



**rapport** *report*

# Måling av varmetap i ulike steinfyllingsfraksjoner

Måling av varmetap i ballastpukk, maskinkult og sprengstein

982519-1

20 september 1999

**Oppdragsgiver:** Jernbaneverket Hovedkontoret,  
Teknisk Avdeling

Kontaktperson: Arne Vik  
Kontraktreferanse: Kontrakt undertegnet 26.05.98

**For Norges Geotekniske Institutt**

Prosjektleder:

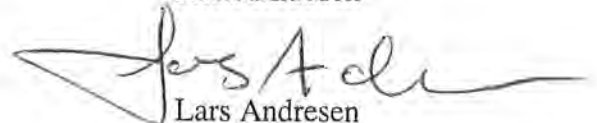


Siren Knudsen

Rapport utarbeidet av:

Siren Knudsen

Kontrollert av:



Lars Andresen

## Sammendrag

NGI er engasjert av Jernbaneverket Hovedkontoret til å utføre måling av varmetap i ulike steinfyllingsfraksjoner i laboratoriet. Følgende arbeid ble avtalt utført :

1. Ombygging av tidligere produsert plateapparat for måling av varmeledning samt måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon i steinfyllingsmaterialer.
2. Utarbeide kornfordelingskurve for materialfraksjonen 25 - 63 mm, samt bestemme vann- og kvartsinnhold i forsøksmaterialet.
3. Utføre måling av varmetap med både varmeledning og tetthetsdrevet konveksjon ved ett vanninnhold for tre ulike materialfraksjoner :
  - Forsøk 1, ballastpukk i fraksjon 25 - 63 mm.
  - Forsøk 2, maskinkult i fraksjon 20 - 120 mm.
  - Forsøk 3, sprengstein i fraksjon 0 - 250 mm.

I forsøkene ble det benyttet stein fra Feiring Bruk på Skårer i Akershus. Resultater fra forsøkene er vist i Tabell 1 og Tabell 2 for henholdsvis situasjonene uten og med naturlig konveksjon.

Tabell 1 Resultater fra utførte forsøk uten naturlig konveksjon

Forsøk	Fraksjon (mm)	Kvartsinnhold (%)	Total romvekt (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{tot}/d_{maks}$	Porøsitet (%)	Vanninnhold (%)	Varmeledn. tall, k (W/mK)
1	25 - 63	23	16.5	11.9	38	~ 0	0.8
2	20 - 120	21	17.4	6.3	34	~ 0	0.85
3	0 - 250	30	22.5	3.0	17	~ 2	1.6

Tabell 2 Resultater fra utførte forsøk der naturlig konveksjon kan oppstå

Forsøk	$\Delta T$ (°C)	$T_{middel}$ (°C)	Ra (-)	$Nu^{teoretisk}$ (-)	$k^*$ (W/mK)	$Nu^{forsøk}$ (-)
1	13.5	20.8	44.4	1.04	0.83	1.04
	21.0	27.0	67.6	1.39	1.20	1.50
	23.0	30.0	73.3	1.47	1.35	1.69
2	14.0	21.0	38.4	1.00	0.96	1.13
	22.5	24.8	61.0	1.30	1.30	1.53
3	18.0	21.0	6.5	1.00	1.82	1.13
	22.5	24.3	8.0	1.00	1.82	1.13

Ra eller Rayleigh tallet er et forholdstall mellom oppdriftskrefter og viskøse krefter.  $k^*$  er en parameter beregnet med formelverk som for varmeledning men benyttet for situasjonen der konveksjon kan oppstå. Nu eller Nusselt tallet er et mål på hvor mye den totale varmetransporten øker pga naturlig konveksjon sammenlignet med ren varmeledning.

## Innhold

1	INNLEDNING .....	5
2	OMBYGGING AV PLATEAPPARAT .....	6
2.1	Prinsipp for måling av varmeledningsevne i plateapparat.....	6
2.2	Prinsipp for måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon i plateapparat.....	6
2.3	Plateapparat for prøver av steinfylling .....	8
3	BESKRIVELSE AV STEIN BENYTTET I FORSØKENE .....	9
3.1	Siktekurver.....	9
3.2	Kvartsinnhold .....	9
3.3	Vanninnhold .....	9
3.4	Komprimeringsgrad.....	10
4	BESKRIVELSE AV FORSØKSPROSEDYRE MED RESULTATER ..	11
4.1	Innbygging av prøven.....	11
4.2	Registrering av temperatur og effekt frem mot stasjonær tilstand ..	11
4.3	Utbygging av prøven .....	12
4.4	Varmetap gjennom topplokket og bunnplaten.....	12
4.5	Resultater fra måling av varmeledningsevne.....	13
4.6	Resultater fra måling av både varmeledningsevne og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon.....	13
5	DISKUSJON OG KONKLUSJON.....	14
5.1	Diskusjon .....	14
5.2	Konklusjon.....	17
6	REFERANSER .....	18

### Tabeller:

Tabell 1	Resultater fra utførte forsøk for måling av varmeledningstall
Tabell 2	Resultater fra utførte forsøk der naturlig konveksjon kan oppstå
Tabell 3-1	Bergarts- og mineralsammensetning i steinmaterialet
Tabell 3-2	Beregnet graderingstall fra kornfordelingskurver
Tabell 3-3	Vanninnhold i steinmateriale benyttet i forsøk
Tabell 3-4	Total romvekt samt porøsitet oppnådd i forsøk
Tabell 4-1	Beregnet effekttap for de ulike forsøk og temperaturgradienter
Tabell 4-2	Resultater fra utførte forsøk for måling av varmeledningstall
Tabell 4-3	Resultater fra utførte forsøk der naturlig konveksjon kan oppstå
Tabell 5-1	Oppsummering av resultater fra måling av varmeledningstall

### Figurer :

- Figur 2.1 Prinsipp for måling av varmeledningsevne ved stasjonær varmestrøm i plateapparat.
- Figur 2.2 Prinsipp for måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon i plateapparat.
- Figur 2.3 Skisse av plateapparat produsert ved NGI for måling av varmetap i ulike steinfyllingsmaterialer.
- Figur 3.1 Kornfordelingskurver for steinmateriale benyttet i forsøk.
- Figur 4.1 Temperaturutvikling, uten konveksjon, Ballastpukk.
- Figur 4.2 Temperaturutvikling, konveksjon kan oppstå, Ballastpukk.
- Figur 4.3 Temperaturutvikling, uten konveksjon, Maskinkult.
- Figur 4.4 Temperaturutvikling, konveksjon kan oppstå, Maskinkult.
- Figur 4.5 Temperaturutvikling, uten konveksjon, Sprengstein.
- Figur 4.6 Temperaturutvikling, konveksjon kan oppstå, Sprengstein.
- Figur 5.1 Kornfordelingskurver for alle steinfraksjoner der måling av varmeledningstall er utført.

### Foto fra forsøkene:

- Foto 1 Plateapparat i forsøkshall ved NGI. Innbygging
- A Oppsett ved innbygging av forsøk.
  - B Innmåling av prøvehøyden
- Foto 2 Plateapparat i forsøkshall ved NGI. Innbygging
- A Avretting, utlegging av fiberduk og bascarp sand for kontakt mellom topp-plate og prøvemateriale.
  - B Apparat etter avsluttet innbygging.
- Foto 3 Plassering av termistorer mellom hvert lag – Forsøk 1 ballastpukk
- A Temperaturmålere plassert på toppen av lag 1.
  - B Nærbilde av A.
- Foto 4 Plassering av termistorer mellom hvert lag – Forsøk 2 maskinkult
- A Temperaturmålere plassert på toppen av lag 2.
  - B Nærbilde av A.
- Foto 5 Bilder fra forsøk 3, sprengstein, fraksjon 0 – 250 mm
- A Stein til forsøk 3 spadd sammen uten store stein (> ca. 100 mm).
  - B Store stein fordelt jevnt utover massen => fraksjon 0 – 250 mm.
- Foto 6 Plassering av termistorer mellom hvert lag – Forsøk 3 sprengstein
- A Temperaturmålere plassert på toppen av lag 1.
  - B Nærbilde av A.
- Foto 7 Utbygging, veggene i kassen er løftet opp og massen spres utover.
- A Utbygging av forsøk 1, ballastpukk (25 – 63 mm)
  - B Utbygging av forsøk 3, maskinkult (25 – 63 mm)

### Kontroll- og referanseside



## 1 INNLEDNING

Vinteren 95/96 oppstod det problemer med telehiv på nybygde parseller på Øst- og Vestfoldbanen. Som et ledd i å vurdere årsakene til dette, ble NGI engasjert av Jernbaneverket til å utføre måling av varmeledningsevne av ulike steinfyllingsmaterialer i laboratoriet, (NGI, 1996). Materialfraksjonene som ble benyttet i forsøkene utført i 1996 var 0 - 100 mm, 20 - 250 mm og 0 - 250 mm.

Etter at ulike tiltak ble foretatt for å utbedre forholdene, oppstod det vinteren 96/97 igjen problemer med telehiv på Skoger-parsellene på Vestfoldbanen. NGI konkluderte med at konveksjon, i kombinasjon med åpen struktur i fyllmassene, etter all sannsynlighet var årsak til disse telehiv-problemene.

På bakgrunn av dette ønsket Jernbaneverket å få utført målinger av varmeledning i laboratoriet, samt måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon for ulike steinfyllingsmaterialer.

NGI ble engasjert av Jernbaneverket Hovedkontoret for å utføre målinger av varmetap i ulike steinfyllingsmaterialer i laboratoriet. Følgende arbeider ble avtalt utført :

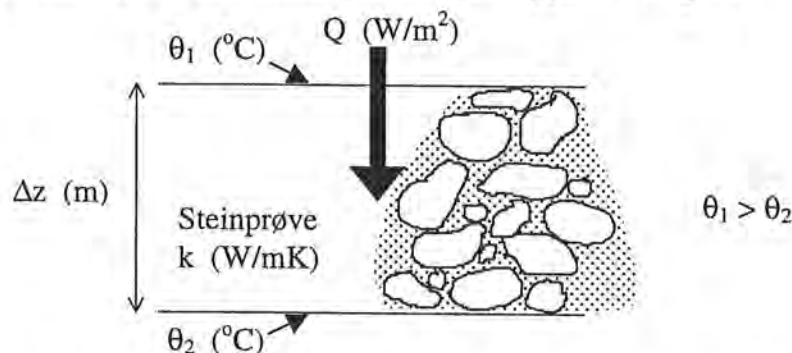
1. Ombygging av tidligere produsert plateapparat for måling av varmeledning samt måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon i steinfyllingsmaterialer.
2. Utarbeide kornfordelingskurve for materialfraksjonen 25 - 63 mm, samt bestemme vann- og kvartsinnhold i forsøksmaterialet.
3. Utføre måling av varmetap med både varmeledning og tetthetsdrevet konveksjon ved ett vanninnhold for tre ulike materialfraksjoner :
  - Forsøk 1, ballastpukk i fraksjon 25 - 63 mm
  - Forsøk 2, maskinkult i fraksjon 20 - 120 mm
  - Forsøk 3, sprengstein i fraksjon 0 - 250 mm

Denne rapporten presenterer resultatene fra dette arbeidet, som er utført i perioden mai '98 til august '99.

## 2 OMBYGGING AV PLATEAPPARAT

### 2.1 Prinsipp for måling av varmeledningsevne i plateapparat

Prinsippet for måling av varmeledningsevne i plateapparat fremgår av Figur 2.1.



