

Rapport

R32:1982

**Värmelagring
i grundvattenmagasin**

**Fältförsök i kalkstensakvifer,
Landskrona**

**Christer Gedda
Göran Ejdeling**

| | |
|-------------------------------------|------------|
| INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION | |
| Accnr | |
| Plac | <i>Ser</i> |

*K
9/12*

R32:1982

VÄRMELAGRING I GRUNDVATTENMAGASIN

Fältförsök i kalkstensakvifer, Landskrona

Christer Gedda
Göran Ejdeling

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
800685-6 från Statens råd för byggnadsforskning
till Kjessler & Mannerstråle AB, Halmstad.

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

R32:1982

ISBN 91-540-3666-6
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

INNEHÅLL

| | |
|---|----|
| SAMMANFATTNING | 5 |
| 1. INTRODUKTION | 6 |
| 2. KVARTERET TÄRNAN, LANDSKRONA | 7 |
| 3. HYDROGEOLOGI | 8 |
| 4. BEFINTLIGA BRUNNAR | 10 |
| 5. FÄLTFÖRSÖKET | 11 |
| 5.1 Fas I: Laddning | 11 |
| 5.2 Fas II: Lagring | 11 |
| 5.3 Värmeuttag | 13 |
| 5.4 Mätprogram | 13 |
| 6. MATEMATISK SIMULERING | 17 |
| 7. UTVÄRDERING AV FÖRSÖKET | 18 |
| 8. UTVÄRDERING AV ENERGIVINSTEN VID VÄRMELAGRING I AKVIFEREN | 19 |
| 9. FORTSATT FORSKNING | 20 |
| RITNINGAR | |
| 1. Provpumpningsdiagram | 21 |
| 2. Resultat av värmelagrings- försök | 22 |
| BILAGOR | |
| 1. Fysikaliskt-kemiska analyser av grundvattnet | 23 |
| 2. Numerisk simulering av värme- transporten i akviferen | 27 |
| 3. Lagring i kombination med värmepump | 43 |

REFERENSER

Broberg P. & Johansson K. 1979:
Ett hushållningsplanerat kvarter
i Eslöv. Förstudie till stadsbyggnads-
och energiexperiment. (Byggforsknings-
rådet, R16:1979).

FIGURFÖRTECKNING

- Fig.1 Kvarteret Tärnan, Landskrona. Vy
från söder.
- Fig.2 Principen för energilagring i akvifera.
- Fig.3 Geologisk profil
- Fig.4 Sammanställning av borrningsresultaten.
- Fig.5 Plan över kv. Tärnan med brunnars
placering
- Fig.6 Fältförsökets utförande. Principskiss.
- Fig.7 Temperaturprofiler, injektionsbrunn.
- Fig.8 Temperaturförändringar under laddnings-
förloppet vid 4 nivåer.
- Fig.9 Resultat av spårämnesförsök. Litium-
halter fig 4.

SAMMANFATTNING

Effektivt utnyttjande av solenergi och överskotts- värme förutsätter att man har tillgång till an- läggningar för korttids- och säsongslagring. En möjlighet är värmelagring i grundvattenmagasin (akvifer), vilken för närvarande närmare studeras i Sverige.

Olika slags geologiska formationer kan härvid utnyttjas, bl a sedimentärt berg. I Skåne SV om en linje Landskrona - Ystad består den övre delen av berggrunden av grundvattenförande sedimentära kalkstenar.

I centrala Landskrona skall nio lågenergihus byggas på kvarteret Tärnan. Husens uppvärmning skall klaras med värmepump och grundvattenenergi. Grund- vattnets temperatur är här 11° - 12° . Eftersom ett visst värmeöverskott kommer att uppstå under soliga dagar i samband med kylning av en glastäckt gata mellan husen, har möjligheten att lagra värme i grundvattenmagasinet undersökts.

Under sensommaren 1980 har ett fältförsök utförts, varvid två 80 m djupa brunnar med ett inbördes avstånd av ca 40 m använts. Under 10 dygn pumpades grundvatten med kapaciteten 2 l/s ($173 \text{ m}^3/\text{d}$) från den ena brunnen uppvärmdes $13,5^{\circ}$ med en transpor- tabel oljepanna och injekterades därefter i den andra brunnen. Efter 10 dygns lagring pumpades det uppvärmda vattnet upp igen med samma kapacitet. Av den lagrade värmen hade 29 % återvunnits efter 10 dygns utpumpning och efter ytterligare 11 dygns pumpning hade totalt 49% återvunnits. Under laddningens 10 dygn hade ingen värmeövergång skett i akviferen mellan de båda brunnarna, trots att en viss mängd vatten, enligt ett spårämnes- försök, runnit fram redan efter ca 3 timmar.

Matematisk simulering av lagringsförsöket visar att värmen sprids huvudsakligen i akviferens sprick- system, och att dess effektiva värmeledningsför- måga kan bestämmas till ca 20 W/mK.

Resultaten av det nu utförda fältförsöket visar att det är möjligt att lagra energi i kalkstensakviferen.

Beroende på att den tillgängliga överskottsvärmen vid kv. Tärnan är liten i förhållande till grund- vattnets naturliga värmeinhåll, är lagring av värme i akviferen i detta speciella fall inte ekonomiskt lönsam. Därför bör den fortsatta forskning- en i första hand inriktas på utvärdering av kalk- stensakviferens kemiska egenskaper i samband med energiuttaget från grundvattnet med åtföljande återinjektering av avkylt vatten.

1 INTRODUKTION

Effektivt utnyttjande av solenergi och överskotts-
värme förutsätter att man har tillgång till an-
läggningar för korttids- och säsongslagring. En
möjlighet är värmelagring i grundvattenmagasin
(akvifer), vilken för närvarande närmare studeras
i Sverige.

Olika slags geologiska formationer kan härvid ut-
nyttjas, bl a sedimentärt berg. I Skåne SV om en
linje Landskrona - Ystad består den övre delen
av berggrunden av sedimentära kalkstenar.

Under augusti - september 1980 utfördes ett värme-
lagringsförsök i Landskrona. Eftersom detta är det
första försök, som utförts i Sverige med värmelag-
ring i en berggrundsakvifer (kalksten), har vi
redovisat utförandet i detalj.

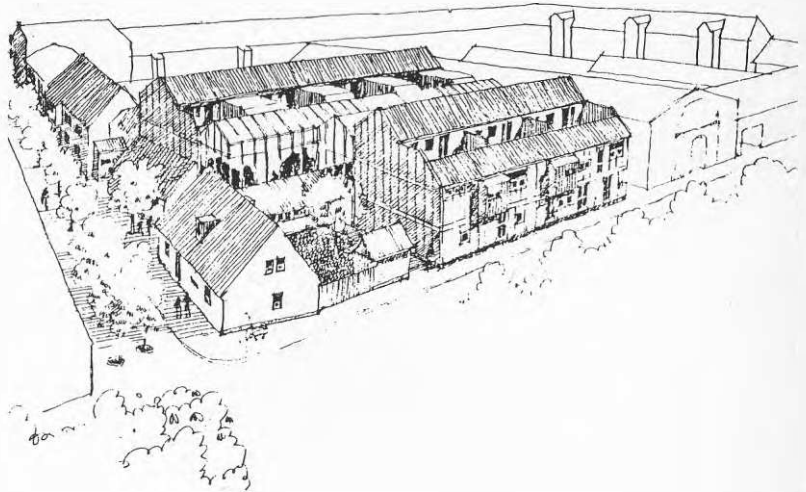


Fig.1 Kvarteret Tärnan, Landskrona. Vy från söder

2 KVARTERET TÄRNAN, LANDSKRONA

En försöksanläggning kallad Aggregata Urbana med lågenergisystem skall byggas på kvarteret Tärnan i den centrala delen av Landskrona. Försöksanläggningen är ett pilotprojekt för ett större stadsbyggnads- och energiexperiment kallat Nya Esle (se BFR rapport R 16:1979).

En glasad gata mellan två bostadslängor skall bli tjäna som en stor solfångare (se fig 1).

Lågenergisystemet är tänkt att byggas upp runt värmepumpar, som skall använda grundvatten för försök med lagring och uttag av värme. Grundvattnet kommer att cirkuleras i ett s k tvåbrunnssystem mellan en varm brunn och en kall brunn.

Systemet är i första hand avsett för värmeuttag och ev korttidslagring (soliga - molniga dagar, fig 2). Försöket har även utförts för att testa om det är möjligt att använda akviferen för säsongslagring (vinter - sommar).

Det maximala erforderliga vattenflödet har beräknats till ca $200 \text{ m}^3/\text{d}$ ($2,3 \text{ l/s}$) med en högsta resp lägsta temperatur hos grundvattnet av $+5^\circ\text{C}$ resp $+20^\circ\text{C}$.

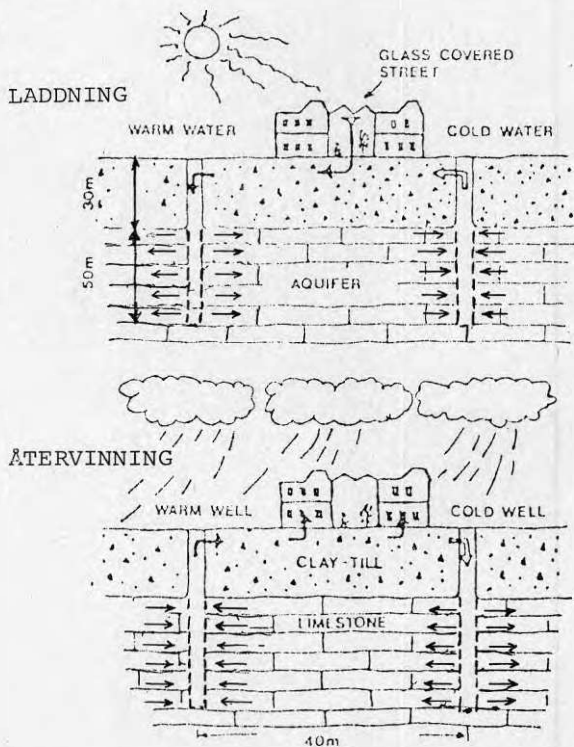


Fig 2. Principen för energilagring i akviferen

3 HYDROGEOLOGI

Jordlagren vid försöksplatsen består av glacial lera och moränlera, vilka har en total mäktighet av ca 30 m (se fig 3). Dessa jordarter har låg permeabilitet (vattengenomsläpplighet) och tillåter inte vattenuttag.

Under de lösa jordlagren påträffas berggrunden, som överst består av kalksten och kalksandsten från kritperioden. Dessa sedimentära bergarter har mycket stor mäktighet (mer än 500 m) och grundvattentillgången i de övre delarna har visat sig vara förhållandevis god.

Grundvattnet förekommer både i kalkstenens porer och i dess spricksystem. För grundvattnets rörelse har sannolikt spricksystemet störst betydelse. Vidare är grundvattnets naturliga rörelsehastighet låg. Vattnets salthalt är runt 400 mg/l, varför det inte kan användas för vattenförsörjning. Således är förutsättningarna goda för uttag av grundvattenenergi.

På grund av grundvattnets relativt långsamma naturliga rörelse har lagring av uppvärmt vatten bedömts vara möjlig.

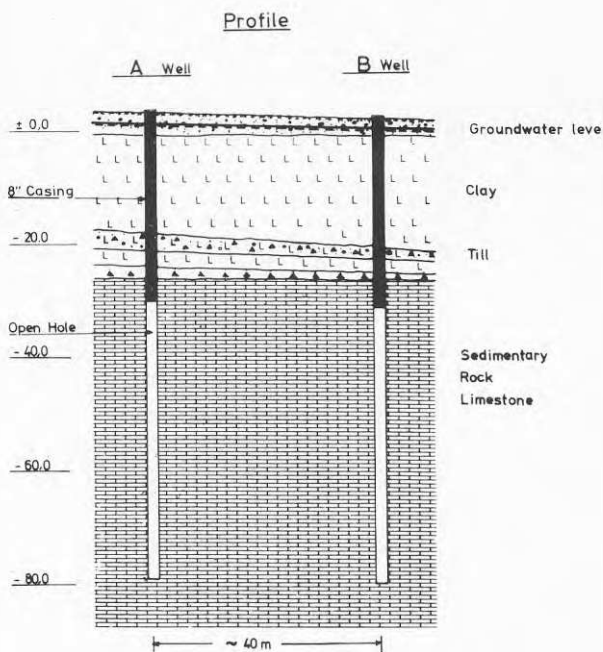
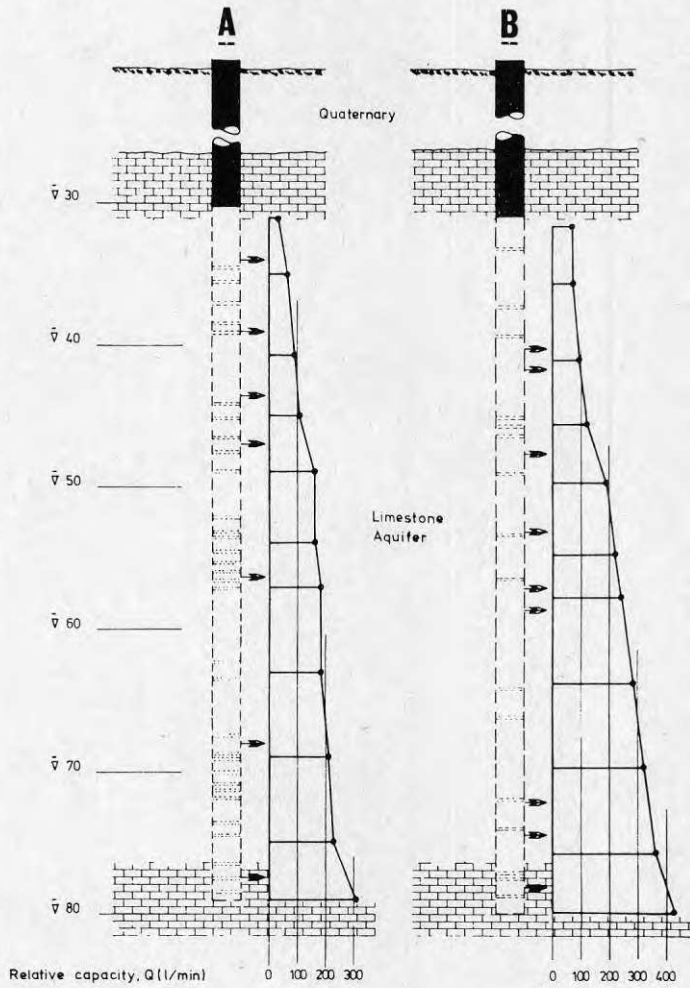


Fig 3. Geologisk profil

Drilling Log



Legend

- Level with noticeable increasing water capacity
- ⋯ Layer with flintstone
- Water capacity tested

BFR 800685-6

Fig 4

Två ca 80 m djupa försöksbrunnar har anlagts med ett inbördes avstånd av ca 40 m (se fig 5). Brunnarna är placerade diagonalt i var sin ände av tomten. Borrhålen har försetts med foderrör i de lösa jordlagren och består av ett ca 50 m långt öppet hål i berggrunden (se fig 3).

