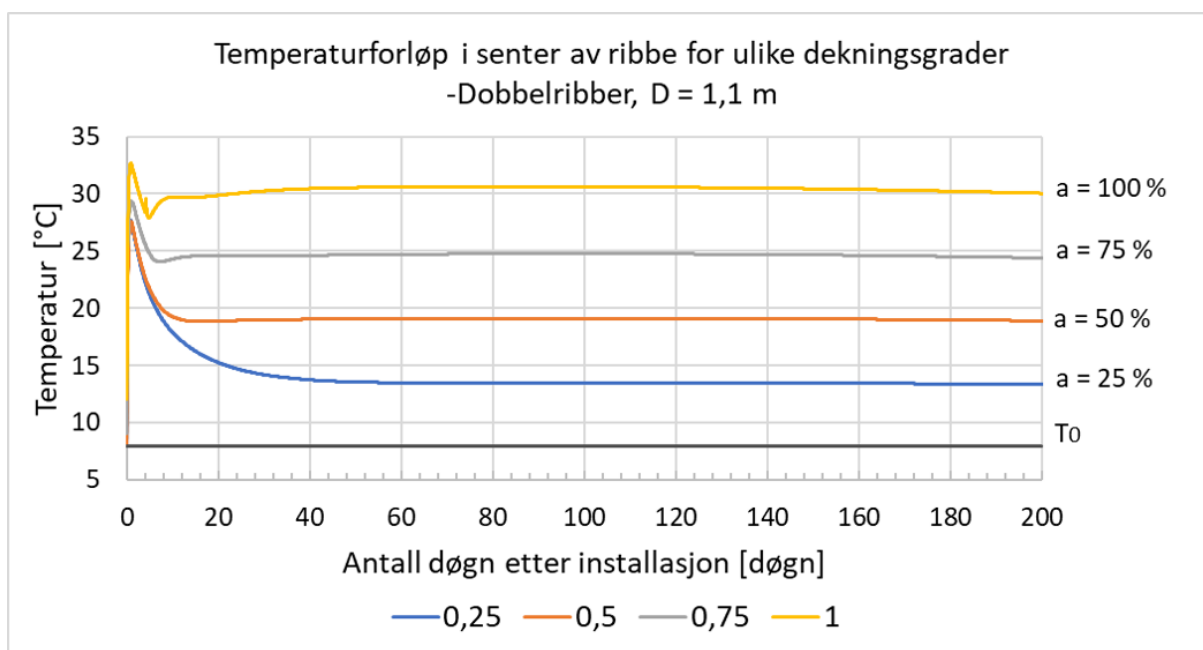
## **Vedlegg B**

### **Resultater av numeriske beregninger**

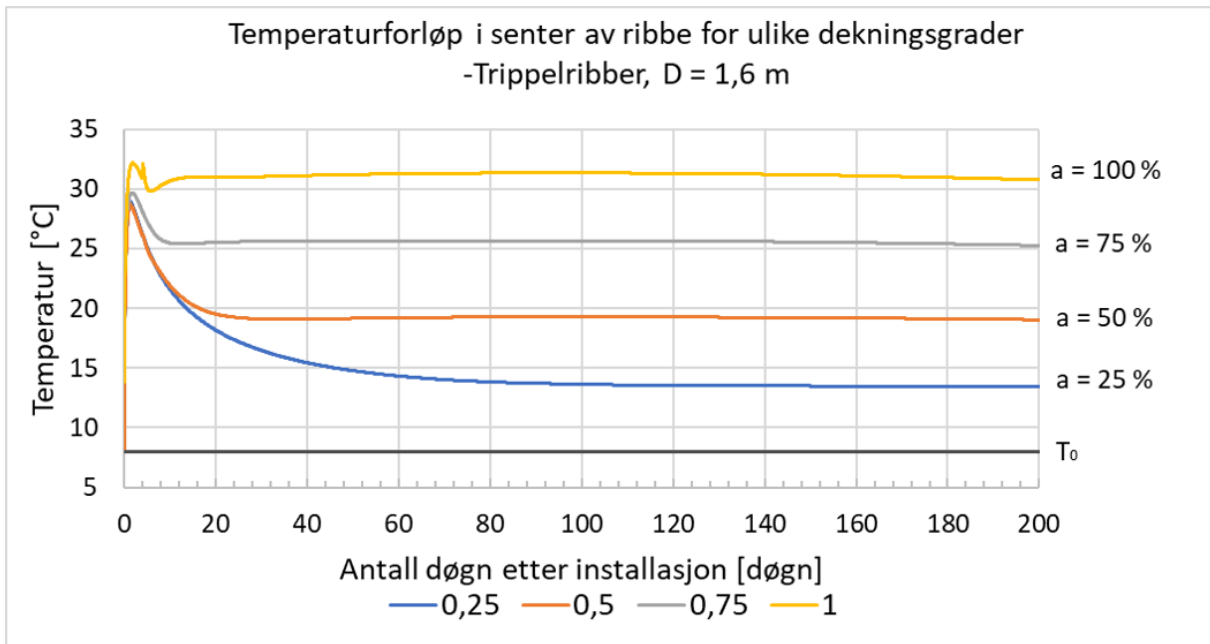
## B.1 Temperaturforløp mot tid for ulike ribbekonfigurasjoner, $D$ , og ulike dekningsgrader, $a$



