



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R92:1990**

**Energilagring i lera  
med sanddränering**

**Kent Adolfsson  
Göran Sällfors**

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400135497

**Byggforskningsrådet**

R92:1990

ENERGILAGRING I LERA  
MED SANDDRÄNERING

Kent Adolfsson  
Göran Sällfors

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840256-2  
från Statens råd för byggnadsforskning till CTH,  
Göteborg.

## REFERAT

Värmelagring i lera är i vissa fall ett såväl tekniskt som ekonomiskt gynnsamt alternativ till andra värmelagringssystem. Traditionellt används tunna plaströr som värmeväxlare. Därmed erhålls två mindre gynnsamma effekter, nämligen att temperaturbrotten runt värmeväxlaren blir brant och systemet trögladdat samt att höga portryck uppstår i leran. Genom att använda s k värmedräner, där plaströren löper i en sand/grus drän minskas de ovannämnda negativa effekterna.

Omfattande fält och laboratorieförsök har genomförts för att studera funktionen hos s k värmedräner och dess samverkan med omgivande jord.

I laboratoriet undersöktes bl a dränmaterialets inverkan på konvektion i dränen och hur väl dränen fungerade som korttidslager. Resultaten visar att mycket gynnsamma resultat erhålls om dränmaterialet utgörs av grus.

I fält installerades sju värmedräner med en diameter på 20 cm, i ett hexagonalt mönster. Vid uppvärmningen konstaterades att dränerna, som bestod av grus 4-12 mm, fungerade utmärkt som ett korttidslager. De portryck som genererades var mindre än hälften av de som erhöles i motsvarande värmelager med rörvärmeväxlare. Försöken visar på att värmedräner har flera tekniska egenskaper som gör dem överlägsna konventionella rörvärmeväxlare.

I Byggeforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R92:1990

ISBN 91-540-5268-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**gotab** Stockholm 1990

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD

SAMMANFATTNING

SUMMARY

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

1	BAKGRUND	1.1
2.	SYFTE OCH PROBLEMORIENTERING	2.1
	2.1 Värmeströmning	2.2
	2.2 Portrycksutveckling	2.2
3.	LITTERATURSTUDIUM	3.1
4.	FÖRSÖKSOMRÅDET	4.1
5.	FÄLTFÖRSÖK - INSTALLATIONER	5.1
	5.1 Värmeväxlare	5.1
	5.2 Utrustning för temperaturmätningar	5.2
	5.3 Utrustning för portrycksmätningar	5.2
	5.4 Uppvärmningsanordningar	5.4
6.	FÄLTFÖRSÖK - RESULTAT OCH ANALYS	6.1
	6.1 Värmeströmning	6.1
	6.2 Portrycksutveckling	6.6
7.	LABORATORIEFÖRSÖK- RESULTAT OCH ANALYS	7.1
	7.1 Försöksuppställning	7.2
	7.2 Försöksutförande och utvärdering	7.6
	7.3 Försök med enbart vatten	7.6
	7.4 Försök med mellansand	7.9
	7.5 Försök med fingrus	7.12
	7.6 Felkällor	7.13
8.	DISKUSSION AV RESULTAT FRÅN LABORATORIE- OCH FÄLTFÖRSÖK	8.1
	8.1 Portryck	8.1
	8.2 Värmetransport	8.1
9.	SLUTSATSER	9.1
	REFERENSER	
	APPENDIX	

## FÖRORD

Denna rapport utgör slutredovisning av de fält- och laboratorieförsök som genomförts inom projektet "Värmelagring i lera. Försök med stortytiga värmeväxlare". Anslag har erhållits av Byggforskningsrådet (projekt 840256-2)

Projektet har genomförts vid institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, under perioden 1986 06 01 - 89 06 30.

Ett stort tack riktas till institutionens personal som samvetsgrant deltagit i projektet.

Delar av det experimentella arbetet har utförts, under vår ledning, som examensarbete av Serena Lindström och Margareta Lisjö. Deras bidrag är mycket uppskattat.

Göteborg i mars 1990

Kent Adolfsson

Göran Sällfors

## SAMMANFATTNING

Lagring av värme i lera kan, i vissa fall utgöra ett ekonomiskt lagringsalternativ. En nackdel är emellertid att ett värmelager i lera ofta utgör ett ganska trögt lager, dvs temperaturgradienterna i lagret blir ganska stora, så även temperaturdifferensen mellan brinern och lagermedeltemperaturen. Ett sätt att förbättra värmelagrets egenskaper är att använda s k värmedränar som värmeväxlare, se fig. 1. Därmed erhålls även ett korttidslager, värmedränen, som kan fungera som buffert vid tillfälliga kraftiga såväl uttag som laddningar.

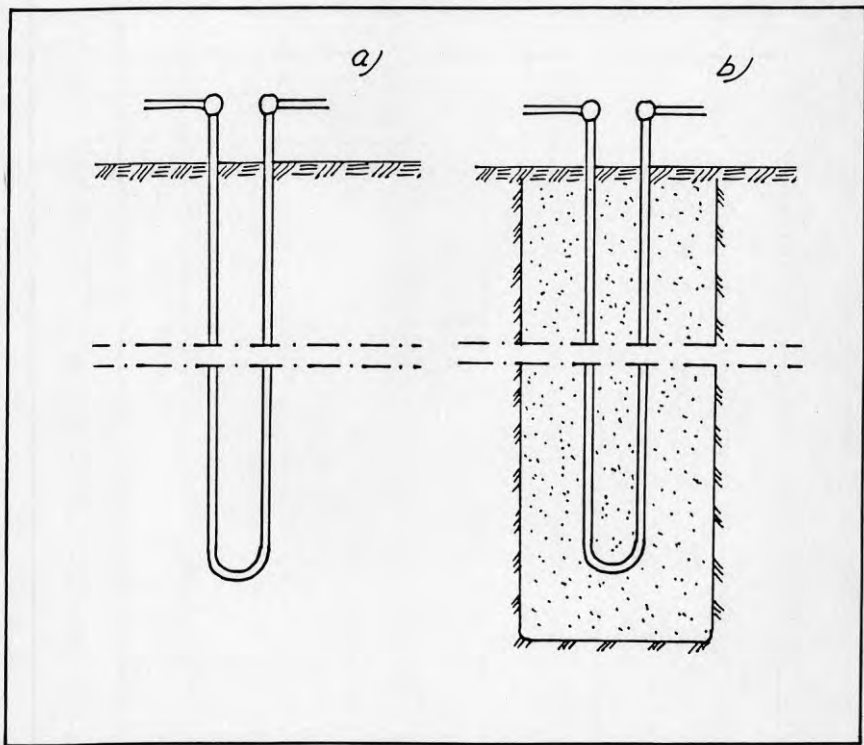


Fig. 1 a Exempel på U-rörsformad värmeväxlare.  
b Utformning av värmedrän.

Värmedränen kan ävenledes bidra till att begränsa de porövertryck som uppkommer till följd av att leran värms upp.

Projektet som beskrivs i denna rapport omfattar dels en laboratoriestudie, dels ett fullskaleförsök med sju värmedrärer.

I laboratoriestudien studerades hur kornstorleksfördelningen i dränen påverkade temperatutfördelningen i dränen vid uppvärmning. Tre olika material provades. Av fig. 2 framgår att med finsand i dränen blir temperatutfördelningen i stort sett indentisk med vad som erhålls för en fast kropp med samma värmetekniska egenskaper. Någon konvektion förekommer således nästan inte alls.

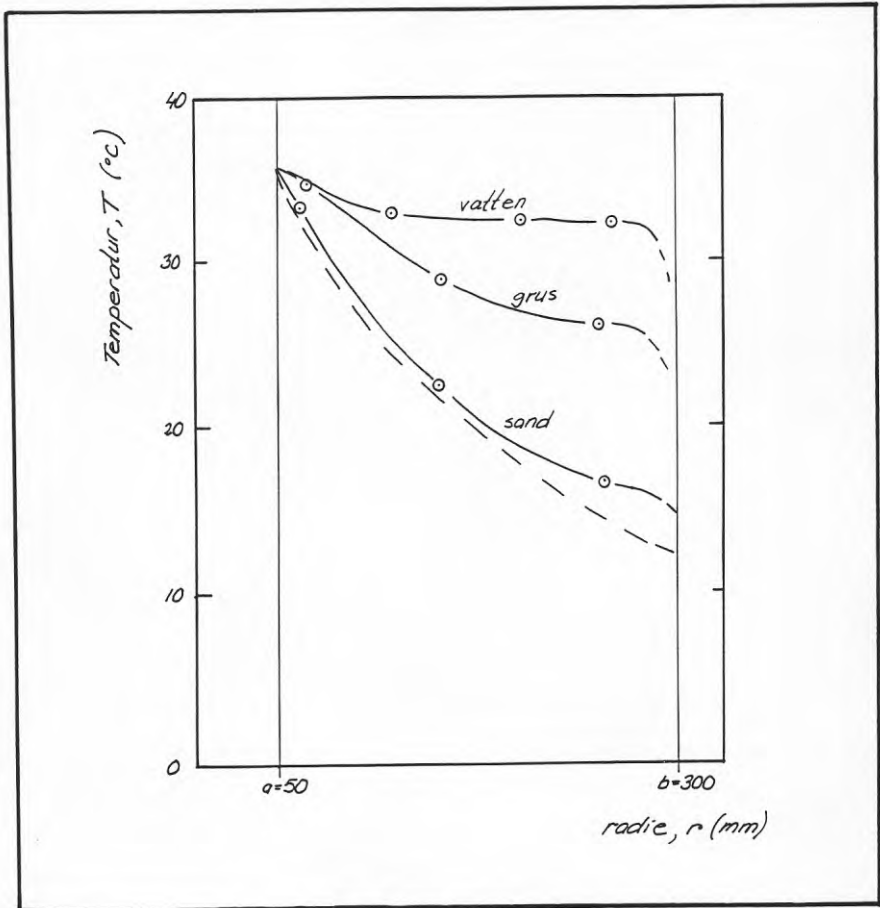


Fig. 2 Temperaturfördelning i värmväxlare fylld med vatten, grus och sand.



För det fingrus som användes erhöles en påtaglig konvektion och analysen av fältförsöken, där grus, (4-12 mm) användes, antyder att i det närmaste total konvektion erhöles. Det innebär en temperaturfördelning jämförbar med den då dränen innehöll enbart vatten, se fig. 2.

Vid fältförsöken mättes temperatur och portryck i ett antal punkter. Dessa mätningarna visade att portrycken endast blev 30-40% av vad som erhöles vid ett jämförbart försök med konventionella värmväxlare, se fig. 3. Därmed skulle de sättningar som kan förväntas till följd av att ett värmelager förläggs i lera, inträffa under betydligt kortare tidsrymd, kanske några få uppvärmningscykler. Området ovan lagret skulle därför inte behöva något underhåll därefter.

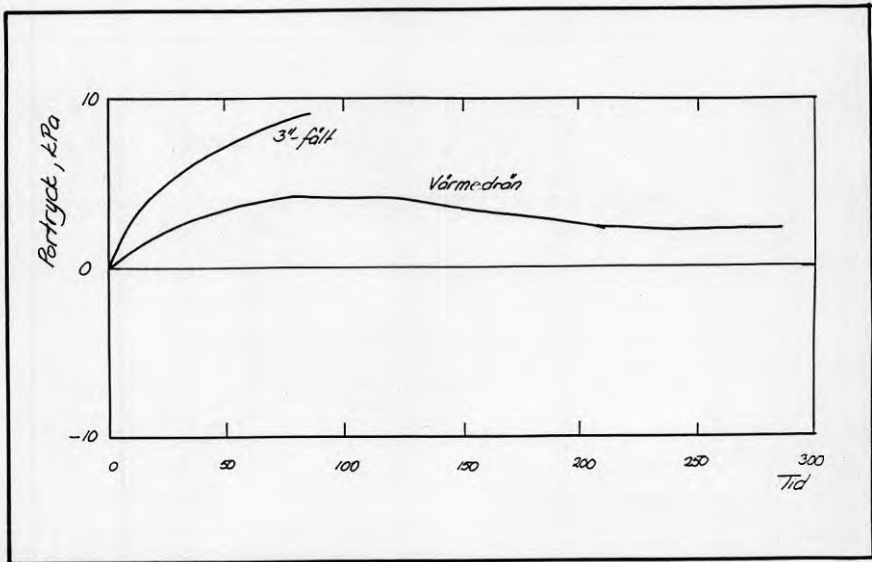


Fig. 3 Normaliserad portrycksutveckling i lera med värmväxlare av rör respektive värmedrän.

## SUMMARY

Storage of heat in clay layers is in many cases feasible and economical. A drawback with a heat storage facility in clay is that it is slow, e.g. the temperature gradients quickly become large, and thereby also the difference in temperature between the brine and the average clay temperature.

The thermal properties of the storage can be greatly improved by the use of so called "heat drains", see Figure 1. Thereby a short term storage is obtained, the drain itself acts as a heatbuffer during peaks of loading as well as unloading. The heat drain can also reduce the pore pressures which usually develop due to the increase in temperature of the clay.

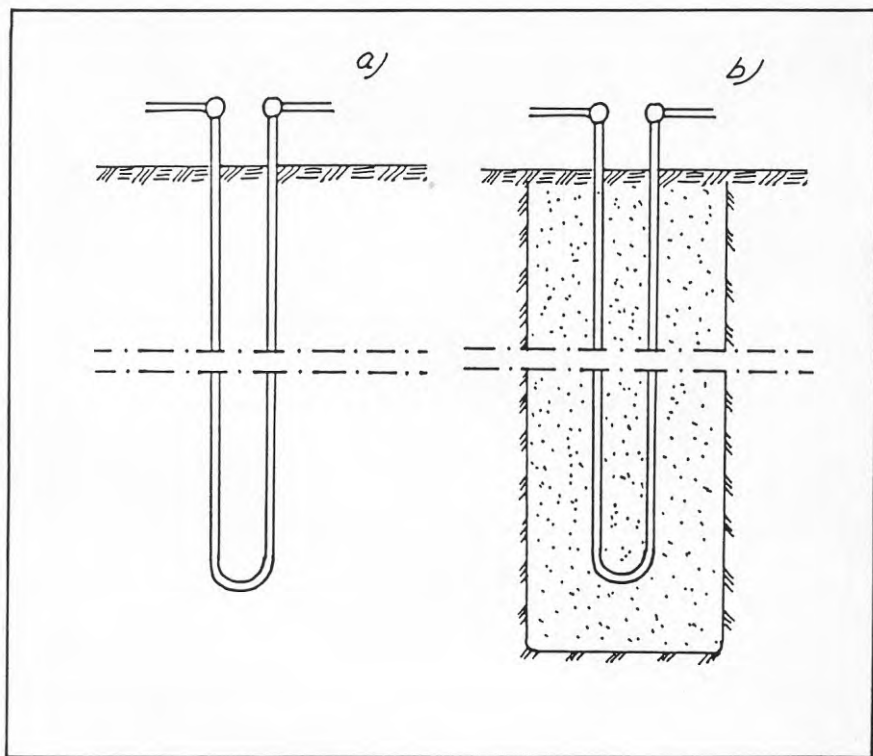


Fig. 1 a Example of a u-shaped heat exchanger.  
b Design of the heat-drain.