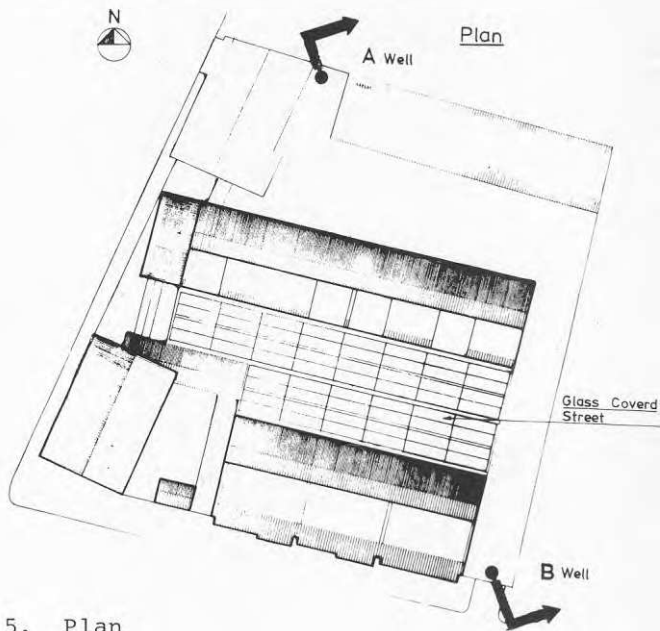


Fig 5. Plan

Brunnarna har provpumpats och resultaten visar att det är möjligt att kontinuerligt ta ut och injektera en grundvattenmängd av mer än 240 m³/d (se ritning 1). Grundvattnets temperatur var 11-12°C och den erforderliga uppföringshöjden för att pumpa upp och injektera vattnet är mindre än 10 m vattenpelare.

Vid provpumpningen togs vattenprover för fysikalisk-kemisk analys (se bil 1). Vattnets kvalitet är typisk för den aktuella akviferen med bl a hög hårdhet och relativt hög järnhalt. För att utvärdera effekten av en uppvärmning av vattnet genomfördes laboratorieförsök. Vattnet värmdes upp först till 80°C, med resultat att kalk fälldes ut och pH ökade. Vid uppvärmning till 30°C skedde ingen sådan utfällning (se bil 1).

För undvikande av utfällningsproblem bör alltså relativt måttliga temperaturhöjningar göras vid värmeenergilagring.

5 FÄLTFÖRSÖKET

För att undersöka möjligheterna att injicera uppvärmt vatten och att senare återvinna den lagrade värmen genomfördes ett fältförsök under augusti - september 1980.

Speciellt skulle den eventuella risken för "kortslutning" mellan injektions- och uttagsbrunnen undersökas. Eventuell förekomst av kraftigt vattenförande horisontella sprickor skulle kunna ge en sådan effekt.

Beroende på resultaten av ovannämnda laboratorieförsök valdes att arbeta med en temperaturhöjning av ca $13,5^{\circ}\text{C}$.

5.1 Fas I: Laddning

Under tiden 1980-08-06 till 1980-08-16 (9,3 dygn) pumpades ca 2 l/s eller $173 \text{ m}^3/\text{d}$ grundvatten från brunn A, värmdes upp till ca 25°C och injicerades därefter i brunn B (se fig 6).

Uppvärmningen skedde med en transportabel oljepanna, vilken kunde leverera maximalt 110.000 kcal/h (128 kW).

Beroende på vissa intrimningsproblem med pannan inträffade ett par avbrott i pumpningen under det första dygnet. Pumpkapaciteten och oljepannans effekt justerades så, att det uppumpade vattnets temperatur ökades ca $13,5^{\circ}\text{C}$. Det injicerade vattnets temperatur var alltså ca 25°C . Temperaturhöjningen registrerades med hjälp av två temperaturgivare kopplade till en kontinuerlig skrivare.

Temperaturen hos det uppumpade vattnet var $11,6^{\circ}\text{C}$ under de första två dyggen och steg sedan svagt till $11,8^{\circ}\text{C}$ det tionde dygnet, när uppladdningen avbröts.

Avsänkningen var i uttagsbrunnen ca 5,1 m och överhöjningen i injektionsbrunnen var ca 1,6 m.

Totalt pumpades 1588 m^3 vatten, som tillfördes totalt 24,8 MWh energi.

5.2 Fas II: Lagring

Under tiden 1980-08-16 till 1980-08-26 (10 dygn) skulle den tillförda energin lagras i grundvattenmagasinet.

För att kunna utföra vissa observationer av vattentemperaturen runt brunnarna gjordes två korta testpumpningar den 18 och 21 augusti. Vid varje tillfälle pumpades i två timmar ur brunn B och

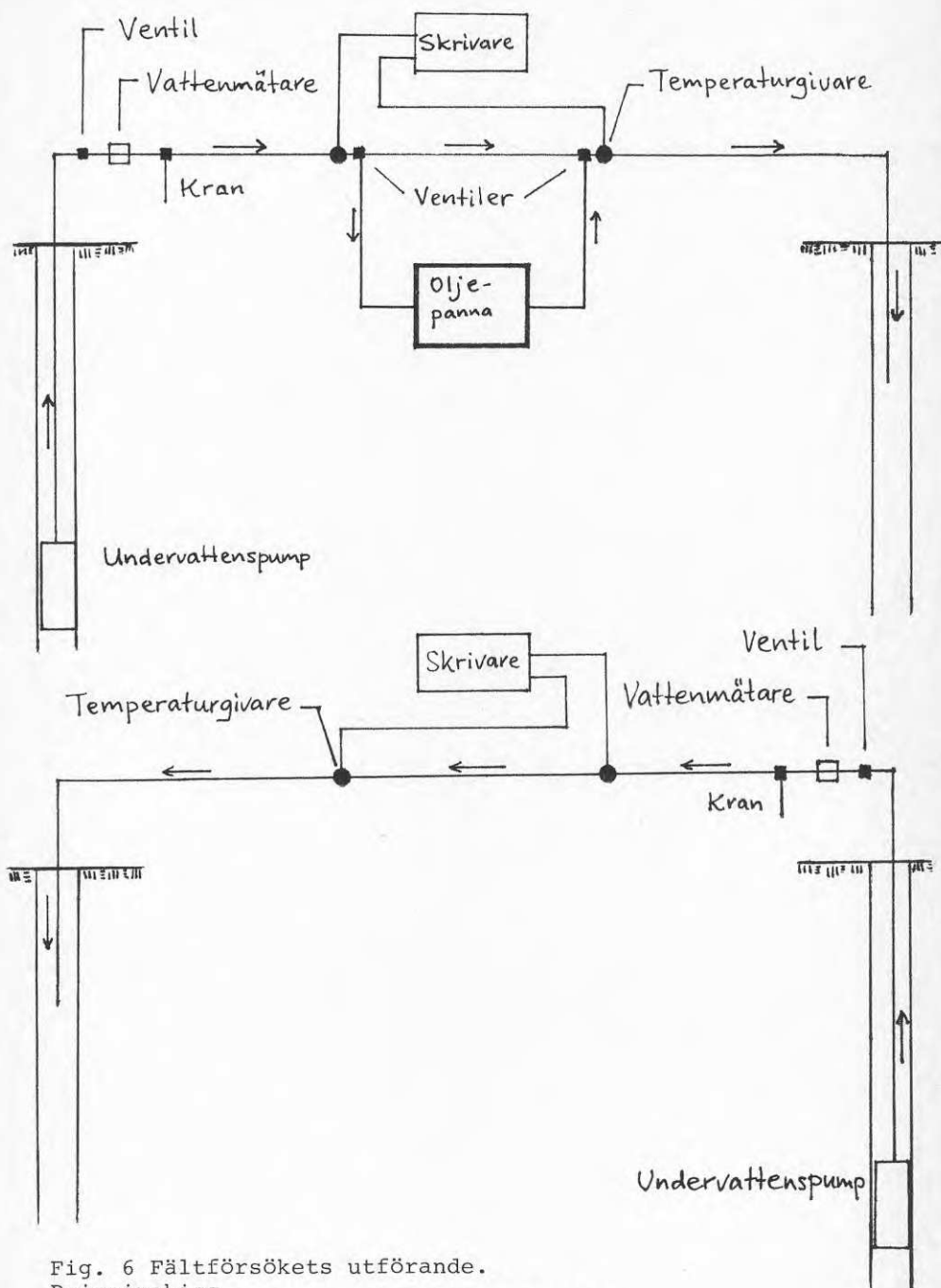


Fig. 6 Fältförsökets utförande.
Principskiss
Överst värmelagring; underst återvinning.

vattnet injicerades i brunn A.

På detta sätt togs ca 30 m³ upp och temperaturen på det uppumpade grundvattnet var vid den första testen 20,3°C och vid den andra 18,8°C.

5.3 Värmeuttag

Under tiden 1980-08-26 till 1980-09-15 pumpades ca 2 l/s från brunn B och injicerades i brunn A. Temperaturen hos det uppumpade vattnet var första dagen +17,2°C och sjönk successivt till +13,4°C den 20:e dagen efter pumpstart (se ritning nr 2)

5.4 Mätprogram

Före försökets start loggades temperaturfördelningen i båda brunnarna. Temperaturen hos det uppumpade vattnet var 11,6°C vid försökets start. Temperaturprofilen framgår av figur 7.

Under pumpningen mättes temperaturen kontinuerligt med hjälp av två temperaturgivare monterade i vattenledningen mellan brunnarna; den ena före oljepannan, den andra efter. Givarna var båda kopplade till en skrivare.

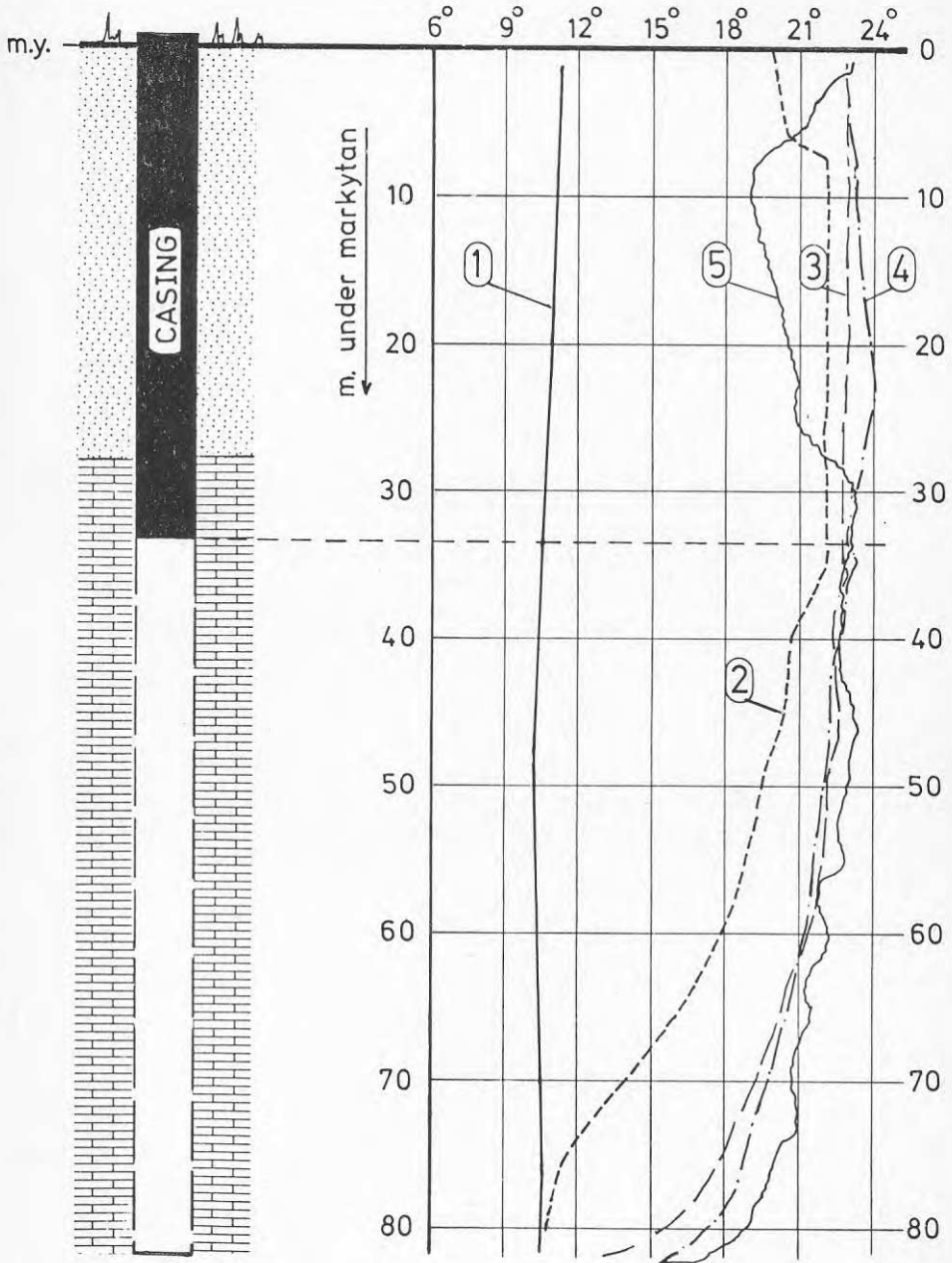
Förutom de kontinuerliga temperaturmätningarna gjordes manuella mätningar av det uppumpade vattnets temperatur med precisionstermometer.