Figur B.1: Temperaturforløp mot tid for enkelribber

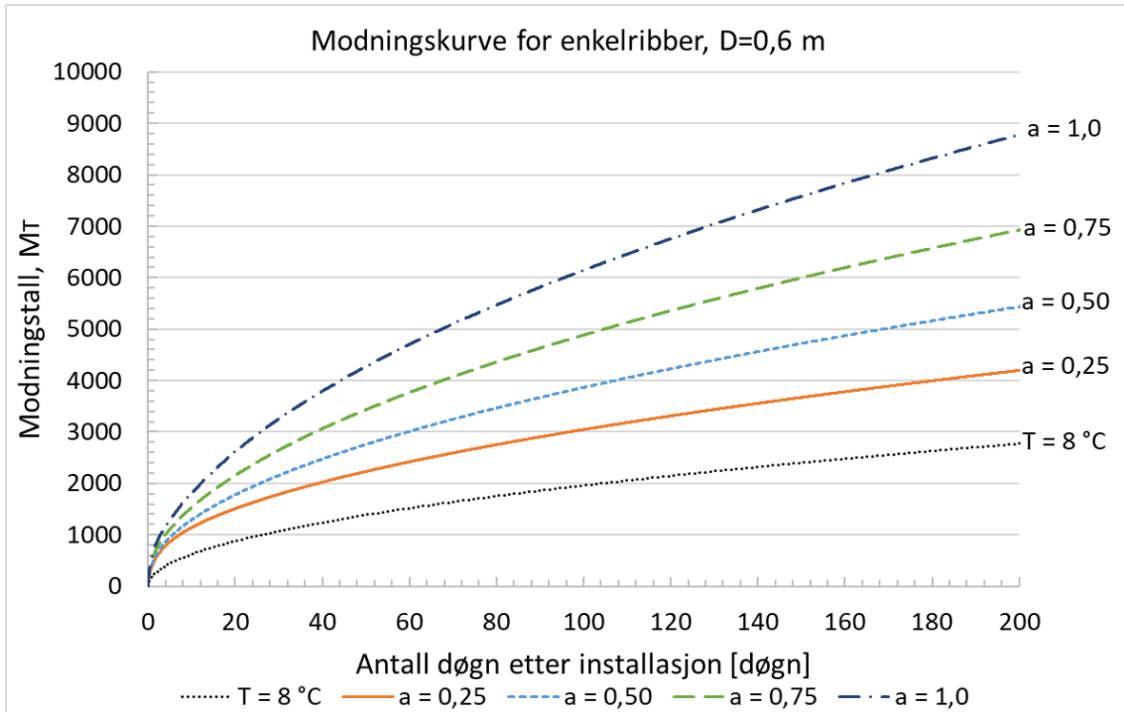


Figur B.2: Temperaturforløp mot tid for dobbelribber

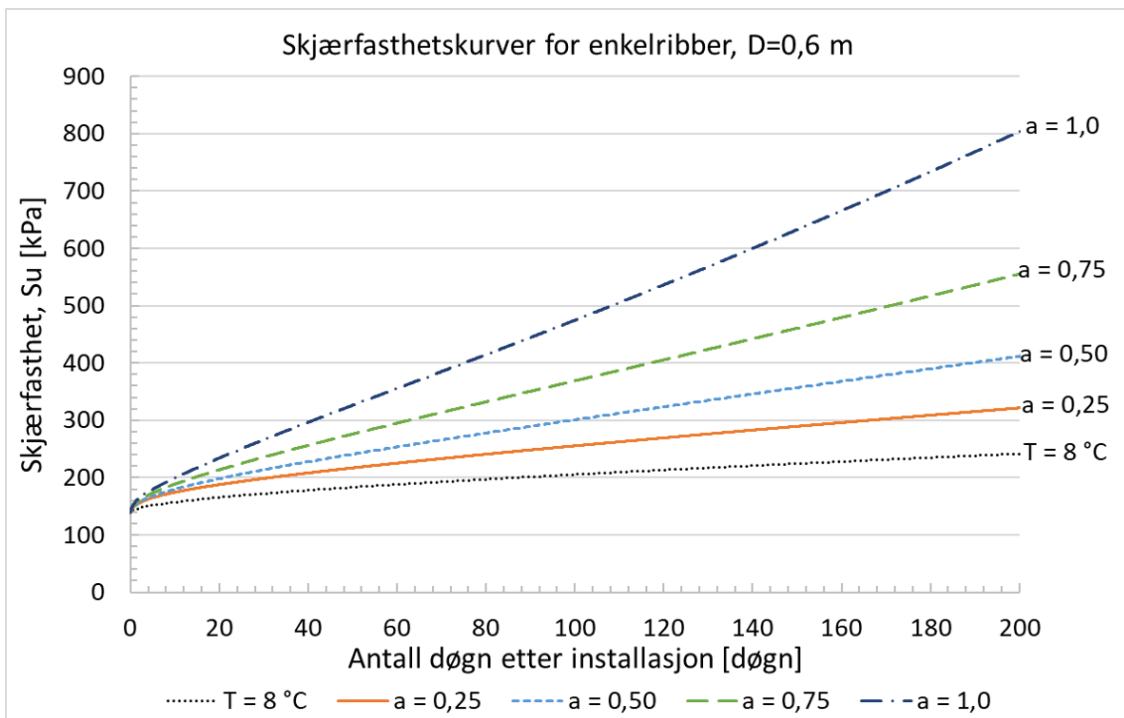


Figur B.3: Temperaturforløp mot tid for trippelribber

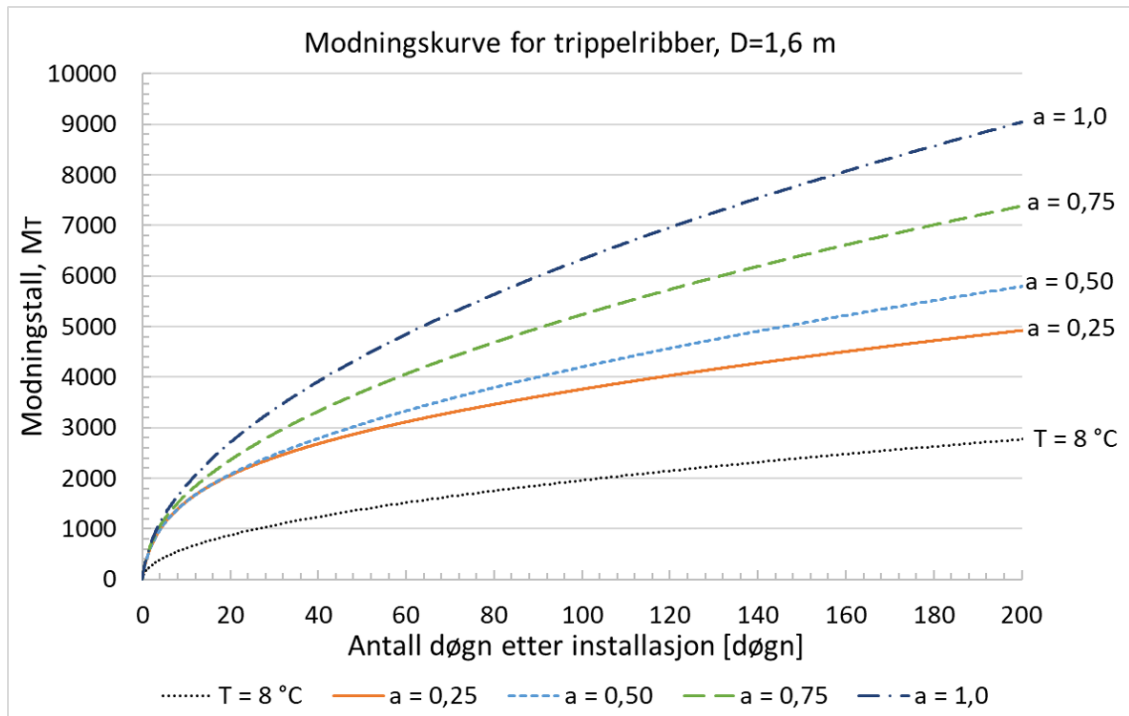
## B.2 Modning og skjærfasthet mot tid for ulike ribbekonfigurasjoner, $D$ , og dekningsgrader, $a$