The project described in this report including a laboratory study as well as full scale tests with seven heat drains in the field.

In the laboratory the effect of the grain size distribution on the distribution of temperatures within the drain was investigated. Three different grain size distributions were tested all together. Figure 2 shows that when the drain consists of fine sand, the distribution of temperatures is almost identical to that which would have been obtained for a solid material with corresponding thermal properties. Obviously almost no convection takes place at all.

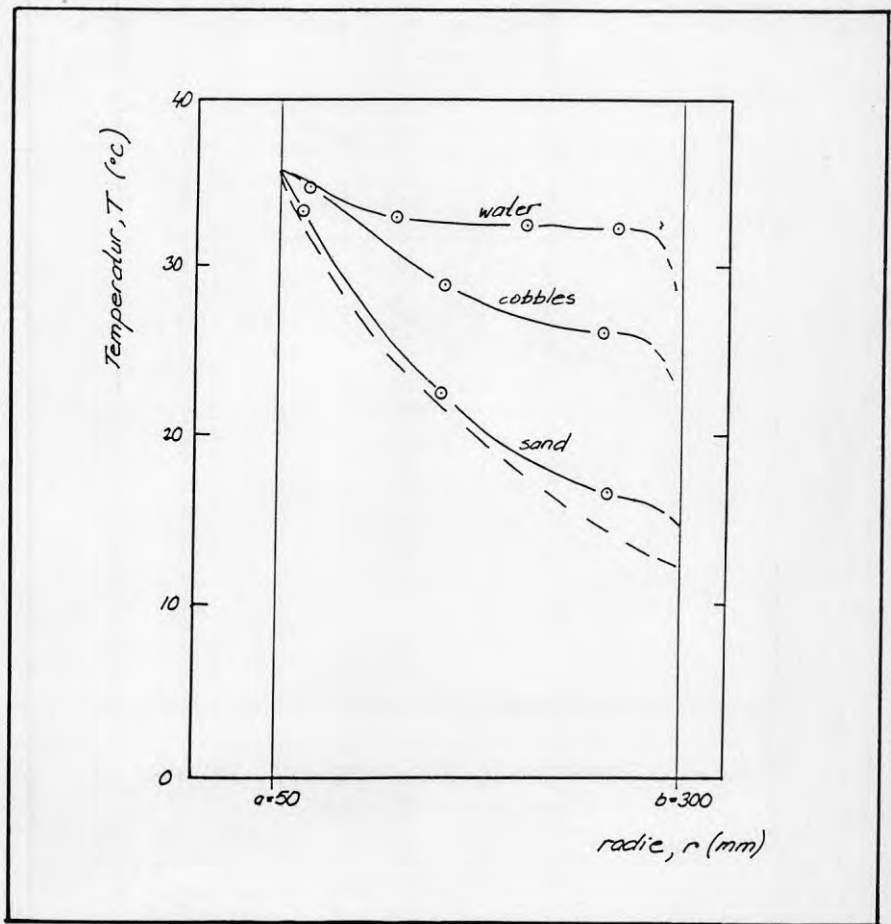


Fig. 2 Normalised temperature distribution for heat-exchanger filled with water, cobbles and sand respectively.

In another test fine cobbles were used and substantial convection was obtained. The analysis of the field tests, where a courser material (4-12 mm) was used indicated an almost total convection. The situation then corresponds to that obtained when no sand was present in the drain, see Figure 2.

During field tests temperatures and pore pressures were measured at a number of points. The measurements showed that the pore pressures were only 30-40% of those obtained in a similar test where conventional heat exchanges were used, see Figure 3. Thereby the settlements due to the heating of the clay could be expected to develop during a much shorter period of time, than for conventional exchangers.

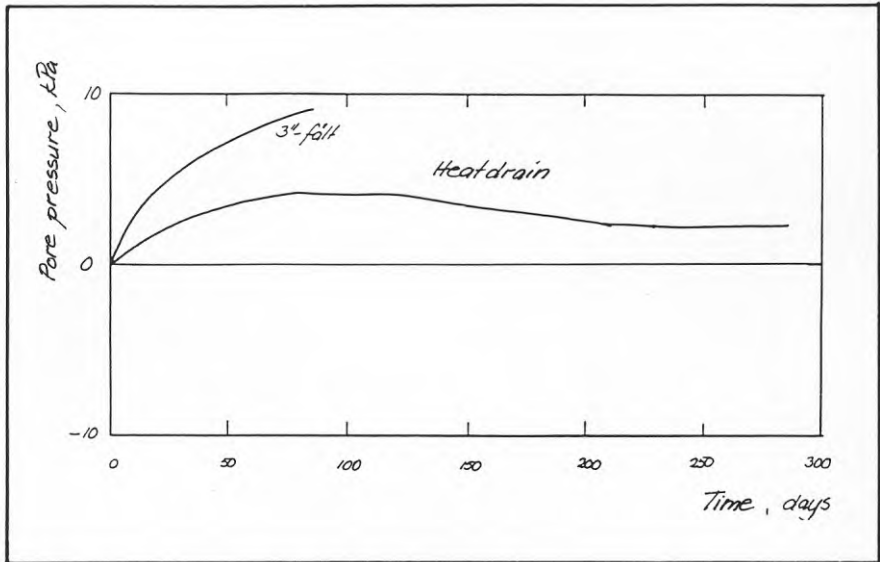


Fig. 3 Normalized pore pressures in clay with tube-shaped heatexhanger and heatdrain.

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

a	inre radie
b	yttre radie
c	värmekapacitivitet
k	värmeledningstal
$k_t$	värmetransport
$m_g$	värmemotstånd i mark
P	effekt/meter
q	flöde
Q	effekt
$Q_g$	genererad värme
q	effekt
r	radie
T(r)	temperatur vid radien r
$\Delta T$	temperaturskillnad
T	temperatur
$T_1$	randtemperatur
$T_2$	randtemperatur
$T_D$	drivtemperatur
t	tid
x	rumskoordinat
y	rumskoordinat
z	rumskoordinat
$\kappa$	$\frac{k}{\rho \cdot c}$
$\rho$	densitet



## 1. BAKGRUND

Ständigt ökande energikostnader samt en förändrad attityd till miljöfrågor har medfört att alternativ till förnyelsebara energikällor åter blivit av stort intresse. Flertalet av dessa energikällor, kräver dock för ett rationellt utnyttjande, möjlighet till lagring. Detta främst för att överbrygga tiden mellan produktion, tillgänglighet och konsumtion.

I en tidigare rapport (Adolfsson och Sällfors, 1987) har långtidslagring, s.k. säsongslagring, i lera behandlats. Där används enkla rörformiga värmeväxlare som installerats direkt i leran ner till stora djup, 10-30 m. Systemet fungerar i och för sig väl men är ganska trögt, stora temperaturdifferenser mellan värmebärande medie och lera erfordras för att en godtagbar effekt skall erhållas.

En annan nackdel är att de portryck som genererades i leran till följd av uppvärmningen blev tämligen höga och tog lång tid att utjämnas, med åtföljande fördröjning av tillhörande sättningar, se fig. 1.1a. Det vore önskvärt med ett system som kräver lägre drivtemperatur och som dessutom möjliggör att merparten av de väntade sättningarna uppträder redan under de första uppvärmningscyklerna, fig. 1.1b.

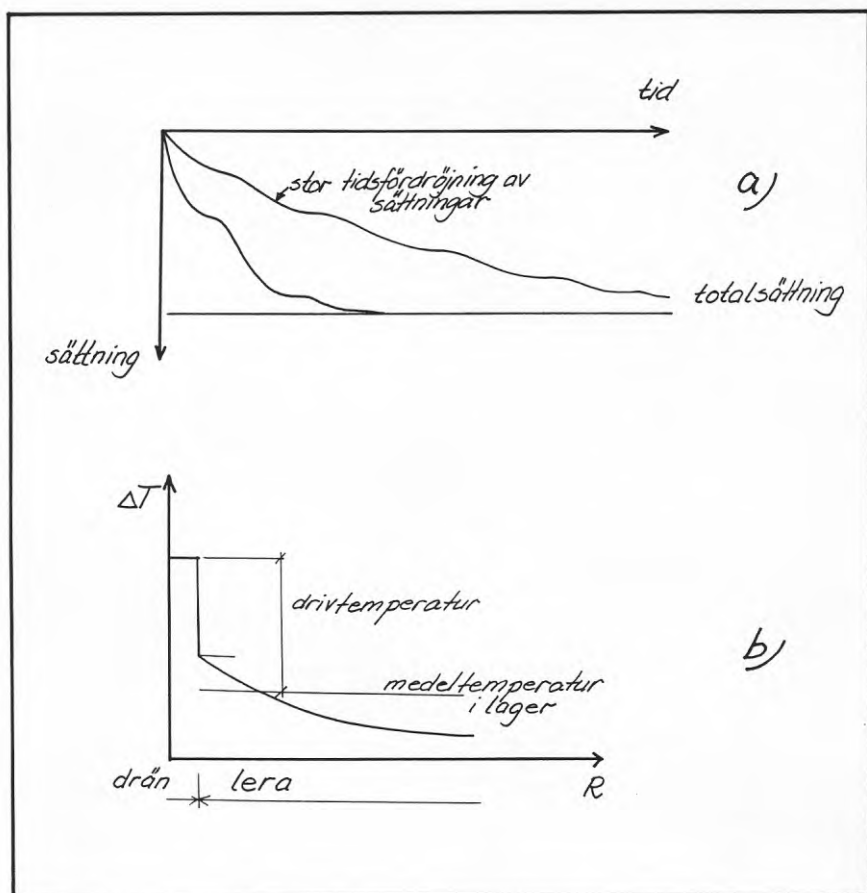


Fig. 1.1a Exempel på tidsfördröjning av sättningar.

b Temperaturfördelning i värmväxlare och lera

a Typical time delay of settlements.

b Distribution of temperatures in heat exchanger and clay.



## 2. SYFTE OCH PROBLEMIORIENTERING

Redan i den tidigare studien (Adolfsson och Sällfors, 1987) provades en enstaka s.k. värmedrän, se fig. 2.1b. Värmedrären består av en u-rörsformad värmeväxlare som är monterad i en s k sanddrän. Sanddränen kan ha en diameter allt ifrån ca 20 cm upp till någon meter. Materialet i sanddränen utgörs av sand eller grus som är vattenmättat. Denna studie avser att närmare utreda de fördelar och eventuella nackdelar som den storytiga värmedrären har jämfört med konventionella U-formade rörvärmeväxlare, fig. 2.1a.

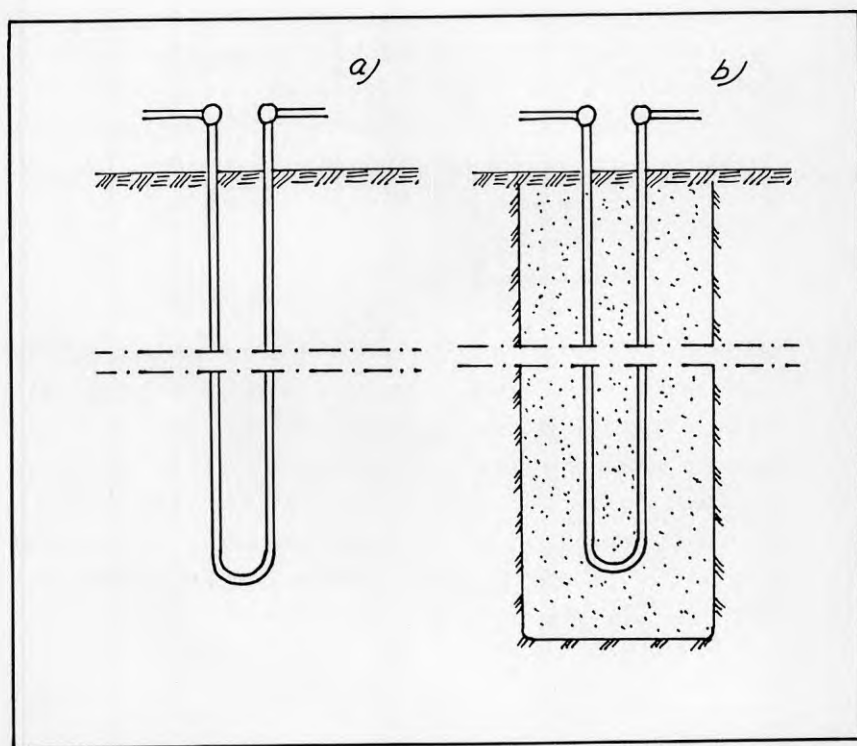


Fig. 2.1a Exempel på U-rörsformad värmeväxlare.

b Utformning av värmedrän.

a Example of a u-shaped heat exchanger.

b Design of the heat-drain.

### 2.1. Värmeströmning

Det är önskvärt att värmedränen utformas så att sand/grus/vattenpelaren, som utgör själva dränen, fungerar som ett korttidslager. Det innebär att temperaturen i värmedränen skall kunna höjas kraftigt på ganska kort tid. Därmed kan en visserligen begränsad energimängd lagras utan att den långsammare delen av lagret, leran, engageras. På motsvarande sätt skall en viss energimängd på kort tid kunna tas ut ur lagret.

Sand/grusfraktionen måste således vara så grov att värmespridningen sker i huvudsak genom konvektion. I stort sett hela värmedränens värmekapacitet kan då utnyttjas som korttidslager, samtidigt som mantelarean mot leran ökar markant och därmed gör lerlagret mer "lättladdat". Syftet med detta forskningsprojekt är att fastställa den minsta kornstorlek som ger tillräcklig grad av konvektion, samt att allmänt utreda de termiska förhållandena runt värmedränen.

### 2.2 Portrycksutveckling

Då lerans temperatur höjs påverkas lerans geotekniska egenskaper, samtidigt som ett porövertryck uppstår till följd av främst vattnets termiska utvidgning. Då uppvärmningen sker med vanliga rörvärmeväxlare tar portrycksutjämnningen och därmed tillhörande sättningar ganska lång tid. Runt den värmedrän som provades som en pilotanläggning uppkom i stort sett inte några portryck överhuvudtaget. I det sistnämnda fallet användes en enstaka värmedrän. I detta projekt studeras portrycksutvecklingen vid värmedränar i grupp.

### 3. LITTERATURSTUDIUM

En omfattande genomgång av litteraturen inom ämnesområdet gjordes inom ramen för ett tidigare forskningsprojekt. En redovisning av de problemställningar som är av intresse för just detta projekt återfinns i BFRs rapport R23:1987.

En ny genomgång av litteraturen med avseende på de problemställningar som angivits i kapitel 2, gav vid handen att några väsentliga nya rön inte gjorts. Läsaren hänvisas därför till litteraturstudiet i ovan nämnda rapport.

Den matematiska analysen av värmeströmningen i och omkring värmedröner baseras på resultat och förenklingar som föreslagits av Claesson (1985).