Pumpkapaciteten mättes med en summerande vattenmätare, monterad på ledningen mellan brunnarna. Vattennivån i brunnarna mättes med ljuslod. En principskiss över försöksutrustningen visas i figur 6.

Vid 5 tillfällen mättes temperaturfördelningen i brunn B med en kontinuerligt registrerande logg (se figurer 7 och 8). Detta utfördes av personal från Lunds tekniska högskola. Tyvärr skadades loggningsutrustningen vid mätningar på annan plats så allvarligt, att några temperaturloggningar inte kunde utföras efter den 15 augusti.

För att studera grundvattnets rörelse mellan de två brunnarna genomfördes även ett spårämnesförsök. Vid pumpningens start tillsattes 10 kg litiumklorid (LiCl) till brunn B (injektionsbrunnen). Vattenprover togs på det ur brunn A pumpade vattnet, och dess halt av litium analyserades. Resultaten framgår av figur 9.

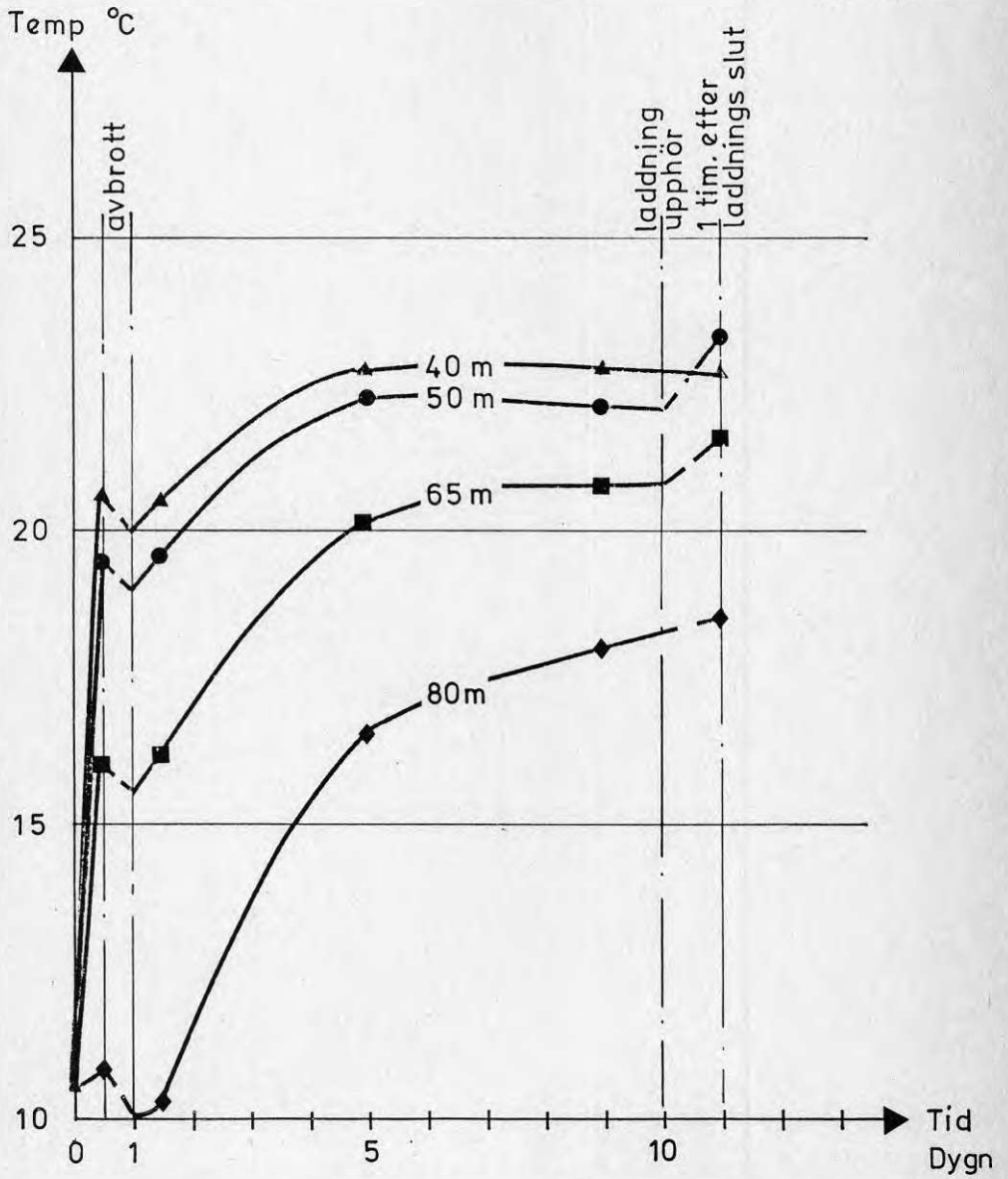
- | | |
|----------------------|--------------------|
| ① FÖRE LADDNING | ④ 9 DYGNS LADDNING |
| ② 6 TIMMARS LADDNING | ⑤ 1 TIMMES LAGRING |
| ③ 5 DYGNS LADDNING | |



brunn B

Énergilagringprojekt, BFR 800685-6
 Kv. Tärnan - Landskrona
 Temperaturprofiler, injektionsbrunn

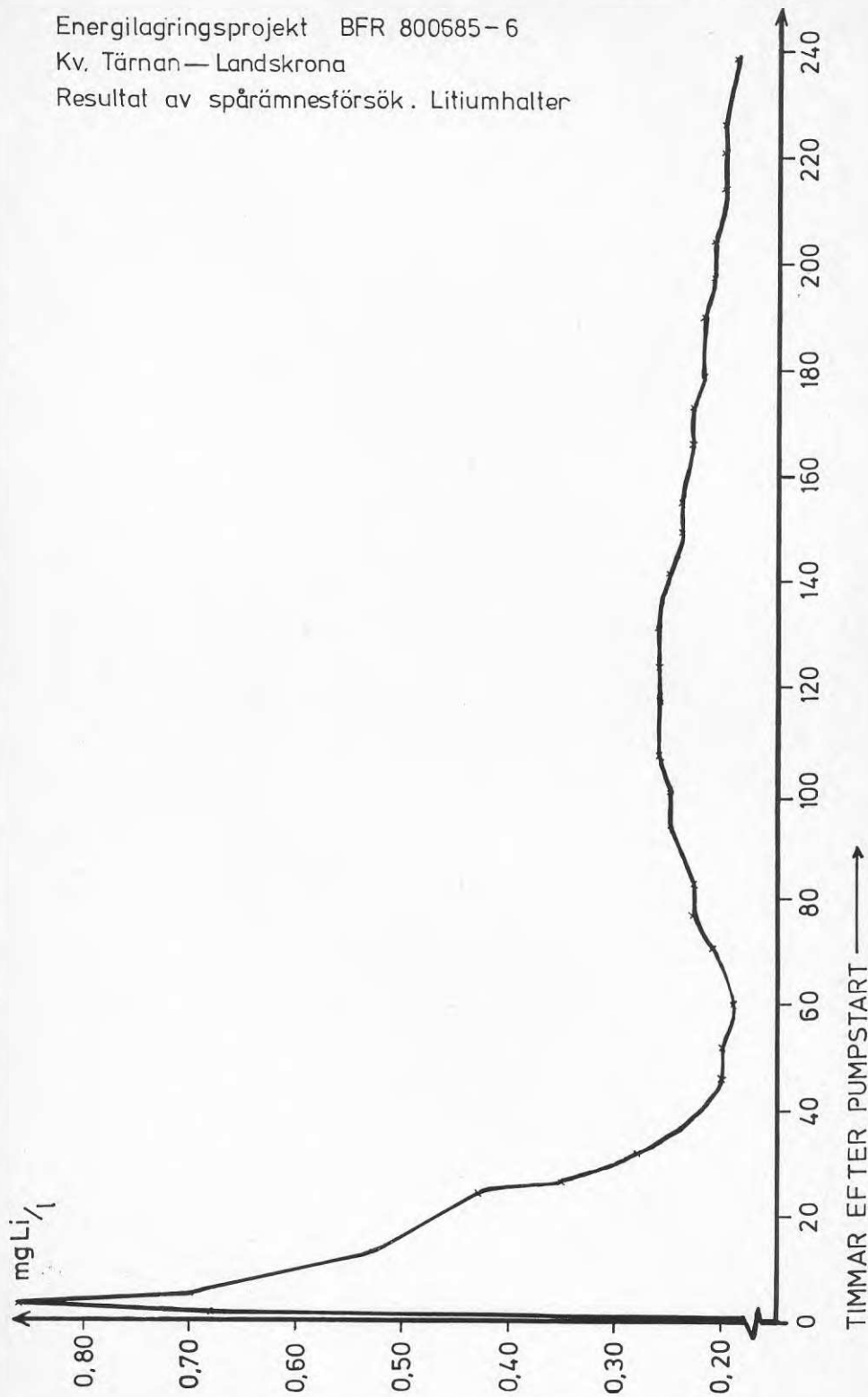
Energilagringsprojekt BFR 800685-6
 Kv Tärnan - Landskrona
 Temperaturförändring under
 laddningsförloppet vid 4 nivåer



Energilagringsprojekt BFR 800685-6

Kv. Tärnan—Landskrona

Resultat av spårämnesförsök. Litiumhalter



För att förklara de erhållna mätresultaten och för att kvantitativt beskriva akviferens reaktion på försöket har en matematisk modell för simulering av värmetransporten använts. Beräkningarna har utförts vid Institutionen för matematisk fysik vid Lunds tekniska högskola av Johan Claesson och Göran Hellström. Resultaten, som redovisas i bilaga 2, kan sammanfattas enligt följande:

En numerisk modell har använts för att simulera lagringsförloppet. Vattenflödet har antagits vara radiellt och ha olika storlek i olika horisontella skikt. Fördelningen av flödet har beräknats med stöd av bl a borrprotokollet från respektive brunn. Detta är den enda inhomogenitet i akviferens hydrauliska egenskaper, som beaktats i beräkningarna. I övrigt har akviferen antagits vara homogen. Temperaturen hos det uppumpade vattnet under uttagsperioden har studerats.

Akviferens effektiva värmeledningsförmåga har antagits bero av bergartens och vattnets värmeledningsförmåga samt av dispersion p g a inhomogent flöde. Bäst överensstämmelse mellan uppmätta temperaturer och beräknade värden erhöles med antagande om en effektiv värmeledningsförmåga av 20 W/mK, vilket innebär att flödet är mycket inhomogent. (I en akvifer med i stort sett homogent flöde är 5 W/mK ett rimligt värde). Flödet synes alltså till stor del ske i ett spricksystem, vilket kan stämma med vad som är känt om berggrundens utseende.

7 UTVÄRDERING AV FÖRSÖKET

Försöket visar att det är möjligt att kontinuerligt ta ut 2 l/s (170 m³/d), värma upp detta vatten och därefter återföra det till akviferen i den andra brunnen.

Dessutom framgår att värmen från det uppvärmda vattnet inte når uttagsbrunnen under en tidsrymd av 10 dygn. Däremot tyder spårämnesförsöket på att en viss vattenmängd troligen rör sig relativt snabbt mellan de två brunnarna.

Spårämnesundersökningarna visar att litiumhalten har ett första distinkt maxvärde redan efter 3 tim och sedan ett andra mera diffust maxvärde efter ca 120 timmar. Den första toppen har tolkats som resultatet av ett direkt vattenflöde i en spricka mellan de två brunnarna, medan den andra toppen motsvarar den tid som huvudflödet kräver för att nå fram.

Det förstnämnda flödet kan ske i en enskild spricka med god kontinuitet mellan brunnarna eller troligare i en sprickrik översta del av berggrunden.

Den vattenmängd, som rör sig snabbt mellan brunnarna måste dock vara förhållandevis liten, eftersom någon temperaturökning av det uppumpade vattnet inte märktes under hela injektionsperioden (9 dygn).