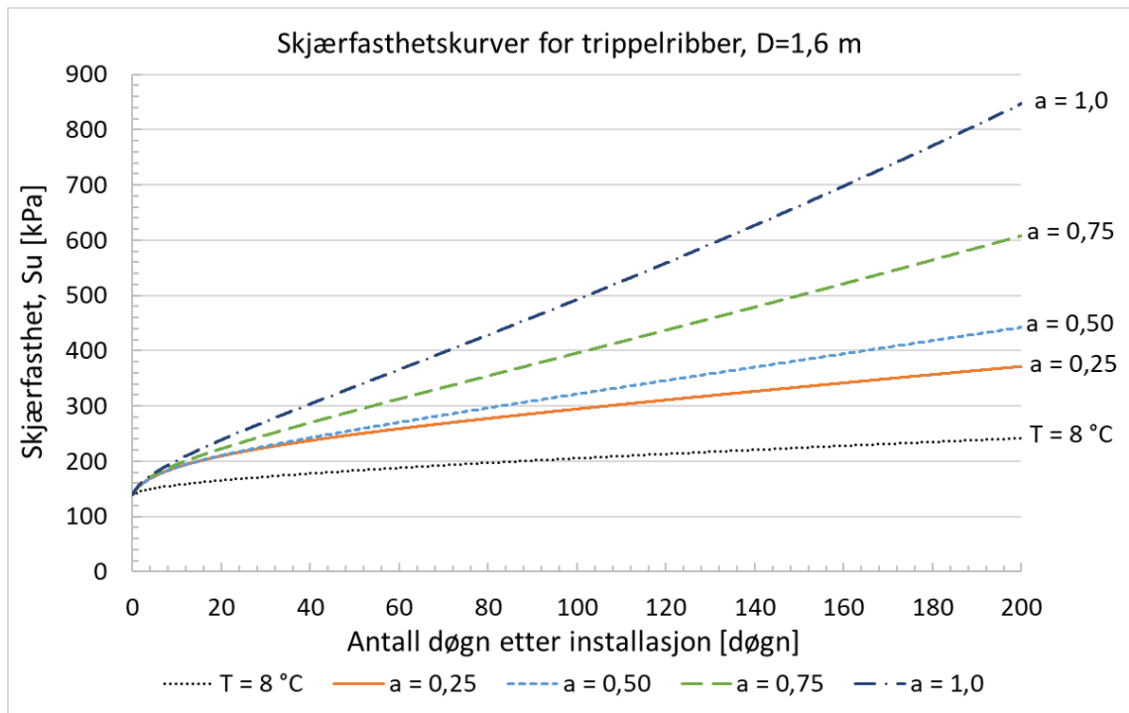
Figur B.4: Modning mot tid for enkelribber



Figur B.5: Skjærfasthet mot tid for enkelribber



Figur B.6: Modning mot tid for trippelribber



Figur B.7: Skjærfasthet mot tid for trippelribber





# Vedlegg C

## Beregning av termiske materialparametre

### C.1 Varmekapasitet

#### Inputparametre

Varmekapasiteten til et sammensatt materiale beregnes ved et masseforhold av varmekapasiteten til hver av komponentene materialet består av (Andersland og Ladanyi, 2004). I dette tilfellet består materialet av leire, vann, kalk og sement. For å beregne varmekapasiteten benyttes korndensiteten og varmekapasiteten til hver av komponentene, se tabell C.1, og materialparameterne beskrevet nedenfor:

Vanninnhold,	$w$	(–)
Densitet,	$\rho$	( $kg/m^3$ )
Mengde kalk per $m^3$ leire,	$C_k$	( $kg/m^3$ )
Mengde sement per $m^3$ leire,	$C_s$	( $kg/m^3$ )

Følgende avsnitt beskriver beregning av varmekapasitet for leire og leire stabilisert med kalk og sement. Figur C.1 illustrerer volumforholdet av fast stoff og vann før og etter tilsetning av kalk og sement.

Tabell C.1: Spesifikk varmekapasitet til komponentene i materialet (Åhnberg et al., 1995).

Materiale	Indeks, $i$	Korndensitet, $\rho_s^i$ ( $kg/m^3$ )	Spesifikk varmekapasitet, $C_p^i$ ( $kJ/kgK$ )
Leire	$l$	2600 - 2800	0,72 <sup>1</sup>
Vann	$w$	1000	4,18
Sement	$s$	2400	0,9
Kalk	$k$	2600	0,84

## Leire

Antar fullstendig vannmettet prøve,  $V_p = V_w$ , hvor

$V_p$  = Volum av porer

$V_w$  = Volum av porevann

Beregner masseandelen av vann og fast stoff i leira:

$$\text{Porøsitet:} \quad n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s^l \cdot (1 + w)} \quad (-)$$

$$\text{Masseandel vann per } m^3 \text{ leire:} \quad m_w = \rho_s^w \cdot n \quad (kg/m^3)$$

$$\text{Masseandel fast stoff per } m^3 \text{ leire:} \quad m_s = \rho - m_w \quad (kg/m^3)$$

Beregner varmekapasiteten til ustabilisert leire:

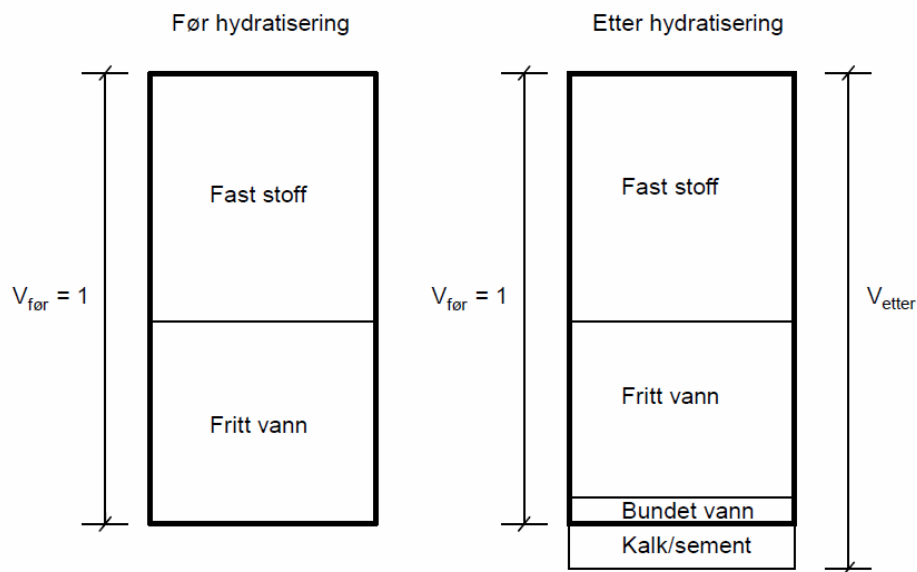
$$C_{p,leire} = \frac{m_s \cdot C_p^l + m_w \cdot C_p^w}{\rho} \quad (kJ/kgK)$$

## Leire stabilisert med kalk og sement

Antar fullstendig vannmettet prøve,  $V_p = V_w$ .

Ved hydratisering av kalk og sement blir vann bundet opp, og mengden fritt porevann blir redusert. For hver 100 g sement forbrukes 25 g vann, og for hver 100 g kalk forbrukes 32 g vann (Åhnberg et al., 1995).

<sup>1</sup>Spesifikk varmekapasitet til leire er avhengig av mineralogien i leiren (Andersland og Ladanyi, 2004). En gjennomsnittlig verdi har blitt benyttet i dette tilfellet.



Figur C.1: Illustrasjon av volumforholdet av fast stoff og vann før og etter tilsetning av kalk og sement.

Beregner mengde fritt vann etter hydratisering:

$$\text{Mengde vann bundet i sementreaksjonen: } m_{w,s} = \left(\frac{25}{100}\right) \cdot C_s \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Mengde vann bundet i kalkreaksjonen: } m_{w,k} = \left(\frac{32}{100}\right) \cdot C_k \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Mengde fritt vann etter hydratisering: } m_{w,etter} = m_w - m_{w,s} - m_{w,k} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Beregner varmekapasiteten for leire stabilisert med kalk og sement:

$$C_{p,stab.leire} = \frac{m_{w,etter} \cdot C_p^w + m_s \cdot C_p^l + (m_{w,s} + C_s) \cdot C_p^s + (m_{w,k} + C_k) \cdot C_p^k}{\rho + C_k + C_s} \quad (\text{kJ/kgK})$$

## C.2 Varmedningsevne

Varmedningsevnen beregnes som et forhold mellom varmedningsevnen til vann og varmedningsevnen til fast stoff (Åhnberg et al., 1995). Disse verdiene er vist i tabell C.2.

Tabell C.2: Varmedningsevne (Åhnberg et al., 1995).