**Figur 2.1 Prinsipp for måling av varmeledningsevne ved stasjonær varmestrøm i plateapparat**

Plateapparatet er i prinsippet en kasse med en varmeplate/effektgiver i toppen og en kjøleplate i bunnen. En kjent stasjonær varmestrøm passerer gjennom prøven, og det er mulig å måle temperaturforskjellen mellom topp og bunn. Kassen som prøven bygges inn i er isolert slik at varmetap til omgivelsene minimaliseres. Når stasjonær varmestrøm er oppnådd kan prøvens varmeledningstall,  $k$ , beregnes fra :

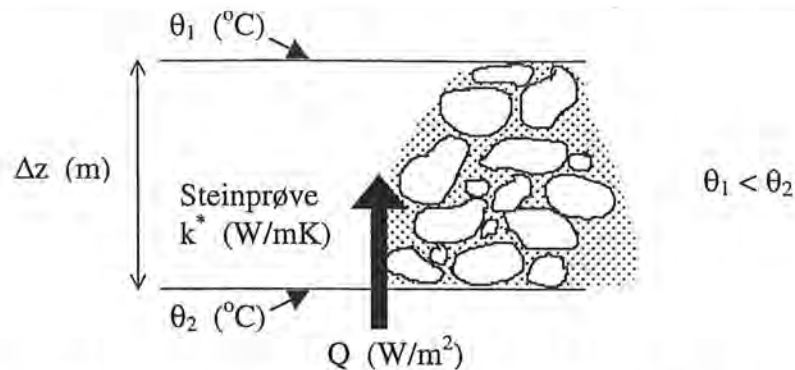
$$k = \frac{Q \cdot \Delta z}{\Delta \theta} \quad (W / mK) \quad (\text{ligning 2.1})$$

der

$Q$ ( $W / m^2$ )	Stasjonær varmestrøm gjennom prøven
$\Delta z$ (m)	Prøvehøyde
$\Delta \theta$ (K)	Temperaturdifferanse over prøven

### 2.2 Prinsipp for måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon i plateapparat

Dersom plateapparatet har varmeplate/effektgiver i bunnen og en kjøleplate i toppen, kan konvektiv varmeovergang oppstå som følge av tetthetsforskjellen mellom varm (lett) luft og kald (tyngre) luft. En kjent stasjonær varmestrøm passerer gjennom prøven, og det er mulig å måle temperaturforskjellen mellom topp og bunn. Varmetap med både varmeledning og bidrag fra naturlig tetthetsdrevet konveksjon kan da måles. Dette prinsippet er vist i Figur 2.2.



**Figur 2.2** Prinsipp for måling av varmetap med både varmeledning og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon i plateapparat

Konveksjon av betydning starter når Rayleigh tallet overstiger en kritisk verdi, som for et porøst materiale med impermeable grenser er funnet til å være ca. 40, (Lapwood, 1948). Rayleigh tallet er gitt som :

$$Ra = \frac{\beta \cdot g \cdot B_0 \cdot H \cdot \rho^2 \cdot c \cdot \Delta T}{\mu \cdot \lambda_m} \quad \text{likning 2.2}$$

der	$\beta$ - termisk og konsentrasjon ekspansjonskoeffisient [-]	
	$g$ - tyngdens akselerasjon	[9.81 m²/s]
	$B_0$ - spesifikk luftpermeabilitet, $B_0 = \frac{n^3 \cdot D_p^2}{180 \cdot (1-n)^2}$	[m²]
	$n$ - porøsitet	[%]
	$D_p$ - gjennomsnittlig korndiameter	[m]
	$H$ - høyden av spalten	[m]
	$\rho$ - densitet av luft	[kg/m³]
	$c$ - varmekapasitet	[J/kgK]
	$\Delta T$ - temperaturdifferanse	[°C]
	$\mu$ - dynamisk viskositet	[kg/ms]
	$\lambda_m$ - konduktivitet	[W/mK]

Rayleigh-Nusselt korrelasjoner blir ofte benyttet for å fremstille hvordan naturlig konveksjon innvirker på varmetransporten. For horisontale porøse lag med impermeable randbetingelser er en Rayleigh-Nusselt korrelasjon gitt av likning 2.3 (Somerton, 1983).

$$Nu = \frac{Ra^{0.68}}{12.63} \quad \text{likning 2.3}$$

$Nu$  eller Nusselt tallet er et mål på hvor mye den totale varmetransporten øker pga naturlig konveksjon sammenlignet med ren varmeledning. Den totale varmetransporten fra naturlig konveksjon og ledning finnes ved å multiplisere Nusselt tallet med varmetransport for ledning.



### 2.3 Plateapparat for prøver av steinfylling

Et plateapparat for måling av varmeledningsevne på stein- og grusfyllings prøver ble produsert av NGI i 1996. Figur 2.3 viser et vertikal snitt av apparatet etter ombygging. I horisontalplanet er apparatet kvadratisk med et prøvetverrsnitt på 100x100 cm.

For å kunne bygge inn en representativ prøve med stein i fraksjonen 0 - 250 mm, er apparatet mye større enn et tradisjonelt plateapparat. Som det fremgår av Figur 2.3 er prøvedimensjonen 100x100x75 cm. Plateapparatet er bygd som en kasse bestående av en skallkonstruksjon med 10 cm isolasjon (XPS) mellom to 15 mm forskalingsplater. Kassen består etter ombygging av tre deler som kan separeres :

1. **Bunnseksjon** med varmeplate over kjølerørsløyfer av kobber over 10 cm XPS. En termostatventil regulerer temperaturen på inngående kjølevann. Mellom kjølerørene og varmeplaten i bunnseksjonen er det plassert to termistorer, som registrerer temperaturen i bunn av innbygget prøve. Bunnplaten har samme areal som prøven.
2. En **senterseksjon** som skrues fast til bunnseksjonen. Denne er 75 cm høy og kledd med 10 cm XPS. Utvendig er senterseksjonen avstivet med trebjelker i tre nivåer.
3. **Topplaten** med varmeplate og kjølerørsløyfer skrues fast til senterseksjonen etter at prøven er bygd inn. Topplaten er isolert med 20 cm XPS mellom tre 15 mm forskalingsplater.

Under forsøkene ble vann benyttet som kjølevæske. En termostatventil regulerer gjennomstrømningshastigheten slik at kjølerørssystemet holder en konstant temperatur.

Begge varmeplatene kan kobles til en styringsenhet som er festet til oversiden av topplaten. Varmemattene som benyttes er av samme areal som prøven. Styringsenheten gjør det mulig å velge mellom temperaturstyring og effektstyring av varmeelementene. Ved temperaturstyring velger man ønsket temperatur og leser av den effekten som forbrukes. Ved effektstyring velges en konstant effekt, og den temperaturen dette gir kan leses av.

Ved innbygging plasseres to termurmålere mellom hvert lag, se Figur 2.3. Alle termurmålere som er benyttet er av leverandøren oppgitt å ha en usikkerhet på maksimalt +/- 0.2 °C. I varmeplatene i topp og bunn av forsøkkassen er det et innebygget termoelement som av leverandøren er oppgitt å ha en usikkerhet på maksimalt +/- 2.2 °C. Registrert temperatur fra termoelementet blir kun benyttet som retningsgivende mens forsøket pågår, og inngår ikke i beregning av varmetap i steinmaterialet.

### 3 BESKRIVELSE AV STEIN BENYTTET I FORSØKENE

I forsøkene er det benyttet stein levert fra Feiring Bruk. Bergarts- og mineralsammensetning fremgår av Tabell 3-1. Dette er resultater fra petrografiske analyser som Feiring Bruk har fått utført.

Tabell 3-1 Bergarts- og mineralsammensetning i steinmaterialet

Bergart - mineral	Volumprosent	
	April 1995	Desember 1997
Gneis / granitt	73	53
Metagabbro / amfibolitt	19	33
Dioritt / feltspat	7	3 / 11
Omdannet bergart	1	

#### 3.1 Siktekurver

Siktekurvene for de tre ulike steinfyllingsfraksjonene er vist i Figur 3.1. Graderingstallet,  $C_u = d_{60}/d_{10}$ , for materialet benyttet i forsøkene er beregnet fra siktekurvene og resultatene fremgår i Tabell 3-2.

Tabell 3-2 Beregnet graderingstall fra kornfordelingskurver

Forsøk nr..	Graderingstall, $C_u$ (-)	Betegnelse
Forsøk 1; ballastpukk (25 - 63 mm)	1.6	Ensgradert
Forsøk 2; maskinkult (20 - 120 mm)	2.5	Ensgradert
Forsøk 3; sprengstein (0 - 250mm)	104	Velgradert

#### 3.2 Kvartsinnhold

Kvartsinnholdet i steinmassene ble beregnet ved analyse av ca. 6 bergartstynnslip for hvert forsøk. For sprengstein, fraksjon 0-250 mm, ble kvartsinnholdet bestemt for materialet i delfraksjonen 4 - 250 mm. Resultatene viser et midlere kvartsinnhold på 23 %, 21 % og 31 % for henholdsvis forsøk 1, 2 og 3. Feiring bruk har tidligere foretatt differensialtermisk analyse (DTA) av steinmaterialet. Denne analysen viste at det er registret 25 % kvarts i det knuste tilslaget. Legges dette til grunn for sprengsteinmaterialet, blir det midlere kvartsinnholdet 30 %.

#### 3.3 Vanninnhold

Det ble benyttet tørre steinmasser i forsøk 1 og 2, henholdsvis ballastpukk og maskinkult. Vanninnholdet er derfor tilnærmet 0 % og ble derfor ikke bestemt ved tørking og veiing av prøven. For forsøk 3 ble steinmassene bygget inn ved det vanninnhold materialet hadde ved levering NGI. Ved innbygging av

forsøk 3, ble det tatt ut ca. 75 kg av prøvemateriale til bestemmelse av vanninnhold. Steiner > 100 mm ble fjernet før veiing og tørking. Dette tas det hensyn til ved å vekte målt vanninnhold mot prosentandel av dette materiale gitt av kornfordelingskurven. En antar her at svært lite vann er bundet til materialet med steinfraksjoner > 100 mm. Vanninnholdet ble også målt etter utbygging av forsøk 3. Vanninnholdet, gitt som prosentandel vann i forhold til tørrvekt av hele prøven, fremgår av Tabell 3-3.

Tabell 3-3 Vanninnhold i steinmateriale benyttet i forsøk

Forsøk nr.	Vanninnhold ved innbygging (%)	Vanninnhold ved utbygging (%)
Forsøk 1; ballastpukk (25 - 63 mm)	~ 0	~ 0
Forsøk 2; maskinkult (20 - 120 mm)	~ 0	~ 0
Forsøk 3; sprengstein (0 - 250mm)		
fraksjon 0 – 100 mm	3.2	2.3
vektet 0 – 250 mm	2.3	1.7
Feiring bruk	1.4	-

### 3.4 Komprimeringsgrad

Steinmassene ble bygd inn i måleapparatet i tre lag av ca. 25 cm. Etter innbygging av hvert lag ble massene komprimert med én overkjøring med vibro "hoppetusse". Dette tilsvarer ca. 30 minutters komprimeringsarbeid. Resultatene i form av oppnådd total romvekt samt beregnet porøsitet etter innbygging, er gitt i Tabell 3-4. Porøsiteten etter innbygging av prøven er beregnet basert på målt vanninnhold og antatt tyngdetetthet av fast stoff,  $\gamma_s$ , på  $26.5 \text{ kN/m}^3$ .

Tabell 3-4 Total romvekt samt porøsitet oppnådd i forsøk

Forsøk nr.	Total romvekt, $\gamma_{\text{tot}}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Porøsitet, n (%)
Forsøk 1; ballastpukk (25 - 63 mm)	16.5	37.8
Forsøk 2; maskinkult (20 - 120 mm)	17.4	34.4
Forsøk 3; sprengstein (0 - 250mm)	22.4	17.0



## 4 BESKRIVELSE AV FORSØKSPROSEDYRE MED RESULTATER

Prosedyren som ble benyttet i forsøkene består av tre deler (NGI, 1996) :

1. Innbygging av prøven.
2. Registrering av temperatur og effektforbruk frem mot stasjonær tilstand.
3. Utbygging av prøven.

### 4.1 Innbygging av prøven

Før innbygging ble steinmassene spadd sammen slik at en mest mulig homogen fordeling av fraksjoner og vanninnhold skulle oppnås. Steinmasser ble spadd opp i prøvekasen i tre lag av ca. 25 cm. Hvert lag ble komprimert ved å benytte en "hoppetusse". Etter utlegging av hvert lag, ble to termometer plassert på toppen av laget og laghøyden innmålt. På toppen av lag 3 ble det benyttet filterduk og avrettet med finsand for å skape god kontakt med varmeplaten. Etter at toppen av prøven var avrettet, ble topplokket skrudd fast og kjølevann og varmeplate ble slått på.

### 4.2 Registrering av temperatur og effekt frem mot stasjonær tilstand

Ved innbygging hadde steinmassene en temperatur på ca. 20 °C (~ romtemperatur). Det tar tid før varmestrømmen gjennom prøven blir stasjonær og temperaturene målt i prøven blir konstante. Under forsøkene ble temperaturen mellom alle lag i prøven registrert hver time ved hjelp av en datalogger. Dette er nødvendig for å følge med og observere når temperaturene blir tidskonstante og en stasjonær tilstand er oppnådd.

Ved starten av forsøkene ble varmeplata satt på temperaturstyring med konstant temperatur, mot slutten av forsøkene ble effektstyring valgt for å sikre en mest mulig konstant varmestrøm. Kjøletemperaturren ble satt til ca. 13 °C.

