



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.



Utvinning av värme ur berg- borrade brunnar

Fältnätningar och erfarenheter

Johan Tollin
Sören Andersson
Anders Eriksson

R
Adt

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	Plac Ser

R148:1983

UTVINNING AV VÄRME UR BERGBORRADE BRUNNAR
Fältmätningar och erfarenheter

Johan Tollin
Sören Andersson
Anders Eriksson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 800640-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Allmänna
Ingenjörbyrån, Stockholm

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

R148:1983

ISBN 91-540-4047-7

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1983

<u>Innehållsförteckning</u>		<u>Sid</u>
Förord		4
Sammanfattning		5
1	Bakgrund	6
2	Kortfattad beskrivning av teori och praktik	7
2.1	Allmänt	7
2.2	Konstant effektuttag vid fortvarighetstillstånd	7
2.3	Konstant effektuttag i initialskedet	9
2.4	Varierande effektuttag i initialskedet	10
2.5	Betydelse av rörligt grundvatten	10
2.6	Betydelse av uttag av vatten	10
2.7	Influens mellan närliggande brunnar	11
2.8	Olika värmeuttagssystem	11
3	Beskrivning av uppföljda brunnar	13
3.1	Val av brunnar	13
3.2	Beskrivning	13
4	Mätutrustning	18
4.1	Instrumentering	18
4.2	Temperaturlodning	18
4.3	Mätningarnas noggrannhet	20
5	Mätresultat	21
5.1	Allmänt	21
5.2	Uppföljda brunnar	21
6	Erfarenheter från energibrunnar utanför projektets mätprogram	30
7	Jämförelse mellan mätresultat och teoretiska beräkningar	37
7.1	Förutsättningar	37
7.2	Begränsningar	37
7.3	Resultat	38
7.4	Generella erfarenheter från simuleringen	42
8	Ekonomi	43
8.1	Investering och fasta kostnader	45
8.2	Energikostnader	45
9	Drifterfarenheter	48
9.1	Funktion	48
9.2	Styr- och reglersystem	49
9.3	Livslängd	49
10	Jämförelse mellan öppna och slutna system	51
11	Utvecklingstendenser	53
11.1	Allmänt	53
11.2	Småhus	54
11.3	Flerfamiljshus	56
12	Angelägna forskningsområden	60
12.1	Värmepumpsystemet	60
12.2	Geologiska förutsättningar	60
12.3	Beräkningsmodeller	61
13	Referenser	62

Bilaga: Principiell inkoppling av energibrunnsinstallationerna

FÖRORD

AIB - Allmänna Ingenjörbyrå AB har i här föreliggande projekt mätt och utvärderat 5 olika energibrunnsinstallationer.

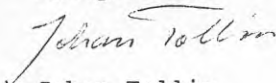
Projektet är fortsättningen av en förstudie, "Utvinning av värme ur bergborrade brunnar", (BFR R 142:1980) och det har genomförts i samarbetet med AB Avanti-Maskiner och Institutionen för matematisk fysik vid Lunds Tekniska Högskola.

I projektet har medverkat

Tekn lic Sören Andersson, AIB
Geolog Anders Eriksson, AIB
Ing Tommy Eriksson, AB Avanti-Maskiner
Civ ing Göran Hellström, LTH
Civ ing Johan Tollin, AIB (proj ledare)

Insamlandet av mätdata har underlättats genom att ägarna av installationerna aktivt och intresserat medverkat.

Stockholm maj 1983
AIB - ALLMÄNNA INGENJÖRSBYRÅN AB
Energiteknik



Johan Tollin

SAMMANFATTNING

Värme kan utvinnas ur en bergborrad brunn genom att vatten tas ut och efter nedkylning i en värmepump antingen avleds eller återföres till brunnen. Ett alternativt sätt att uttaga värme är att cirkulera en glykollösning eller annan antifrysavätska i ett rör eller slangsystem i brunnen. En förstudie av de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för energiuttag genom nedkylning av brunnar har redovisats i BFR-rapport R 142:1980.

Sedan de första bergvärmeanläggningarna provades 1978 har antalet bergvärmeinstallationer ökat kraftigt. För närvarande installeras uppskattningsvis 1000 anläggningar per år i Sverige.