Materiale	Indeks, $i$	Varmedningsevne, $k_i$ (W/mK)
Vann	$w$	0,6
Fast stoff	$s$	3,08

Varmedningsevnen er i hovedsak avhengig av endring i porøsitet, og samlet varmedningsevne blir beregnet ved (Åhnberg et al., 1995):

$$k = k_w^n \cdot k_s^{(1-n)}$$

For ustabilisert leire er:

$$n = n$$

For leire stabilisert med kalk og sement er:

$$n = x_w^*$$

hvor:

$$x_w^* = \frac{V_w}{V_{etter}}, \quad V_w = \frac{m_{w,etter}}{\rho_s^w}, \quad V_{etter} = 1 + \frac{C_s}{\rho_s^s} + \frac{C_k}{\rho_s^k}$$

Resterende parametre er beskrevet i avsnitt C.1 ovenfor.

### **C.3 Varmekapasitet- og varmeledningsberegninger i excel**

Nedenfor følger excel-dokument med utregnede verdier for varmekapasitet, varmelednings-  
evne og maksimal teoretisk temperaturøkning for leire fra Klett og Bellevue. Lignende utreg-  
ninger har også blitt utført for andre mengder og sammensetninger av kalk og sement.

### C.3.1 Leire fra Bellevue, Fredrikstad

Type leire: Bellevue, Fredrikstad

#### Kjente verdier

	Korndensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Spesifikk varmekapasitet [kJ/kgK]
Leire	2600	0,72
Vann	1000	4,18
Sement	2400	0,9
Kalk	2600	0,84

Varmeledningsevne [W/m*K]	
Vann	0,6
Fast materiale	3,08

#### Input-parametre

vanninnhold, w	0,34 [-]
densitet leire, ρ	1845 [kg/m <sup>3</sup> ]
Mengde kalk per m <sup>3</sup> leire	40 [kg/m <sup>3</sup> ]
Mengde sement per m <sup>3</sup> leire	40 [kg/m <sup>3</sup> ]

#### Mellomregning:

##### Varmekapasitet

Porøsitet	0,47 -
Masse vann	468,1 kg/m <sup>3</sup>
Masse fast stoff	1376,9 kg/m <sup>3</sup>
Total masse	1845,0 kg/m <sup>3</sup>

Mengde vann bundet i sementreaksjonen	10 kg/m <sup>3</sup>
Mengde vann bundet i kalkreaksjonen	12,8 kg/m <sup>3</sup>
Mengde fritt vann etter hydratisering	445,3 kg/m <sup>3</sup>

##### Varmeledningsevne

x* <sub>w</sub>	0,43 -
-----------------	--------

#### Resultater

##### Varmekapasitet

Leire	1,60 [kJ/kg*K]
Leire blandet med kalk og/eller sement	1,53 [kJ/kg*K]

##### Varmeledningsevne

Leire	1,4 [W/mK]
Leire blandet med kalk og/eller sement	1,5 [W/mK]

Teoretisk temperaturendring i stabilisert leire ved adiabatisk forhold

Temperaturendring, ΔT	22,9 [°C]
-----------------------	-----------

### C.3.2 Leire fra Klett, Trondheim

Type leire: Klett, Trondheim

#### Kjente verdier

	Korndensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Spesifikk varmekapasitet [kJ/kgK]
Leire	2780	0,72
Vann	1000	4,18
Sement	2400	0,9
Kalk	2600	0,84

Varmeledningsevne [W/m <sup>2</sup> *K]	
Vann	0,6
Fast materiale	3,08

#### Input-parametre

vanninnhold, w	0,34 [-]
densitet leire, ρ	1916 [kg/m <sup>3</sup> ]
Mengde kalk per m <sup>3</sup> leire	40 [kg/m <sup>3</sup> ]
Mengde sement per m <sup>3</sup> leire	40 [kg/m <sup>3</sup> ]

#### Mellomregning:

##### Varmekapasitet

Porøsitet	0,49 -
Masse vann	486,1 kg/m <sup>3</sup>
Masse fast stoff	1429,9 kg/m <sup>3</sup>
Total masse	1916,0 kg/m <sup>3</sup>

Mengde vann bundet i sementreaksjonen	10 kg/m <sup>3</sup>
Mengde vann bundet i kalkreaksjonen	12,8 kg/m <sup>3</sup>
Mengde fritt vann etter hydratisering	463,3 kg/m <sup>3</sup>

##### Varmeledningsevne

x* <sub>w</sub>	0,45 -
-----------------	--------

#### Resultater

##### Varmekapasitet

Leire	1,60 [kJ/kg*K]
Leire blandet med kalk og/eller sement	1,53 [kJ/kg*K]

##### Varmeledningsevne

Leire	1,4 [W/mK]
Leire blandet med kalk og/eller sement	1,5 [W/mK]