Den ekvation som används vid beräkning av värmeströmning kan allmänt skrivas som

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_g \quad (2.1)$$

- där  $\rho$  = densitet,  $\text{kg/m}^3$   
 $c$  = värmekapacitivet,  $\text{J/kg, } ^\circ\text{C}$   
 $k$  = värmeledningstal  
 $T$  = temperatur,  $^\circ\text{C}$   
 $t$  = tid, s  
 $x, y, z$  = koordinater  
 $Q_g$  = genererad värme

I detta fall genereras ingen värme inne i sanden varför  $Q_g = 0$ . Västra ledet anger förändringen av temperaturen med tiden, alltså transient värmeströmning. Den analys som görs i denna rapport behandlar enbart stationär värmeströmning, varför vänstra ledet kan sättas lika med noll.

Vidare kan man anta att värmeströmningen i vertikalled är försumbar. Därmed är problemet reducerat till 2-dimensionellt. Slutligen, om polära koordinater införs och  $k/\rho \cdot c$  ersätts med  $\kappa$  samt att  $k$  och  $c$  är oberoende av  $x$  och  $y$  får ekv (2.1) följande utseende

$$\kappa \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = 0 \quad (2.2)$$

I den modell som används förutsätts att värme transporteras från en inre rand med temperaturen  $T_1$ , se fig. 3.1.

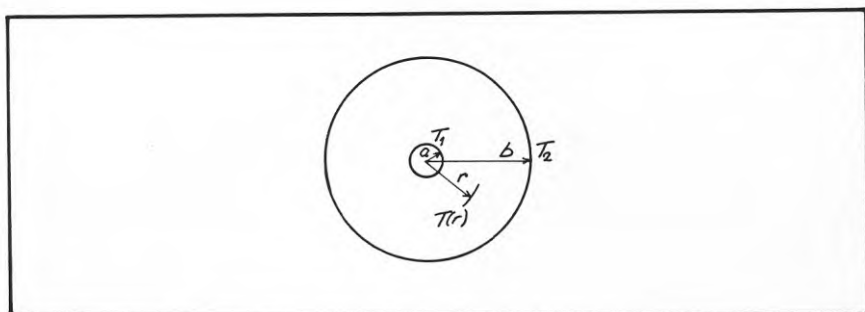


Fig. 3.1 Randvillkor för den teoretiska analysen.

*Boundary conditions assumed for the theoretical analysis.*

Med användande av ovanstående randvillkor erhålls följande lösning av ekv 2.2.

$$T(r) = \frac{T_1 \ln(b/r) + T_2 \ln(r/a)}{\ln(b/a)} \quad (2.3)$$

där  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $a$ ,  $b$  och  $r$  definierats i fig. 3.1.

Därmed kan temperaturfördelningen i en cylinder vid stationär värme-strömning utan konvektion beräknas.

Om  $T_1$  och  $T_2$  antages till 7 respektive  $34^\circ$  och radierna  $a$  och  $b$  sätts till 50 och 300 mm erhålls den temperaturfördelning som visas i fig. 3.2.

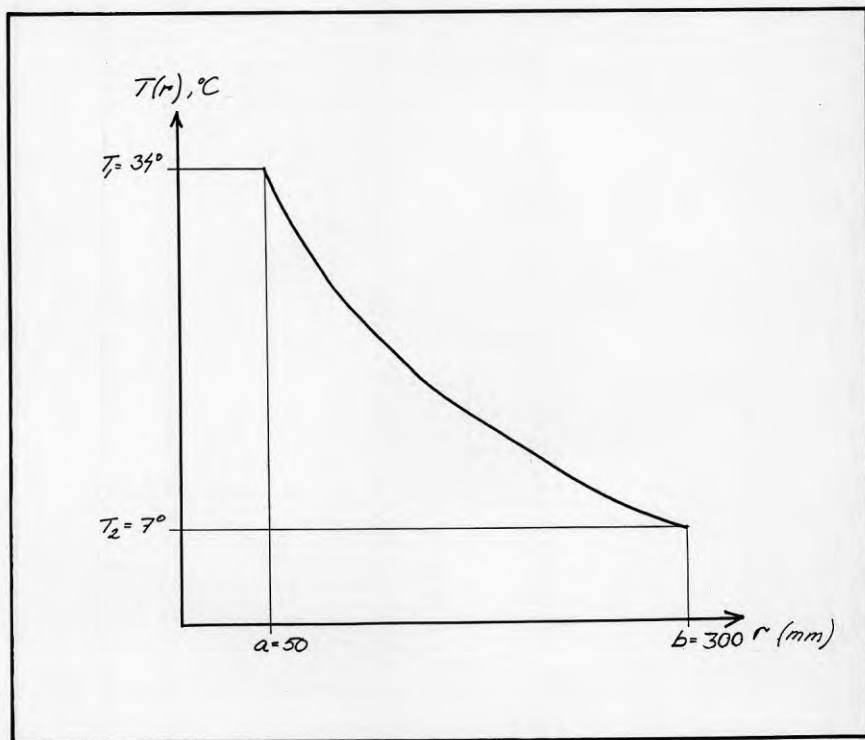


Fig. 3.2 Temperaturfördelning i värmedrären.

*Distribution of temperature in the heatdrain.*

Det vatten som cirkulerar i det inre röret avger en viss värmemängd per tidsenhet. Denna effektavgivning kan beräknas om skillnaden i temperatur mellan ingående och utgående vatten är känd.

där  $\Delta T$  = temperaturskillnad mellan ingående och utgående vatten, °C

$q$  = flöde, m<sup>3</sup>/s

$\rho$  = vattens densitet, kg/m<sup>3</sup>

$c$  = värmekapacitivet, J/kg, °C

$Q$  = avgiven effekt, w

$L$  = inre rörets längd, m

Men den avgivna effekten  $Q$ , vid stationär strömning kan även beräknas utifrån de kända randtemperaturerna  $T_1$  och  $T_2$  (Claesson, 1985) som

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_t (T_1 - T_2)}{\ln(b/a)} \quad (2.5)$$

där  $Q$  = avgiven effekt, W

$k_t$  = värmetransport, W/m °C (inkluderar såväl konduktiv som konvektiv värmetransport)

$T_1, T_2, a, b$  definieras i fig 3.1

Genom att kombinera ekvation (2.4) och (2.5) erhålls

$$k_t = q \cdot L \frac{\rho \cdot c}{2\pi} \cdot \frac{\Delta T}{(T_1 - T_2)} \cdot \ln(b/a) \quad (2.6)$$

Den så beräknade värmetransportförmågan ( $k_t$ ) kan sedan jämföras med värmekonduktiviteten ( $k$ ). Skillnaden ( $k_t - k$ ) är ett mått på den andel av värmetransporten som sker pga konvektion i dränen.

Fältförsöket genomfördes inom samma område som användes för de i rapport R23:1987 beskrivna försöken.

Området är beläget inom stadsdelen Öster i Kungälv. Försöksplatsen är belägen på Göta Älvs västra strand. Området lutar svagt ned mot älven och är beläget ca 1,4 m över älvens normala vattenstånd.

Marken består av äng som normalt utnyttjas för höskörd. Enligt uppgift invallades området och fylldes upp med muddermassor från älven på 1920-talet. Detta bestyrks av att det på ca 2 m djup förekommer ett skikt med i huvudsak organiskt material, sannolikt utgörande den tidigare älvbotten.

Jorden består i huvudsak av lera med en vattenkvot som varierar mellan 70 och 110% med den högsta vattenkvoten i den övre något organiska jorden. Densiteten varierar mellan 1,45 och 1,55 ton/m<sup>3</sup>. Skjuvhållfastheten ökar något med djupet från 10-12 kPa i markytan till ca 21 kPa på 19 m djup. Någon utpräglad torrskorpebildning förekommer inte. Den höga vattenkvoten leder till att lerans värmekapacitet är hög (ca 3,6 MJ/m<sup>3</sup> K).

Portrycksprofilen visar i ostörd lera på ett med djupet tilltagande porövertryck, vilket även verifieras av den artesiska brunn som monterats inom området och i stort försett anläggningen med vatten. Vattnet från brunnen har haft en stark gaslukt vilket tyder på riklig förekomst av jordgas i undergrunden.

Leran i området är svagt överkonsoliderad. En sammanställning av de geotekniska egenskaperna återfinns i fig. 4.1.

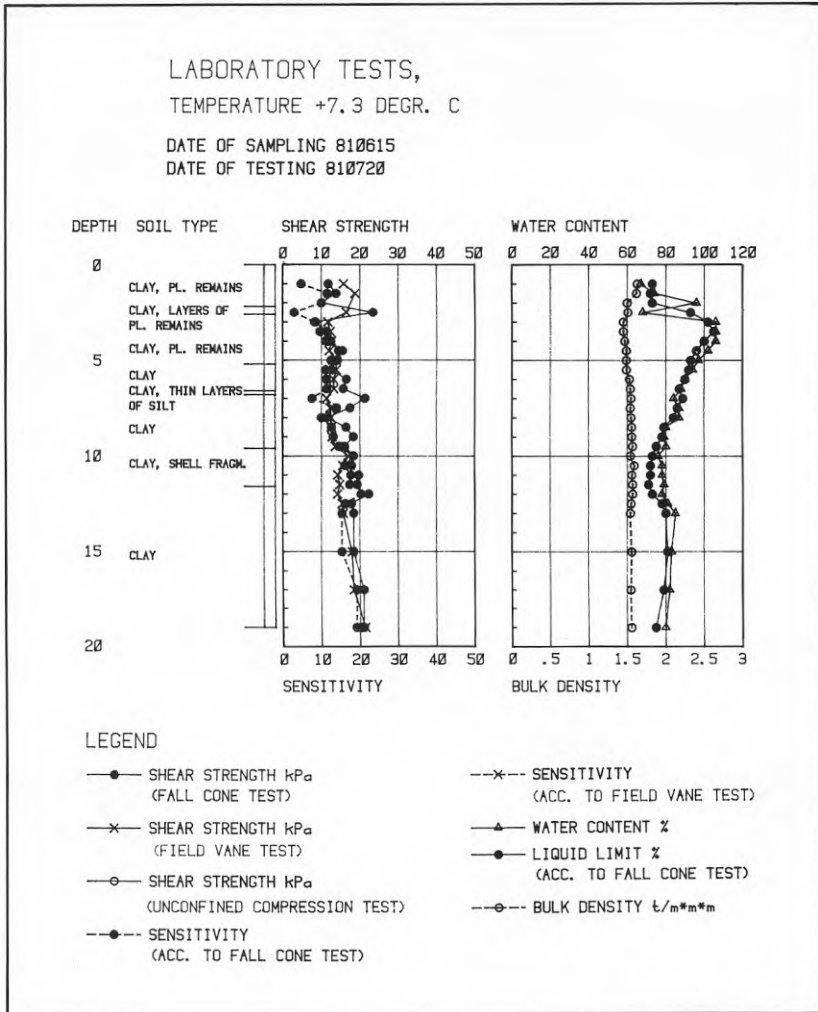


Fig. 4.1 Vattenkvot, skjvnhållfasthet och densitet för leran i försöksområdet.

Water content, shear strength and densities for the clay at the test site.



## 5 FÄLTFÖRSÖK - INSTALLATIONER

Inom det tidigare använda området monterades ett värmelager på en plats som bedömdes opåverkad av de tidigare försöken. Så mycket som möjligt av utrustningen från de tidigare försöken användes.

## 5.1. Värmeväxlare

Försökslagret bestod av 7 värmeväxlare i hexagonalt mönster se fig. 5.1. Värmeväxlarna monterades på följande sätt. Ett hål med diametern

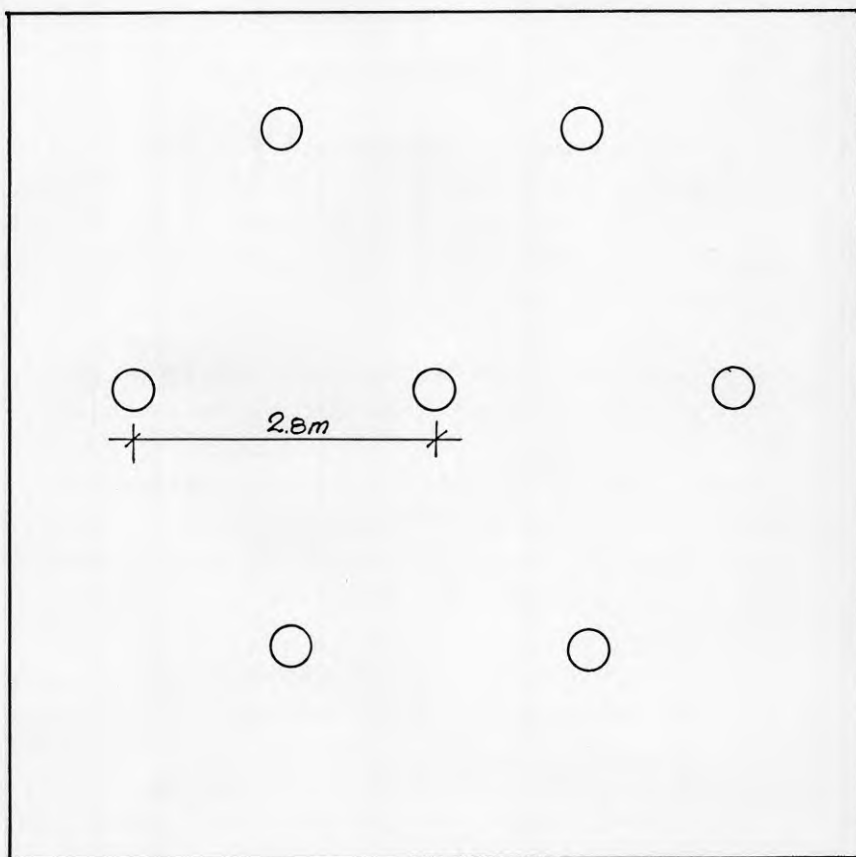


Fig. 5.1 Plan över värmeväxlarnas placering.

*Plan showing the position of the heatdrains.*

200 mm skruvborrades ner till ca 9 m djup. Hålets väggar stabiliserades genom att det vattenfylldes. Vid uppdragning av skruvborren tillfördes vatten genom borrhålet till underkanten av skruven för att undvika kollaps av hålet genom det undertryck som annars skulle uppstå. Efter borrhålet nedfördes ett U-rör av polyamidplast (18x2,5 mm<sup>2</sup>) med ett avstånd av ca 200 mm mellan skänklarna. Därefter fylldes hålet med krossmaterial 4-12 mm. Avståndet mellan värmeväxlarna var 2,8 m. De sju värmeväxlarna parallellkopplades på ett sådant sätt att lika vattenströmning skulle ske genom samtliga värmeväxlare. Ledningarna mellan värmeväxlarna samt ledningarna till och från värme-centralen lades på markytan och isolerades.

### 5.2 Utrustning för temperaturmätningar

Temperaturen mättes med resistiva givare, (Pt100). Givarna nedfördes till önskat djup i förmonterade 16 mm PH-rör, sk elektriskorrör, som tätats i sin nedre ända. Samtliga givare (11 st) kopplades till en omkopplare och varje givare lästes manuellt med hjälp av ett digitalt avläsningsinstrument.

Efter genomförd försökstid togs temperaturgivarna upp och samtliga kalibrerades i vatten vars temperatur noggrant uppmättes.

Temperaturgivarna placerades i linje mellan den centrala värmeväxlaren och de perifert placerade. 3 st placerades på 3 m djup, 3 st på 6 m djup samt en på 9 m djup, se fig. 5.2. De övriga 4 placerades på till- och utloppsledningarna till lagret.