Denna rapport redovisar resultat och erfarenheter från fem energibrunnsanläggningar från idrifttagandet uppvärmningssäsongen 1980/81 till sommaren 1982.

Anläggningarna är uppbyggda kring en enskilda brunn som värmekälla och försörjer vardera en enfamiljvilla med värme och tappvarmvatten.

Studien har visat att bergvärme är en utmärkt, naturlig markvärmekälla för värmepumpstillämpningar. Berget utgör en stabil värmekälla över hela uppvärmningssäsongen, till skillnad från t ex uteluft.

Tre principiellt olika bergvärmesystem har studerats. Dessa är recirkulationsbrunnar (dvs öppet grundvattensystem), kylslangbrunnar samt en kombinationsbrunn (tidvis vattenuttag). Samtliga system fungerar utmärkt om de är rätt dimensionerade.

Fyra av anläggningarna levererar hela fastighetens effektbehov. Brunnsdjupen (aktivt djup) varierar hos dessa mellan 89 och 145 m och den levererade värmemängden mellan 19 och 26 MWh/år. Systemvärmefaktorerna har varierat mellan 2,5 och 1,8. En kylslangbrunn har utgjort basvärmekälla (aktivt brunnsdjup 148 m) och levererat 50 MWh värme med en systemvärmefaktor på 2,1.

Datorsimulering av värmeuttagen har givit att de aktuella bergmassornas värmeledningstal har varierat mellan ca 2,2 och 3,3 W/m²°K. De teoretiska beräkningarna synes vara väl användbara vid dimensionering av bergvärmeanläggningar.

Avslutningsvis redovisas i rapporten drifterfarenheter, ekonomin i bergvärmeanläggningarna, utvecklingstendenser (bl a flerbrunnssystem) och de områden som vi anser vara ofullständigt belysta inom bergvärmetekniken.

1. BAKGRUND

Värme kan utvinnas ur en bergborrad brunn genom att vatten tas ut och efter nedkylning i en värmepump antingen avleds eller återföres till brunnen. Ett alternativt sätt att uttaga värme är att cirkulera en glykollösning eller annan antifrysavätska i ett rör eller slangsystem i brunnen. En förstudie av de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för energiuttag genom nedkylning av brunnar har redovisats i BFR-rapport R 142:1980.

Värmeutvinning ur bergborrade brunnar genom återföring av avkyld vatten är en ung teknik. Den första installationen gjordes troligen 1978. Tekniken har emellertid visat sig såpass intressant att ett stort antal anläggningar därefter tagits i drift.

Föreliggande rapport redovisar resultat och erfarenheter från 5 energibrunnsanläggningar för uppvärmning av småhus, idrifttagna under uppvärmningssäsongen 1980/81.

2. KORTFATTAD BESKRIVNING AV TEORI OCH PRAKTIK

2.1 Allmänt

Vid den teoretiska behandlingen av uttag av bergvärme förutsätts vid beräkningarna att ingen värmetransport sker via strömmande vatten idet omgivande bergets spricksystem. All värmetransport i berget fram till vattnet i borrhålet förutsätts således ske via ledning.

Den drivande kraften för värmetransporten är vid långvarigt uttag temperaturdifferensen mellan borrhålets temperatur och markytans medeltemperatur och kan bestämmas enligt följande.

Markytans medeltemperatur motsvaras relativt väl av grundvattentemperaturen på ca 5 m djup och kan då uppskattas med hjälp av isotermerna i fig 2-1. Ett normalt värde för mellan-Sverige är 6 à 8°C.

I förstudien, BFR R 142:1980, till detta projekt /Andersson 80/ redovisas utförligt de grundläggande teoretiska förutsättningarna för bergvärme och grundvattenvärme.