##### Teoretisk temperaturendring i stabilisert leire ved adiabatisk forhold

Temperaturendring, ΔT	22,0 [°C]
-----------------------	-----------

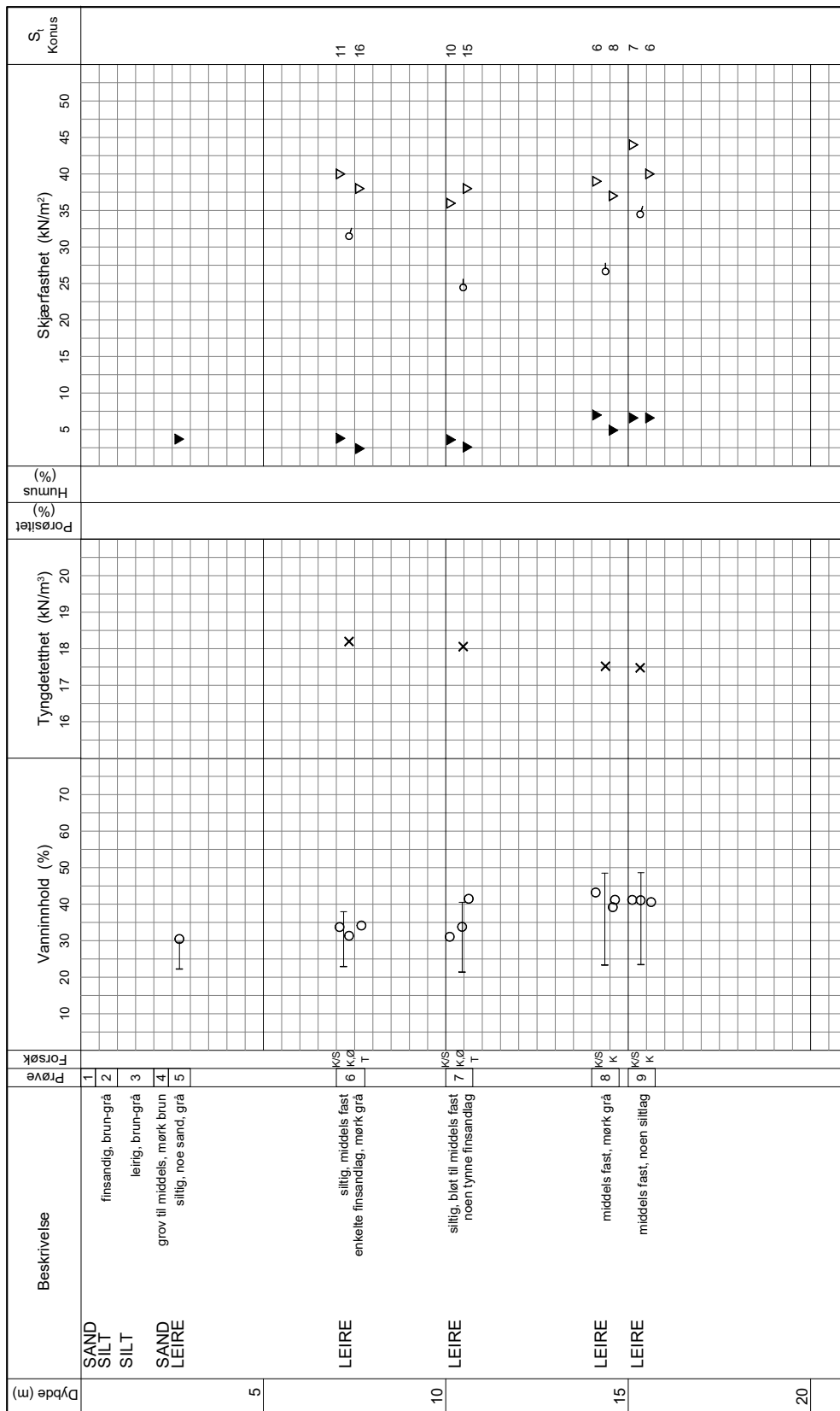




**Vedlegg D**

**Borprofil**





**TEGNFORKLARING:**

- Plastisitetsgrense/Vanninnhold/Flytegrense
- Treakslial forsøk, aktiv
- Treakslial forsøk, passiv
- Enaks. trykkforsøk/def. ved brudd
- Treakslial forsøk, passiv
- ⊞ Direkte skjærforsøk
- ⊞ Konus forsøk, uforstyrret
- ⊞ Konus forsøk, omrørt
- + Vingeboring
- S<sub>i</sub> Sensitivitet
- ∅ = Ødometer forsøk
- P = Permeabilitetsforsøk
- K = Korngrederingsanalyse
- T = Treakslial forsøk
- K/S = Kalk-/Sement stabilisering
- D = Direkte skjærforsøk (DSS)

**Bellevue Brygge**

Provetype: poser/72 mm  
 Terrengkote: - moh  
 Grunnvannst. dybde: ca.2 m  
 Dato boret: 2017-07-25

Borprofil  
 Borpunkt nr.: NGI2  
 Prøve nr. 1-5 er poseprøver

Bellevue Brygge

Prosjekt nr.: 20170504-01-R  
 Figur nr.: X.X  
 Dato: 2017-08-14  
 Utgitt av / levert: FI / THV