Efter 10 dygns lagring är det möjligt att återvinna en stor del av den lagrade värmemängden. Under de första 9 dygnens pumpning återvanns 29 % av den lagrade värmemängden. Efter ytterligare 11 dygn hade totalt 49 % återvunnits.

Att temperaturen sjunker så pass snabbt under lagringsfasen beror troligen på att akviferen består av relativt stora block med sprickor emellan.

Blocken i brunnens närhet har inte hunnit värmas upp helt under lagringsfasen. Under vilofasen utjämnas temperaturen i blocken, varför vattnets temperatur sjunker. Detta förhållande styrks även av resultaten vid värmeuttaget. Vatten med förhöjd temperatur kunde tas ut under avsevärt längre tid än lagringstiden.

8 UTVÄRDERING AV ENERGIVINSTEN VID VÄRME-
LAGRING I AKVIFEREN

Sydkraft har deltagit i projektets styrgrupp och dessutom bidragit med mätutrustning under fältförsöket.

På ett tidigt stadium av experimenten framstod möjligheterna att utvinna grundvatten med en naturlig temperatur på mer än 10°C som mycket goda. Värmen i detta vatten skulle med en värmepump kunna utnyttjas för uppvärmning av husen.

Eftersom man räknar med att det kommer att uppstå ett kylbehov i kv Tärnan under sommaren, låg alternativet att lagra denna överskottsvärme nära till hands.

Sydkraft har nu i sina beräkningar (bil 3) funnit att den tillgängliga överskottsvärmen är så begränsad, att det inte skulle vara lönsamt att lagra den i akviferen. Energivinsten i detta fall med 9 radhus skulle vara av storleksordningen 1%.

Orsaken till detta är framför allt att den tillgängliga "naturliga" grundvattenenergin är tillräcklig, även utan värmelagring. Här finns inte heller några motstående vattenförsörjningsintressen. Dessutom är brunnarna från energilagringssynpunkt alltför långa.

Slutsatsen blir alltså att värmelagring i akviferen inte är ekonomiskt lönsam i detta speciella fall.

9 FORTSATT FORSKNING

Det nu utförda försöket visar att lagring av uppvärmt vatten inte är lönsamt i kvarteret Tärnan, mest beroende på att mängden tillgänglig över-skottsenergi är liten i förhållande till akviferens energipotential. För att kunna studera kalkstensakviferens lagringsegenskaper bör i stället det i värmepumpen avkylda vattnet återinjekteras. Det är nämligen lika givande från forskningssynpunkt att studera akviferens reaktion på avkyllt vatten som på uppvärmt vatten.

Eftersom akviferen under kv Tärnan har en stor energipotential, bör försökshuset utrustas med värmepump som utnyttjar grundvattnets energiinnehåll. Vattnet tas upp ur brunn A, passerar värmepumpen där det kyls av och injekteras därefter i brunn B.

För att kunna mäta det kalla vattnets inverkan på akviferen bör minst två observationshål anläggas mellan den "kalla brunnen" och den "varma".

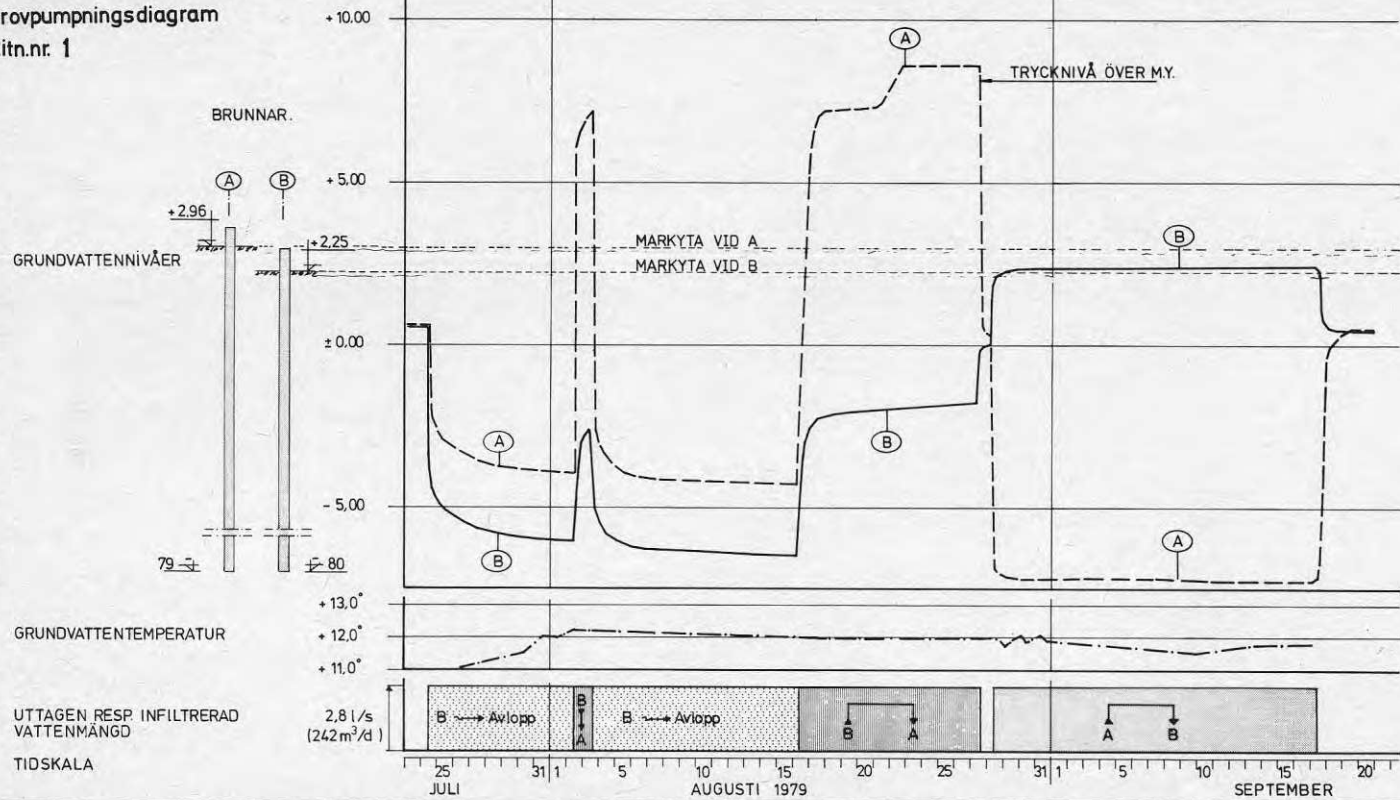
Kalkstensberggrund av den typ, som finns i Landskrona, förekommer i hela sydvästra Skåne. Grundvattenuttag för energiutnyttjande kan komma i konflikt med vattenförsörjningsintressen, om inte återinjektering sker. Det är därför av stort intresse att ett pilotprojekt med uttag - återinjektering kommer till stånd. Ett problem vid återinjektering är risken för att få upp det avkylda vattnet ur uttagsbrunnen, s k "kortslutning". Detta kan inträffa om avståndet mellan brunnarna är för kort eller om det finns öppna sprickor, som förbinder brunnarna.

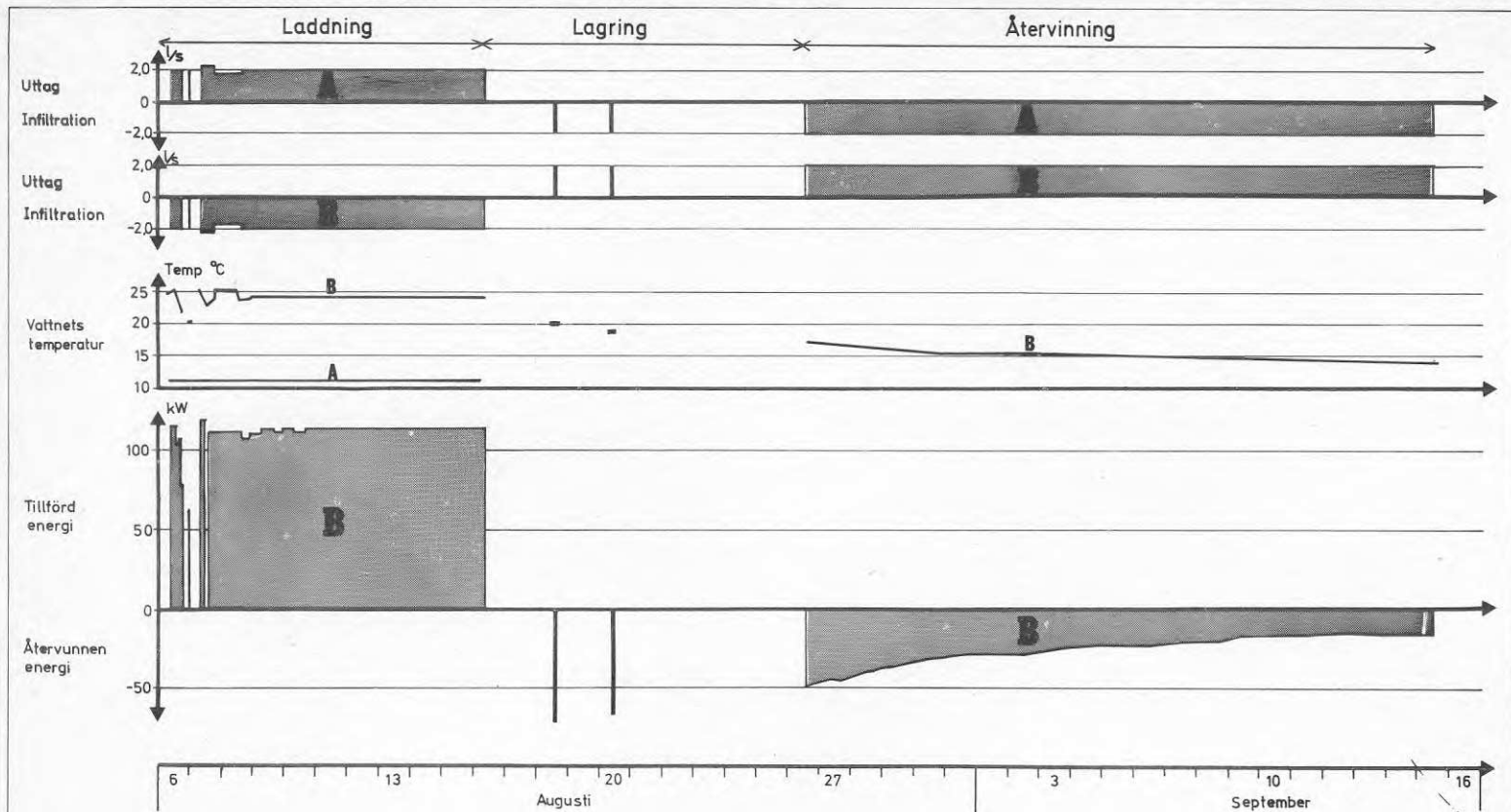
Kvarteret Tärnan är ett lämpligt forskningsobjekt av flera orsaker:

- Husens energisystem kommer att följas av en forskningsgrupp vid Lunds tekniska högskola och ett omfattande mätprogram kommer att pågå.
- Kvarteret Tärnan är ett litet objekt, endast 9 radhus.
- Brunnarna finns, vilka har provpumpats och visat sig ge tillräckliga vattenmängder.
- Kalkstensberggrunden vid kv Tärnan är av samma typ som i en stor del av sydvästra Skåne.

För att optimalt kunna utnyttja akviferen bör såväl brunnarna som observationshålen undersökas medelst borrhålsloggning, för att utröna var de mest vattenförande partierna är belägna. Om en god bild av berggrundens spricksystem föreligger, kan resultaten tolkas bättre och eventuellt mindre lämpliga delar av brunnarna avskärmade.

Energilagringsprojekt,
Kv. Tärnan—Landskrona
Grundvattenundersökningar
Provpumpningsdiagram
Ritn.nr. 1





Energilagringssprojekt,
 Kv. Tärnan—Landskrona
 Resultat av värmelagringssörsök
 Ritn.nr. 2



PROTOKOLL

ÖVER FYSIKALISK-KEMISK OCH BAKTERIOLOGISK VATTENUNDERSÖKNING

Uppdragsgivare KM, Halmstad Litt. 3910422

Provets art Rävatten

Provtagningsplats Landskrona

Provet märkt Prov A

Provet taget den 1979-07-04 kl. _____ av Christer Gedda

Provet inkom den 1979-07-05 kl. 0800

| FYSIKALISK-KEMISK UNDERSÖKNING | RESULTAT | * | UTLÅTANDE OCH BEDÖMNING | |
|---|----------|------|--|---|
| Temperatur vid provtagning (enl. uppg.). | | | Efter bedömning enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i fysikalisk-kemiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt såsom | |
| Temperatur vid upppackningen | | | | |
| Färgvärde mg/l Pt | 75 | | | |
| Grumlighet FTU | 48 | | | |
| Lukt (styrka, art) | ingen | | | |
| Smak (styrka, art) | -- | | | |
| Bottensats | liten | | | |
| Permanganatförbrukning mg/l KMnO ₄ | 18 | | | |
| Glödningsrest (beräkn.) mg/l | 1183 | | | |
| Specifik ledningsförmåga 25°C mS/m | 186 | | | |
| pH, pot. | 7,5 | 8,2 | | |
| Ammonium, NH ₄ mg/l | 0,5 | | | |
| Totalhårdhet mg/l Ca | 94 | 77 | | |
| Totalhårdhet, tyska grader | 13,1 | 10,8 | | |
| Järn, Fe, mg/l | 2,0 | | Järn ²⁺ = 0,07 | |
| Mangan, Mn, " | < 0,05 | | | |
| Aluminium Al, " | -- | | | |
| Bikarbonat, HCO ₃ , " | 550 | 458 | | |
| Klorid, Cl, " | 310 | | * Efter uppvärmning till 80°C och filtrering. | |
| Fluorid, F, " | -- | | | |
| Sulfat, SO ₄ , " | 66 | | | |
| Nitrat, NO ₃ , " | < 2 | | | |
| Nitrit, NO ₂ , " | < 0,01 | | | |
| Fosfat, PO ₄ , " | < 0,1 | | | |
| Aggressiv kolsyra, CO ₂ , " | 0 | | | |
| BAKTERIOLOGISK UNDERSÖKNING | | | | |
| Totala antalet bakterier (22°C) per ml | | | | Efter bedömning enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i bakteriologiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt såsom |
| Totala antalet bakterier (35°C) per ml | | | | |
| Totala antalet coliforma bakterier (35°C) ... per 100 ml | | | | |
| Antalet termotabila coliforma bakterier (44°C) per 100 ml | | | | |
| Anmärkningar: | | | | |

Avskrift av protokollet har tillställts: Hälsovårdsnämnden Länsläkaren Veterinärstyrelsen Länsveterinären
 Naturvårdsenheten Maskinisten

Tecknet < betyder att halten understiger angivet siffrvärde.