2.2 Konstant effektuttag vid fortvarighetstillstånd

Effektuttaget ur ett borrhål kan vid uppnått fortvarighetstillstånd skrivas

$$Q = \frac{2\sqrt{H}\lambda H \Delta t}{\ln \frac{H}{R} - 0,7} \quad (1)$$

där Q är effektuttaget i W

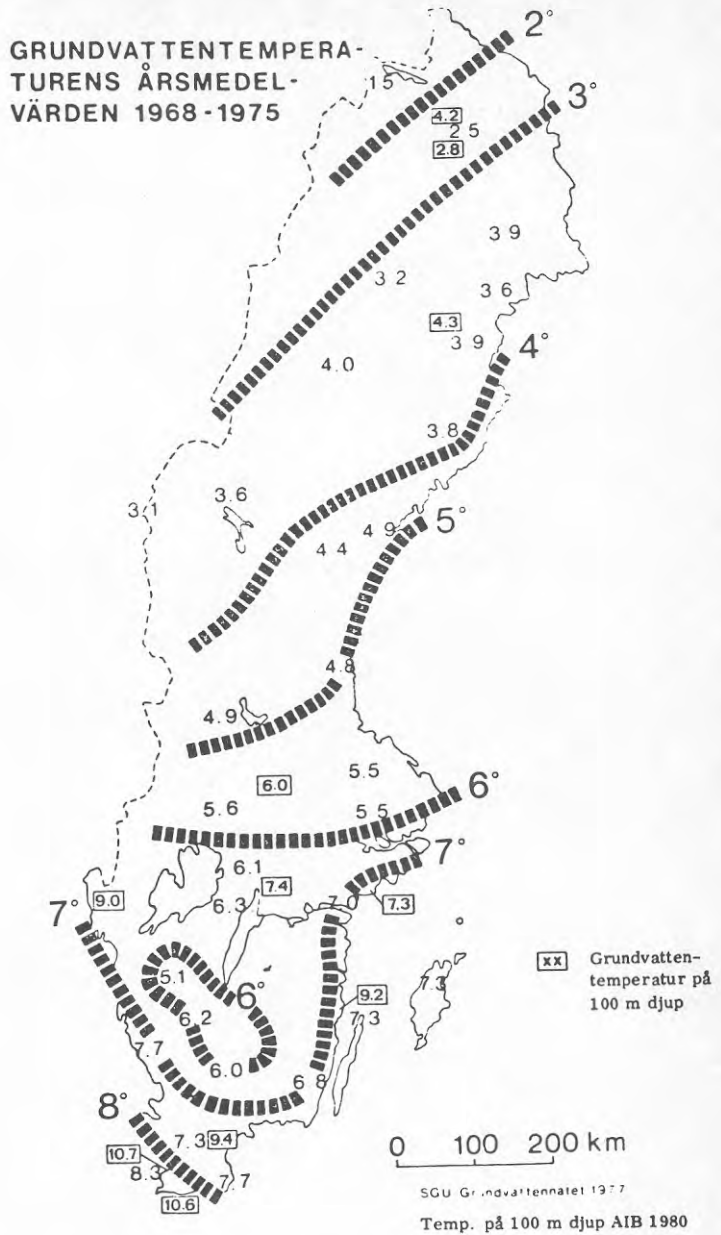
λ bergets värmeledningsförmåga, W/m, °C

H är borrhålets djup i m

Δt är temperaturdifferensen mellan borrhålets medeltemperatur och markytans årsmedeltemperatur, °C

R är borrhålets radie i m

Ekv (1) definierar det värmeuttag som under obegränsad tid kan tas från ett borrhål. Innan fortvarighetstillståndet uppnåtts tas värme från bergmassan i borrhålets närhet. Bergets temperatur sjunker och allteftersom värmeuttaget fortsätter kommer värmen att tas från berg-



Figur 2-1 Grundvattentemperaturens årsmedelvärden samt temperaturen på 100 m djup (inramade värden)

volymer som ligger allt längre från borrhålet. Efter tillräckligt lång tid kommer så gott som all värme att tas från markytan.

För ett givet borrhål är således den kontinuerligt uttagbara värmeeffekten på lång sikt proportionell mot den drivande temperaturdifferensen mellan borrhål och markyta.

Utöver ovan beräknade värmefflöde mellan markyta och borrhål tillkommer ett värmefflöde förorsakat av den geotermiska gradienten. Detta värmefflöde innebär ett extra värmestillskott till borrhålet. Storleken av detta tillskott kan genom en superponeringsmodell visas vara beroende enbart av borrhålets längd och radie men däremot oberoende av borrhålets temperaturnivå.