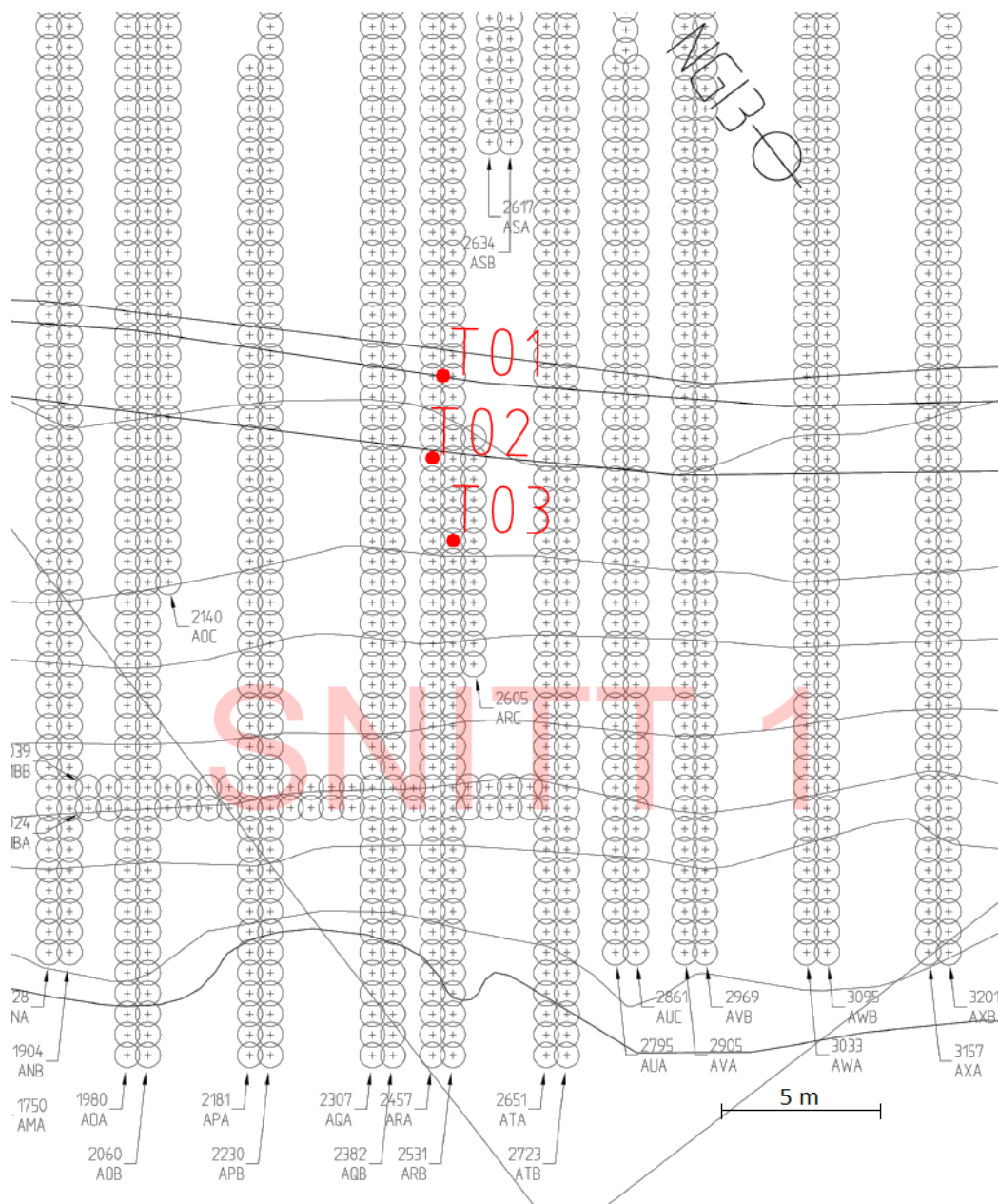
NGI



## **Vedlegg E**

### **Pelinstallasjonsplan på Bellevue**





Figur E.1: Snitt 1 av pelinstallasjonsplanen på Bellevue



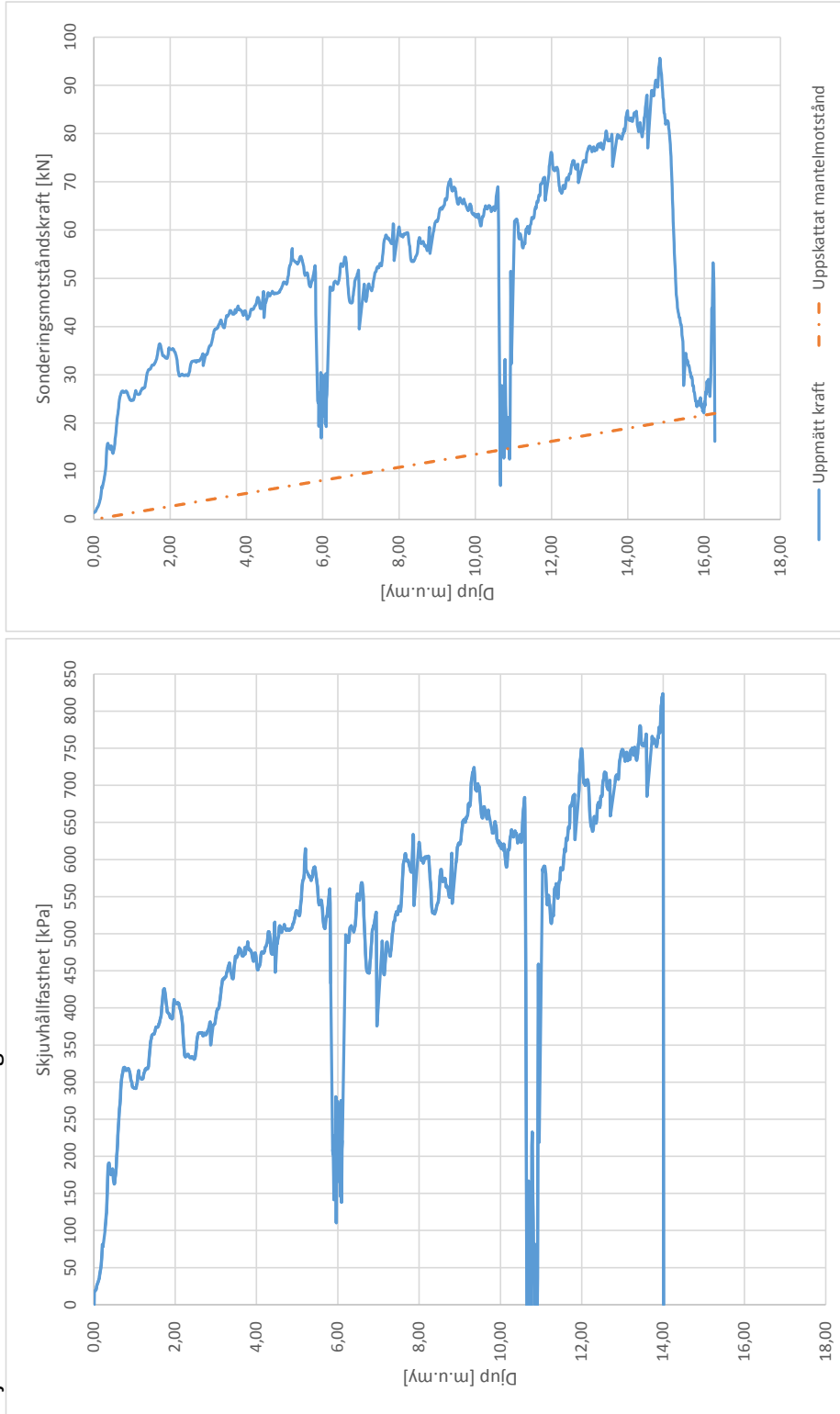


## **Vedlegg F**

### **FOPS-målinger fra Bellevue, Fredrikstad**



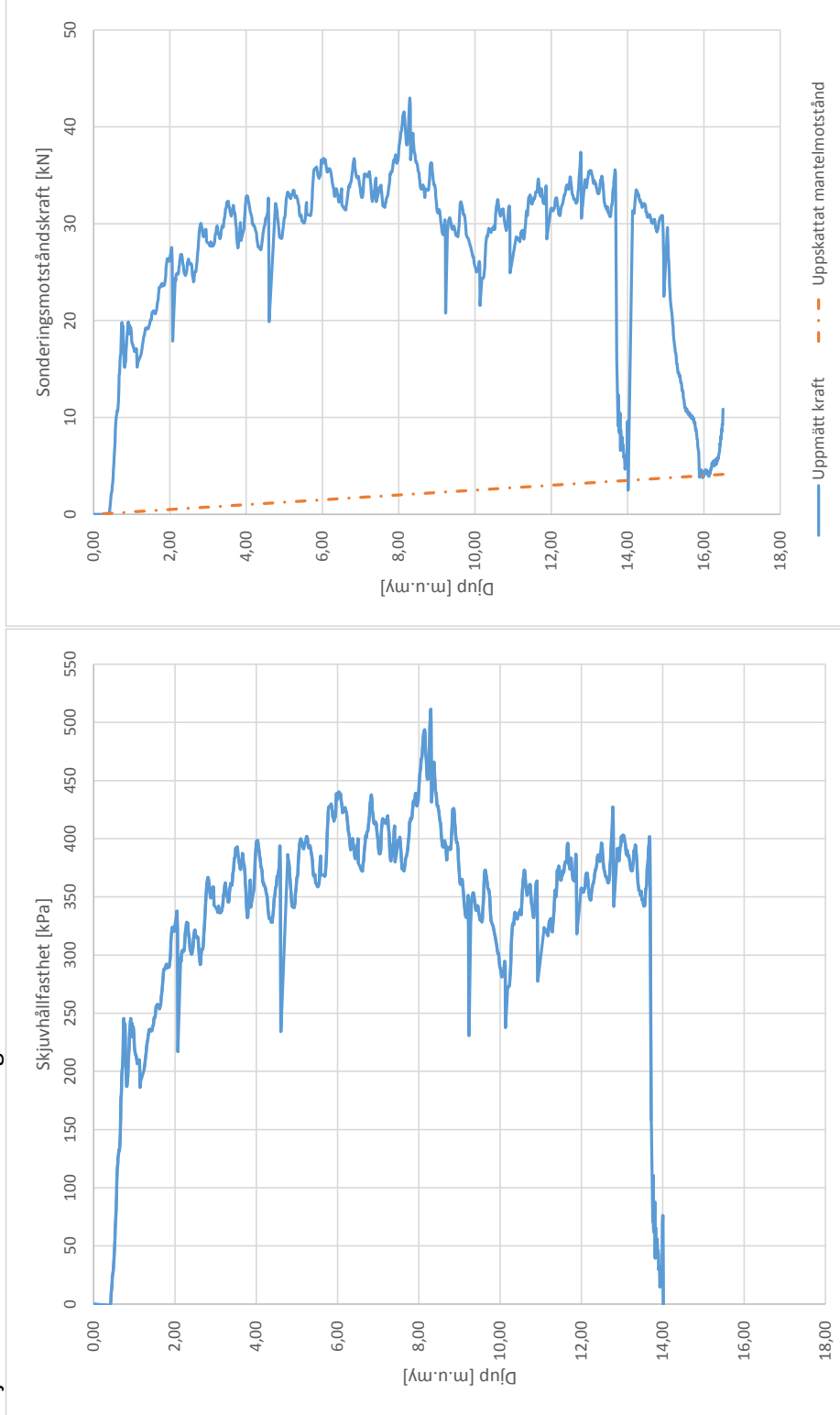
## Skjuvhållfasthets- og sonderingsmotstandskurver- Fredrikstad-Kontroll 4



PelarID	Provdatum:	Installationsdatum:	2017-12-04	Ålder [dagar]:	3
	01593-ALA.1	Vinge [mm]:	Eff. længd pelare [m]:	13,55	Diameter [mm]