Flere temperaturbetingelser ble påført de ulike forsøkene under kjøring. For situasjonen uten konveksjon, er temperaturutviklingen i de ulike lag samt romtemperaturen vist i Figur 4.1, 4.3 og 4.5 for henholdsvis forsøk 1, 2 og 3. For situasjonen der naturlig konveksjon kan oppstå er temperaturutviklingen i de ulike lag samt romtemperaturen vist i Figur 4.2, 4.4 og 4.6 for henholdsvis forsøk 1, 2 og 3. Som det fremgår av figurene tar det ca. en uke før en endring i en av randbetingelser har stabilisert seg og stasjonær tilstand oppnås i steinmaterialene.

### 4.3 Utbygging av prøven

Ved utbygging av prøven ble topplokket skrudd av og avrettingslaget av sand fjernet. Senterseksjonen ble skrudd fra bunnplata og løftet opp slik at massene tømmes. Prøve for bestemmelse av kvartsinnhold og eventuelt vanninnhold ble tatt, før det resterende steinvolum ble transportert tilbake til Feiring bruk.

### 4.4 Varmetap gjennom topplokket og bunnplaten

Ved å benytte nøyaktige termometer og en godt isolert forsøkskasse er feilkildene redusert betraktelig. Likevel vil det på grunn av den store temperaturforskjellen mellom undersiden og oversiden av topplokket eller bunnplaten, være et effekttap her. Effekttapet gjennom sideveggene er det ikke tatt hensyn til da det for måling av varmeledningstall ble tilstrebet å oppnå en gjennomsnittstemperatur i prøven som var tilnærmet lik romtemperaturen.

Effekttapet er avhengig av temperaturforskjellen mellom varmeplate og romtemperatur. Tabell 4-1 viser beregnet effekttap for de ulike forsøk og temperaturgradienter. Beregnet effekttap er basert på temperaturforskjellen gjennom topplokket eller bunnplaten, varmeledningstall for XPS lik 0.03 W/mK og varmemotstand for 15 mm kryssfinér plater lik 0.12 m<sup>2</sup>K/W. Forsøksresultatene er korrigert i henhold til disse effekttapene.

Tabell 4-1 Beregnet effekttap for de ulike forsøk og temperaturgradienter

Forsøk	T <sub>varmeplate</sub> (°C)	T <sub>rom</sub> (°C)	ΔT (°C)	Beregnet tap (W/m <sup>2</sup> )
1	64.0	22.5	41.5	5.9
	33.0	20.0	13.0	1.9
1- konveksjon	27.4	18.5	8.9	2.5
	37.9	18.8	19.1	5.3
	41.9	18.0	23.9	6.7
2	31.4	17.7	13.7	2.0
2- konveksjon	26.5	16.8	9.7	2.7
	34.6	19.0	15.6	4.6
3	34.1	20.6	13.5	1.9
3- konveksjon	29.9	19.9	10.0	2.8
	35.5	22.2	13.3	3.7

#### 4.5 Resultater fra måling av varmeledningsevne

For de tre utførte forsøkene 1, 2 og 3 er resultatene samlet i Tabell 4-2.

Tabell 4-2 Resultater fra utførte forsøk for måling av varmeledningstall

Forsøk	Fraksjon (mm)	Kvarts- innhold (%)	Total romvekt (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{tot}/d_{maks}$	Porøsitet (%)	Vann- innhold (%)	Varmeledn. tall, k (W/mK)
1	25 – 63	23	16.5	11.9	38	~ 0	0.8
2	20 – 120	21	17.4	6.3	34	~ 0	0.85
3	0 – 250	30	22.5	3.0	17	~2	1.6

Forholdstallet  $h_{tot}/d_{maks}$  forteller hvor høy lagtykkelsen ( $h_{tot} = 750$  mm) er i forhold til steinfyllingens maksimale steinstørrelse ( $d_{maks}$ ).

Det er mulig at ulik komprimeringsgrad, finstoffansamling i bunnen og fukttransport mot kald side er effekter som gjør at verdien for varmeledningsevne ikke vil være helt homogent fordelt over prøvehøyden. De verdiene som her er oppgitt er tolket av NGI til å være mest representativ for de tre prøvene.

#### 4.6 Resultater fra måling av både varmeledningsevne og bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon

For de tre utførte forsøkene er resultatene samlet i Tabell 4-3.

Tabell 4-3 Resultater fra utførte forsøk der naturlig konveksjon kan oppstå

Forsøk	$\Delta T$ (°C)	$T_{middel}$ (°C)	Ra (-)	$Nu^{teoretisk}$ (-)	$k^*$ (W/mK)	$Nu^{forsøk}$ (-)
1	13.5	20.8	44.4	1.04	0.83	1.04
	21.0	27.0	67.6	1.39	1.20	1.50
	23.0	30.0	73.3	1.47	1.35	1.69
2	14.0	21.0	38.4	1.00	0.96	1.13
	22.5	24.8	61.0	1.30	1.30	1.53
3	18.0	21.0	6.5	1.00	1.82	1.13
	22.5	24.3	8.0	1.00	1.82	1.13

$k^*$  er en parameter beregnet med formelverk som for varmeledning (se ligning 2.1), men benyttet for situasjonen der randbetingelsene kan gi konveksjon.  $k^*$  er en kvasi parameter som er avhengig av temperaturgradienten i prøven. Nusselt tallet,  $Nu$ , er et mål for hvor mye den totale varmetransporten øker på grunn av naturlig konveksjon sammenlignet med ren varmeledning. Et Nusselt tall på 1.5 betyr at varmetransporten har økt med 50 % sammenlignet med ren varmeledning. Nusselt tallet er beregnet ut fra antagelser av ulike material parametre, se ligning 2.2.



## 5 DISKUSJON OG KONKLUSJON

### 5.1 Diskusjon

#### 5.1.1 Kvarts

En kan forvente et kvartsinnhold på mellom 20 % og 100 % for en gneis. I steinmassene benyttet i forsøkene er det målt kvartsinnhold mellom 20 % og 30 %, som er innenfor det forventede området.

#### 5.1.2 Varmeledning

Generelt vil det for drenerte steinfyllinger være formen på siktekurven, kvartsinnhold, vanninnhold og porøsitet, som bestemmer midlere varmeledningsevne for fyllingen. Redusert porøsitet, økt kvartsinnhold og høyere vanninnhold er alle faktorer som generelt fører til høyere varmeledningsevne.

Resultatene fra forsøkene gir varmeledningstall for steinprøvene ved en gjennomsnittlig temperatur på 20.5, 21 og 19.2 °C, for henholdsvis ballastpukk, maskinkult og sprengstein. Varmeledningstall for frosset materiale er ikke målt i noen av forsøkene, men for tørre steinmasser forventes ingen stor forskjell mellom ufrosset og frosset varmeledningstall. For en fuktig steinfylling derimot forventes frosset varmeledningstall å være høyere enn ufrosset varmeledningstall, da is leder varme bedre enn vann.

På grunn av vanninnholdet i steinfraksjonen i forsøk 3, diffunderer fukt fra varm mot kald side under hele forsøket. Varmestrømmen i steinmaterialet blir derfor aldri helt stasjonær. Det varmeledningstallet som er oppgitt, er hva vi ut fra forsøksresultatene har tolket å være den mest representative for det innbygde vanninnholdet.

En oppsummering av alle utførte forsøk med måling av varmeledningstall i plateapparatet på NGI er gitt i Tabell 5-1. Tilhørende kornfordelingskurver for alle steinfraksjoner der måling av varmeledningsamtilall er utført er vist i Figur 5.1.



Tabell 5-1 Oppsummering av resultater fra måling av varmeledningstall

Forsøk	Fraksjon (mm)	Kvartsinnhold (%)	Total romvekt (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{tot}/d_{maks}$	Porøsitet (%)	Vanninnhold (%)	Varmeledn. tall, k (W/mK)
1A	0 - 100	40	21.5	7.5	20	1.4	1.1
1B	0 - 250	40	21.1	3.0	21	0.4 - 0.9	0.75
2A	20 - 250	40	17.4	3.0	34	~ 0	0.52
3A	0 - 100	40	22.2	7.5	20	4.2	1.3 - 1.4
3B	0 - 250	40	21.1	3.0	24	4.5	1.2 - 1.3
1	25 - 63	23	16.5	11.9	38	~ 0	0.8
2	20 - 120	21	17.4	6.3	34	~ 0	0.85
3	0 - 250	30	22.5	3.0	17	~ 2	1.6

Sammenlignes forsøk 1 med forsøk 2 er det kun små forskjeller, men varmeledningstallet er målt noe høyere i forsøk 2 enn i forsøk 1. Dette kan skyldes at forholdstallet ( $h_{tot}/d_{maks}$ ) mellom høyden på steinfyllingen og maksimal steinstørrelse er redusert fra forsøk 1 til forsøk 2. I tillegg er også porøsiteten noe lavere i forsøk 2 sammenlignet med forsøk 1.

Ufrosset varmeledningstall for forsøk 3 er høyere enn for forsøk 1 og 2. Dette skyldes trolig at forsøk 1 og 2 begge er kjørt på et ensgradert materiale som resulterer i høy porøsitet, mens forsøk 3 er utført på et mer velgradert materiale som gir relativ lav porøsitet. I tillegg er både vanninnhold og kvartsinnhold høyere i forsøk 3 sammenlignet med forsøk 1 og 2. Dette er alle faktorer som gir et forventet lavere varmeledningstall for materialene benyttet i forsøk 1 og 2 sammenlignet med forsøk 3.

For sprengsteinen i forsøk 3, skulle en ut fra forsøk 1B og 3B forvente et varmeledningstall i området 0.75 - 1.3 W/mK. Det målte varmeledningstallet for sprengstein i forsøk 3 er derimot høyere, til tross for lavere kvartsinnhold. Dette kan skyldes at forsøk 3 hadde høyere prosentandel finstoff, og derfor lavere porøsitet, enn forsøkene 1B og 3B. I forsøk 3 utgjør fraksjonen 0 - 20 mm ca. 36 % av totalen, mens den ved forsøk 1B og 3B utgjør ca. 21 % av totalen, se Figur 5.1. Basert på kornfordelingskurvene, er det derimot størst likhet mellom materialet benyttet i forsøk 3 og materialet benyttet i forsøk 3A. Varmeledningstallet fra forsøk 3 er 1.6 W/mK, sammenlignet med 1.3 - 1.4 W/mK for forsøk 3A. Dette til tross for lavere kvarts- og vanninnhold i forsøk 3 sammenlignet med forsøk 3A. Grunnen til dette kan være forskjell i oppnådd lagringstetthet i de to forsøkene. I tillegg kan reduksjon i forholdstallet ( $h_{tot}/d_{maks}$ ) mellom høyden på steinfyllingen og maksimal steinstørrelse ha ført til en økning av varmeledningstallet.





### 5.1.3 Tetthetsdrevet konveksjon

Når det gjelder indre konveksjon i en steinfylling, eller fri konveksjon i et porøst materiale, er dette bl.a. avhengig av lagtykkelse, porøsitet, steinstørrelse (kornfordeling) og temperaturgradient. Tetthetsdrevet konveksjon inntreffer først når temperaturgradienten overstiger en kritisk verdi. Inntil dette skjer, foregår varmetransporten hovedsakelig ved varmeledning.

For forsøkene der tetthetsdrevet konveksjon kan oppstå, har temperaturdifferansen mellom bunn og topp av forsøksmaterialet vært mellom 13.5 °C og 23.0 °C. Tre temperaturgradienter (13.5 °C, 21 °C og 23 °C) ble påført ballastpukken for situasjonen der tetthetsdrevet konveksjon kan oppstå. For de to høyeste gradientene oppsto tetthetsdrevet konveksjon. Maskinkulten i forsøk 2 ble påført to temperaturgradienter (14 °C og 22.5 °C). Begge gradientene gav et Nusselttall større enn 1.0, som er tilsier at konveksjon foregår. For ballastpukk og maskinkult oppsto indre konveksjon. Varmetransporten økte med opptil 70 % sammenlignet med ren varmeledning.

Sprengsteinen i forsøk 3 ble påført to temperaturgradienter (18 °C og 22.5 °C) under betingelser der konveksjon kan oppstå. For begge temperaturbetingelsene ble parameteren  $k^*$  lik 1.8 som er høyere enn gjennomsnittlig varmeledningstall for samme forsøk,  $k=1.6$  W/mK. Økningen i effektivt varmeldningstall skyldes trolig ikke konveksjon. Dette skyldes et lavt teoretisk beregnet Rayleigh tall, samt at det ikke var tegn til fluktuasjoner i kurven for temperaturutvikling i Figur 4.6. Forklaringen på økt Nusselt tall ( $Nu=1.13$ ) kan være forskjell i fukttransportregimet.