Det geotermiska värmestillskottets storlek vid fullt utbildad temperaturprofil är betydligt lägre än värmefflödet från markytan, ca 300 W för ett 100 meter djupt borrhål /Andersson 80/.

2.3 Konstant effektuttag i initialskedet

I ett initialskede (de första 25-50 åren) kan vid relativt djupa borrhål vertikala värmeeffekter försummas.

Erforderlig drivande temperaturdifferens i förhållande till omgivande ostört berg kan då skrivas /Claesson 80/:

$$T(r, t) = \frac{q}{4\sqrt{t}\lambda} \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (2)$$

där T är undertemperaturen i förhållande till omgivande, ostört berg

r är radiella avståndet från brunnens centrum i meter

q är uttagen effekt W/m

λ är bergets värmeledningstal W/m, °C

a är $\frac{\lambda}{\rho c}$ m²/s

$$\text{funktionen } E_1 \text{ ges av } E_1(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$$

2.4 Varierande effektuttag i initialskedet

Olika lösningar till värmeledningsekvationen ovan kan superponeras. Härigenom kan t ex inverkan av olika laddnings- och uttagspulser beräknas.

Det är då möjligt att behandla en representativ belastning på ett borrhål för t ex uppvärmning av ett småhus. Beräkningarna är emellertid inte giltiga för belastningsändringar kortare än 5-15 timmar. (Egentligen skall tiden i sekunder vara större än $\frac{50 \times r^2}{4a}$ för att ge ett fel <1 %.)

En verifiering av de teoretiska beräkningarna samt undersökning av effekterna vid kortvariga belastningsändringar måste göras genom praktiska försök.

För en mer detaljerad genomgång av den teoretiska behandlingen av värmeuttag ur bergborrade brunnar hänvisas till etapp 1 i denna studie /Andersson 80/.

Det finns nu utvecklat dataprogram för att beräkna resulterande temperaturer vid olika energi- och effektuttag. Resultat från korrelation mellan teori och de praktiska mätvärdena som erhållits redovisas i avsnitt 7.

2.5 Betydelse av rörligt grundvatten

De teoretiska beräkningarna baseras som tidigare nämnts enbart på bergets värmeledningsförmåga. Ett grundvattenflöde genom bergmassan i energibrunnens omedelbara närhet påverkar värmeuttagsmöjligheterna positivt. Storleken på detta bidrag varierar beroende på lokala hydrogeologiska förutsättningar.

2.6 Betydelse av uttag av vatten

Genom att avleda vatten från brunnen erhålls en påtvingad tillrinning av grundvatten med högre temperatur till brunnen. Redan små uttag bidrar markant ur både energi- och effektsynpunkt, eftersom grundvattnet oftare kommer in i brunnen via en eller några få sprickor. Brunnar med måttlig eller liten tillrinning kan med fördel utföras som kombinerade recirkulations- och uttagsbrunnar. Effekttillskottet kan beräknas ur

$$Q = F \cdot 1,16 \cdot \Delta t$$

där Q = effekt (kW)

F = vattenuttag (m^3/h)

Δt = temperaturdifferensen mellan tillrinnande och avlett vatten.

Detta kan åskådliggöras med följande exempel. En recirkulationsbrunn återför $2 m^3/h$ tvågradigt vatten till

brunnen och avleder $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Normal grundvattentemperatur i området är ca 8° varvid effekttillskottet blir

$$0,2 \cdot 1,16 \cdot (8-2) = 1,4 \text{ kW.}$$

2.7 Influens mellan näraliggande brunnar

Vid en tät placering av energibrunnar kommer dessa att påverka det möjliga energiuttaget vid en given temperatursänkning i en brunn. Denna influens behandlas för två och tre näraliggande brunnar av Eskilson /Eskilson 82/.

2.8 Olika värmeuttagssystem

De värmeuttagssystem som förekommer i samband med bergborrade brunnar kan generellt indelas i 5 olika system, fig 2-2.