### 5.3 Utrustning för portrycksmätningar

I lagret placerades sammanlagt 6 st portrycksmätare varav 3 st i linje mellan centrumvärmeväxlaren och en av de perifera på 6 m djup, se fig. 5.2. Två placerades mitt mellan centrum och yttre värmeväxlare på 4 och 8 m djup. Den sista mätaren monterades på 6 m djup mitt emellan två yttre värmeväxlare.

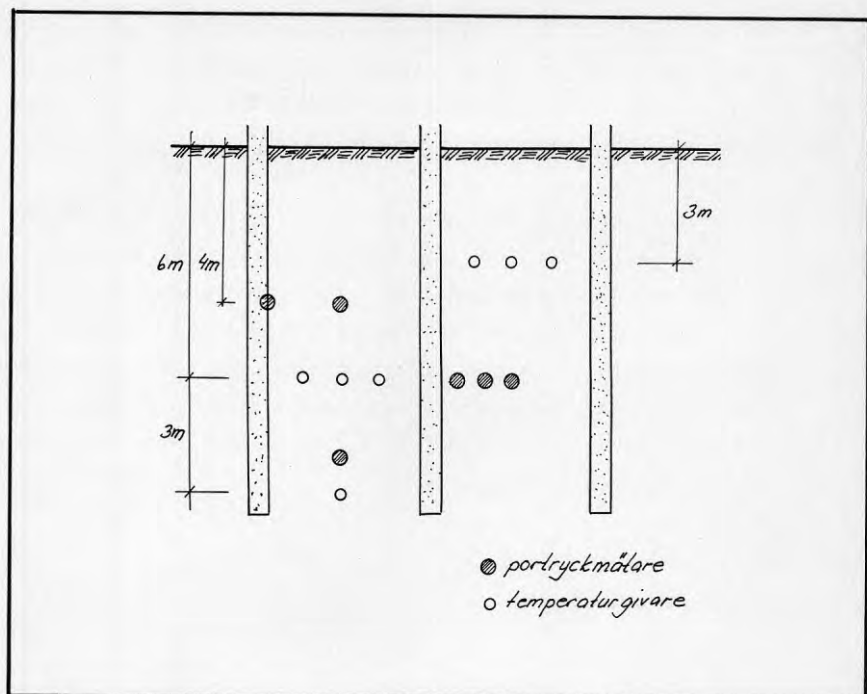


Fig. 5.2 Sektion visande temperaturgivarnas och portrycksmätarnas placering.

- o temperaturmätare
- portrycksmätare

*Section showing the position of the temperature gauges and the piezometers.*

- o temperature gauge*
- piezometers*

De fem förstnämnda portrycksmätarna var av BAT-typ med tryckanslutning via kanyl genom gummimembran i filtrets överdel. Den sista mätaren hade en öppen nippel i filtrets överdel som mellan avläsningarna tätades med ett tätton.

Som referensmätare användes 3 av mätarna i en referensytan ca 20 m från provplatsen (samma referensyta som använts i de tidigare försöken).

Anledningen till att referensmätare användes var att de naturliga variationerna av porttrycken skulle kunna beaktas.

#### 5.4 Uppvärmningsanordningar

Provlagret försågs med varmvatten från en 6 kW elpanna vars termostat hade satts på max 60 °C utgående temperatur. Med hjälp av en cirkulationspump cirkulerades vattnet genom lagrets värmväxlare med så stor hastighet att turbulent strömning med säkerhet uppkom i rörsystemet. Flödehastigheten mättes upp genom avläsning av en konventionell vattenmätare varje gång övriga mätningar utfördes. Medelflödet under hela försökstiden var 41 m<sup>3</sup>/tim, vilket motsvarar en vattenhastighet av ca 21 m/s i rören i värmväxlarna.

## 6. FÄLTFÖRSÖK - RESULTAT OCH ANALYS

Syftet med fältförsöken var att klarlägga dels temperaturutvecklingen runt värmeväxlare av den aktuella modellen med en "sanddrän" runt en U-rörsformad värmeväxlare och dels vilken påverkan "sanddränerna" kunde ha på de av uppvärmningen orsakade portryckshöjningarna. Bearbetningen och redovisningen av resultaten har därför delats upp i två faser.

I första fasen, under uppvärmningen, var syftet att studera portryckutvecklingen och jämföra denna med portrycksutvecklingen vid försök utan "sanddrän" runt värmeväxlarna. När sedan ett konstant värmeflöde med balans mellan tillförd energi och det lilla värmelagrets relativt stora förluster hade uppnåtts var syftet att studera värmeväxlarnas funktion, speciellt då med avseende på "sanddränernas" inverkan på drivtemperaturen.

### 6.1 Värmeströmning

Uppvärmningen av värmelagret pågick i ca 250 dygn. De uppmätta temperaturerna i lagret redovisas i fig. 6.1a och b. Mätare 5 och 7 visade nära nog identiska förlopp medan en viss tidseftersläpning kan konstateras för mätare 6, vilket speglar den väntade temperaturfördelningen i dränen. Mätare 8, 9 och 10 var placerade på liknande sätt, fast mätare 10 gav något avvikande resultat. Mätare 11, som var belägen vid den nedre randen visade lägre värden än övriga mätare, vilket är ett resultat av värmeströmningen ut ur lagret.

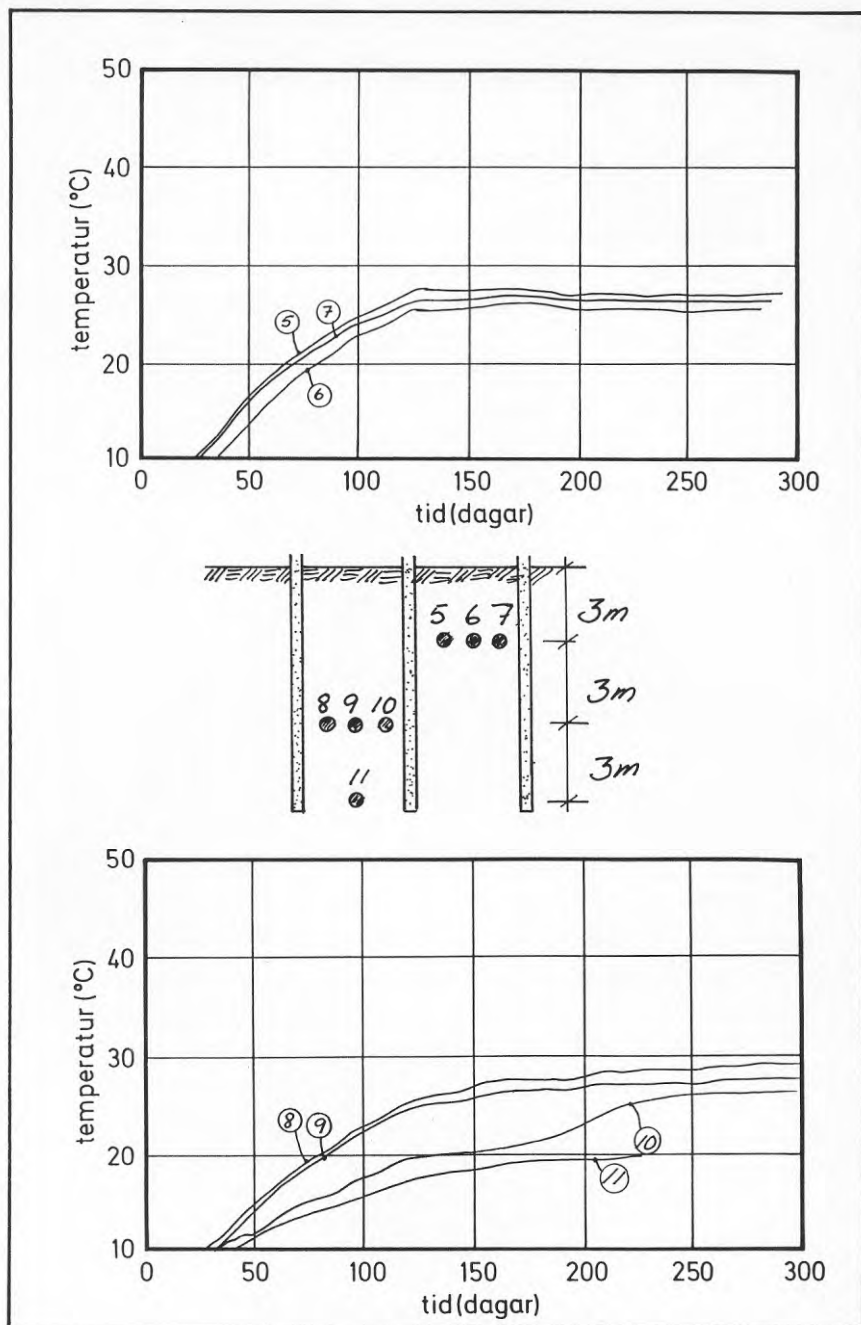


Fig. 6.1 Temperaturutveckling i lagret under uppvärmning.

*Temperatures in the soil during heating.*

En sammanfattning av temperaturutvecklingen i lagret under uppvärmningen framgår av figur 6.2, där temperaturen på värmeväxlarnas utsida, lagrets medeltemperatur samt drivtemperatur redovisas.

I samband med en störning i elsystemet ca 120 dygn efter provstart havererade elpannan delvis, vilket ledde till en reducerad effekt (ca 4500 Watt inklusive pumpenergi) under resten av försöket.

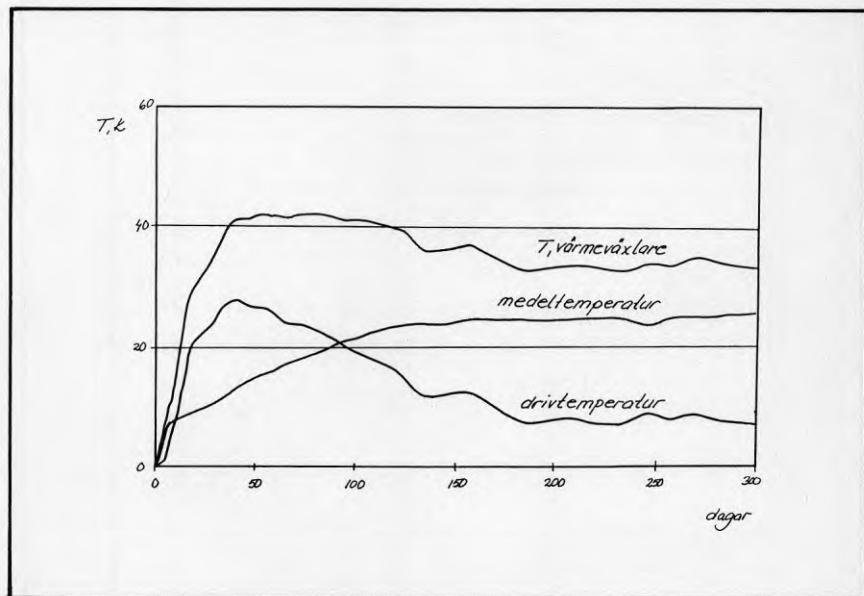


Fig. 6.2 Temperaturutveckling i lagret  
 a utsida värmväxlare  
 b lagermedeltemperatur  
 c drivtemperatur

*Temperature during the filed test*  
 a outside of heat exchangers  
 b average temperature  
 c driving temperature

Alla nedan redovisade värmeströmningsberäkningar har genomförts enligt de riktlinjer som anges av Claesson et al. (1985).

Analysen av värmedränens termiska funktion koncentreras därför till "steady-state"-stadiet efter dygn ca 200 där följande gäller som medelvärden:

Temp utsida värmeväxlarrör	33.9 °C
Lagermedeltemperatur	25.3 °C
Drivtemperatur	8.6 °C
Luftmedeltemperatur	3,0 °C
Angiven effekt från elpanna	4500 W
Total värmeväxlarlängd	65 m
Sanddränens diameter	200 mm
U-rörets skänkelavstånd	180 mm
Värmeväxlarrörens diameter	18 mm

I den tidigare rapporten (Adolfsson och Sällfors, 1987) förutsattes att drivtemperaturen ( $T_d$ ) var proportionell mot effekten per m värmväxlare enligt formeln

$$T_d = q \cdot m_g$$

där  $m_g$  = värmemotståndet i mark K/(W m)

$q$  = avgiven effekt W/m

För en cylindrisk värmväxlare råder enligt Claesson m fl (1985) följande samband:

$$m_g = 1/(2 \cdot \pi \cdot \lambda) (\ln(B/(2 \cdot \pi \cdot R_o)) + 0,52)$$

där  $\lambda$  = markens termiska konduktivitet, W/(m K)

$B$  = avstånd mellan värmväxlare, m

$R_o$  = värmväxlarradie, m

Löses  $m_g$  för ett antal olika  $R_o$  med värmväxlavståndet 2,8 m och den termiska konduktiviteten 1 W/(m K), fås



$R_o$	$m_g$
m	K/(W m)
0,05	0,43
0,06	0,41
0,07	0,38
0,08	0,36
0,09	0,34
0,10	0,32

I appendix redovisas en tabell där värmemotståndet enligt ovan beräknats med ett antal kombinationer av värmedrän/cylindrisk värmeväxlar-radie, värmeväxlaravstånd samt skänkelavstånd vid U-rörsmontage i le-ra. Resultatet redovisas för cylindrisk värmeväxlare, värmedrän och U-rörsmontage. Vid U-rören är skänkelavståndet detsamma som i värmedrären. I tabellen redovisas även ett jämförelsetal som uttrycker effektiviteten hos värmedrän och U-rör jämfört med cylindrisk värmeväxlare. Vid beräkningarna har använts de parametrar som är aktuella för projektet.

Det aktuella lagret kan anses ha dimensionerna  $8,4 \times 10 \text{ m}^3$ . Efter ca 200 dygn råder balans mellan tillförd effekt och värmeförlusterna. Den nominella panneffekten (4500 W) skall reduceras med förluster genom anslutningsledningarna. Dessa torde uppgå till ca 400 W, varför återstår 4100 W.

Beräknas de stationära förlusterna enligt ovan med viss hänsyn till den befintliga vegetationens isolerande förmåga, uppgår dessa till ca 4200 W. Eftersom lagermedeltemperaturen inte ändrades i någon större omfattning under den senare delen av försöket var alltså tillförd energi i stort samma som den stationära förlusten.

Eftersom lagret bestod av 6 st perifera värmeväxlare och en central, var det endast den centrala värmeväxlaren som genererade värme till det egentliga lagret runt hela sin omkrets. De perifera värmeväxlarna avlämnade ca 1/3 av sin energi till lagret och resten till omgivande mark. Detta innebär att ca 3/7 av den genom värmeväxlarna totalt till-

förda energin (ca 1750 W) passerar genom lagret, och att det således är denna effekt som skall fördelas på samtliga värmeväxlare vid bestämning av värmemotståndet.

Delas den mot centrala partiet tillförda effekten (1750 W) med 63 m värmeväxlare (7 \* 9 m), fås 28 W/m. Detta ger, vid 8,6 graders drivtemperatur, ett värmemotstånd av 0,31 k/(W/m).