Johansen (1975) utførte også laboratorieforsøk for å studere effekten av fri konveksjon i en steinfylling med vertikal varmestrøm. Steinmaterialet benyttet i forsøkene var i fraksjon 20 - 80 mm, tørt, løst lagret og hadde tørr densitet lik 14.7 kN/m<sup>3</sup>. Varmeledningstallet ble målt til 0.45 W/mK. Gjennomsnittlig effektiv konduktivitet,  $k^*$ , under betingelser der fri konveksjon kunne oppstå, ble da målt opptil 0.80 W/mK, avhengig av temperaturgradient. Det svarer til et Nusselt tall på 1.77, dvs. at varmetransporten økte med 77 % sammenlignet med ren varmeledning uten konveksjon.

### 5.1.4 Tvungen konveksjon

Johansen (1975) utførte også laboratorieforsøk der en steinfylling på 0.5 m høyde ble utsatt for en luftstrøm med hastighet 2 m/s og temperatur 10 °C. Det ble da målt gjennomsnittlig effektiv konduktivitet,  $k^*$ , av steinmaterialet på 1.46 W/mK. Det tilhørende varmeledningstallet for steinmaterialet var 0.45 W/mK. Dette viser at selv små vindhastigheter gir store endringer både i temperatur regimet og varmetransporten i steinmaterialet.

## 5.2 Konklusjon

- Forsøkene har vært vellykkede.
- Varmetap inkludert bidrag fra tetthetsdrevet konveksjon er målt for tre ulike steinfraksjoner :
  1. Ballastpukk, fraksjon 25 - 63 mm.
  2. Maskinkult, fraksjon 20 - 120 mm.
  3. Sprengstein, fraksjon 0 - 250 mm.
- Resultatene viser at det for de to mest ensgraderte fraksjonene, 25-63 mm og 20 – 120 mm, oppsto tetthetsdrevet konveksjon for temperaturgradienter i området 13 – 23 °C. Varmetransporten økte med opptil 70 % sammenlignet med ren varmeledning uten bidrag fra konveksjon.
- For den mer velgraderte fraksjonen 0 – 250 mm oppstod ikke tetthetsdrevet konveksjon for en temperaturgradient opptil 23 °C.
- Det ufrossede varmeledningstallet for de tre forsøkene ligger i forventet område. Generelt kan det sies at :
  - Varmeledningstallet øker med økende og vanninnhold
  - Varmeledningstallet øker med redusert porøsitet
  - Varmeledningstallet øker med økende kvartsinnhold
- Kvartsinnholdet i steinmassene er i området som en kan forvente for en gneis. Kvartsinnholdet er også i overensstemmelse med tidligere bestemmelser som Feiring bruk har fått utført.
- Tidligere utførte forsøk med tvungen konveksjon fra en luftstrøm med hastighet 2 m/s, viser en mer enn tredobling av varmetapet sammenlignet med ren varmeledning.
- For en virkelig jernbanefylling som har en kornfordeling som tillater konveksjon vil varmetapet kunne øke betydelig pga :
  - Åpen overflatestruktur som tillater luft å sirkulere ut og inn pga tetthetsforskjeller.
  - Vind, som gir en ekstra effekt i form av tvungen konveksjon



## 6 REFERANSER

Johansen, Ø. (1975)

Thermal conductivity of soils

Ph.D. thesis, Trondheim, Norway.

(CRREL Draft Translation 637)

Lapwood, E.R. (1948)

Convection of A Fluid in a Porous Medium.

Proc. Camb. Soc. 44, pp. 508 – 521.

NGI (1996)

Måling av varmeledningsevne i sprengstein

Ufrosset varmeledningstall for stein i fraksjon 0 - 100 mm og 0 - 250 mm

målt i plateapparat

Rapport 960054-1, 6 august 1996

NGI (1996)

Måling av varmeledningsevne i sprengstein

Ufrosset varmeledningstall for stein i fraksjon 20 - 250 mm

Rapport 960054-2, 12 september 1996

NGI (1996)

Måling av varmeledningsevne i sprengstein

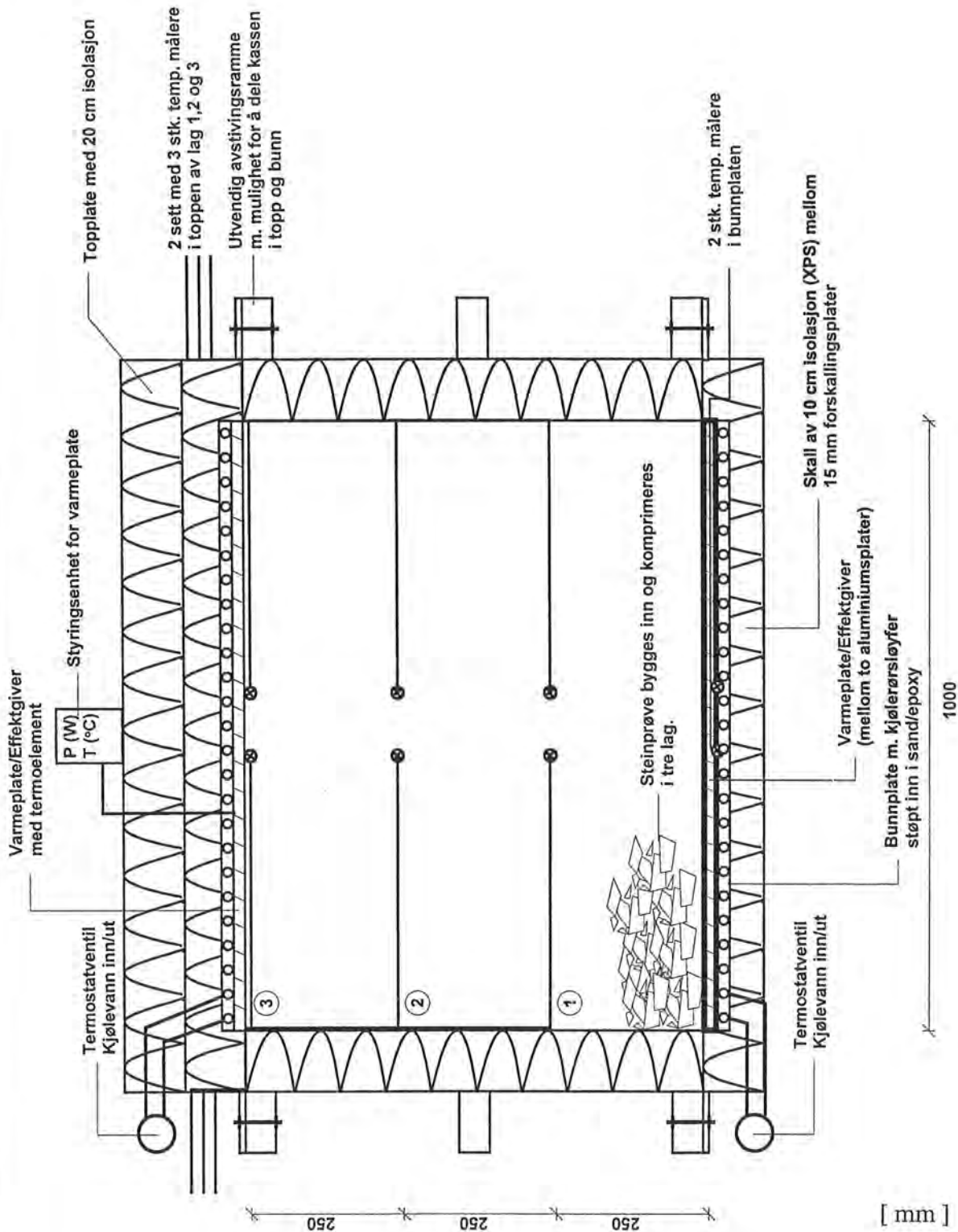
Ufrosset varmeledningstall for stein i fraksjon 0 - 250 mm, jordfuktig tilstand

Rapport 960054-3, 11 november 1996

Sommerton, C.W. (1983)

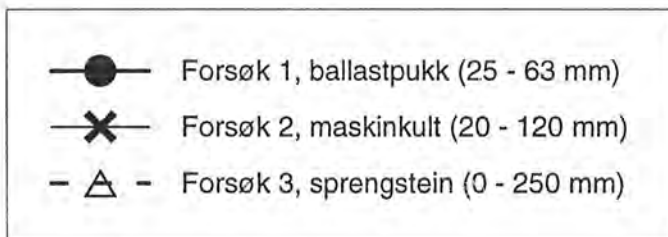
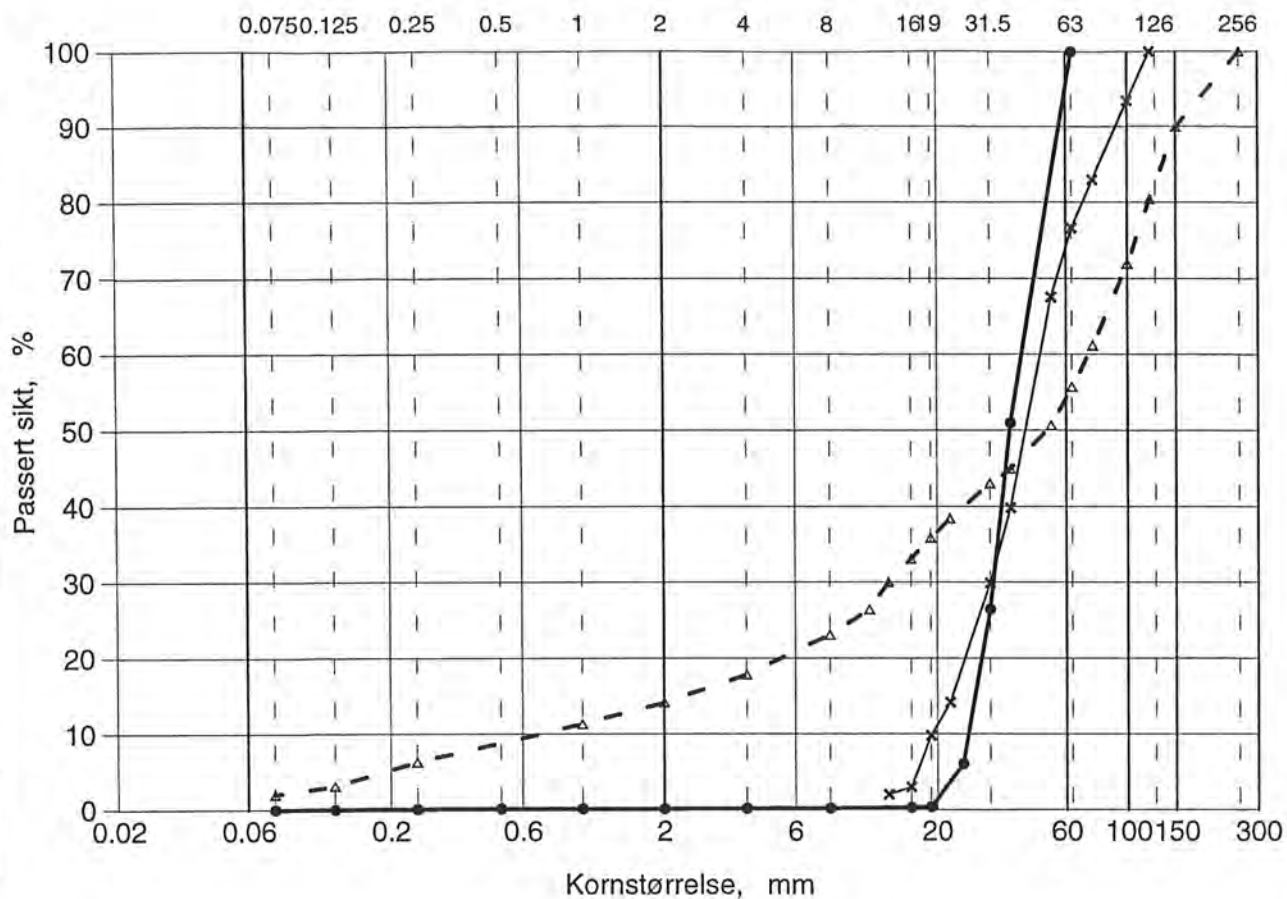
The Prandtl number effect in porous layer convection.

Appl. Sci. Research, 40, pp. 333 – 344.