- Uttagsbrunnar
Det upptagna och nedkylda vattnet avleds till ett dike, en recipient eller motsvarande.
- Uttags- och infiltrationsbrunnen
Det upptagna och nedkylda vattnet avleds till en infiltrationsbrunn.

Vid dessa system uttas ej någon värme ur bergmassan såvida inte infiltrationsbrunnen temperaturmässigt påverkar uttagsbrunnen.

De system som bygger på uttag av bergvärme är:

- Recirkulationsbrunn (öppet system)
Allt avkyldt vatten återförs till brunnen.
- Kombinationsbrunn
En del av det avkylda vattnet leds bort (kontinuerligt eller periodvis) och resterande mängd återförs till brunnen.
- Kylslangsbrunn (slutet system)
Värmen överförs via en sluten slinga (av metall och/eller plast) som är nedsänkt i brunnen.

I denna rapport redovisas resultat från mätningar på installationer enligt de tre sistnämnda systemen.

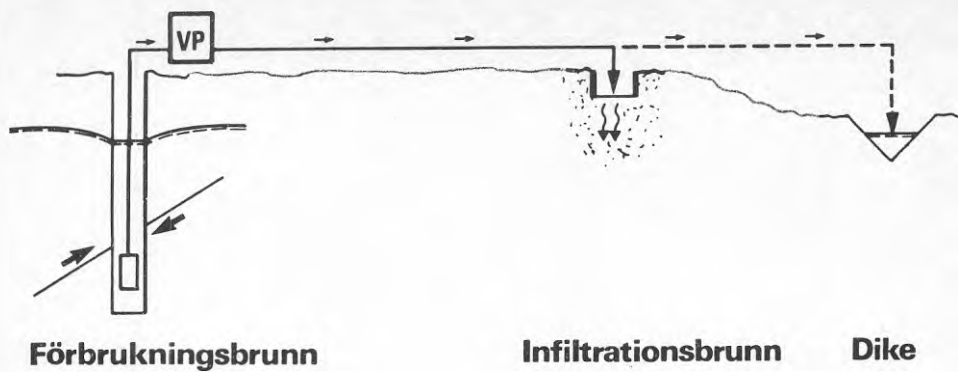
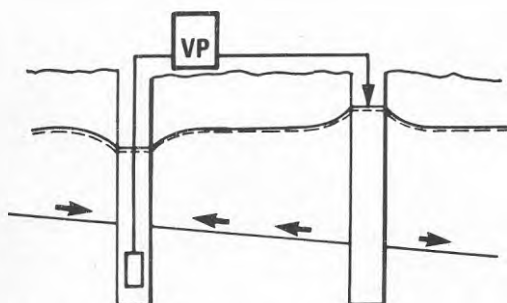
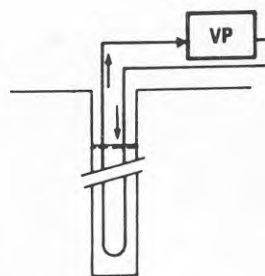
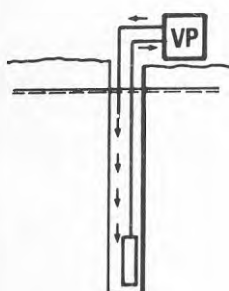
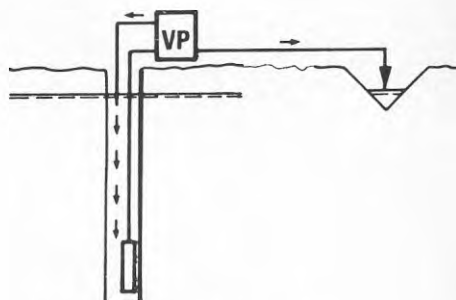
**Förbrukningsbrunn****Infiltrationsbrunn****Dike****Dubbelbrunnssystem****Kylslangbrunn****Recirkulationsbrunn****Kombinationsbrunn**

Fig 2-2 Olika värmeuttagssystem för bergborrade brunnar utan återladdning

3. BESKRIVNING AV UPPFÖLJDA BRUNNAR

3.1 Val av brunnar

Ett stort antal fastighetsägare som avsett att installera sk energibrunnar kontaktades för att undersöka möjligheten och lämpligheten att välja deras installation som uppföljningsobjekt i undersökningen.