Detta värmemotstånd svarar i stort sett mot det teoretiska värdet för en cylindrisk värmeväxlare med 100 mm radie. Genomföres beräkningarna för en värmedrän där värmetransporten förutsätts endast ske konduktivt erhålles motsvarande 0,35 K/(W/m), vilket innebär att det uppmätta resultatet är ca 13% bättre.

Genomföres samma beräkning för ett U-rörsmontage fås värmemotståndet 0,45 K/(W/m), vilket innebär att det uppmätta resultatet är ca 45% bättre. De erhållna resultaten tyder på att fullständig konvektion skulle råda i dränen, dvs hela värmedränen skulle ha samma temperatur som den som uppmätts på utsidan av värmeväxlarrören. Detta är praktiskt omöjligt, men resultaten tyder på att man utan större risk kan betrakta en värmedrän av det i projektet använda slaget, som likvärdig med en cylindrisk värmeväxlare med samma dimensioner.

## 6.2 Portrycksutveckling

Portrycksmätningarna visade att portrycken steg oväntat snabbt i de fem mätarna som hade slutna filter, medan en betydligt långsammare portrycksuppbyggnad kunde noteras i mätaren med öppen nippel. En sammanställning av de uppmätta portrycken visas i fig. 6.3. Fenomenet med de plötsligt ökande portrycken är inte helt klarlagt men följande kan dock observeras. Skillanderna mellan mätutrustningarna var i huvudsak två:

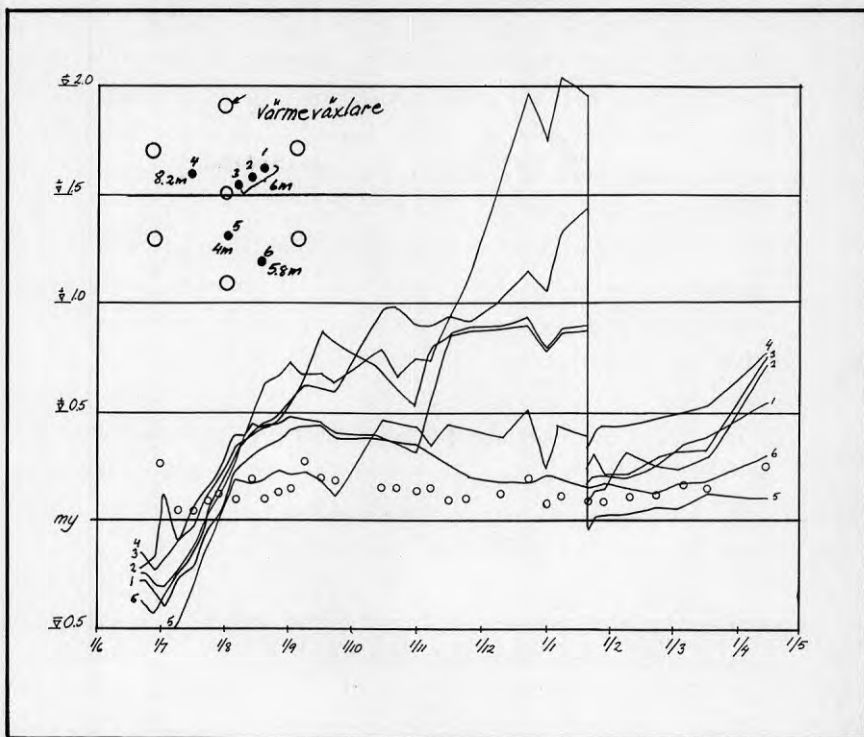


Fig. 6.3 Portryck uppmätta under uppvärmning av lagret.  
o öppen mätare

*Pore pressures during heating of the soil.*  
o open piezometer

Filtret hos mätarna med slutet system hade inte vid något tillfälle under försökets gång kontakt med atmosfären vilket den andra mätarens filter hade vid varje avläsningstillfälle. Filtren hos det slutna systemet består av keramiskt material med stor styvhet medan den andra mätarens filter är tillverkat av geotextil med en viss eftergivlighet.

De höga portrycken hos de slutna systemen åstadkoms sannolikt av gasbildning vilket bevisades av att värdena för dessa mätare överensstämde med den öppna mätarens efter avgasning med hjälp av vacuum.

Sannolikt avgav jorden mer gas än normalt vid uppvärmning av det slag som ägt rum. Det bör dock uppmärksammas att gränsen för störning av jorden, som kan ge upphov till denna typ av gasbildning, inte är klarlagd, varför hela konceptet med slutna filtersystem kan ifrågasättas.

Man kan på goda grunder antaga att gasblåsor "fångats" i filtret där de senare genom, i detta fall, delvis termisk utvidgning blivit så stora att de inte kunnat pressas ut genom filterporerna och därför påverkat mätresultaten.

I det öppna systemet var filtret eftergivligt vilket innebär att eventuella gasblåsor ej kan generera något tryck som är högre än omgivande portryck. Dessutom har större gasbubblor möjlighet att evakueras varje gång tätlodet lyftes av för avläsning av portrycket.

Utgående från ovanstående resonemang återstår bara pålitliga portrycksvärden från den öppna mätaren.

I den tidigare undersökningen (R23:1987) visades att portrycket mellan två värmeväxlare var lika högt oberoende av avståndet från dessa. Värdena från den nu mätta 6 m nivån kan alltså jämföras med de tidigare. Den verkliga portryckshöjningen genereras i huvudsak av den termiska utvidgningen av porvattnet i kombination med de rådande dräneringsförhållandena.

Jämförs portrycksutvecklingen på 6 m nivån i det tidigare försöket med 3"-rör som värmeväxlare och avståndet 2,8 m i kvadratisk mönster med det nu aktuella försöket kan följande observeras.

Medeltemperaturökningen var i det tidigare försöket 0,14 K/dygn och i det nu aktuella 0,16 K/dygn och är således jämförbar.

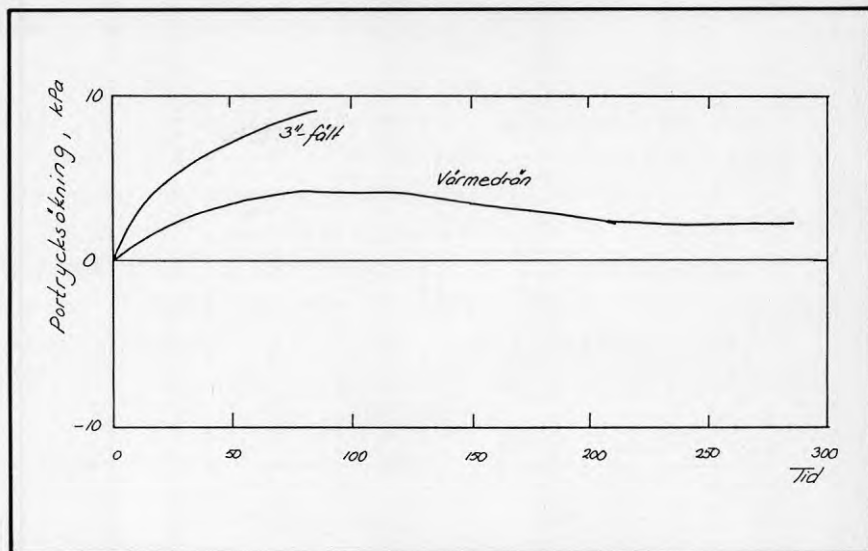


Fig. 6.4 Normaliserad portryckutveckling i lera med värmväxlare av typ rör respektive värmedrån.

*Normalized pore pressures in clay with tube-shaped heatexhanger and heatdrain.*

Figur 6.4 visar portrycksutvecklingen vid de båda försöken. Det framgår klart att portrycksökningen reducerats till ca 40% i lagret med sanddränerna. Detta beror sannolikt på de förändrade dräneringsförhållandena som sanddränen medför.

## 7. LABORATORIEFÖRSÖK - RESULTAT OCH ANALYS

En av fördelarna med värmedränen är att värmen inom dränen inte enbart sprids genom materialets värmeledande förmåga, utan att vattnet även kan blandas genom konvektion. Denna vattenströmning kommer till stånd tack vare densitetsskillnaderna i vatten med olika temperaturer. Idealsituationen är då att vattnets temperatur i dränen är lika stor överallt, se fig. 7.1. En viss fördröjning i temperaturökning hos mineralkornen kan dock förekomma. Konvektionen hämmas av sanden/gruset i dränen och om kornfördelningen är för fin, blir permeabiliteten så låg att temperaturutjämnningen till följd av konvektionen blir försumbar.

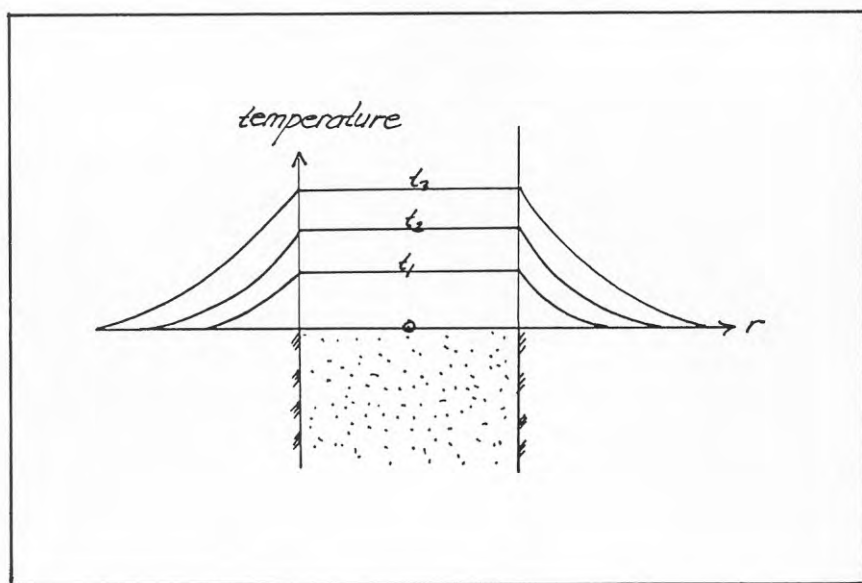


Fig. 7.1 Ideal temperaturfördelning i dränen.

*Ideal temperature distribution in the heat drain.*

Laboratorieförsöken syftar till att utreda hur kornstorleksfördelningen inverkar på konvektionen. Ett önskemål är att finna en minsta acceptabel kornfördelning. I laboratoriemodellen har en värmedrän testats med två olika kornstorleksfördelningar. Dessutom har för kontrollens skull även en öppen drän testats, dvs en drän med enbart vatten.

### 7.1 Försöksupställning

Försöken utfördes i laboratoriet och inte i fält, då det ansågs möjligt att i stort sett återskapa de randvillkor för dräner som föreligger i fält. Genom att göra utredningarna i laboratoriet minskades kostnaderna påtagligt samtidigt som det var möjligt att mer renodlat studera den aktuella parametern. Även mätningarnas kvalitet ansågs öka.

Försöksutrustningen utgjordes av en laboratorievärmedrän, värmekälla med cirkulationspump samt temperaturmätare, se fig. 7.2. För att inte vattensystemet på sikt skulle tömmas genom avdunstning, anslöts vattenreservoiren via en hävert till en extern vattenkälla.

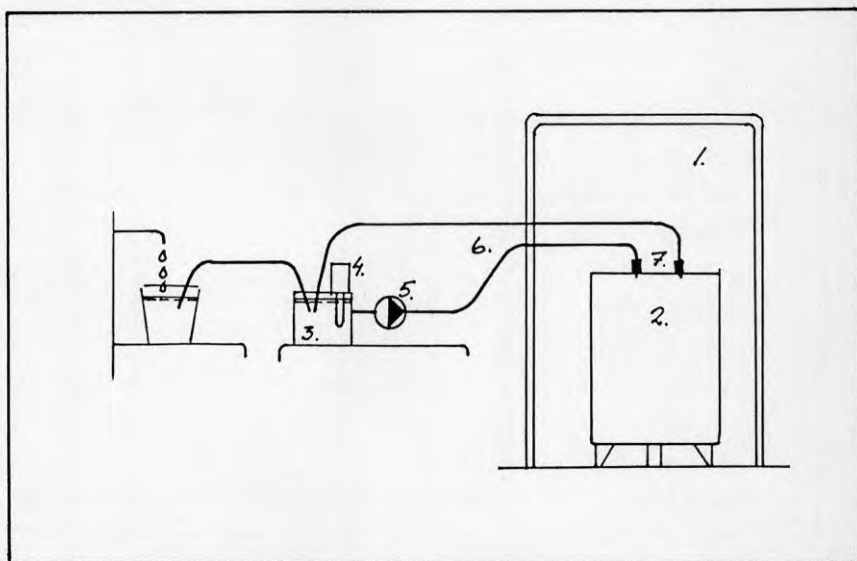


Fig. 7.2 Försöksupställning i laboratoriet.

*Test set up in the laboratory.*

1. Klimatrum	<i>Climate controlled room</i>
2. Värmeväxlare	<i>Heatexchanger</i>
3. Vattenbehållare	<i>Waterbasin</i>
4. Doppvärmare	<i>Heater</i>
5. Pump	<i>Pumps</i>
6. Slangar	<i>Hoses</i>
7. Temperaturgivare	<i>Temperaturgauges</i>

### *Värmekälla*

Värmekällan bestod av ett vattenbad med en doppvärmare som var termostaterad. Cirkulationspumpen var kontinuerligt reglerbar inom intervall 0,1-10 liter/min.

### *Värmedrän*

Värmedränen utformades som en 1 m lång drän med 0.6 m diameter, se fig. 7.3. Höljet utgjordes av en stålcyllinder, och över och underdelen försågs med isolering av 10 cm cellplast. Som värmeväxlare användes två plaströr av samma material och utförande som vid fältförsöken. Värmedränen placerades i ett klimatrum med temperaturen 7°C.

### *Temperaturmätare*

Samma typ av temepaturgivare användes som beskrivits under avsnittet fältförsök. 8 st givare placerades inne i dränen och två stycken på in respektive utgående vatten. Temperaturgivarnas numrering och placering framgår av fig. 7.3.

### *Dränmaterial*

Totalt utfördes 9 st uppvärmningsförsök med varaktigheter från 1 till 7 dygn.

Ett försök utfördes med cylindern fylld enbart med vatten, fyra försök med mellansand och fyra försök med fingrus. I fältförsöken användes grus, 4-12 mm. Resultaten därifrån kan även användas då en minsta lämplig korn diskuteras.