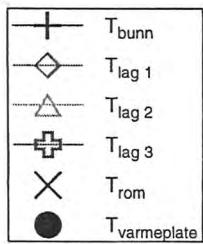
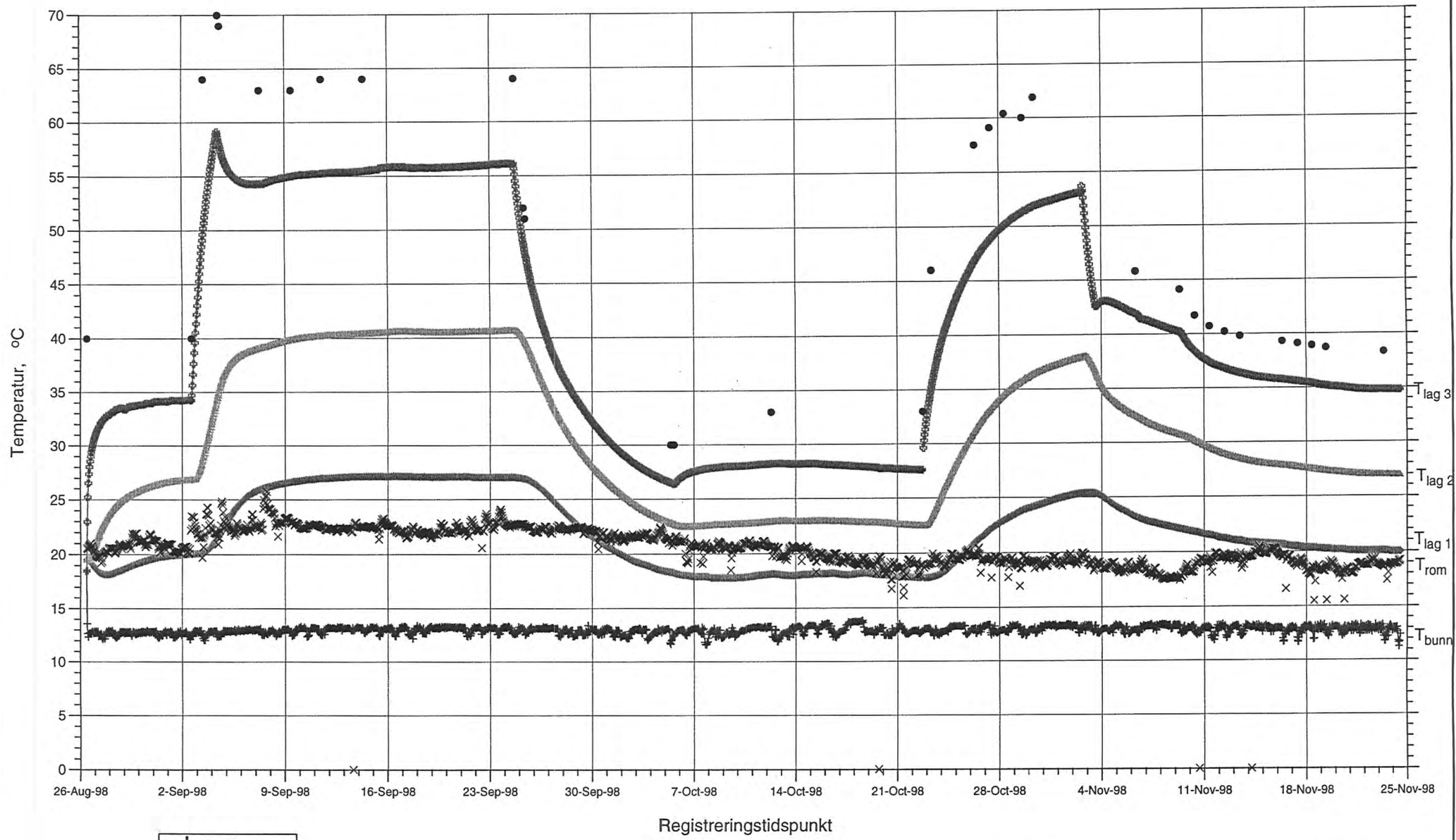
M = 1 : 10


<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSMATERIALER</b>	Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 2.3
	Tegner SK	Dato 01-02-99
Skisse av plateapparat produsert ved NGI for måling av varmetap i ulike steinfyllingsmaterialer.	Kontrollert 	
	Godkjent SK	

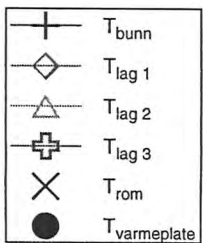
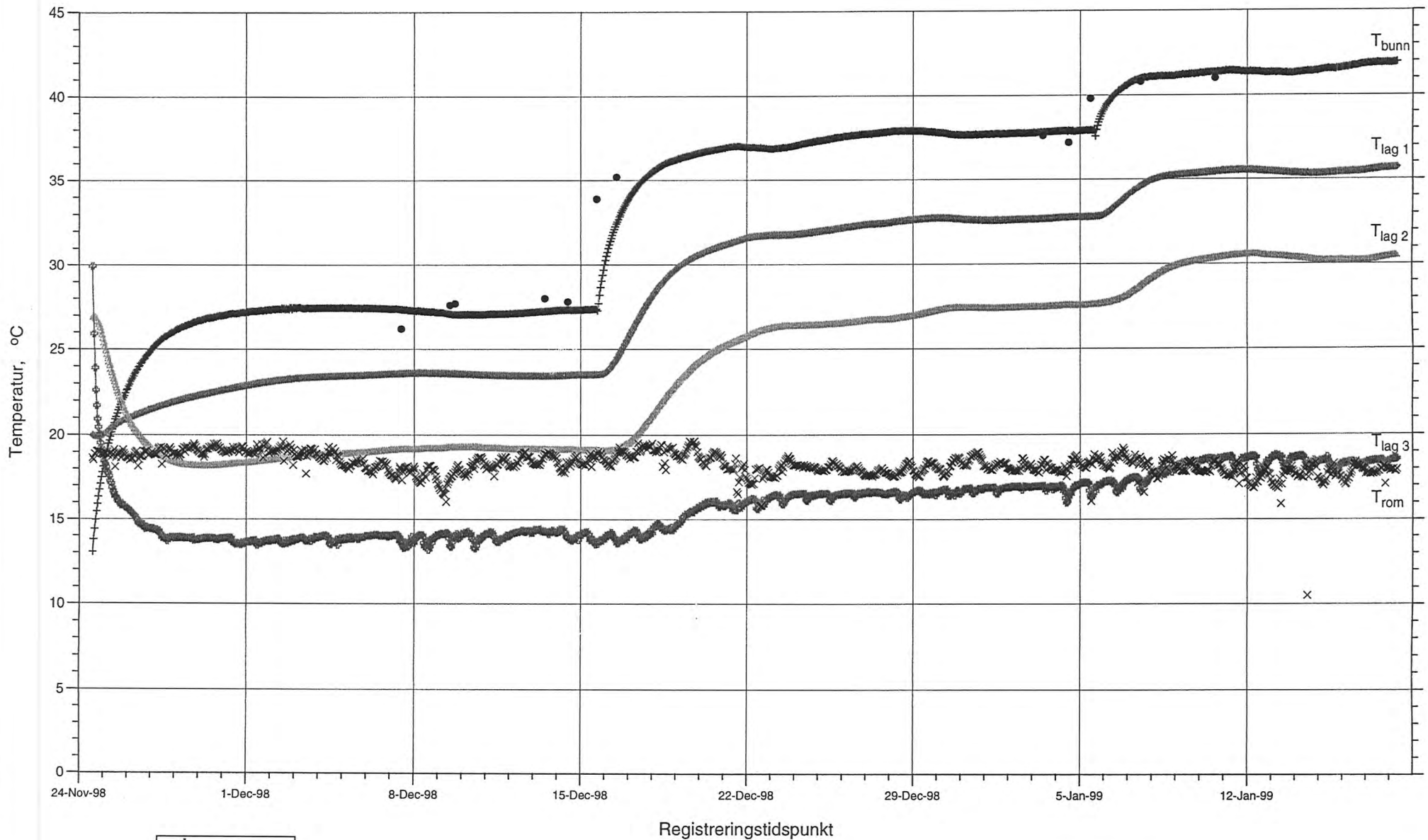



f:\p\98\251982519\forsok\grain.grf

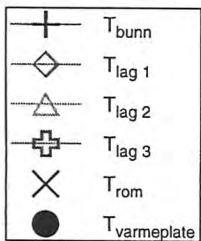
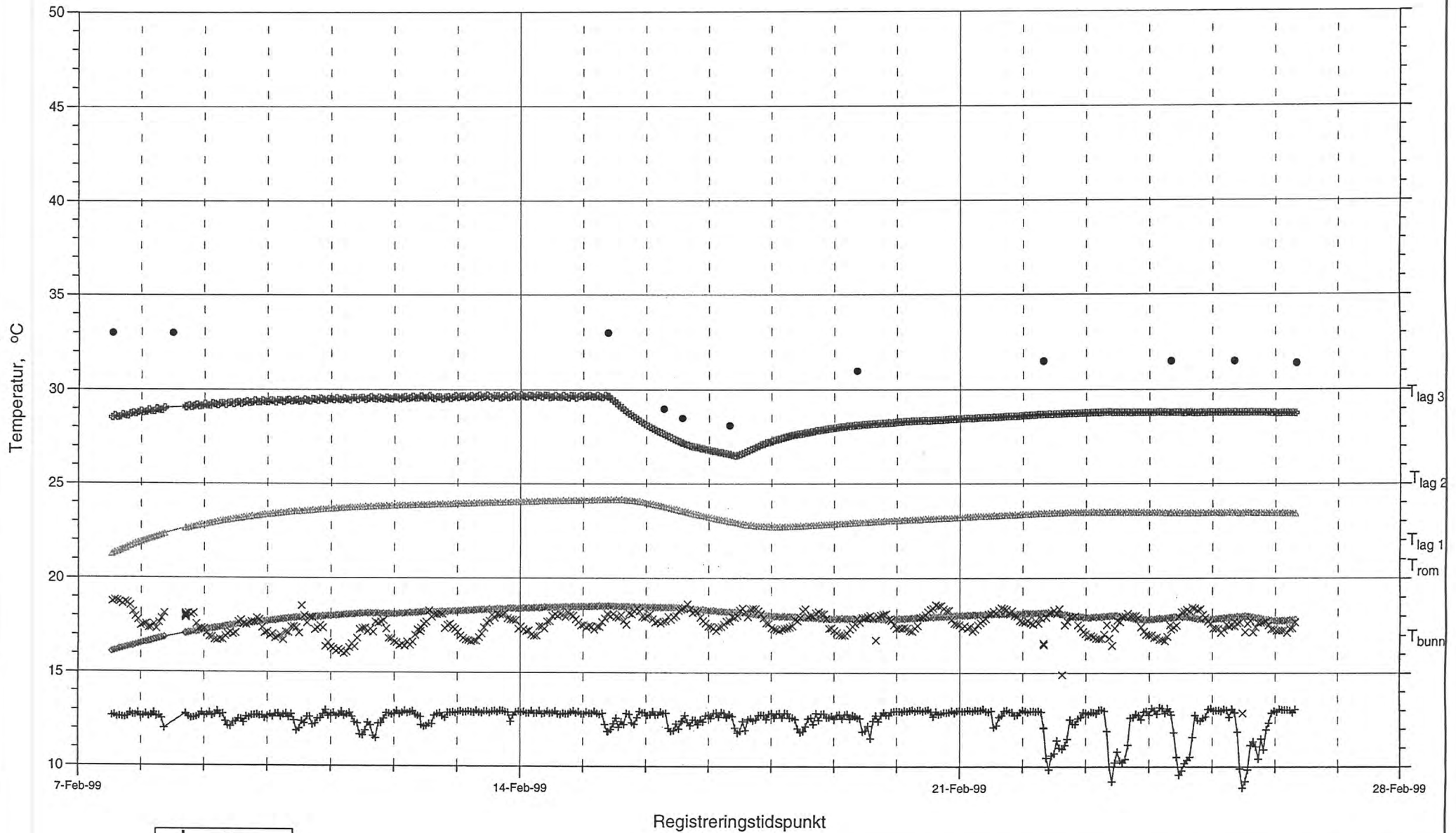
<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER</b>  Kornfordelingskurver for steinmateriale benyttet i forsøk.  Forsøk 1, ballastpukk (25 - 63 mm) Forsøk 2, maskinkult (20 - 120 mm) Forsøk 3, sprengstein (0 - 250 mm)	Rapport nr. 982519 - 1	Figur nr. 3.1
	Tegner SK	Dato 31.05.99
	Kontrollert 	
	Godkjent SK	




<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER</b>  Forsøk 1, ballastpukk (25 - 63 mm)  Temperaturutvikling	Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 4.1
	Tegner <i>[Signature]</i>	Dato 25.11.98
	Kontrollert <i>SK</i>	
	Godkjent <i>SK</i>	