Vid valet av energibrunnsinstallationer har eftersträvat geografisk och geologisk fördelning av brunnarna.

Det slutliga valet av mätobjekt har även styrts av de praktiska förutsättningarna att få installationerna instrumenterade för att kunna följa dessa maximal tid av 1980/81 års eldningsäsong.

Det har inte varit projektets avsikt eller möjlighet att projektera och/eller dimensionera det totala värmesystemet från brunn till radiatorer. Undersökningen har koncentrerats till att skapa underlag för dimensionering vid värmeuttag ur bergborrade brunnar, dvs energiflöden mellan berget, grundvattnet i borrhålet och värmepumpens förångare.

Projektet har omfattat 5 installationer. Totaldjupen på brunnarna ligger mellan 97 och 150 m varav en är borrarad i granit, en i diorit och 3 st i gnejs. Dessutom har ytterligare ett antal installationer utanför projektet följts mer eller mindre intensivt. De brunnar som varit under observation finns inprickade på Sverigekartan i figur 3-1. Installationerna är i rapporten numrerade med 1-5 för projektets instrumenterade brunnar.

3.2 Beskrivning

Samtliga uppföljda energibrunnsinstallationer är avsedda för bostads- och varmvattenuppvärmning. De har dimensionerats för hela eller delar av det totala energibehovet. En kort beskrivning av de studerade värmepumpsinstallationerna följer nedan. I tabell 3-1 finns data angående brunn- och värmepumpsinstallationerna samlade. Flödeschema för de olika installationerna redovisas i bilaga 1. Angivna kapaciteter är uppmätta vid brunnborrningen.

Nr 1 Linköping

Värmepumpen förser ett nybyggt sluttningshus i Linköping på 200 m² bostadsyta + 36 m² förråd med värme och varmvatten. Totala effektbehovet är 7 kW vid -22°C. Radiatorsystemet är dimensionerat för temp 55°/45°C. Grundvattnet pumpas via sänkpump i botten på borrhålet till