Stig Holtzberg



S. STRANDGATAN 7, 252 24 HELSINGBORG, TEL. 042/14 41 85
SKARABORGSVAGEN 7, 502 34 BORÅS, TEL. 033/13 05 04
KUNGSGATAN 2, 302 45 HALMSTAD, TEL. 035/11 90 25
NORRA ESPLANADEN 41, 352 33 VÄXJÖ, TEL. 0470/233 00
SIMHALLEN, 262 00 ÄNGELHOLM, TEL. 0431/158 79

Datum Halmstad
1979-08-24

PROTOKOLL

ÖVER FYSIKALISK-KEMISK OCH BAKTERIOLOGISK VATTENUNDERSÖKNING

Uppdragsgivare Kjessler & Mannerstråle AB, Halmstad Litt 3910422
Provets art Rävatten
Provtagningsplats Landskrona
Provet märkt Borra b.
Provet taget den 1979-08-02 kl. av Christer Gedda
Provet inkom den 1979-08-02 kl.

| FYSIKALISK-KEMISK UNDERSÖKNING | RESULTAT | UTLÅTANDE OCH BEDÖMNING |
|--|----------|---|
| Temperatur vid provtagning (enl. uppg.). | | Efter bedömmande enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i fysikaliskt-kemiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt såsom |
| Temperatur vid upppackningen | | |
| Färgvärde mg/l Pt | 40 | |
| Grumlighet FTU | 4,3 | |
| Lukt (styrka, art) | ingen | |
| Smak (styrka, art) | -- | |
| Bottensats | ingen | |
| Permanganatförbrukning mg/l KMnO ₄ | 14 | |
| Glödningsrest (beräkn.) mg/l | 1191 | |
| Specifik ledningsförmåga 25°C mS/m | 1873 | |
| pH, pot. | 7,6 | |
| Ammonium, NH ₄ mg/l | 1,5 | |
| Totalhårdhet mg/l Ca | 92 | |
| Totalhårdhet, tyska grader | 13 | |
| Järn, Fe, mg/l | 1,1 | |
| Mangan, Mn, " | < 0,05 | |
| Aluminium Al, " | -- | |
| Bikarbonat, HCO ₃ , " | 538 | |
| Klorid, Cl, " | 320 | |
| Fluorid, F, " | -- | |
| Sulfat, SO ₄ , " | 62 | |
| Nitrat, NO ₃ , " | < 2 | |
| Nitrit, NO ₂ , " | < 0,01 | |
| Fosfat, PO ₄ , " | < 0,1 | |
| Aggressiv kolsyra, CO ₂ , " | < 1 | |
| Efter uppvärmning till 20°C Ca = | 89 | |
| Efter uppvärmning till 30°C Ca = | 89 | |
| BAKTERIOLOGISK UNDERSÖKNING | | |
| Totala antalet bakterier (22°C) per ml | | Efter bedömmande enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i bakteriologiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt såsom |
| Totala antalet bakterier (35°C) per ml | | |
| Totala antalet coliforma bakterier (35°C) per 100 ml | | |
| Antalet termostabila coliforma bakterier (44°C) per 100 ml | | |
| Anmärkingar: | | |

Avskrift av protokollet har tillställts: Hälsovårdsnämnden Länsläkaren Veterinärstyrelsen Länsveterinären
 Naturvårdsenheten Maskinisten

Tecknet < betyder att halten understiger angivet siffrvärde.

Essie Andersson



S. STRANDGATAN 7, 252 24 HELSINGBORG, TEL. 042/14 41 85
SKARABORGSVAGEN 7, 502 34 BORAS, TEL. 033/13 05 04
KUNGSGATAN 2, 302 45 HALMSTAD, TEL. 035/11 90 25
NORRA ESPLANADEN 41, 352 33 VAXJÖ, TEL. 0470/233 00
SIMHALLEN, 262 00 ANGELHOLM, TEL. 0431/158 79

Datum Helsingborg
1979-09-24

PROTOKOLL

ÖVER FYSIKALISK-KEMISK OCH BAKTERIOLOGISK VATTENUNDERSÖKNING

Uppdragsgivare Kjessler o Mannerstråle AB KM-Litt: 3910422
 Provetts art Grundvatten
 Provtagningsplats Landskröna, kv. Tärnan, borra A, orovpumpning
 Provet märkt 14
 Provet taget den 1979-09-10 kl av
 Provet inkom den 1979-09-10 kl 1600

| FYSIKALISK-KEMISK UNDERSÖKNING | RESULTAT | UTLÅTANDE OCH BEDÖMNING |
|--|-------------------------|---|
| Temperatur vid provtagning (enl. uppg.) | 11,6 | Efter bedömning enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i fysikaliskt-kemiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt |
| Temperatur vid upppackningen | | |
| Färgvärde mg/l Pt | 12 | |
| Grumlighet FTU | svag op | |
| Lukt (styrka, art) | tydlig H ₂ S | |
| Smak (styrka, art) | - | |
| Bottensats | ingen | |
| Permanganatförbrukning mg/l KMnO ₄ | 15 | |
| Glödgningsrest (beräkn.) mg/l | 1316 | |
| Specifik ledningsförmåga 25°C mS/m | 207 | |
| pH, pot. | 7,4 | Efter uppvärmning till 30° i 15 min och avkylning till 20° befanns pH-värdet vara 7,6 och Ca-halten 103 mg/l Vattenmätare: 19817 m ³ |
| Ammonium, NH ₄ mg/l | 1,4 | |
| Totalhårdhet mg/l Ca | 103 | |
| Totalhårdhet, tyska grader | 14,4 | |
| Järn, Fe, mg/l | 1,1 | |
| Mangan, Mn, " | <0,05 | |
| Aluminium Al, " | - | |
| Bikarbonat, HCO ₃ , " | 531 | |
| Klorid, Cl, " | 430 | |
| Fluorid, F, " | - | |
| Sulfat, SO ₄ , " | 45 | |
| Nitrat, NO ₃ , " | < 2 | |
| Nitrit, NO ₂ , " | 0,01 | |
| Fosfat, PO ₄ , " | <0,1 | |
| Aggressiv kolsyra, CO ₂ , " | 0 | |
| Svavelväte, H ₂ S | 0,2 | |
| BAKTERIOLOGISK UNDERSÖKNING | | |
| Totala antalet bakterier (22°C) per ml | | Efter bedömning enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i bakteriologiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt |
| Totala antalet bakterier (35°C) per ml | | |
| Totala antalet coliforma bakterier (35°C) ... per 100 ml | | |
| Antalet termostabila coliforma bakterier (44°C) per 100 ml | | |
| Anmärkningar: | | såsom |

Avskrift av protokollet har tillställts: Hälsovårdsnämnden Länsläkaren Veterinärstyrelsen Länsveterinären
 Naturvårdsenheten Maskinisten

Tecknet < betyder att halten understiger angivet siffrvärde.

Olle Bragwad
 Olle Bragwad



S. STRANDGATAN 7, 252 24 HELSINGBORG, TEL. 042/14 41 85
SKARABORGSVÄGEN 7, 502 34 BORÅS, TEL. 033/13 05 04
KUNGSÅGATAN 2, 302 45 HÄLMSTAD, TEL. 035/11 90 25
NORRA ESPLANADEN 41, 352 33 VÄXJÖ, TEL. 0470/233 00
SIMHALLEN, 262 00 ÄNGELHOLM, TEL. 0431/158 79

Datum Helsingborg
1979-09-24

PROTOKOLL

ÖVER FYSIKALISK-KEMISK OCH BAKTERIOLOGISK VATTENUNDERSÖKNING

Uppdragsgivare Kjessler o Mannerstråle AB KM-Litt: 3910422
302 45 Halmstad
Provets art Grundvatten
Provtagningsplats Landskrona, kv. Tärnan, borra B, provpumpning
Provet märkt 8
Provet taget den 1979-08-23 kl av B Johansson
Provet inkom den 1979-08-23 kl 1430

| FYSIKALISK-KEMISK UNDERSÖKNING | RESULTAT | UTLÅTANDE OCH BEDÖMNING |
|---|-------------------------|--|
| Temperatur vid provtagning (enl. uppg.). Temperatur vid uppackningen | 12,1 | Efter bedömande enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i fysikaliskt-kemiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt såsom |
| Färgvärde mg/l Pt | 10 | |
| Grumlighet FTU | ingen | |
| Lukt (styrka, art) | tydlig H ₂ S | |
| Smak (styrka, art) | - | |
| Bottensats | ingen | |
| Permanganatförbrukning mg/l KMnO ₄ | 19 | |
| Glödgningsrest (beräkn.) mg/l | 1225 | |
| Specifik ledningsförmåga 25°C mS/m | 193 | |
| pH, pot. | 7,4 | |
| Ammonium, NH ₄ mg/l | 1,3 | Efter uppvärmning till 30° i 15 min och avkylning till 20° befanns pH-värdet vara 7,6 och Ca-halten 103 mg/l |
| Totalhårdhet mg/l Ca | 102 | |
| Totalhårdhet, tyska grader | 14,3 | |
| Järn, Fe, mg/l | 1,1 | |
| Mangan, Mn, " | <0,05 | |
| Aluminium Al, " | - | |
| Bikarbonat, HCO ₃ , " | 488 | |
| Klorid, Cl, " | 415 | |
| Fluorid, F, " | - | |
| Sulfat, SO ₄ , " | 30 | |
| Nitrat, NO ₃ , " | < 2 | |
| Nitrit, NO ₂ , " | 0,01 | |
| Fosfat, PO ₄ , " | <0,1 | |
| Aggressiv kolsyra, CO ₂ , " | 0 | |
| Svavelväte, H ₂ S | 0,06 | |
| BAKTERIOLOGISK UNDERSÖKNING | | |
| Totala antalet bakterier (22°C) per ml | | Efter bedömande enligt gällande råd och anvisningar har vattnet vid detta undersökningstillfälle i bakteriologiskt avseende befunnits vara <input type="checkbox"/> tjänligt <input type="checkbox"/> med tvekan tjänligt <input type="checkbox"/> otjänligt såsom |
| Totala antalet bakterier (35°C) per ml | | |
| Totala antalet coliforma bakterier (35°C) per 100 ml | | |
| Antalet termostabila coliforma bakterier (44°C) per 100 ml | | |
| Anmärkningar: | | |

Avskrift av protokollet har tillställts: Hälsovårdsnämnden Länsläkaren Veterinärstyrelsen Länsveterinären
 Naturvårdsenheten Maskinisten

Tecknet < betyder att halten understiger angivet siffervärde.

Olle Bragwud
Olle Bragwud

NUMERISK SIMULERING AV VÄRMETRANSPORTEN I
AKVIFEREN

Projekt: Kvarteret Tärnan i Landskrona

Göran Hellström
Johan Claesson

Institutionen för matematisk fysik
Lunds Tekniska Högskola

Denna studie har utförts i samarbete med
Christer Gedda, Kjessler & Mannerstråle AB,
Halmstad
Leif Bjelm, avdelningen för geologi, Lunds
Tekniska Högskola, Lund

I. INTRODUKTION

Vid kvarteret Tärnan i Landskrona har ett försök med lagring av 1700 m³ varmt vatten i en kalkstensakvifer genomförts. Försöket varade i 40 dagar. Avsikten var att utvärdera möjligheten att utnyttja akviferen för säsongslagring av varmt vatten, som under vinterhalvåret utgör värmekälla för värmepump. Det varma vattnet ger därvid en högre värmefaktor för värmepumpen än grundvattnet vid naturlig temperatur. Värmebehovet ges av 9 enfamiljs-hus.

Denna studie avser att utifrån mätresultat beskriva värmetransporten i akviferen.

II. AKVIFERLAGRINGSSYSTEM

Lagringssystemet utgörs av två brunnar som penetrerar ett mäktigt grundvattenförande skikt under Landskrona. Akviferen består av sprickig kalksten med inslag av flintlager. Den är täckt av ett 28 meter tjockt lager av moränlera med låg permeabilitet. Brunnarna når ett djup av 82 meter och är placerade med inbördes avstånd av 40 meter. Överföring av vatten mellan brunn och akvifer sker mellan 32 och 82 meters djup. Brunnarna ingår i ett slutet cirkulationssystem med låg nettokonsumtion av grundvatten. Under sommaren pumpas vatten från den ena brunnen, uppvärms och injekteras i den andra brunnen. Under vintern är cirkulationen omvänd.