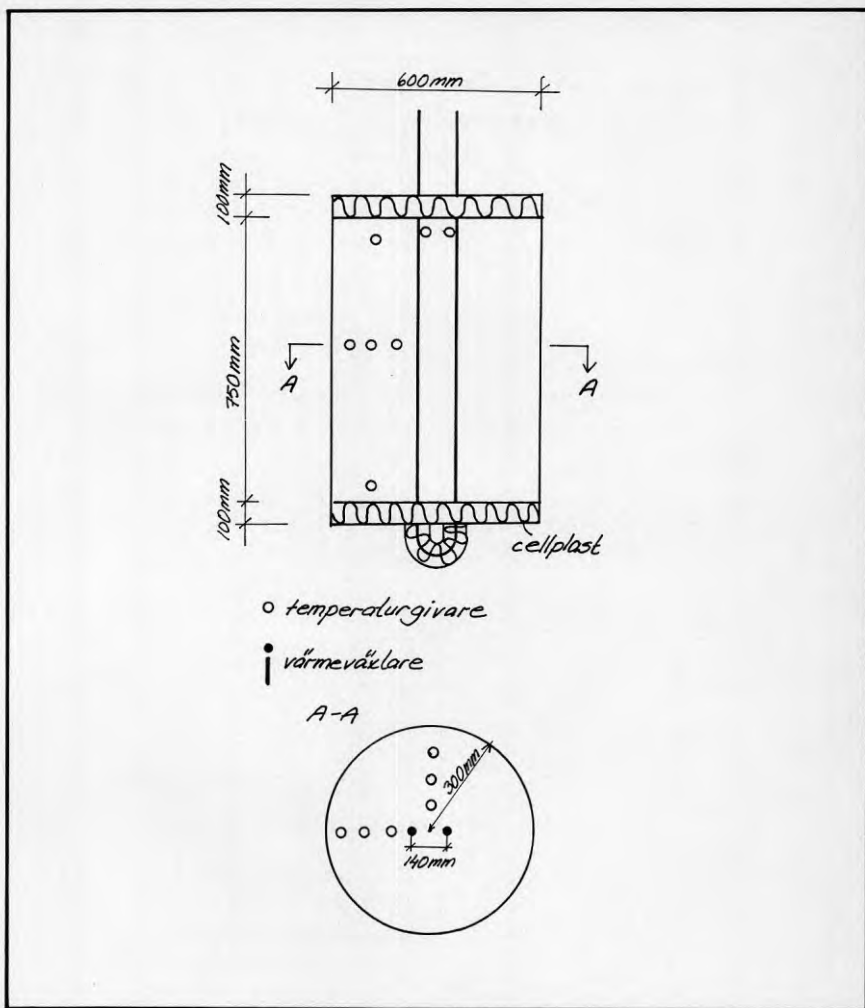


Fig. 7.3 Laboratiemodell av värmedrän.

Laboratory model of heatdrain.

Mellansanden utgjordes av ensgraderad kvartssand (0.2-0.6 mm) typ Ottawa sand, se fig. 7.4. Fingruset, vars siktkurva också är given i fig. 7.4, bestod till övervägande delen av fältspat och glimmer med en viss andel kvarts. En detaljerad information om materialens egenskaper återfinns i tabell 7.1.

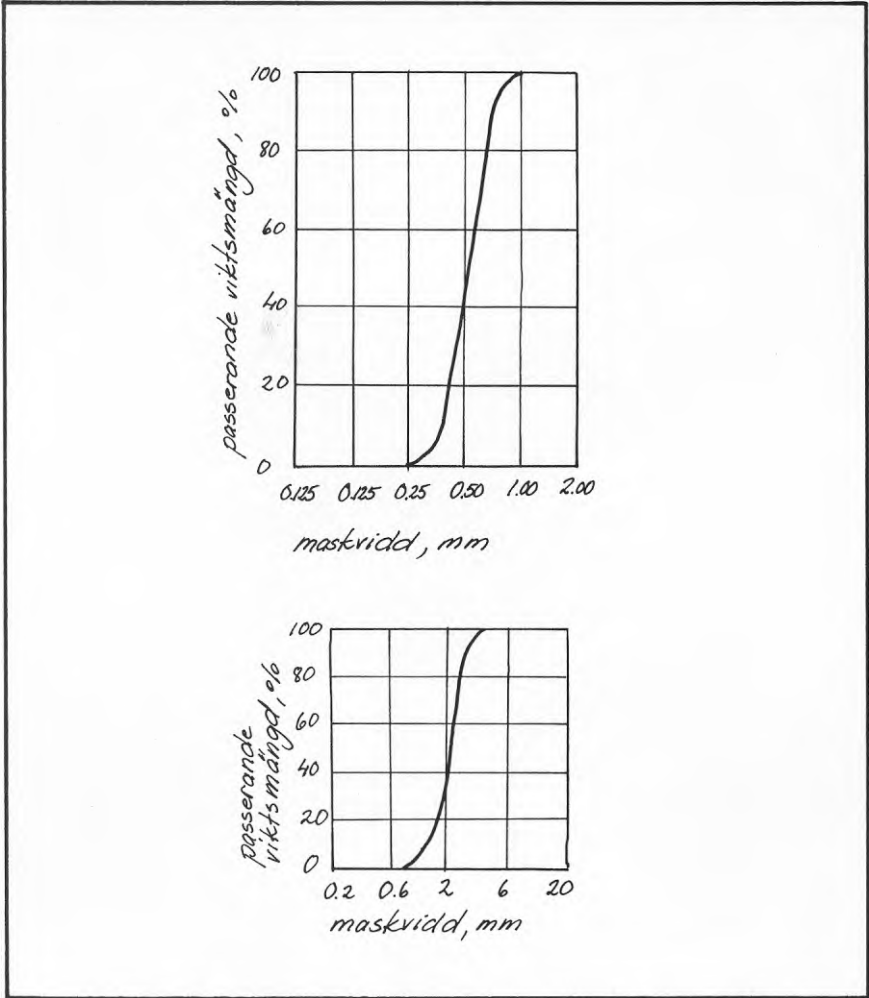


Fig. 7.4 Kornfördelning för den använda sanden och gruset.

Grainsize distribution for the tested sand and cobbles.

Tabell 7.1

	Sandigt fingrus	Mellansand
Kornstorlek	0,6-5 mm	0,2-0,9 mm
Medelkornstorlek	2,5 mm	0,58 mm
Korndensitet	2,65 t/m <sup>3</sup>	2,65 ton/m <sup>3</sup>
Kvartshalt	ej uppmätt	98%
Porositet	0,38	0,40
Skrymdensitet	2,0 t/m <sup>3</sup>	2,0 t/m <sup>3</sup>
Värmeledningsförmåga i vattenmättat tillstånd	1,6 W/m, °C	2,7 W/m, °C

## 7.2 Försöksutförande och utvärdering

Den i avsnitt 7.1 redovisade uppställningen användes och försöken startades då vattnet i konstantbadet uppnått den förutbestämda temperaturen. Under de första dyggen av försöken stiger temperaturen successivt för att så småningom nå ett stationärt tillstånd. Det är de under det stationära tillståndet uppmätta temperaturerna som ligger till grund för analysen av värmeströmningen. De uppmätta temperaturerna jämförs sedan med de för värmeströmning utan konvektion beräknade värdena. Vid den teoretiska analysen har en ekvivalent diameter för den U-rörsförenade värmeväxlarna beräknats. I detta fallet, med två  $\phi$  17 mm rör på ett avstånd av 140 mm, erhålls en ekvivalent diameter på 100 mm.

## 7.3 Försök med enbart vatten

I detta försök används en uppställning med tom drän, dvs tunnan innehöll enbart vatten.

Värmebärrarvattnet cirkulerade med en hastighet som gav ett flöde på

1.4 l/min. Temperaturskillnaden mellan vattnets temperatur i dränen och brinern var ca  $5.5^{\circ}$  i början av försöket och minskade gradvis till ca  $4.5^{\circ}$  efter ca 20 h. Avgiven effekt sjönk något allteftersom tiden gick och var vid slutet av försöken 175 W/m.

Försöket avbröts strax innan stationärt tillstånd uppnåtts. Samtliga temperaturgivare visade då i stort sett samma temperatur.

I fig. 7.5 visas temperaturfördelningen vid försökets slut mitt i dränen (heldragen kurva). Den teoretiska kurvan, beräknad med antagandet att ingen konvektion äger rum visas streckad. Skillnaden i temperatur mellan de tre givarna i "dränen" (vattnet) är mindre än  $1,0^{\circ}\text{C}$ . Temperaturskillnaden mellan övre och undre rand i dränen är mindre än  $2,0^{\circ}\text{C}$ , med den högsta temperaturen i den övre delen.

Dessa mätningar visar klart att konvektionen i princip är fullständig. Temperaturen i brinern är visserligen högre än temperaturen i dränen, men den skillnaden skulle minskat påtagligt om man fortsatt försöket tills värmeflödet blivit helt stationärt. Det viktiga är att temperaturfördelningen radiellt är i stort sett jämn. Gradienten i horisontalld är således mycket liten jämfört med det teoretiska fallet beaktande enbart värmeledning.

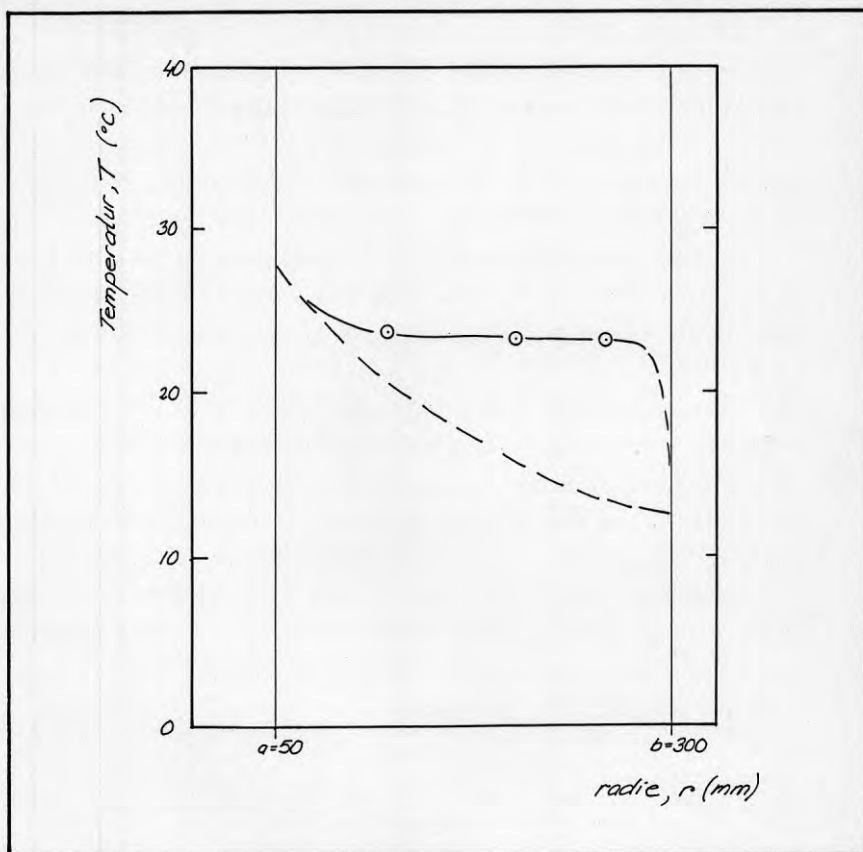


Fig. 7.5 Temperaturfördelning i värmväxlare med enbart vatten.

*Temperature distribution in the heat-exchanger filled with water.*

Den effekt som den inre skänkeln avgav i slutet av försöket var ca 175 W. En beräkning av värmetransportförmågan enligt ekv 2.6 ger  $k_t = 14$  W/m, °C, att jämföras med värmeledningstalet för stillastående vatten som är 0,56 W/m, °C.

Ekv 2.6 förutsätter stationär värmeströmning vilket inte var fallet här.  $k_t$  skulle ökat ytterligare om försöket fortsatt längre och med tiden skulle  $k_t$  blivit mycket stort.

Temperaturen vid den inre randen,  $T_1$  har inte varit samma vid alla försök, utan har varierat mellan 28 och 41 °C. Om man antar att avgiven effekt är direkt proportionell mot temperaturen vid inloppet ( $T_1$ ) för det aktuella temperaturintervallet kan ett jämförelsetal  $P/T_1$  beräknas. I detta fallet blir det  $P/T_1$  6,3 W/°C, och kunde således förväntas öka påtagligt om försöket nått ett stationärt tillstånd.

Sammantaget pekar mätningarna och beräkningarna på att konvektionen leder till att hela "dränen", om den enbart består av vatten, värms upp så att temperaturen i stort sett är densamma i hela dränen.

Beräkningarna som gjorts ovan bortser ifrån värmeövergångsmotstånd vid ränderna och är baserade på randtemperaturerna  $T_1$  och  $T_2$  vilka är tämligen osäkra. Framförallt erhålls vid den yttre randen ett stort temperaturfall. Om man istället antar att de temperaturer som uppmätts av givarna i dränen är sanna kan däremot svarande randtemperaturer  $T_1$  och  $T_2$  beräknas. De blir då i medeltal 25,2 respektive 23 °C. Baserat på dessa värden ger ekvation 2.6  $k_t \approx 30$  W/m, °C. Detta antyder att den uppmätta temperaturens differens  $T_1 - T_2$  är för stor, vilket stämmer väl med vad som kunde förväntas.

#### 7.4 Försök med mellansand

Fyra försök utfördes. Dränen var i dessa försök fylld med mellansand med en porositet på ca 0,40. Samtliga försök gav samma sorts information och här redovisas resultaten från ett försök.

Pumpen reglerades i detta försök så att flödet blev 1,5 l/min. När stationärt flöde uppnåtts var temperaturen i brinern mellan 36 och 38,5 °C medan temperaturen i dränen varierade mellan 22 och 38 °C beroende på mätpunkt. Den angivna effekten var då 136 W.

Exempel på temperaturökning under ett försök visas i fig. 7.6. Samtliga givare var placerade mitt emellan drärens över och underyta på olika avstånd från centrum.

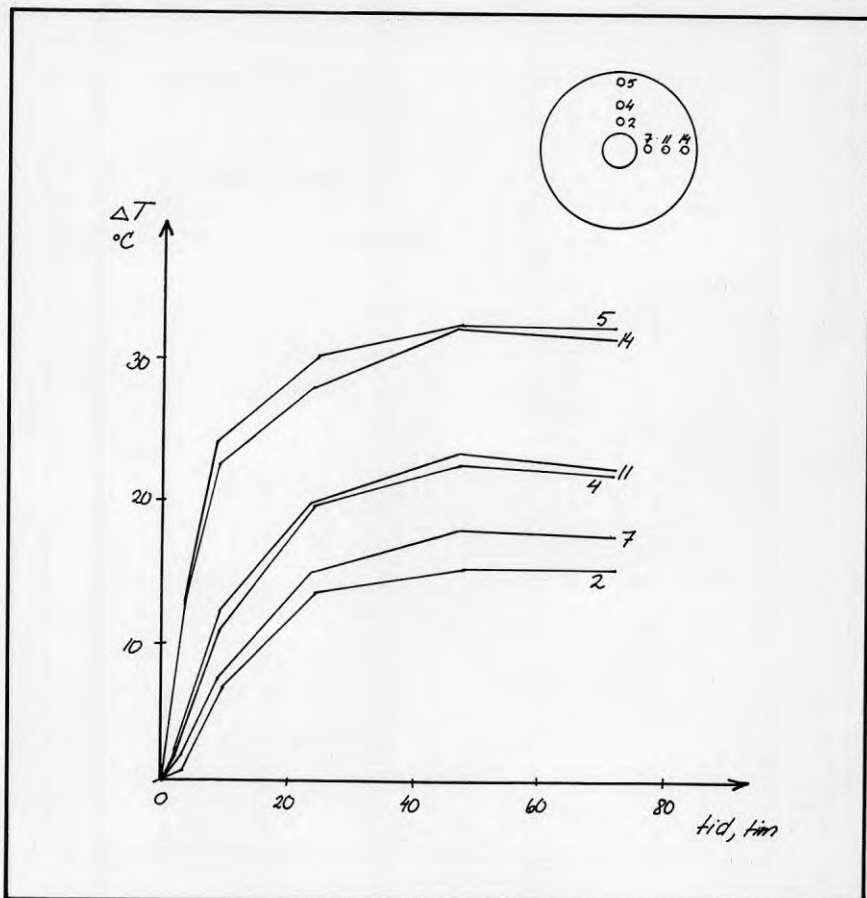


Fig. 7.6 Temperaturutveckling i drän med mellansand.