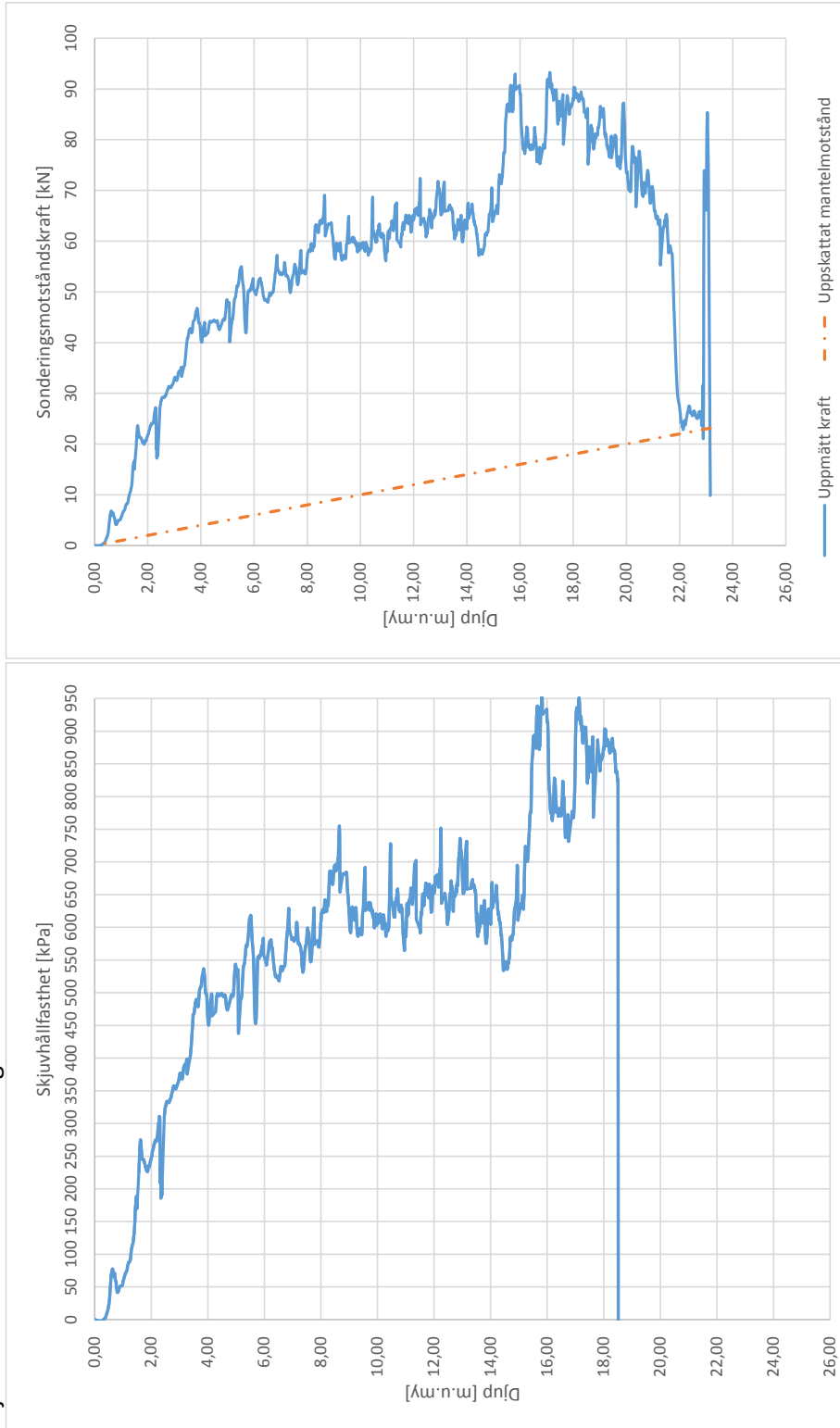
### Skjuvhållfasthets- och sonderingsmotståndskurvor- Fredrikstad-Kontroll 4



<b>PelariD</b>	<b>Provdatum:</b>	2017-12-07	<b>Installationsdatum:</b>	2017-12-04	<b>Ålder [dagar]:</b>	3
	<b>Vinge [mm]:</b>	400x20	<b>Eff. längd pelare [m]:</b>	13,55	<b>Diameter [mm]</b>	800



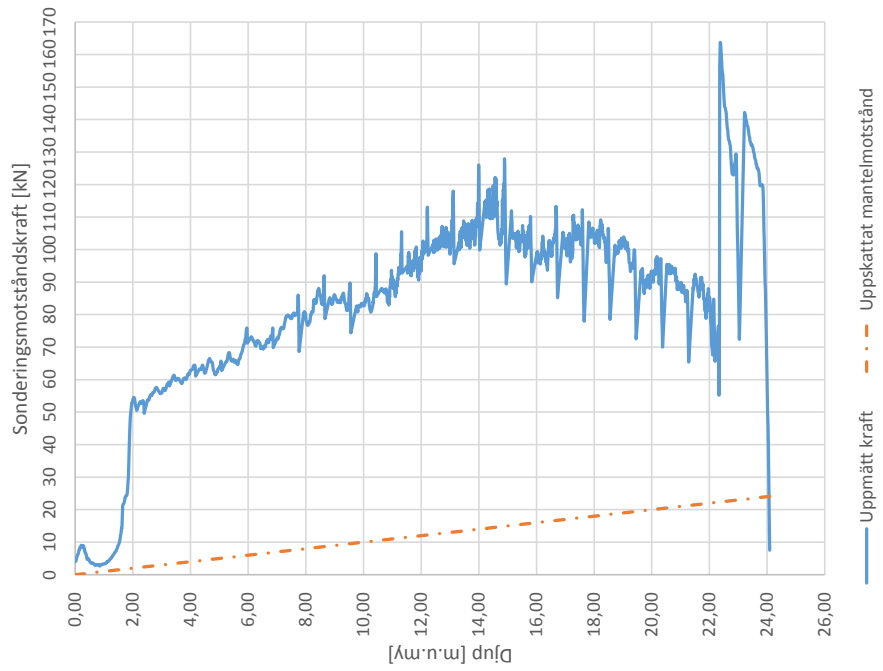
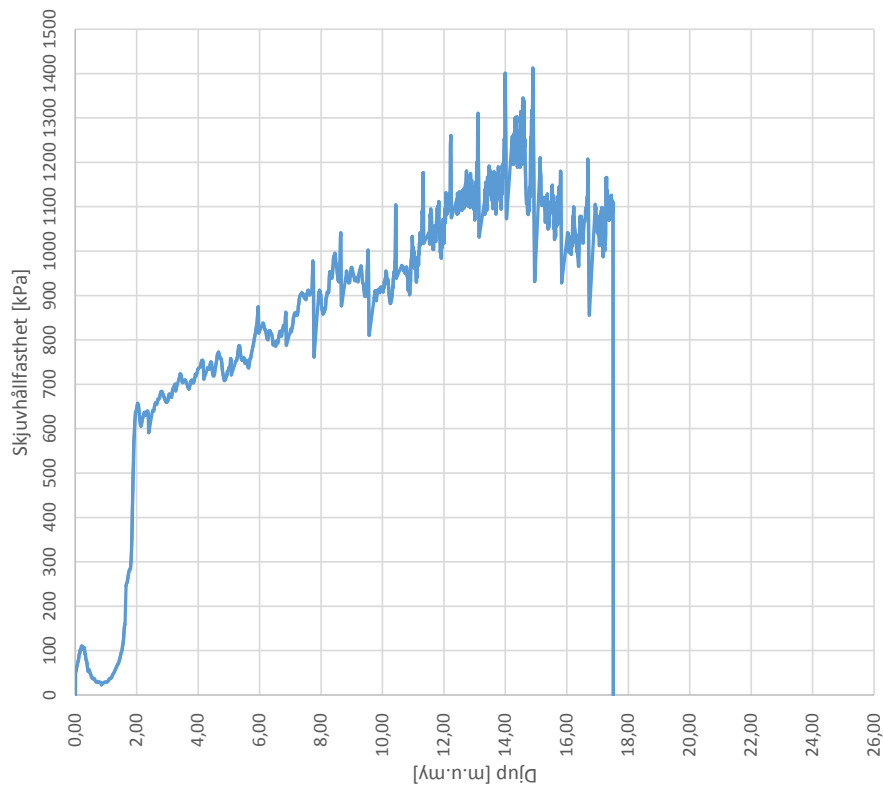
## Skjuvhållfasthets- og sonderingsmotståndskurvor - Fredrikstad-Kontroll 4