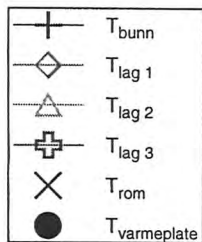
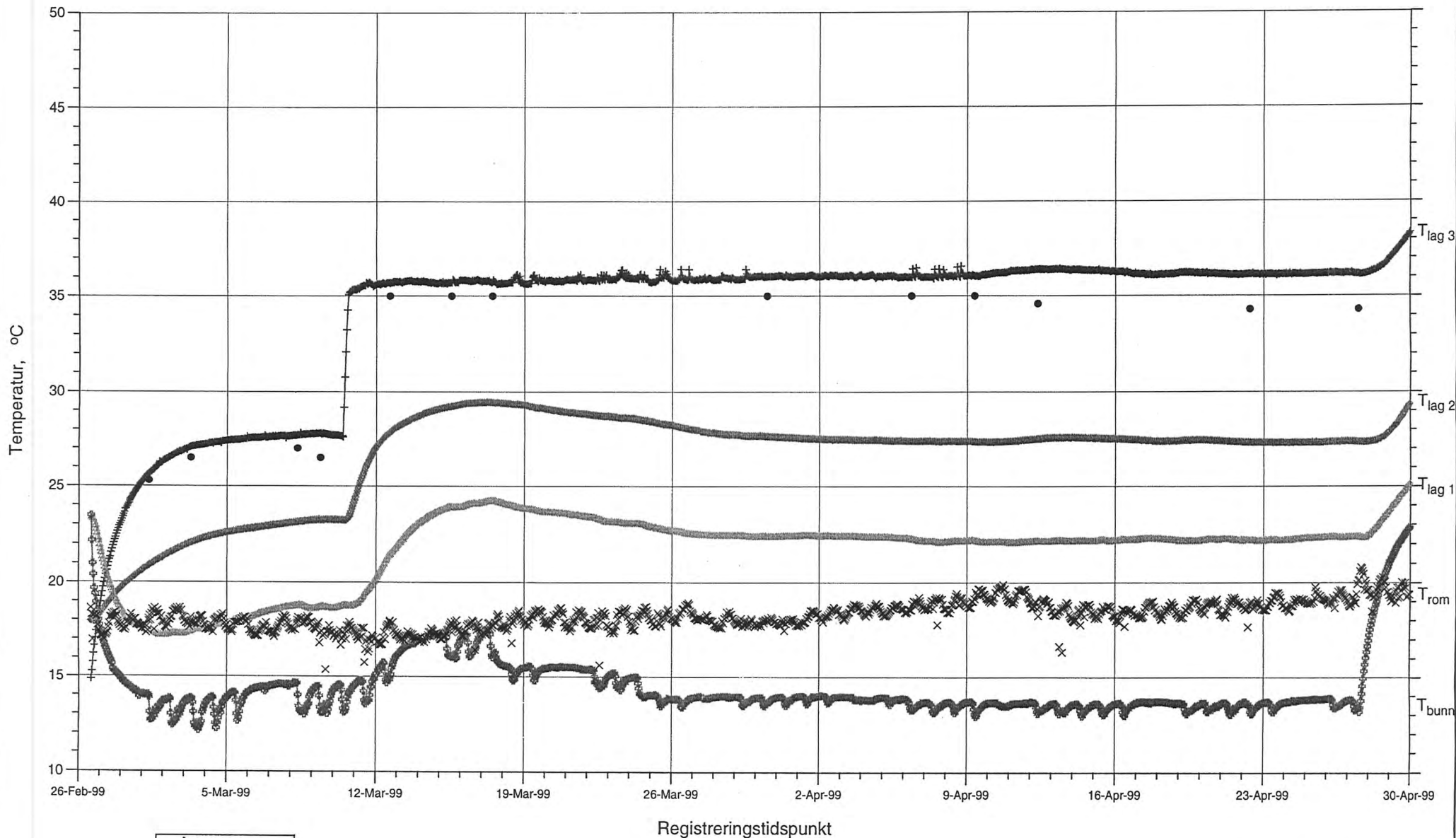



<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER</b>  Forsøk 1, ballastpukk (25 - 63 mm)  Temperaturutvikling	Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 4.2
	Tegner SK	Dato 18.01.99
	Kontrollert [Signature]	
	Godkjent SK	

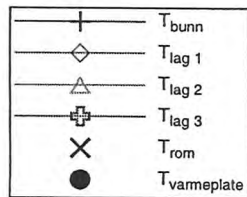
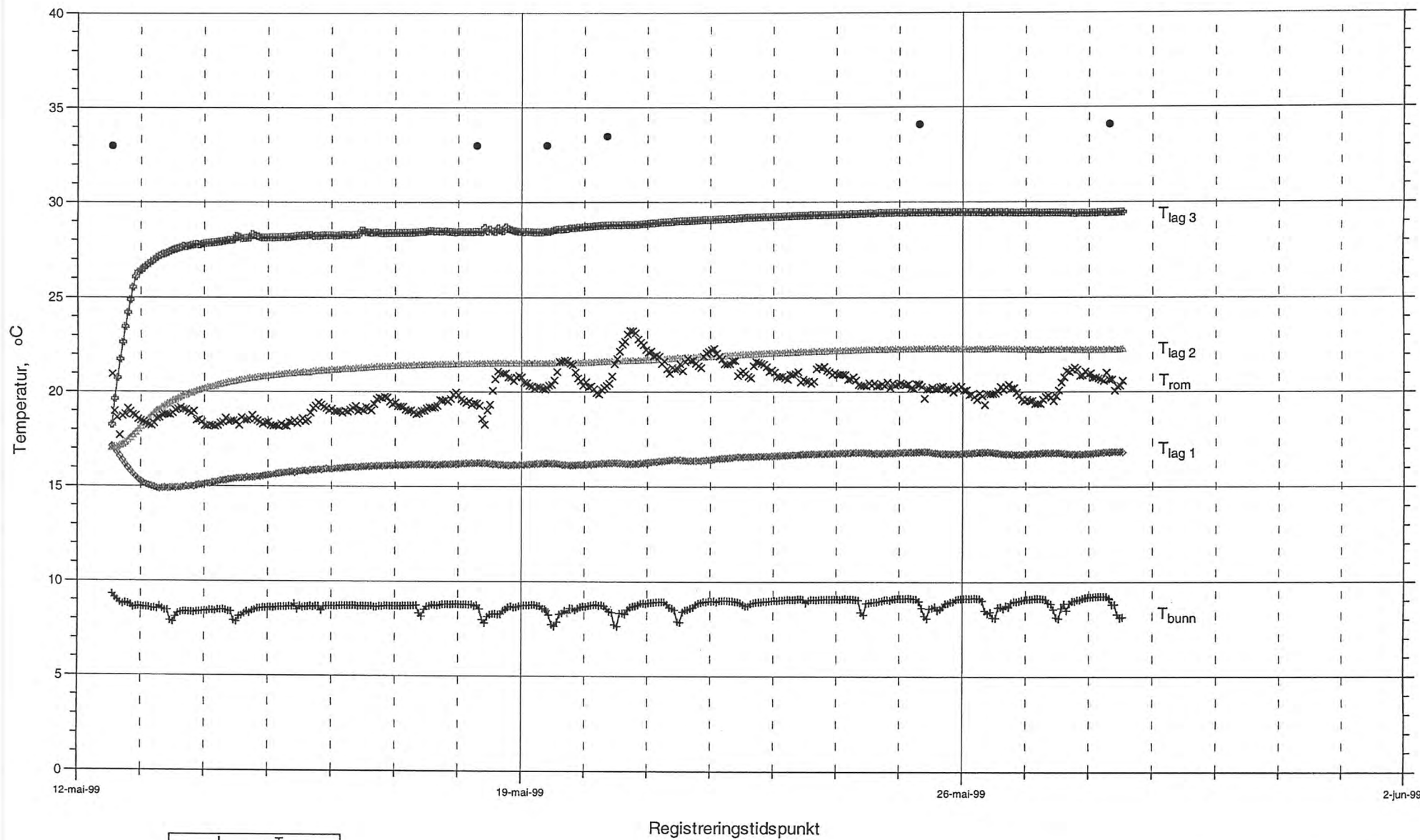


<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER</b>  Forsøk 2, maskinkult (20 - 120 mm)  Temperaturutvikling	Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 4.3
	Tegner SK	Dato 26.02.99
	Kontrollert JA	
	Godkjent SK	

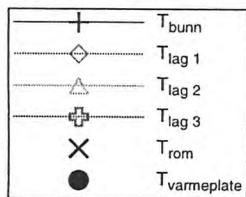
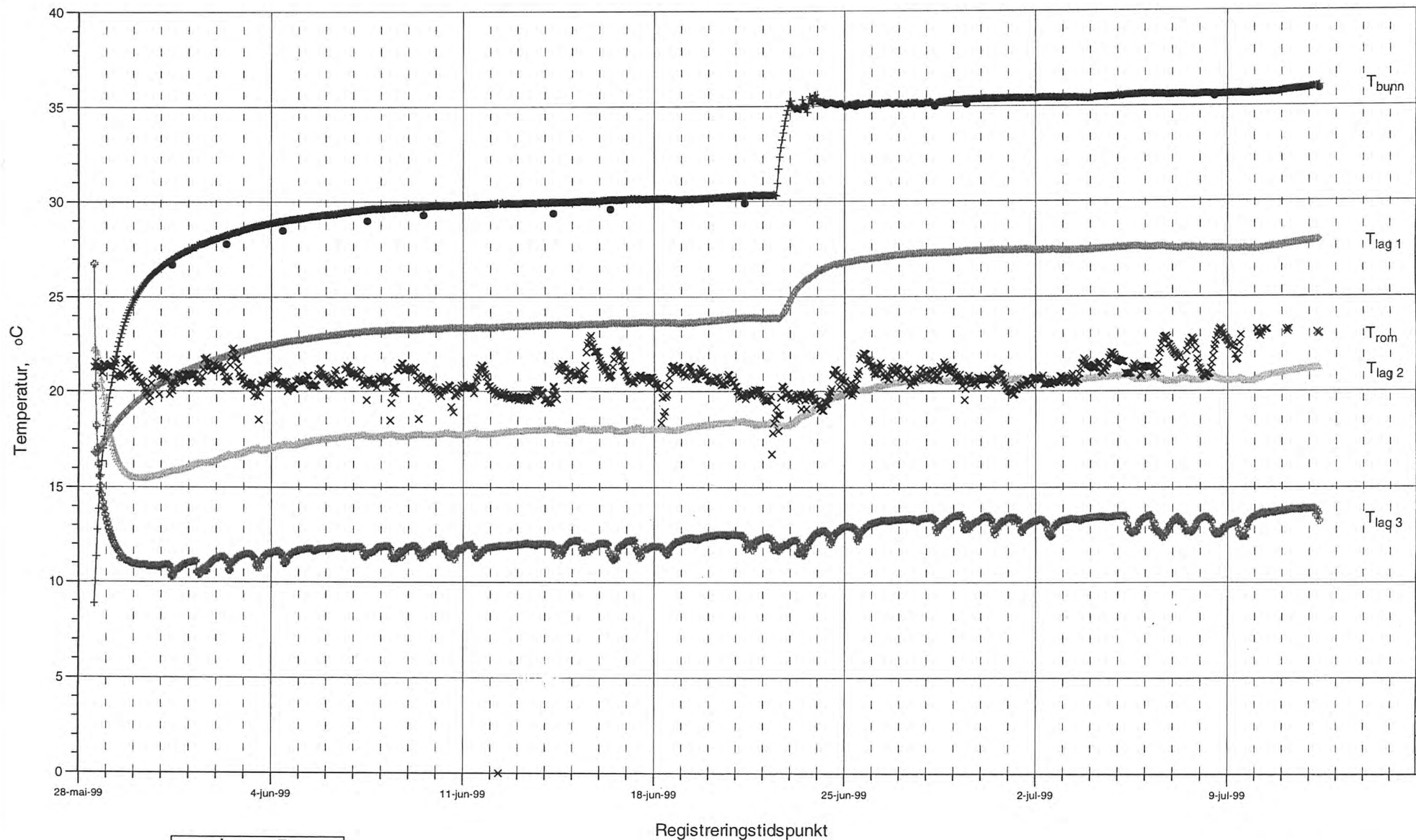




<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER</b>  Forsøk 2, maskinkult (20 - 120 mm)  Temperaturutvikling	Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 4.4
	Tegner SK	Dato 22.04.99
	Kontrollert JK	
	Godkjent SK	