III. MÄTRESULTAT

Vid några inledande pumptester uppmättes den relativa vattenföringen för olika skikt i akviferen. Se figur 1. Flintstenslager samt nivåer med märkbart högre kapacitet har indikerats. Dessa värden visar att akviferen är mycket inhomogen och att en stor del av vattenflödet sker i sprickplan. Notera att 10% respektive 16% av vattenflödet i "kall brunn" respektive "varm brunn" sker på den översta metern.

Under lagringsförsöket injekterades 1700 m^3 vatten med en temperatur av 25.3°C under 10 dagar i "varm brunn". Efter en 10 dagar lång viloperiod pumpades varmt vatten upp ur brunnen under 20 dagar. Vattenflödet vid pumpning var 2 l/s .

Figur 2 visar temperaturen som en funktion av nivån i brunnen vid några tidpunkter under lagringscykeln. Den vertikala temperaturgradienten, som är mycket tydlig efter 6 timmars laddning, är något oväntad och kommer att diskuteras i avsnitt V. Figur 3 visar temperaturen som funktion av tiden på 4 olika nivåer i brunnen. En intressant iakttagelse är att temperaturen tycks stiga i anslutning till sprickzoner när pumpningen upphör. Även detta kommer att behandlas i avsnitt V. Uttagstemperaturen ges i figur 4. Den har sjunkit från 25.3°C vid laddningsperiodens slut till 17.2°C vid uttagsperiodens början. Av den injekterade energin hade 29% återvunnits när den upptagna vattenmängden var lika med den injekterade.

IV. NUMERISK SIMULERING AV VÄRMETRANSPORTEN I AKVIFEREN

IV.1 Beräkningsförutsättningar

Simuleringen utförs för området kring "varm brunn". Akviferen har en stor horisontell utsträckning. Flödesfält och materialegenskaper uppvisar cylindersymmetri med avseende på brunnen. Den avvikelse från cylindersymmetri som regionalt grundvattenflöde och pumpning i "kall brunn" ger upphov till är av liten betydelse i detta fall.

Vattenströmningen i akviferen är kraftigt inhomogen. Detta komplicerar i hög grad det termiska förloppet i akviferen. Utöver den ordinära värmeledningen får värmespridningen ett tillskott när vattnet strömmar genom akviferen. Man har så kallad termisk dispersion. Tre olika ansatser görs för att inkludera denna effekt. Den enklaste är att ansätta en konstant och förhöjd effektiv värmeledningsförmåga, $\tilde{\lambda}$, under hela lagringscykeln. I den andra ansatsen är tillskottet till värmespridningen proportionellt mot vattenflödes hastigheten, d.v.s.

$$\tilde{\lambda} = \lambda_a + d \cdot |q| \cdot C_w$$

där λ_a är värmeledningsförmågan för en blandning av det fasta akvifermaterialiet och vatten i vila, q är flödes hastigheten (m/s eller $\text{m}^3\text{H}_2\text{O}/\text{m}^2$ akvifer, s). C_w är vattnets värmekapacitet, och d är en proportionalitetskonstant. Konstanten d benämnes dispersionslängd. I den tredje ansatsen är dispersionstillskottet proportionellt mot kvadraten på flödes hastigheten. Den effektiva värmeledningsförmågan kan då skrivas

$$\tilde{\lambda} = \lambda_a + d^* \cdot q^2 \cdot C_w$$

där proportionalitetskonstanten d^* är en tid (s).

Akviferens värmekapacitet är $2.5 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{m}^3\text{K}$. Omgivande skikt har värmeledningsförmågan $2.5 \text{ J}/\text{msK}$ och en värmekapacitet $2.5 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{m}^3\text{K}$. Begynnelse temperaturen i området är 11.5°C . Det injekterade vattnet har temperaturen 25.3°C efter uppvärmning. Under passage av den 35-40 meter långa slangen mellan uppvärmningskärlet och injektionshålet sker en liten sänkning av vattentemperaturen. Denna effekt har försumrats. Flödes hastigheten vid pumpning är 2 l/s. Randvillkoret vid markytan har ingen inverkan på temperaturen i akviferen under de 40 dagar försöket pågår.

Om värmetransporten i akviferen var uteslutande konvektiv, d.v.s. att ingen värmeledning förekom, skulle det injekterade varmvattnet vid injektionsperiodens slut ha värmt ett cylindriskt område runt injektionsbrunnen med en radie

$$R_j = \left(\frac{C_w Q_j t_i}{C_a \pi H_j} \right)^{1/2}$$

där Q_j är volymflödet i skiktet j som har tjockleken H_j . C_a är akviferens värmekapacitet och t_i är injektionsperiodens längd (s.). R_j kallas i fortsättningen för termisk radie.

IV.2 Numerisk modell

En numerisk modell används för att simulera värmetransporten i akviferen. För att förenkla beräkningarna tillskrivs de olika skikten ett konstant radiellt massflöde, vars värde är givet för varje tidsperiod. Detta medför att man ej behöver beräkna tryckfältet, vilket innebär en kraftig reduktion av beräkningstiden. I en modell med linjärt flöde [1] som utvecklats under dessa villkor, har gittret och tidsstegen anpassats så att den s.k. numeriska dispersionen blir försumbar oavsett flödets storlek. Gittret består av omkring 1700 celler.

Antagandet om ett radiellt flöde utgör en idealisering av den verkliga processen. Vattnets densitet och viskositet är temperaturberoende och ger upphov till täthetsflöden, vars storlek är en funktion av det varma och kalla vattnets temperaturnivåer samt av akviferens permeabilitet. I detta fall är temperaturskillnaden liten och medelpermeabiliteten i akviferen låg. Täthetsflödet är därför av ringa storlek [2]. De inledande pumptesterna visade att flödet var mycket inhomogent och till stor del tycktes ske i några högerpermeabla skikt. För att till en viss del simulera dessa inhomogeniteter har akviferen indelats i 9 skikt med olika flödes-hastighet, så att flödesbilden överensstämmer med den uppmätta enligt figur 1 där brunnens vattenkapacitet redovisas för olika zoner. Att på ett mer realistiskt sätt simulera en mängd tunna sprickplan är inte möjligt på grund av begränsningar i den använda numeriska metoden. Detta är ett allmänt problem som bl.a. uppträder vid simulering av geotermiska reservoarer, där akvifer med dominerande sprickflöde förekommer.

Någon simulering av förloppet inuti brunnshålet ingår ej i modellen.

IV. RESULTAT

Följande fall har simulerats:

- A. Homogen akvifer med en tjocklek på 50 meter och en termisk radie på 4.4 meter. Se figur 5. Värmeledningsförmågan är

konstant under hela lagringscykeln.

- B. Inhomogen skiktad akvifer med en aktiv tjocklek på 46 meter. De olika skiktens termiska radie framgår av figur 6. Värmeledningsförmågan är konstant under hela lagringscykeln.
- C. Inhomogen skiktad akvifer med en aktiv tjocklek på 46 meter. De olika skiktens termiska radie framgår av figur 6. Värmeledningsförmågan har en komponent som är proportionell mot vattenflödes hastigheten.
- D. Inhomogen skiktad akvifer med en aktiv tjocklek på 46 meter. De olika skiktens termiska radie framgår av figur 6. Värmeledningsförmågan har en komponent som är proportionell mot kvadraten av flödes hastigheten.

Beräknad uttagstemperatur för fall A med två olika värden på den effektiva värmeledningsförmågan, 5 och 20 W/mK, visas i figur 7. Exemplet med den låga effektiva värmeledningsförmågan 5 W/mK motsvarar en akvifer med små dispersiva effekter. Den bästa överensstämmelsen med uppmätt uttagstemperatur erhålls då den effektiva värmeledningsförmågan är omkring 20 W/mK. Detta tyder på att flödet är mycket inhomogent.

I fall B är flödet givet enligt figur 1 och 6. Uttagstemperaturen för en konstant effektiv värmeledningsförmåga på 5 respektive 17 W/mK i varje vattenförande skikt ges i figur 8. Överensstämmelsen med den uppmätta uttagstemperaturen är tämligen god.

Den effektiva värmeledningsförmågan har ett bidrag från dispersiva effekter. Dessa beror som tidigare nämnts på bl.a. flödes hastighet, porsystem, akvifermaterial och inhomogeniteter. I det aktuella experimentet med ett omfattande sprickflöde är detta bidrag beroende av sprickplanens antal, utsträckning, orientering och inbördes avstånd. När flödet sker i tunna sprickplan är värmeledningen i området till stor del oberoende av det vattenförande skiktets egen värmeledningsförmåga. En extrapolation till andra lagringskonfigurationer med utgångspunkt från fall B är ej möjligt eftersom ansatsen med en konstant effektiv värmeledningsförmåga ej innehåller ett explicit beroende på flödes hastigheten.

Om exempelvis injektionsvolymen ökar, medför detta en högre effektiv värmeledningsförmåga p.g.a. ökad flödes hastighet.

I fall C ansättes att dispersionstermen är linjärt beroende av flödes hastigheten. Uttagstemperaturen för en dispersionslängd d av 1 och 5 meter visas i figur 9. Skillnaden mellan uppmätt och simulerad uttagstemperatur är större än i fall A och B. Särskilt tydligt är detta under inledningsskedet av uttagsperioden.

Angående dispersion i porösa medier omtalar Bear [4] att "i alla modeller som tar hänsyn till den kombinerade effekten av en hastighetsfördelning i en strömkanal och transversell molekylär diffusion är dispersionskoefficienten proportionell mot kvadraten av flödes hastigheten. När endast medelhastigheten i en strömkanal betraktas, under det att blandning sker där olika strömkanaler möts, och molekylär diffusion försummas, erhålles en dispersionskoefficient som är linjärt beroende av flödes hastigheten." Eftersom flödet till stor del sker i sprickplan, så kommer den mot flödesriktningen transversella värmeledningen att vara av stor betydelse.

I fall D har därför ansatsen med ett dispersionsbidrag som är proportionellt mot kvadraten av flödes hastigheten använts. Uttagstemperaturen ges i figur 10. Överensstämmelsen med den uppmätta uttagstemperaturen är god.

V. DISKUSSION

V.1 Vertikal temperaturgradient i brunnen

Av figur 2 och 3 framgår att temperaturen avtar med ökande djup i brunnen. Mellan 40 och 65 meters nivån är temperaturfallet ungefär 2 grader vid lagringstidens slut. Detta motsvarar en vertikal temperaturgradient på $0.08^{\circ}\text{C}/\text{m}$. För att uppskatta om denna gradient är orsakad av radiella förluster p.g.a. värmeledning under vattnets passage ner genom brunnen görs följande överläggning. Vi betraktar ett fodrat borrhål, d.v.s. utan radiellt vattenflöde in i formationen. Det strömmande vattnet i brunnen har

en övertemperatur på 15 grader i förhållande till den ostörda omgivningen. Volymflödet i röret är Q och temperaturändringen per meter i djupled är ΔT . Värmeflödet från röret ges av den analytiska lösningen för temperaturförloppet utanför en cylinder med övertemperaturen ΔT [3]. Efter en tid av 5 dagar gäller följande värmebalans för en meter av brunnen:

$$\Delta T \cdot C_w \cdot Q = 75 \text{ W}$$

där C_w är vattnets värmekapacitet. Volymflödet är 2 l/s och brunns diameter är 0.195 m. Temperaturgradienten kan nu beräknas till 0.009°C/m . Detta är ungefär 10% av den uppmätta. Visserligen avtar flödes hastigheten i röret med ökande djup, men vid 65 meters nivå återstår åtminstone 1/3 av det totala flödet. Dessutom kommer det varma vatten som lämnar brunnen att värma upp brunns omgivning och kraftigt minska den radiella temperaturgradienten i anslutning till brunnen. Den beräknade temperaturgradienten torde därför grunda sig på en överskattning av de radiella värmeförlusterna. Trots detta är den beräknade temperaturgradienten endast 10% av den uppmätta, som tydligen orsakas av andra processer.

V.2 Sprickflöde

De höga värden på den effektiva värmeledningsförmågan som måste användas för att reproducera den uppmätta uttagstemperaturen tyder på ett mycket inhomogent flöde. I det inledande brunnstestet lokaliserades 10 zoner med märkbart förhöjd vattenkapacitet. Avståndet mellan sprickplanen är i medeltal omkring 5 meter. En mer detaljerad simulering av detta sprickflöde i akviferen är ej möjligt med den nuvarande numeriska modellen.

VI. SAMMANFATTNING

Ett försök med lagring av varmt vatten i en akvifer under kvarteret Tärnan i Landskrona har utförts. Akviferen består av sprickig kalksten. In- och utmatning av vatten sker mellan 30

och 80 meters djup i akvifer via två brunnar. Temperaturen på det inmatade vattnet var 25.3°C . Försöket varade i 40 dagar.