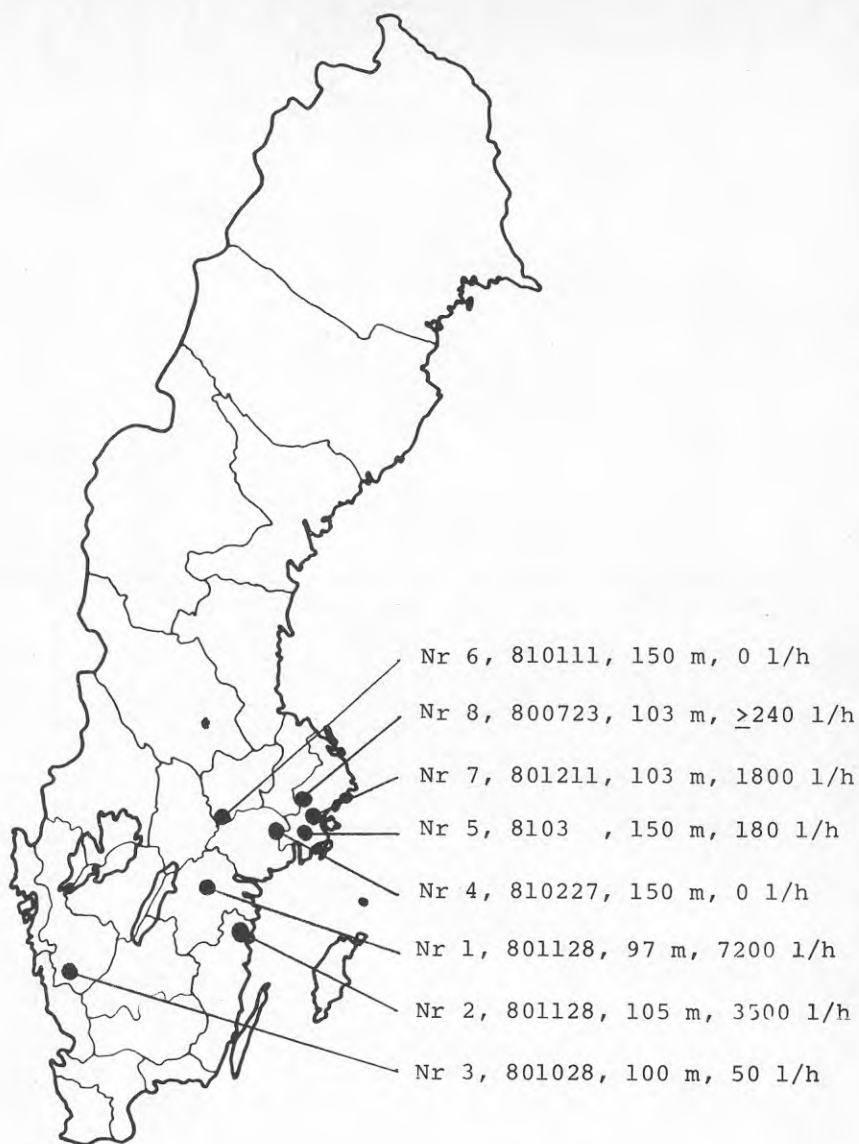


Fig 3-1 Energibrunnsinstallationer. För varje installation framgår startdatum, totaldjup och kapacitet på brunnen.

värmepumpen (41 l/min) och returvattnet kan helt eller delvis avledas eller återcirkuleras till borrhålet. Brunnen har huvudsakligen använts som recirkulationsbrunn. Under vissa perioder på vintern har vatten uttagits (som regel 0,5 m³/h) och avletts för att ingående grundvattentemperatur till värmepumpen ej skall understiga 4°C. Under denna temperatur erhålls en viss is-påfrysning i förångaren.

Brunnen är 97 m djup och borrarad i granit. Grundvattentytan ligger ca 3 m under markytan. Kapaciteten är hög, 7000 l/h. Några grundvattenuttag är ej kända i områdets närhet.

Värmepumpen togs i drift 801128 och har därefter levererat erforderlig värme till huset. En elkassett på 3,5 kW är installerad som reservvärme.

Nr 2 Gamleby

Huset är en tillbyggd äldre fastighet på 112 m² golvyta ovan mark och 112 m² källare, belägen i Gamleby. Värmepumpen är inkopplad till den befintliga oljepannan. Värmepumpen har sedan start levererat all behövlig energi för uppvärmnings- och tappvarmvattenbehov.

Brunnen är 105 m djup och borrarad i diorit. Grundvattentytan ligger ca 4 m under mark. Brunnen har en kapacitet på 3500 l/h.

Allt grundvatten genom värmepumpen (39 l/min) recirkuleras till toppen av brunnen förutom hushållsvattenuttag. Detta uttag har varit i medeltal 0,5 m³/d eller 20 l/h under uppvärmningssäsongen. Totalt vattenuttag fram till aug -82 har varit 445 m³.

Värmepumpen togs i drift 801128.

Nr 3 Kinna

Huset är en äldre fastighet i Kinna med ca 130 m² uppvärmd bostadsyta. Värmepumpen är inkopplad till den befintliga oljepannan och levererar hela husets effektbehov. Brunnen utfördes som en recirkulationsbrunn med "öppet" system och är avsiktligt knappt dimensionerad, (dvs litet borrhål).

I januari efter 56 dagars drift (start 801028) hade temperaturen i brunnen sjunkit så pass att vattnet i förångaren frös. Temperaturen var då +2° på inkommande vatten och flödet 45 l/min. Efter tre veckors "vila" återupptogs driften igen med frysning i förångaren som följd. Installationen ändrades 810403 till kylslangbrunn. Totalt är ca 2 x 105 m slang (PEL, NT6, Ø 40 mm) installerad varav ca 2 x 5 m genom mark. Köldbärarflödet genom värmepumpen har ökat efterhand och är sedan 821124 28 l/min. Mellan 811215 och 820111 byttes värmepumpen efter kompressorhaveri.