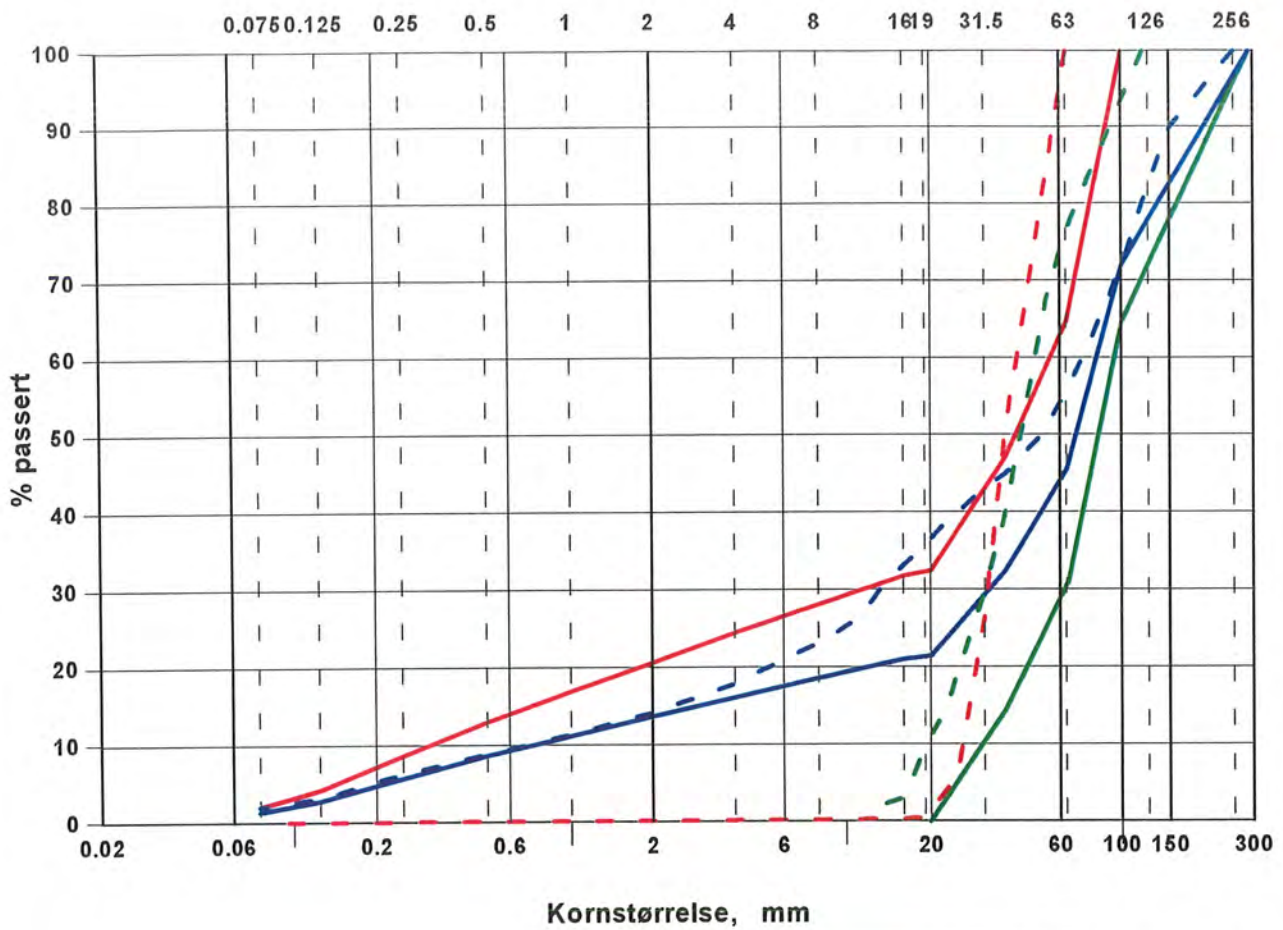
<b>MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER</b>  Forsøk 3, sprengstein (0 - 250 mm)  Temperaturutvikling	Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 4.5
	Tegner SK	Dato 18.05.99
	Kontrollert JK	
	Godkjent OK	



MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER

Forsøk 3, sprengstein (0 - 250 mm)  
 Temperaturutvikling

Rapport nr. 982519-1	Figur nr. 4.6
Tegner SJK	Dato 23.07.99
Kontrollert [Signature]	
Godkjent SK	



<span style="color: red;">—</span>	Forsøk 1A og 3A, 0 - 100 mm
<span style="color: blue;">—</span>	Forsøk 1B og 3B, 0 - 250 mm
<span style="color: green;">—</span>	Forsøk 2A, 20 - 250 mm
<span style="color: red;">- - -</span>	Forsøk 1, 25 - 63 mm
<span style="color: green;">- - -</span>	Forsøk 2, 20 - 120 mm
<span style="color: blue;">- - -</span>	Forsøk 3, 0 - 250 mm

### MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER

Kornfordelingskurver for alle steinfraksjoner der måling av varmeledningstall er utført.

Rapport nr.  
982519 - 1

Figur nr.  
5.1

Tegner  
SK

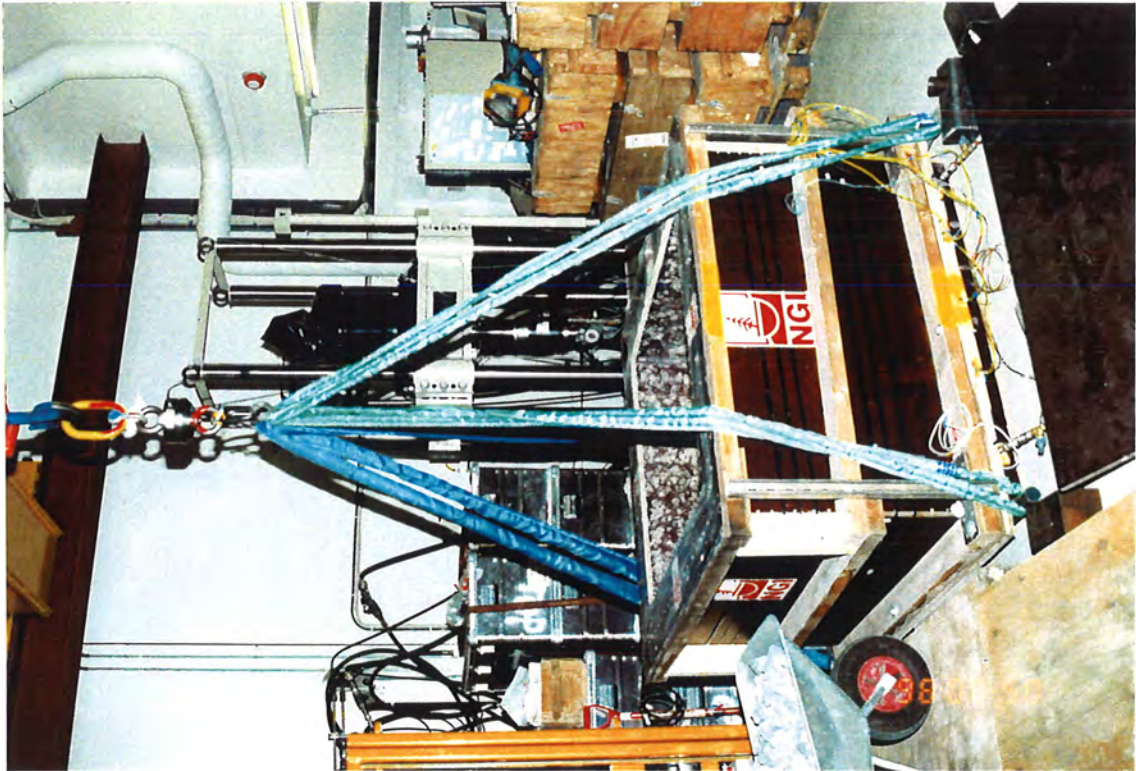
Dato  
17.09.99

Kontrollert  
SK

Godkjent  
SK



A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Plateapparat i forsøkshall ved NGI. Innbygging

- A : Oppsett ved innbygging av forsøk.
- B: Innmåling av prøvehøyden

Rapport nr.  
982519-1

Figur nr.  
Foto 1

Tegner

Dato  
99-09-20

Kontrollert

Godkjent

SK



A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Rapport nr.  
982519-1

Figur nr.  
Foto 2

Plateapparat i forsøkshall ved NGI. Innbygging

Tegner  
—

Dato  
99-09-20

A : Avretting, utlegging av fiberduk og bascarp sand for kontakt mellom topp-plate og prøvemateriale.

B: Apparatet etter avsluttet innbygging.

Kontrollert

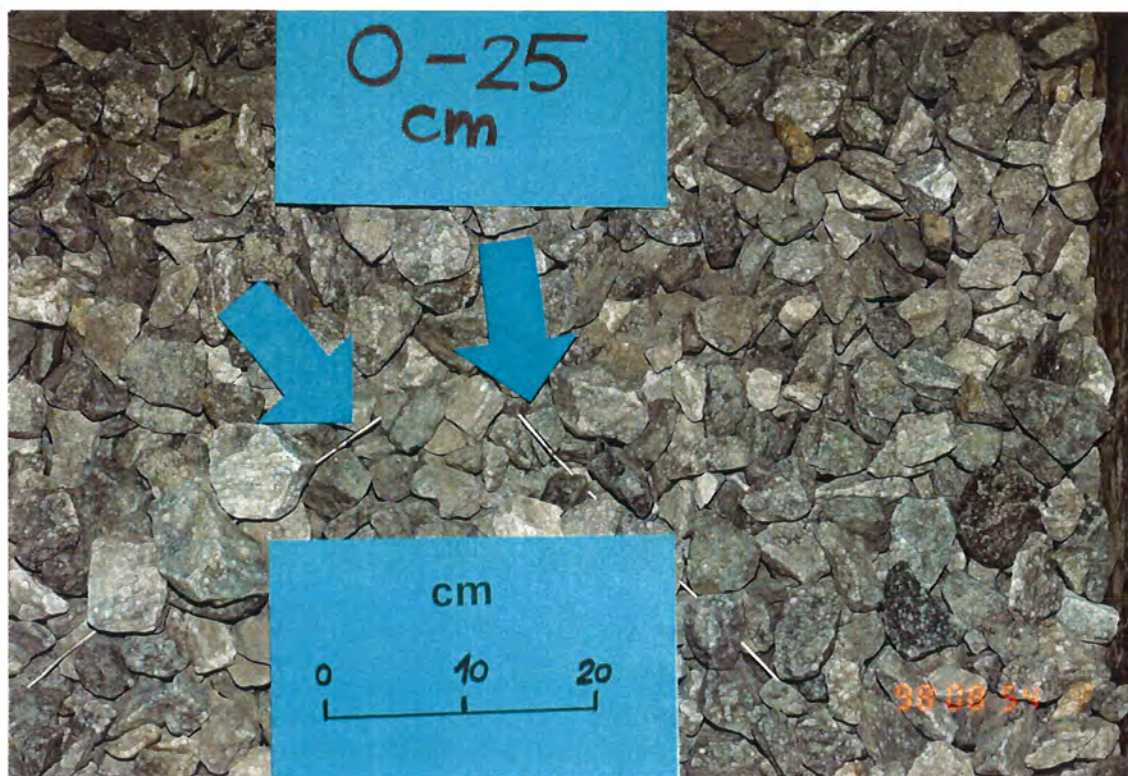
Godkjent  
SJK



A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Plassering av termistorer mellom hvert lag – Forsøk 1 ballastpukk