*Temperature in heatdrain with sand.*

En beräkning av  $k_t$  för det stationära flödet gav  $k_t = 2,7 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$ . Detta skall jämföras med  $k$  för vattenmättad kvarts som är  $2,6 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$ . Värmspridningen till följd av konvektion är i stort sett obefintlig. I fig. 7.7 visas uppmätta temperaturer vid stationärt tillstånd som funktion av radien  $r$ . I figuren visas även den utifrån randtemperatu-

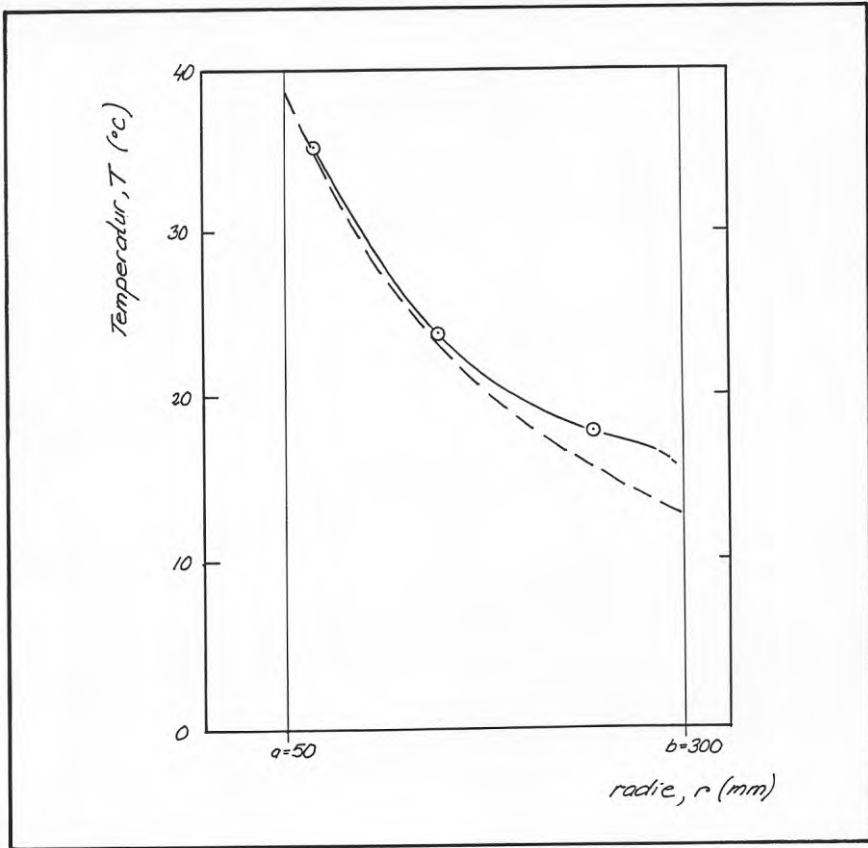


Fig. 7.7 Temperaturfördelning i värmedrån med sand.

*Temperature distribution in the heat-exchanger filled with sand.*

rerna beräknade kurvan om ingen konvektion antas ske, streckad kurva. Det är något anmärkningsvärt att första uppmätta temperaturen innifrån räknat är så hög, den är i stort sett lika med medeltemperaturen i brinern. Å andra sidan har beräkningarna baserats på en cylindrisk värmeväxlare och inte en U-rörsformad. Gradienterna är i vilket fall nära nog desamma för den experimentella som den teoretiska, vilket tyder på att ingen konvektion äger rum.



Om de tre uppmätta punkterna används för att beräkna en fiktiv temperatur  $T_1$  och  $T_2$  fås en temperaturdifferens på  $(T_1 - T_2) = 24$  °C. Den uppmätta differensen var  $(39 - 13) = 26$  °C, vilket även det antyder att ytterst lite konvektion ägde rum.

Jämförelsetalet  $(P/T_1)$  blir i detta fallet endast  $3,5$  W/°C.

Under försöket var det varmare längst ner i cylindern ( $3,5$  °C) vilket även det antyder att någon påtaglig konvektion ej ägde rum. Konvektionen förhindras således nästan totalt av strömningsmotståndet i mellan-sanden.

### 7.5 Försök med fingrus

Fyra försök med dränen fylld med fingrus utfördes. Inga motstridiga resultat erhöles, och endast ett försök redovisas här.

Pumpen reglerades så att ett flöde på  $1,5$  l/min erhöles. Då i stort sett stationärt flöde erhöles var temperaturskillnaden mellan in och utgående vatten  $2,1$  °C. Den avgivna effekten var då  $224$  W. Om man inväntat stationärt flöde hade denna siffra förmodligen sjunkit något. I fig. 7.8 redovisas, som tidigare, uppmätta och beräknade värden. De beräknade värdena har erhöles med användande av randtemperaturerna  $T_1 = 36$  °C och  $T_2 = 13$  °C. De uppmätta temperaturerna var något låga, då flödet ej var helt stationärt. Utifrån dessa värden har tillhörande randtemperaturer beräknats och kurvan har justerats i höjddled så att beräknad randtemperatur  $T_1$  överensstämmer med verklig randtemperatur.

Det framgår av fig. 7.8 att en påtaglig konvektion har ägt rum, även om den inte resulterat i en helt jämn temperaturökning inom dränen. Uppskattningsvis är "effektiviteten" någonstans mellan  $50$  och  $65\%$

Även det faktum att temperaturen var högre i den övre delen av dränen tyder på att konvektion ägt rum.

En beräkning ger  $k_t = 7,3$  W/m, °C, vilket skall jämföras med  $k = 1,6$  W/m, °C som gäller för vattenmättat fingrus utan konvektion. Beräkningarna är inte invändningsfria, men visar ändå att en påtaglig konvektion förekommer. Jämförelsetalet  $(P/T_1)$  blev i detta fallet  $8,3$  W/m.

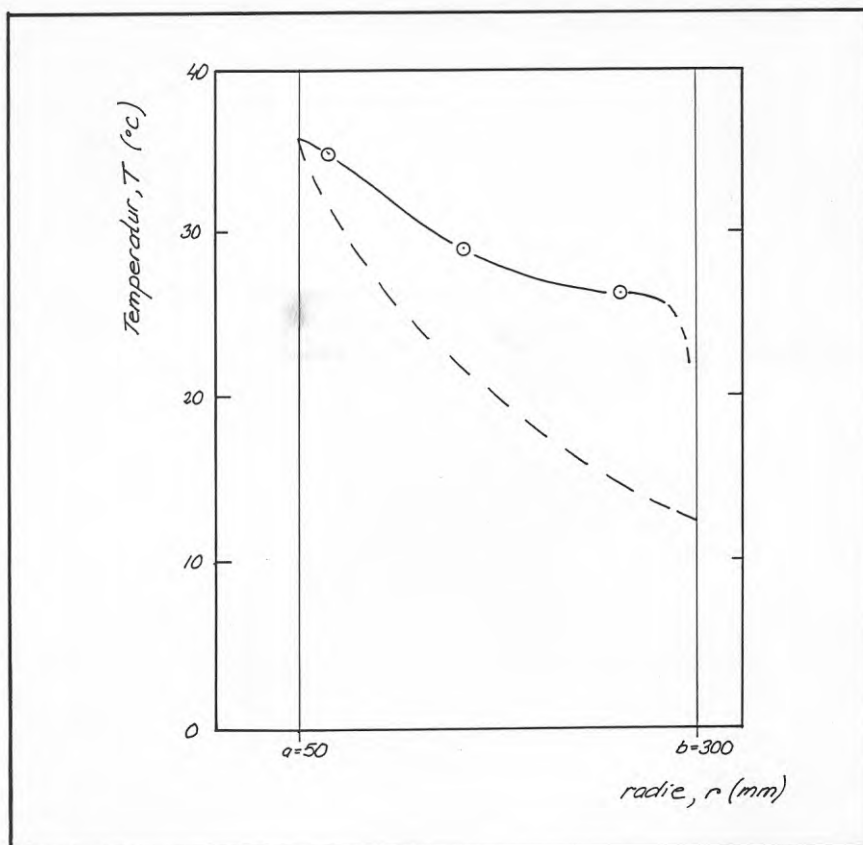


Fig. 7.8 Temperaturfördelning i värmväxlare fylld med fingrus.

*Temperature distribution in the heat exchanger filled with cobbles.*

## 7.6 Felkällor

Försöken har genomförts i laboratoriet med i de flesta avseenden väl beprövad utrustning. I försöksupställningen ingår en del provisoriska lösningar, som efterhand fungerade väl.

Bland mätningstekniska fel kan noteras att mätnoggrannheten i flöde var ca  $\pm 5\%$ , temperatur  $\pm 0,3$  °C, och temperaturgivarnas läge i plan  $\pm 2$  cm. Temperaturmätarna kalibrerades emellertid inte mellan varje försök. Om noll drift förekommer, kan en del resultat ha påverkats av detta.

Det enda reella mätproblemet har varit att mäta temperaturen på in- och utgående vatten. Detta påverkar främst de beräknade effekterna. Jämförelse och analys bör därför koncentreras till temperaturfördelningen i dränen, eftersom felet i inre randtemperaturen,  $T_1$ , är litet jämfört med differensen  $T_1 - T_2$ , där  $T_2$  är yttre randtemperaturen.

Den största osäkerheten är kopplad till idealiseringen av den verkliga modellen till en matematiskt hanterbar modell, se fig. 7.9.

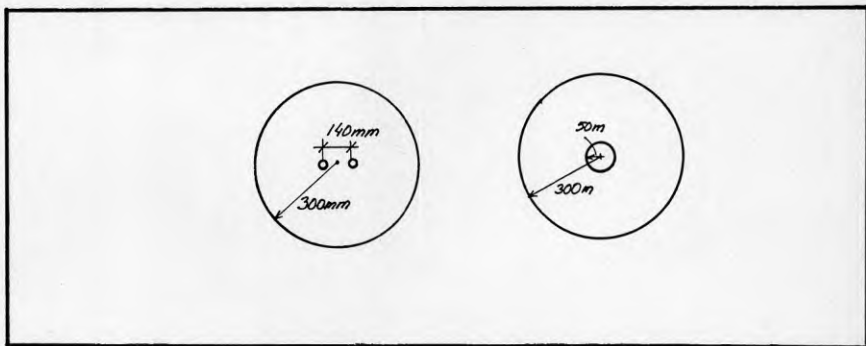


Fig. 7.9 Idealisering av verklig modell till en matematisk hanterbar modell.

*Idealisation of the experimental model to a simple mathematical model.*

Den U-rörsformade värmeväxlaren har ersatts med en ekvivalent cylindrisk värmeväxlare, som antas ha konstant temperatur. Vidare har eventuellt värmeläckage genom ändytorna försumrats, liksom alla värmeövergångsmotstånd.

Syftet med försöken har emellertid enbart varit att studera i vilken omfattning kornfördelningen påverkar konvektionen i dränen. Trots att den värmetekniska analysen är behäftad med ovannämnda brister, ger den ett fullgott underlag för den diskussion som förs i kapitel 8.

## 8. DISKUSSION AV RESULTAT FRÅN LABORATORIE- OCH FÄLTFÖRSÖK

### 8.1 Portryck

Vid de tidigare försöken (R 23:1987) noterades stora höjningar av portrycken i samband med uppvärmningen av leran. Detta innebär att en gradient skapas som leder till en strömning av porvattnet ut från lagret. Vid uttag av värme erhöles på motsvarande sätt en sänkning av portrycken. Genom de olika förutsättningarna som gäller för strömningen till och från lagret erhålles en pumpeffekt med resultatet att vatten bortföres från leran i lagret, vilket i sin tur ger upphov till konsolideringssättningar.

Då det dessutom konstaterades en sänkning av lerans förkonsolideringstryck ligger det nära till hands att misstänka att denna sänkning delvis är orsakad av porvattnets termiska expansion inne i porerna.

Det visade sig vidare att portrycken i stort sett var konstanta oavsett avståndet från värmeväxlarna trots de olika temperaturerna.

Utgående från ovanstående, framstår användandet av dräner i anslutning till värmeväxlarna som ytterligt gynnsamt.

Det enkla pilotförsöket som genomfördes i det tidigare projektet och de nu genomförda försöken visar att en kraftig reduktion av portrycken erhålles, vilket då bör leda till en minskning av sättningarna såväl storleks- som tidsmässigt.

### 8.2 Värmetransport

Hela konceptet med värmedräner är framtaget för att värmetekniskt vinna två fördelar, nämligen dels att öka arean på värmeväxlaren, dels att åstadkomma ett "korttidslager" inom det stora värmelagret och därmed möjliggöra snabba uttag och laddningar av begränsade energimängder.

Laboratorieförsöken visar att en jämn höjning av temperaturen i hela

dränen åstadkoms tack vare konvektion om dränen innehåller enbart vatten, fig. 8.1. Konvektionen hämmas emellertid i princip totalt om dränmaterialet utgörs av mellansand, medan det testade fingeruset ger en viss andel konvektion, se fig. 8.1.

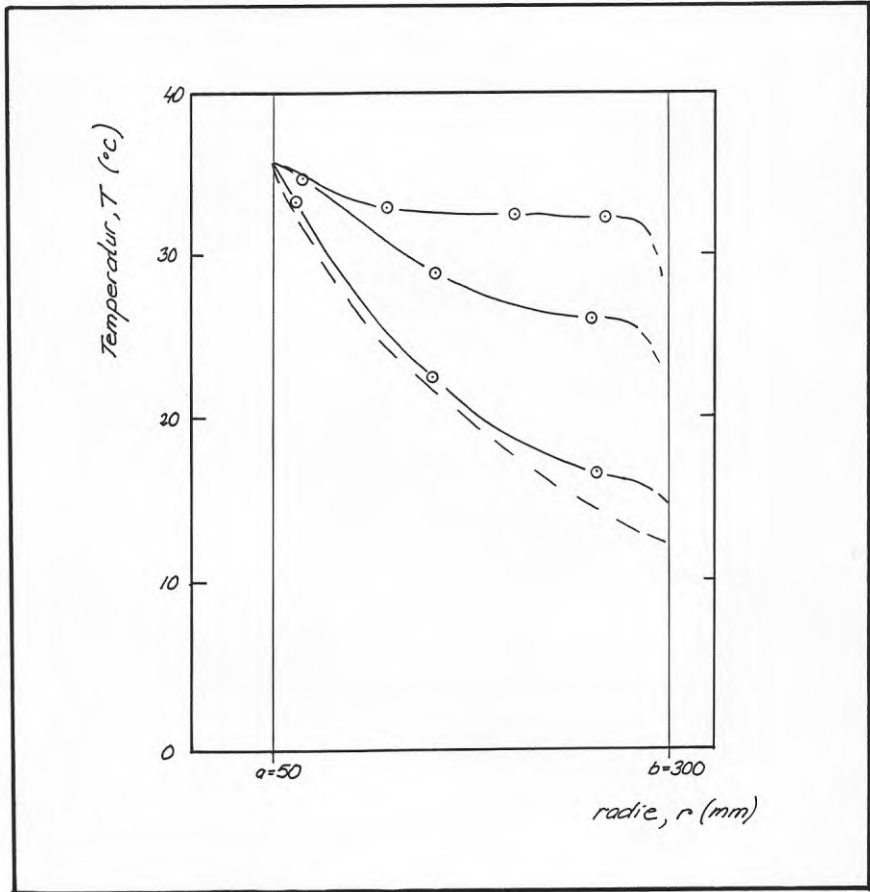


Fig. 8.1 Temperaturfördelning i värmväxlare fylld med vatten, grus och sand.