Denna studie behandlar värmetransporten i akviferen och omgivande skikt. En numerisk modell har använts för att simulera lagringsförloppet. Vattenflödet i akviferen sker i radiell riktning och dess storlek kan anta skilda värden för olika horisontella skikt. Härigenom kan en viss inhomogenitet i akviferens hydrauliska egenskaper efterliknas. Temperaturen på det upptagna vattnet under uttagsperioden studeras. Den effektiva värmeledningsförmågan i akviferen har ett bidrag från dispersion och anpassas så att en god överensstämmelse erhålles vad beträffar den uppmätta uttagstemperaturen. Beräkningarna utföres för tre olika ansatser om den effektiva värmeledningsförmågan:

1. Konstant under hela lagringscykeln.
2. Dispersionsbidraget proportionellt mot vattenhastigheten.
3. Dispersionsbidraget proportionellt mot kvadraten av vattenhastigheten.

Den bästa överensstämmelsen erhålles med den tredje ansatsen.

Beräkningsresultaten visar att vattenflödet i akviferen är mycket inhomogent. Flödet synes till stor del ske i de sprickzoner, som påvisades under det inledande pumptestet.

Fortsatt utveckling av datorprogram för simulering av värmeledning vid vattenflöde i sprickplan pågår.

VII. REFERENSER

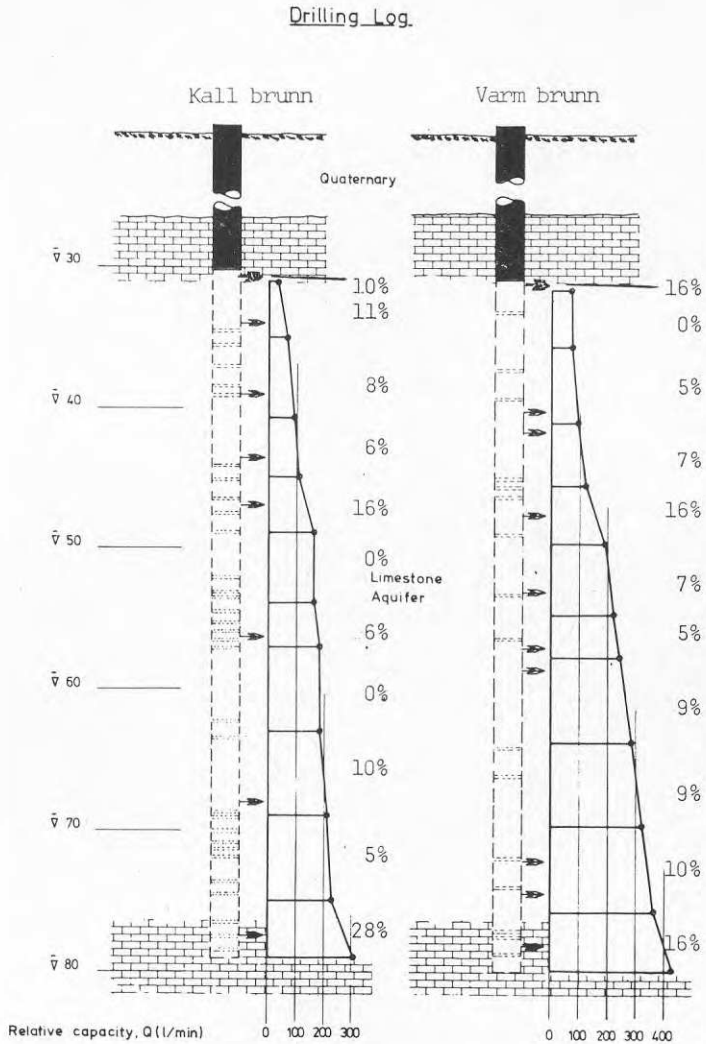
- [1] Hellström, G. och Claesson, J., 1978. Heat Losses and Temperature Fields for Heat Storage Aquifers. A Computational Model with a Simplified Linear Water Flow. Institutionen för matematisk fysik, Lunds Tekniska Högskola, Fack, 220 07 Lund 7.

- [2] Hellström, G., Tsang, C.F. och Claesson, J., 1979. Heat Storage in Aquifers. Buoyancy Flow and Thermal Stratification Problems. Institutionen för matematisk fysik, Lunds Tekniska Högskola, Fack, 220 07 Lund 7.

- [3] Carslaw, H.S. och Jaeger, J.C., 1959. Conduction of Heat in Solids, s. 334-339.

- [4] Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media, s. 606.

Figur 1. Det relativa vattenflödet för olika zoner i de två brunnarna. Nivåer med märkbart högre vattenkapacitet har utmärkts med pilar.

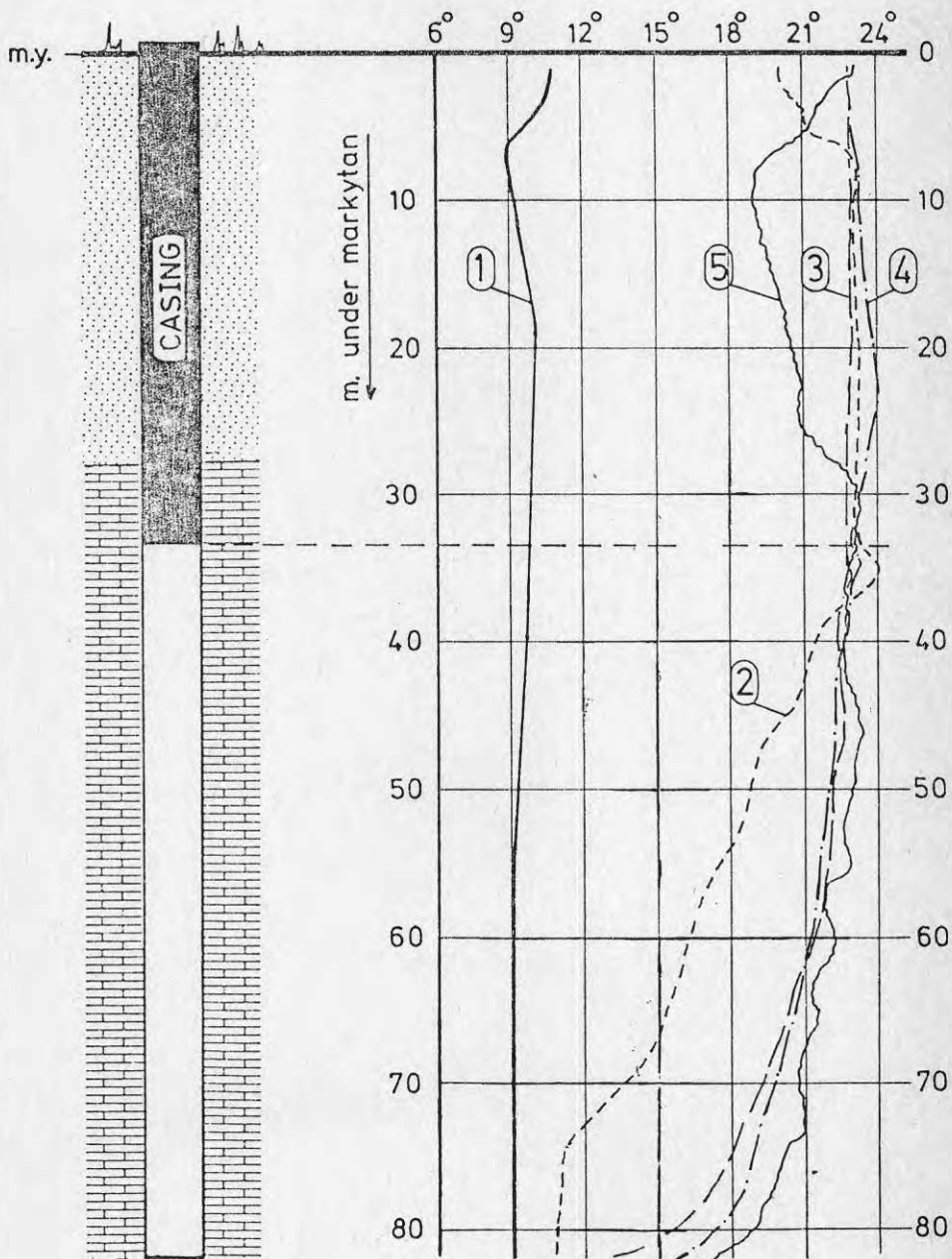


Legend

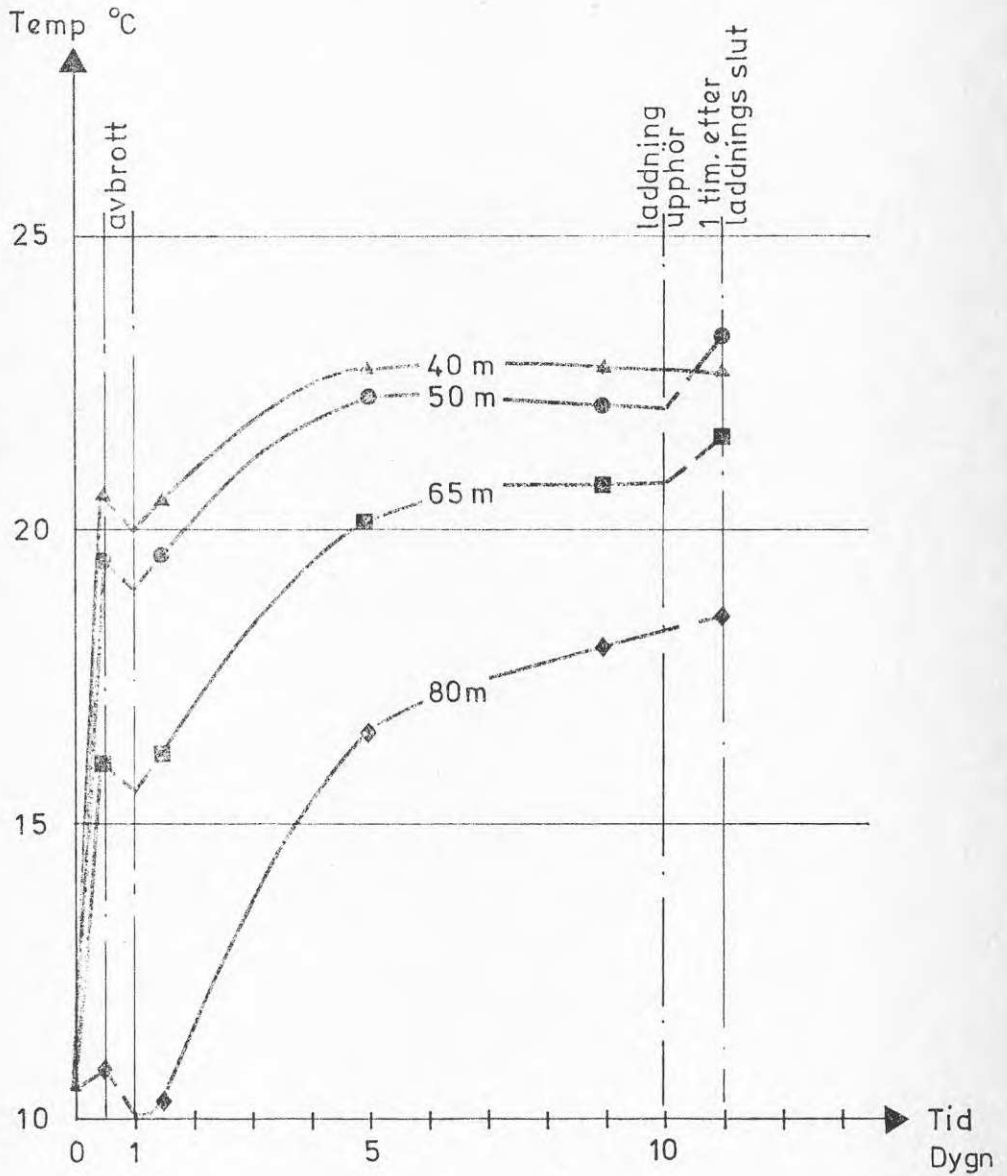
- Level with noticeable increasing watercapacity
- Layer with flintstone
- Water capacity tested

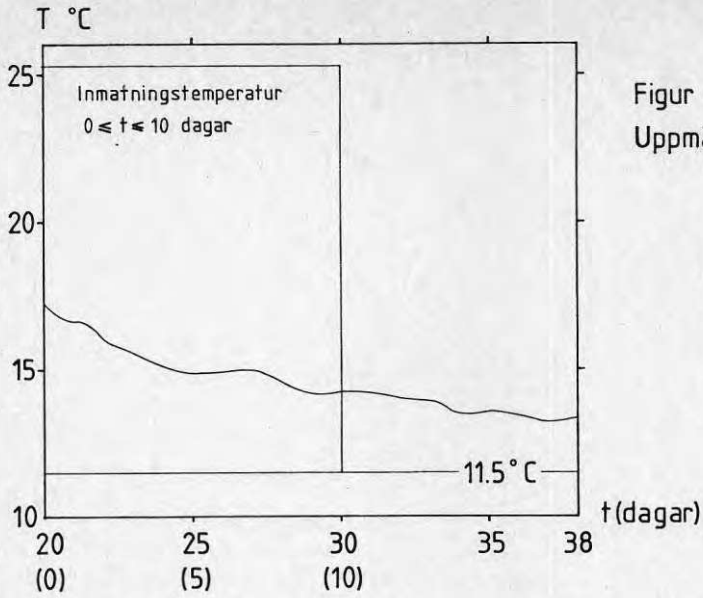
Fig.2

- | | |
|----------------------|--------------------|
| ① FÖRE LADDNING | ④ 9 DYGNS LADDNING |
| ② 6 TIMMARS LADDNING | ⑤ 1 TIMMES LAGRING |
| ③ 5 DYGNS LADDNING | |