<b>PelariD</b>	<b>Provdatum:</b>	2017-12-07	<b>Installationsdatum:</b>	2017-12-04	<b>Ålder [dagar]:</b>	3
	<b>Vinge [mm]:</b>	400x20	<b>Eff. längd pelare [m]:</b>	-	<b>Diameter [mm]</b>	800



### Skjuvhållfasthets- och sonderingsmotståndskurvor - Fredrikstad - Kontroll 4



PelariD	Provdatum:	Installationsdatum:	2017-12-04	Ålder [dagar]:	3
02994-AVB.1	Vinge [mm]:	Eff. längd pelare [m]:	-	Diameter [mm]	800



## **Vedlegg G**

### **Produktblad for kalk og sement**

PRODUKTDATABLAD

# STANDARDSEMENT FA

## CEM II/B-M

SIST REVIDERT AUGUST 2017

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland blandingssement CEM II/B-M 42,5 R.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m <sup>2</sup> /kg)		450	
Spesifikk vekt (kg/dm <sup>3</sup> )		3,00 (B) / 2,99 (K)	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende størkning (min)		140	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	20	
	2 døgn	31	≥ 20
	7 døgn	42	
	28 døgn	55	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO <sub>3</sub> )		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl <sup>-</sup> )		≤ 0,085	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr <sup>6+</sup> )		≤ 2	≤ 2 <sup>1</sup>
Alkalier (% Na <sub>2</sub> O <sub>ekv</sub> )		1,4 (B) / 1,5 (K)	
Klinker (%)		78	65-79
Flygeaske (%)		18	21-35
Kalkmel (%)		4	


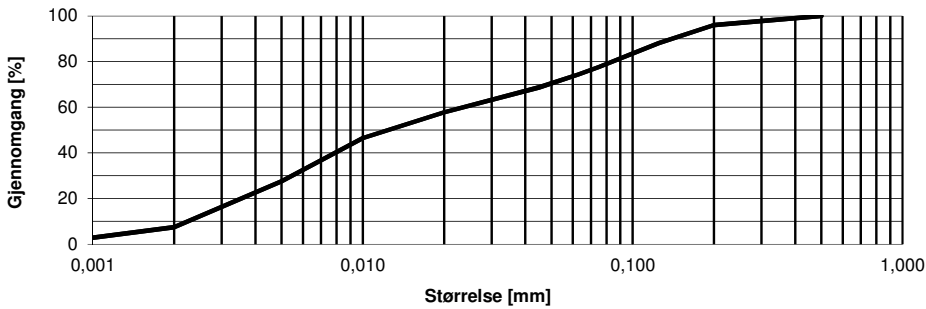
1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII point 47 krom VI forbindelser.

B = Brevik og K = Kjøpsvik

**NORCEM**  
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo  
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no



Produktdatablad								
HYDRATKALK VK								
<b>Miljøkalk AS</b> Postboks 53 NO-1309 Rud Telefon : +47 05255 E-post, Web: <a href="mailto:miljokalk@kalk.no">miljokalk@kalk.no</a> <a href="http://www.kalk.no">www.kalk.no</a>				 <b>MILJØKALK</b>				
<b>Materiale:</b> Hydratkalk		<b>Produsent:</b> Verdalskalk AS, avd Hylla		Ca(OH) <sub>2</sub>		<b>Råmateriale:</b> Kalkstein fra Tromsdalen i Verdal		
<b>Reg.nr.:</b> Deklarasjon -		<b>Fremstilt:</b> Brenning av CaCO <sub>3</sub> til CaO (1000°C i sjaktovn) o		Produktregistrert 032178		<b>Versjon:</b> 1/18		
REACH nr 01-2119475151-45-0048								
<b>Anvendelse:</b> Ulike industriformål								
<b>Krav:</b> -								
Parameter	Metode	Enhet	Statistikk		Krav			
			Snitt	s	L	H	Tolerance +/-	
Ca(OH) <sub>2</sub>	Våtkjemisk	[%]	95	1,4	-	-		
CaO total		[%]	74	0,5	-	-		
MgO		[%]	0,5	0,02	-	-		
SiO <sub>2</sub>		[%]	0,78	0,31	-	-		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WD-XRF	[%]	0,49	0,2	-	-		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		[%]	0,055	0,0731	-	-		
MnO		[%]	0,001	0,0	-	-		
K <sub>2</sub> O		[%]	0,022	0,0054	-	-		
S		[%]	0,04	0,002	-	-		
Masstetthet		Pyknometer	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,24	-	-	-	
Vanninnhold		Karl Fisher	[%]	0,90	0,18	-	-	
Cl	Klor	[%]	<0,005	0,0	-	-		
Hg	Kvikksølv	AAS	<0,005	-	-	-		
As	Arsen	[ppm]	4	1,1	-	-		
Pb	Bly	[ppm]	<4	-	-	-		
Cd	Kadmium	[ppm]	0,17	0,068	-	-		
B	Bor	[ppm]	<20	-	-	-		
Cu	Kobber	[ppm]	2,8	1,57	-	-		
Na	Natrium	[ppm]	<400	-	-	-		
Zn	Sink	[ppm]	26	4,4	-	-		
Ni	Nikkel	[ppm]	<2	-	-	-		
Cr	Krom	[ppm]	<2	-	-	-		
Se	Selen	[ppm]	12,0	4,47	-	-		
0,001 mm		[%]	3	0,4	-	-		
0,002 mm		[%]	7	1,6	-	-		
0,005 mm		[%]	28	3,3	-	-		
0,010 mm		[%]	47	4,7	-	-		
0,020 mm		[%]	58	5,5	-	-		
0,045 mm		[%]	69	5,1	-	-		
0,063 mm	Microtrac	[%]	74	4,6	-	-		
0,075 mm		[%]	78	4,4	-	-		
0,100 mm		[%]	84	3,8	-	-		
0,125 mm		[%]	88	3,2	-	-		
0,200 mm		[%]	96	1,7	-	-		
0,500 mm		[%]	100	0,0	-	-		
<b>Kornfordeling</b>								
								
<b>Råmateriale:</b> Råmaterialet er et naturprodukt med variasjoner innenfor visse grenser								
<b>Levering:</b> Bulk, Storsekk, Sekk								
<b>Volumvekt:</b> 0,4-0,5 [kg/dm <sup>3</sup> ]								
<b>Lagring:</b> Produktet må lagres tørt								
<b>SDS:</b> Se produktets sikkerhetsdatablad for informasjon angående helse, miljø og sikkerhet. Les denne informasjonen og iverksett eventuelle sikkerhetstiltak før produktet tas i bruk.								