*Normalised temperature distribution for heat-exchanger filled with water, cobbles and sand respectively.*

Analysen av effekter och temperaturer i kap 6 antyder att den i fältförsöken använda fraktionen 8-12 är tillräckligt grov för att åstadkomma i princip fullständig konvektion.

Temperaturmätningarna i fält visar vidare på att värmedränen kan betraktas som en cylindrisk värmeväxlare med en radie samma som dränen. En viss eftersläpning av uppvärmningen av dränen jämfört med det värmebärande mediets temperatur förekommer dock. Effektiviteten i denna värmeväxling är dock mycket hög.

Dränen, bestående av vatten och grus, utgör således ett korttidslager vars kapacitet är beroende av, utöver dess dimensioner, vilket mineralslag som dominerar i gruset.

## 9 SLUTSATSER

De genomförda laboratorie- och fältförsöken visar, tillsammans med analysen att

- o De portryck som genereras i leran till följd av uppvärming blir betydligt mindre då värmedräner används istället för konventionella u-rörsformade eller cylindriska värmeväxlare.
- o De sättningar som kan förväntas till följd av uppvärmningen av leran utbildas snabbare och blir sannolikt något mindre.
- o Materialet i dränen hindrar konvektionen i dränen påtagligt om finare material än fingrus används.
- o Om fingrus eller grövre material används fungerar dränen som ett effektivt korttidslager.
- o Användandet av värmedräner medför att betydligt större värmeväxlaravstånd kan användas med bibehållen effektivitet i lagret.



## REFERENSER

Adolfsson, K. och Sällfors, G., 1987. Energilagrin i lera. Värmeledning, värmeväxlarutformning och påverkan av lerans geotekniska egenskaper. Byggforskningsrådet, R23:1987. Stockholm.

Claesson, J. et al., 1985. Markvärme. En handbok om termiska analyser. Byggforskningsrådet. Stockholm

Tidfors, M., 1986. Temperature effects on the deformation characteristics of clay - A laboratory study. Licentiatuppsats. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.



APPENDIX

Beräkning av värmemotstånd i jord

BERÄKNING AV VÄRMEMOTSTÅND FÖR VÄRMEVÄXLARE I JORD

ENLIGT JOHAN CLAESSON m fl MARKVÄRMEHANDBOKEN 1985

KONDUKTIVITET JORD 1 W/mK

KONDUKTIVITET VÄRMEDRÄNSMATERIAL 2.3 W/mK

KAPACITIVITET JORD 3.5 MJ/m<sup>3</sup>K

KAPACITIVITET VÄRMEDRÄNSMATERIAL 2.8 MJ/m<sup>3</sup>K

RÖRRADIE I U-RÖR OCH VÄRMEDRÄN 8.999999E-03 m

DR/VX-RAD m	VX-AVST m	SKÄNKAV m	VÄRMEMOTSTÅND K/(W/m)			JMF-TAL MOT CYL VX	
			CYLVX	U-RÖR	VDRÄN	U-RÖR	VDRÄN
0.020	2.00	0.022	0.511	0.567	0.497	0.901	1.028
0.020	2.20	0.022	0.526	0.582	0.512	0.904	1.027
0.020	2.40	0.022	0.540	0.596	0.526	0.906	1.027
0.020	2.60	0.022	0.553	0.609	0.539	0.908	1.026
0.020	2.80	0.022	0.565	0.621	0.551	0.910	1.026
0.020	3.00	0.022	0.576	0.632	0.562	0.911	1.025
0.040	2.00	0.062	0.401	0.485	0.404	0.827	0.992
0.040	2.20	0.062	0.416	0.500	0.419	0.832	0.992
0.040	2.40	0.062	0.430	0.514	0.433	0.837	0.993
0.040	2.60	0.062	0.443	0.527	0.446	0.841	0.993
0.040	2.80	0.062	0.454	0.538	0.458	0.844	0.993
0.040	3.00	0.062	0.465	0.549	0.468	0.847	0.994
0.060	2.00	0.102	0.336	0.446	0.355	0.755	0.947
0.060	2.20	0.102	0.352	0.461	0.370	0.763	0.950
0.060	2.40	0.102	0.365	0.474	0.384	0.770	0.952
0.060	2.60	0.102	0.378	0.487	0.396	0.776	0.954
0.060	2.80	0.102	0.390	0.499	0.408	0.782	0.955
0.060	3.00	0.102	0.401	0.510	0.419	0.786	0.957
0.080	2.00	0.142	0.291	0.420	0.322	0.693	0.903
0.080	2.20	0.142	0.306	0.435	0.336	0.703	0.909
0.080	2.40	0.142	0.320	0.448	0.350	0.713	0.913
0.080	2.60	0.142	0.332	0.461	0.363	0.721	0.916
0.080	2.80	0.142	0.344	0.473	0.374	0.728	0.919
0.080	3.00	0.142	0.355	0.484	0.385	0.734	0.922
0.100	2.00	0.182	0.255	0.400	0.296	0.637	0.860
0.100	2.20	0.182	0.270	0.415	0.311	0.651	0.868
0.100	2.40	0.182	0.284	0.429	0.325	0.662	0.875
0.100	2.60	0.182	0.297	0.442	0.337	0.672	0.880
0.100	2.80	0.182	0.309	0.453	0.349	0.681	0.885
0.100	3.00	0.182	0.320	0.464	0.360	0.689	0.889
0.120	2.00	0.222	0.226	0.385	0.276	0.587	0.817
0.120	2.20	0.222	0.241	0.400	0.291	0.603	0.829
0.120	2.40	0.222	0.255	0.413	0.304	0.617	0.838
0.120	2.60	0.222	0.268	0.426	0.317	0.628	0.845
0.120	2.80	0.222	0.280	0.438	0.328	0.639	0.852
0.120	3.00	0.222	0.291	0.449	0.339	0.648	0.857
0.140	2.00	0.262	0.201	0.373	0.260	0.541	0.775
0.140	2.20	0.262	0.217	0.387	0.274	0.559	0.789
0.140	2.40	0.262	0.230	0.401	0.288	0.575	0.801
0.140	2.60	0.262	0.243	0.413	0.300	0.588	0.811
0.140	2.80	0.262	0.255	0.425	0.311	0.600	0.819
0.140	3.00	0.262	0.266	0.436	0.322	0.610	0.826

## BERÄKNING AV VÄRMEMOTSTÅND FÖR VÄRMEVÄXLARE I JORD

ENLIGT JOHAN CLAESSON m fl MARKVÄRMEHANDBOKEN 1985

KONDUKTIVITET JORD 1 W/mK

KONDUKTIVITET VÄRMEDRÄNSMATERIAL 2.3 W/mK

KAPACITIVITET JORD 3.5 MJ/m<sup>3</sup>KKAPACITIVITET VÄRMEDRÄNSMATERIAL 2.8 MJ/m<sup>3</sup>K

RÖRRADIE I U-RÖR OCH VÄRMEDRÄN 8.999999E-03 m

DR/VX-RAD m	VX-AVST m	SKÄNKAV m	VÄRMEMOTSTÅND K/(W/m)			JMF-TAL MOT U-RÖR	CYL VX VDRÄN
			CYLVX	U-RÖR	VDRÄN		
0.160	2.00	0.302	0.180	0.362	0.246	0.498	0.732
0.160	2.20	0.302	0.195	0.377	0.260	0.519	0.750
0.160	2.40	0.302	0.209	0.390	0.273	0.536	0.765
0.160	2.60	0.302	0.222	0.402	0.285	0.551	0.777
0.160	2.80	0.302	0.234	0.414	0.297	0.565	0.788
0.160	3.00	0.302	0.245	0.425	0.307	0.576	0.796
0.180	2.00	0.342	0.161	0.353	0.234	0.457	0.689
0.180	2.20	0.342	0.177	0.368	0.248	0.480	0.711
0.180	2.40	0.342	0.190	0.381	0.261	0.500	0.729
0.180	2.60	0.342	0.203	0.393	0.273	0.517	0.744
0.180	2.80	0.342	0.215	0.405	0.284	0.531	0.756
0.180	3.00	0.342	0.226	0.415	0.295	0.544	0.767
0.200	2.00	0.382	0.145	0.345	0.224	0.419	0.645
0.200	2.20	0.382	0.160	0.360	0.238	0.444	0.672
0.200	2.40	0.382	0.174	0.373	0.250	0.466	0.694
0.200	2.60	0.382	0.186	0.385	0.262	0.484	0.711
0.200	2.80	0.382	0.198	0.396	0.273	0.500	0.726
0.200	3.00	0.382	0.209	0.407	0.284	0.514	0.738
0.220	2.00	0.422	0.129	0.339	0.215	0.382	0.602
0.220	2.20	0.422	0.145	0.353	0.229	0.410	0.633
0.220	2.40	0.422	0.158	0.366	0.241	0.433	0.658
0.220	2.60	0.422	0.171	0.378	0.253	0.453	0.678
0.220	2.80	0.422	0.183	0.389	0.263	0.471	0.695
0.220	3.00	0.422	0.194	0.400	0.274	0.486	0.709
0.240	2.00	0.462	0.116	0.333	0.207	0.347	0.557
0.240	2.20	0.462	0.131	0.347	0.220	0.377	0.593
0.240	2.40	0.462	0.145	0.359	0.233	0.402	0.622
0.240	2.60	0.462	0.157	0.371	0.244	0.424	0.645
0.240	2.80	0.462	0.169	0.382	0.255	0.442	0.664
0.240	3.00	0.462	0.180	0.393	0.265	0.459	0.680
0.260	2.00	0.502	0.103	0.328	0.200	0.314	0.513
0.260	2.20	0.502	0.118	0.341	0.213	0.346	0.554
0.260	2.40	0.502	0.132	0.354	0.225	0.373	0.586
0.260	2.60	0.502	0.145	0.366	0.236	0.396	0.612
0.260	2.80	0.502	0.156	0.377	0.247	0.415	0.634
0.260	3.00	0.502	0.167	0.387	0.257	0.433	0.652
0.280	2.00	0.542	0.091	0.323	0.194	0.282	0.468
0.280	2.20	0.542	0.106	0.336	0.207	0.316	0.514
0.280	2.40	0.542	0.120	0.349	0.218	0.344	0.550
0.280	2.60	0.542	0.133	0.360	0.229	0.369	0.579
0.280	2.80	0.542	0.145	0.371	0.240	0.390	0.603
0.280	3.00	0.542	0.156	0.381	0.250	0.408	0.624

## BERÄKNING AV VÄRMEMOTSTÅND FÖR VÄRMEVÄXLARE I JORD

ENLIGT JOHAN CLÆSSON m fl MARKVÄRMEHANDBOKEN 1985

KONDUKTIVITET JORD 1 W/mK

KONDUKTIVITET VÄRMEDRÄNSMATERIAL 2.3 W/mK

KAPACITIVITET JORD 3.5 MJ/m<sup>3</sup>KKAPACITIVITET VÄRMEDRÄNSMATERIAL 2.8 MJ/m<sup>3</sup>K

RÖRRADIE I U-RÖR OCH VÄRMEDRÄN 8.999999E-03 m

DR/VX-RAD m	VX-AVST m	SKÄNKAV m	VÄRMEMOTSTÅND K/(W/m)			JMF-TAL MOT U-RÖR	CYL VX VDRÄN
			CYLVX	U-RÖR	VDRÄN		
0.300	2.00	0.582	0.080	0.319	0.189	0.251	0.424
0.300	2.20	0.582	0.095	0.332	0.201	0.287	0.474
0.300	2.40	0.582	0.109	0.344	0.212	0.317	0.514
0.300	2.60	0.582	0.122	0.356	0.223	0.343	0.546
0.300	2.80	0.582	0.134	0.366	0.233	0.365	0.573
0.300	3.00	0.582	0.145	0.377	0.243	0.384	0.595
0.320	2.00	0.622	0.070	0.316	0.184	0.221	0.379
0.320	2.20	0.622	0.085	0.328	0.196	0.259	0.434
0.320	2.40	0.622	0.099	0.340	0.207	0.290	0.478
0.320	2.60	0.622	0.112	0.351	0.217	0.317	0.513
0.320	2.80	0.622	0.123	0.362	0.227	0.341	0.543
0.320	3.00	0.622	0.134	0.372	0.237	0.361	0.567
0.340	2.00	0.662	0.060	0.313	0.180	0.192	0.334
0.340	2.20	0.662	0.075	0.325	0.191	0.232	0.394
0.340	2.40	0.662	0.089	0.337	0.202	0.265	0.441
0.340	2.60	0.662	0.102	0.348	0.212	0.293	0.480
0.340	2.80	0.662	0.114	0.358	0.222	0.318	0.512
0.340	3.00	0.662	0.125	0.368	0.231	0.339	0.539
0.360	2.00	0.702	0.051	0.310	0.176	0.164	0.289
0.360	2.20	0.702	0.066	0.322	0.187	0.206	0.354
0.360	2.40	0.702	0.080	0.333	0.198	0.240	0.405
0.360	2.60	0.702	0.093	0.344	0.208	0.270	0.447
0.360	2.80	0.702	0.105	0.354	0.217	0.295	0.482
0.360	3.00	0.702	0.116	0.364	0.226	0.317	0.511
0.380	2.00	0.742	0.042	0.308	0.173	0.138	0.245
0.380	2.20	0.742	0.058	0.320	0.183	0.180	0.314
0.380	2.40	0.742	0.071	0.331	0.194	0.216	0.369
0.380	2.60	0.742	0.084	0.341	0.203	0.247	0.414
0.380	2.80	0.742	0.096	0.351	0.213	0.273	0.451
0.380	3.00	0.742	0.107	0.361	0.222	0.297	0.483
0.400	2.00	0.782	0.034	0.307	0.170	0.112	0.201
0.400	2.20	0.782	0.049	0.317	0.180	0.156	0.274
0.400	2.40	0.782	0.063	0.328	0.190	0.193	0.333
0.400	2.60	0.782	0.076	0.338	0.199	0.225	0.381
0.400	2.80	0.782	0.088	0.348	0.209	0.252	0.421
0.400	3.00	0.782	0.099	0.358	0.217	0.276	0.455











Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840256-2  
från Statens råd för byggnadsforskning till CTH,  
Göteborg.

R92:1990

ISBN 91-540-5268-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6801092

Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang

Distribution:  
Svensk Byggtjänst  
171 88 Solna

Cirkapris: 44 kr exkl moms