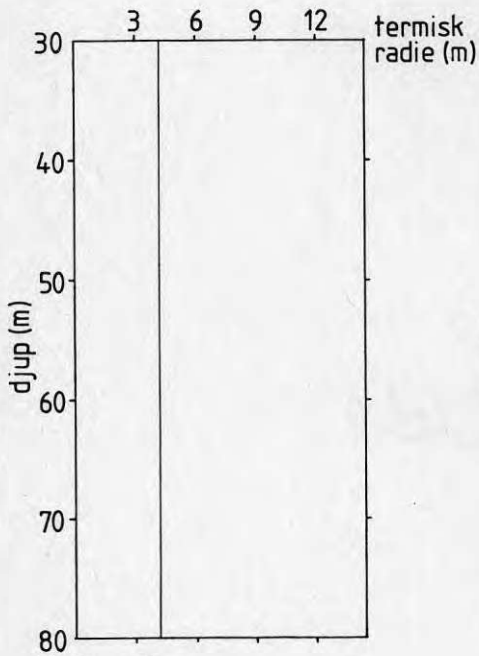
Energilagringsprojekt BFR 800685-6
 Kv Tärnan - Landskrona
 Temperaturförändring under
 laddningsförloppet vid 4 nivåer





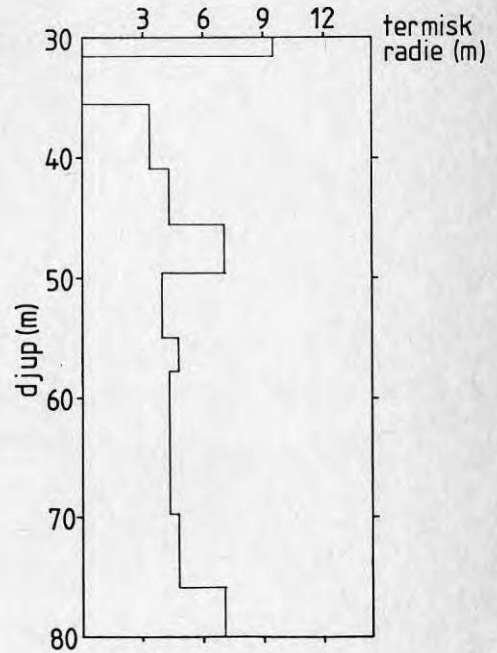
Figur 4

Uppmätt uttagstemperatur



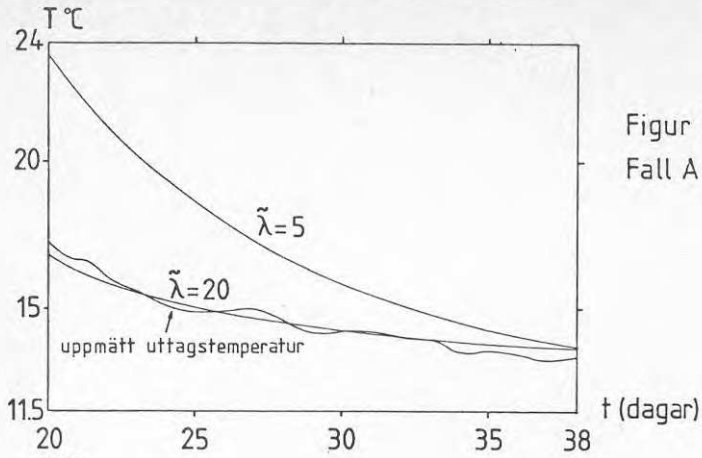
Figur 5

Termisk radie som funktion av djupet för fall A

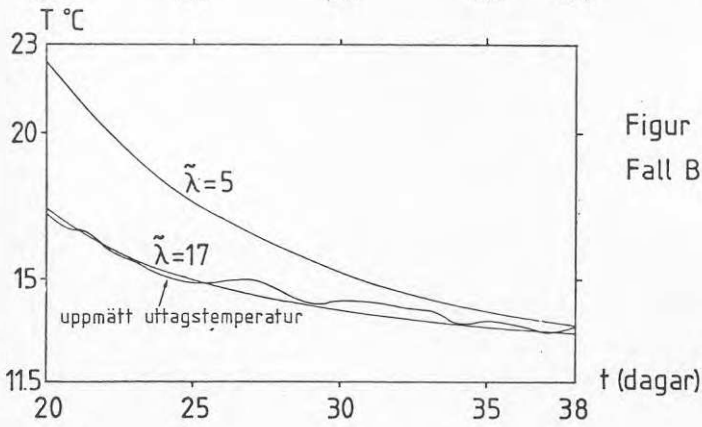


Figur 6

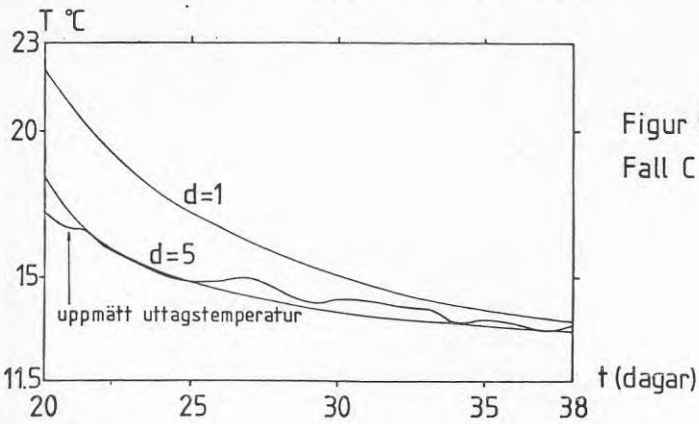
Termisk radie som funktion av djupet för fall B, C och D



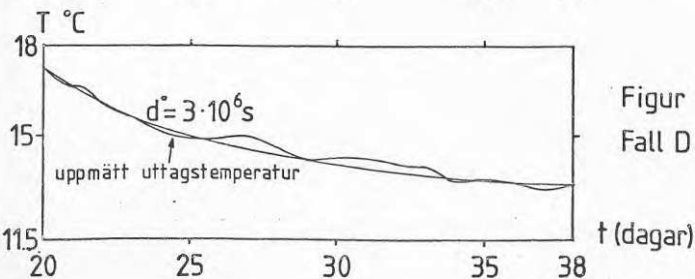
Figur 7

Fall A $\tilde{\lambda}=5$ och 20 W/mK 

Figur 8

Fall B $\tilde{\lambda}=5$ och 17 W/mK 

Figur 9

Fall C $d=1$ och 5 m 

Figur 10

Fall D $d^*=3 \cdot 10^6 \text{ s}$

LAGRING I KOMBINATION MED
VÄRMEPUMP

Mats Renntun (SYDKRAFT)

Det genomförda energilagringssöket stämmer ganska väl överens vad gäller flöden och energimängder med en driftsäsong för kv Tärnan om lagring ingår i energisystemet.

För uppvärmning av kvarteret planeras att utnyttja energin i grundvattnet med hjälp av en värmepump. En sådan värmepump sparar minst 60 % av energin jämfört med eluppvärmning eller oljeuppvärmning.

Den värme som bildas i glasgatan genom "drivhuseffekten", framför allt under sommarmånaderna, kan lagras i grundvattenmagasin under kvarteret.

Ur resultaten från lagringssöket kan utläsas att man sparar ytterligare ca 1 % av energin om denna möjlighet till lagring utnyttjas. Vinsten av lagringen är alltså mycket liten och orsaken är följande:

I alternativet utan lagring arbetar värmepumpen med grundvatten som värmekälla, där grundvattnet året om håller en temperatur av ca 11^o C.

I alternativet med lagring arbetar värmepumpen med grundvattnet som värmekälla, där grundvattnet också håller en temperatur av ca 11^o C över året förutom den första månaden under uppvärmningssäsongen, då grundvattnet är ca 15 - 16^o C. Värmebehovet under den månaden är ca 10 % av årets totala värmebehov.

Ju högre temperatur på värmekällan desto mindre energi förbrukar värmepumpen, dvs desto större blir energibesparingen. Som ovan sagts så blir grundvattentemperaturen i fallet med lagring ca 5^o C varmare än fallet utan lagring under en begränsad del av uppvärmningssäsongen. Detta påverkar dock väldigt lite värmepumpens energiförbrukning under ett år. (Se beräkningar i bilaga).

./.

Lagring av energi vid låg temperatur, som i detta fall, blir meningsfullt endast när det inte finns någon annan värmekälla tillgänglig för värmepumpen.

Lagring av energi vid högre temperatur, ca 50^o C, kan bli lönsam om det kan göras i tillräckliga energimängder och till låga kostnader.

Beräkningar av energibesparing med lagring
i grundvattenmagasin, kv Tärnan

(Siffrorna är endast ungefärliga)

Det årliga behovet för 9 radhus i kv Tärnan uppskattas till 170.000 kWh.

Alternativ utan lagring

Värmepumpen antas prestera en årsvärmefaktor på 2,5, vilket innebär att det åtgår 68.000 kWh el för att driva värmepumpen.

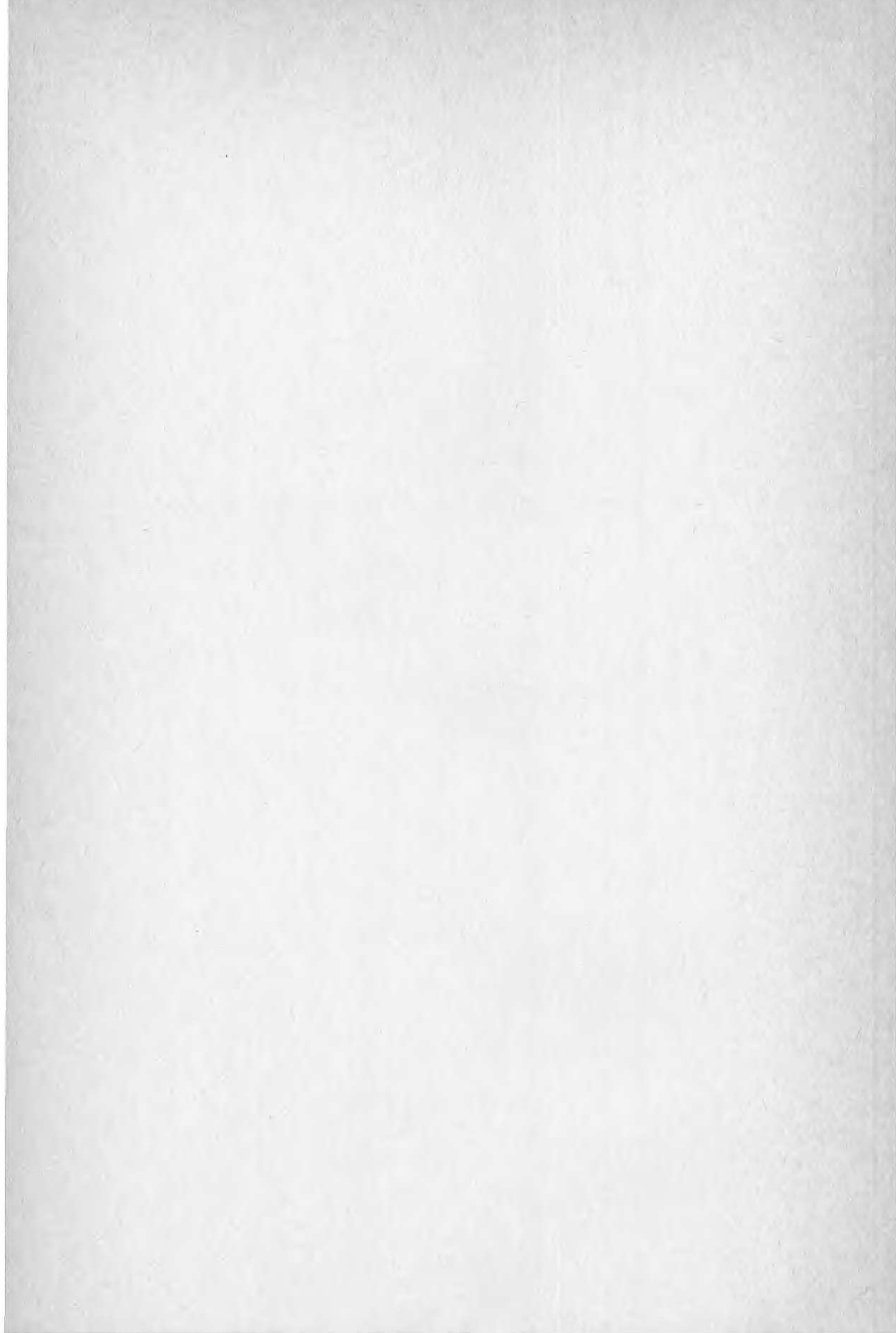
Alternativ med lagring

Skillnaden i detta fallet jämfört med föregående fall är att värmepumpen kan arbeta med bättre värmefaktor under ca 1 månad av året. Den höstmånadens värmebehov motsvarar ca 10 % av årets värmebehov. Värmefaktorn höjs under den perioden från 2,5 till 2,8.

Värmepumpens elförbrukning per år i detta alternativ kan beräknas enligt följande:

$$\frac{0,9 \times 170.000 \text{ kWh}}{2,5} + \frac{0,1 \times 170.000 \text{ kWh}}{2,8} = 67.250 \text{ kWh}$$

Elförbrukningen i alternativet utan lagring blir 68.000 kWh, varför vinsten med lagring blir 750 kWh eller ca 1 %.



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
800685-6 från Statens råd för byggnadsforskning
till Kjessler & Mannerstråle AB, Halmstad.

R32: 1982

ISBN 91-540-3666-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700532

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 25 kr exkl moms