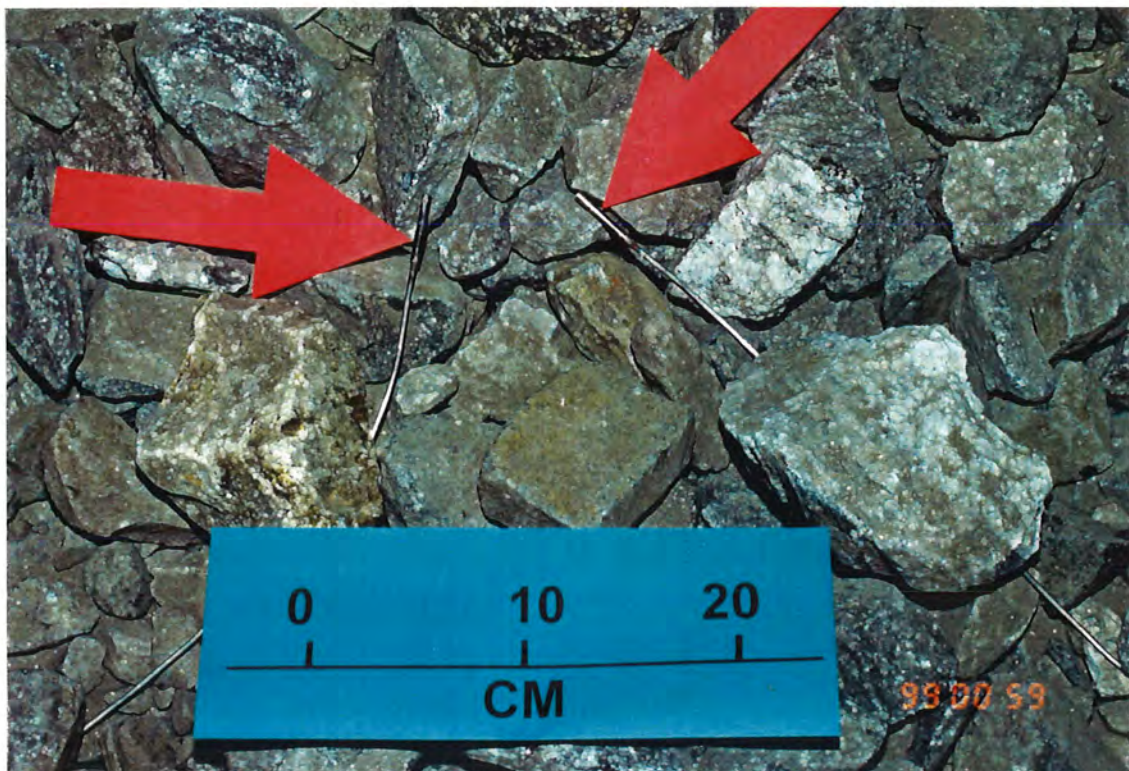
A: Temperaturmålere plassert på toppen av lag 1.  
 B: Nærbilde av A

Rapport nr. 982519-1	Figur nr. Foto 3
Tegner —	Dato 99-09-20
Kontrollert	
Godkjent SK	

A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Plassering av termistorer mellom hvert lag – Forsøk 2 maskinkult

A: Temperaturmålere plassert på toppen av lag 2.  
 B: Nærbilde av A

Rapport nr.  
982519-1

Figur nr.  
Foto 4

Tegner  
—

Dato  
99-09-20

Kontrollert

Godkjent  
SK





A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Rapport nr.  
982519-1

Figur nr.  
Foto 5

Bilder fra forsøk 3, sprengstein, fraksjon 0 – 250 mm

Tegner  
—

Dato  
99-09-20

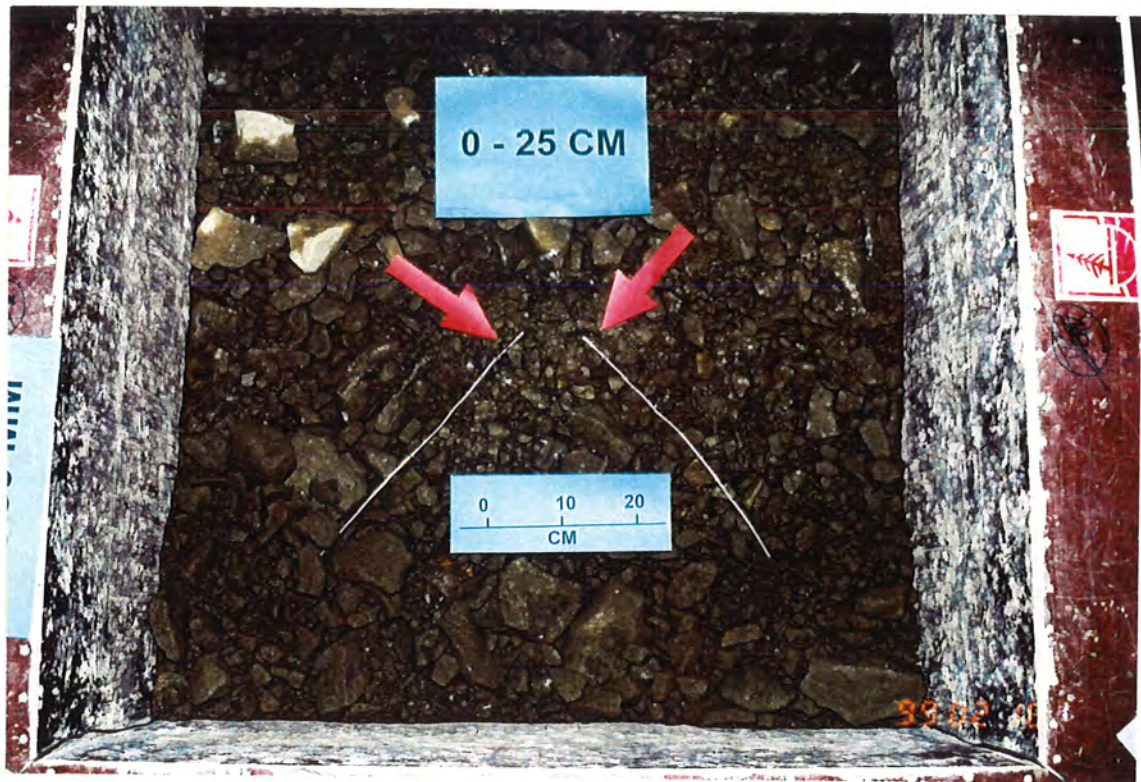
Kontrollert

- A: Stein til forsøk 3 spadd sammen uten store stein (> ca.100 mm).
- B: Store stein fordelt jevnt utover massen => fraksjon 0 – 250 mm.

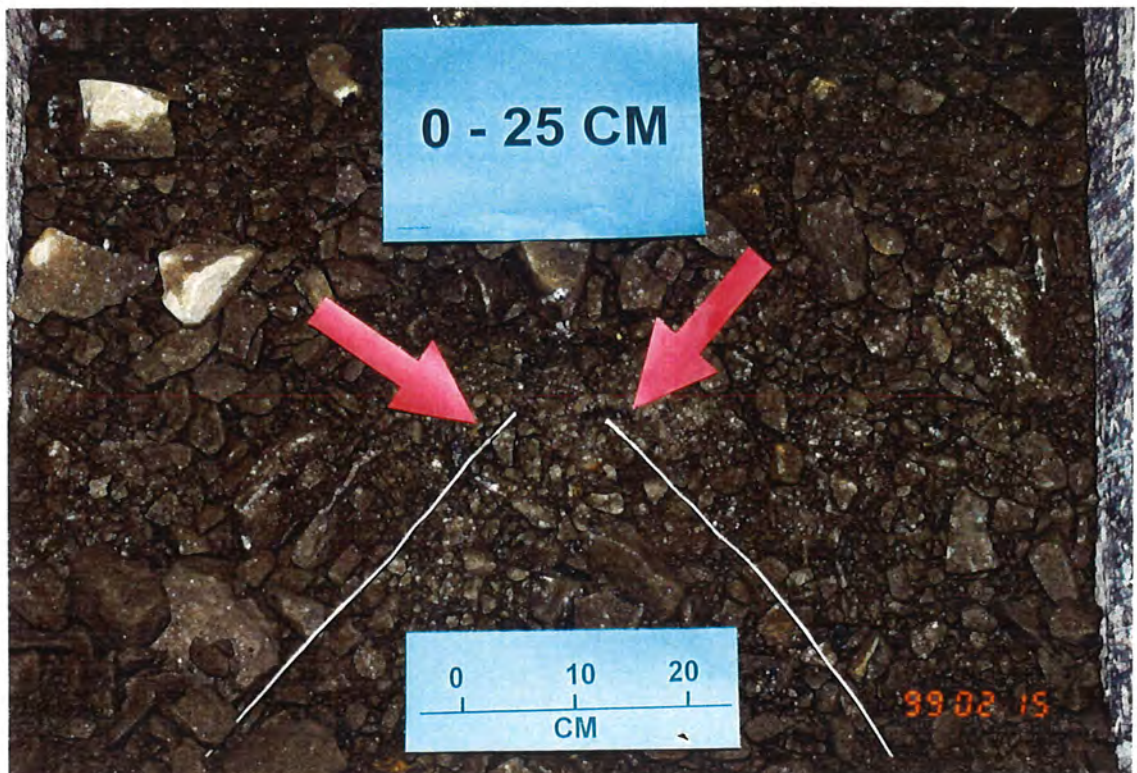
Godkjent  
SK



A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Rapport nr.  
982519-1

Figur nr.  
Foto 6

Plassering av termistorer mellom hvert lag – Forsøk 3 sprengstein

Tegner

Dato  
99-09-20

Kontrollert

- A: Termistormålere plassert på toppen av lag 1.
- B: Nærbilde av A

Godkjent

SK



A.



B.



**MÅLING AV VARMETAP I ULIKE STEINFYLLINGSFRAKSJONER**

Utbygging, veggene i kassen er løftet opp og massen spres utover.

- A: Utbygging av forsøk 1, ballastpukk (25 – 63 mm)
- B: Utbygging av forsøk 3, sprengstein (0 – 250 mm)

Rapport nr.  
982519-1

Figur nr.  
Foto 7

Tegner

Dato  
99-09-20

Kontrollert

Godkjent

SK



# Kontroll- og referanseside/ Review and reference page

<b>Oppdragsgiver/Client</b> Jernbaneverket Hovedkontoret, Teknisk Avdeling	<b>Dokument nr/Document No.</b> 982519-1
<b>Kontraksreferanse/ Contract reference</b> Kontrakt undertegnet 26.05.98	<b>Dato/Date</b> 20 september 1999
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Måling av varmetap i ulike steinfyllingsfraksjoner	<b>Distribusjon/Distribution</b> <input type="checkbox"/> Fri/Unlimited <input checked="" type="checkbox"/> Begrenset/Limited <input type="checkbox"/> Ingen/None
<b>Prosjektleder/Project Manager</b> Siren Knudsen <b>Utarbeidet av/Prepared by</b> Siren Knudsen	
<b>Emneord/Keywords</b> Steinfylling, varmeledningstall, konveksjon, sprengstein, maskinkult, ballastpukk, kvartsinnhold	
<b>Land, fylke/Country, County</b> Norge <b>Kommune/Municipality</b>  <b>Sted/Location</b> Steinmateriale fra Feiring Bruk i Akershus <b>Kartblad/Map</b>  <b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>  <b>Felt navn/Field name</b>  <b>Sted/Location</b>  <b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>

Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001							
Kon- trollert av/ Reviewed by	Kontrolltype/ Type of review	Dokument/Document		Revisjon 1/Revision 1		Revisjon 2/Revision 2	
		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed	
		Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.
LA	Helhetsvurdering/ General Evaluation *	20/9-99	JK				
LA	Språk/Style	20/9-99	JK				
LA	Teknisk/Technical - Skjønn/Intelligence - Total/Extensive - Tverrfaglig/ Interdisciplinary	20/9-99	JK				
LA	Utforming/Layout	20/9-99	JK				
SK	Slutt/Final	20/9-99	SK				
JS	Kopiering/Copy quality	23/9-99	JS				
* Gjennomlesning av hele rapporten og skjønnsmessig vurdering av innhold og presentasjonsform/ On the basis of an overall evaluation of the report, its technical content and form of presentation							
Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release		Dato/Date 20/9 - 99		Sign. Siren Knudsen			

### **NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT**

er en privat stiftelse etablert i 1953, NGI er et nasjonalt og internasjonalt senter for forskning og rådgivning innen geofagene. NGI har følgende kompetanseområder:

- \* Fundamenter og undergrunnsanlegg
- \* Marine konstruksjoner
- \* Bergrom og tunneler
- \* Dammer
- \* Sikring mot skred
- \* Miljøvern og miljøgeoteknologi
- \* Reservoarmekanikk og borhullsteknologi
- \* Grunnundersøkelser og laboratorieundersøkelser
- \* Modell- og feltforsøk
- \* Måleteknisk instrumentering og tilstandskontroll

### **NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE**

*is an independent foundation established in 1953. NGI is a national and international center for research and consulting in the geosciences. NGI has the following areas of expertise:*

- \* Foundations and underground structures*
- \* Offshore and nearshore structures*
- \* Rock engineering and tunnelling*
- \* Dam engineering*
- \* Avalanches, landslides and safety measures*
- \* Environmental geotechnical engineering*
- \* Petroleum reservoir mechanics and borehole technology*
- \* Site investigations and laboratory testing*
- \* Model and field testing*
- \* Field instrumentation and performance evaluation*



NORGES  
GEOTEKNISKE  
INSTITUTT

NORWEGIAN  
GEOTECHNICAL  
INSTITUTE

Sognsveien 72 – P.O.Box 3930 Ullevaal Stadion, N-0806 Oslo, Norway  
Telephone: (+47) 22 02 30 00 – Telefax: (+47) 22 23 04 48 – Telex: 19787 ngi n