Brunn	1 Linköping	2 Gamleby	3 Kinna	4 Tynnelsö Gård	5 Älvsjö
Bergart	granit 7,8	diorit 7,9	gnejs 7,8	gnejs 7,3	gnejs 7,6
Utgångstemp i borrhål; (på 50 m djup)					
Totalt djup (m)	97	105	100	150	150
Jorddjup (m)	13		9,5		1
Borrhålsdimension (mm)	110	110	110	165	110
Kapacitet (l/h)	7200	3500	50	torrt	180
Grundvattenyta (m) (från markytan)	3	4	11	3	8
Effektivt djup (mellan intagssläng o retur)	92	90	87	145 ⁴⁾	ca 140
Typ av energibrunn (se fig 2-2)	kombi-1) nation	kombi-2) nation	recirk/ kylslang ³⁾	kylslang ⁴⁾	recirk
Grundvattenpump/köldbärarpump	sänkpump 0,37 kW	sänkpump 0,74 kW	sänkp 0,37 kW	ca 125 W, ca 1 kW ⁶⁾	sänkpump
Värmepump, fabrikat	POLAR NT3	CIAT MS25	GM40	POLAR NT4	CIAT MS35
nominell värmeeffekt (6°/50°)	7 kW	9 kW	8-12 kW/ Nather S500-5 ⁵⁾	9 kW CIAT MS 50 ⁶⁾	12 kW
Dimensionerat för hela värmebehovet	ja	ja	ja	nej	ja

- 1) tidvis vattenuttag, 250-500 l/h
- 2) hushållsvattenuttag, 500 l/d
- 3) byte till kylslangbrunn 3/4-81, 2 x 100 m slang i brunnen, 2 x 5 i mark
- 4) 2 x 148 m slang i brunnen, 2 x 35 i mark
- 5) byte av VP 820111 p g a kompressorhaveri
- 6) byte aug -81

Tabell 3-1 Uppföljda energibrunnar. Utgångsförutsättningar

Brunnen är 100 m djup och har en kapacitet på 50 l/h. Grundvattenytan ligger 11 m under markytan. Vattenomsättningen mellan olika sprickor i brunnen är sannolikt obetydlig.

Nr 4 Tynnelsö Gård

En nybyggd fastighet på ca 400 m² uppvärmd yta vid Tynnelsö Gård nordväst om Mariefred värms delvis av en värmepump. Den levererade effekten från värmepumpen motsvarar ca hälften av maximalt effektbehov. Värmepumpen går i det närmaste kontinuerligt under uppvärmningssäsongen.

Brunnen är borrarad i gnejs till 150 m djup. Grundvattenytan ligger ca 2,4 m under markytan. Brunnen är torr. Det tar veckor innan vattennivån återställs om den urpumpas. En annan brunn för dricksvattenuttag ligger på 20 m avstånd, men uttaget ur denna brunn är litet.

Eftersom brunnen ligger några få meter över Mälarens nivå, några hundra meter från Tynnelsöfjärden, och i ett ganska flackt område, bör grundvattenomsättningen kring brunnen vara liten.

Brunnen är kopplad som en kylslangbrunn och ligger ca 35 m från värmepumpen. Totalt är 2 x 35 m (i mark) + 2 x 148 m (i brunnen) plastslang PEH NT6, \varnothing 40mm installerad. Slangarna mellan brunnen och värmepumpen är lagda i samma grav. Cirkulationen av brine-lösningen från början ca 21 l/min. Sommaren -81 utbyttes värmepumpen mot en ny med större effekt, varvid även en större cirkulationspump installerades (köldbärarflöde ca 50 l/min).

Värmepumpen togs i drift 810227.

Nr 5 Älvsjö

Installationen är belägen i Älvsjö, strax söder om Stockholm. En nybyggd fastighet på 200 m² uppvärmd bostadsyta försörjs med värme och varmvatten av värmepumpsinstallationen.

Energibrunnen drivs som en öppen recirkulationsbrunn.

Brunnen är 150 m djup och borrarad i gnejs. Grundvattenytan ligger ca 8 m under markytan. Kapaciteten har uppskattats till 180 l/h. Brunnen ligger i ett småkuperat område. Ytterligare en brunn finns borrarad ca 10 m från energibrunnen. Något vattenuttag sker ej ur brunnarna. Grundvattenomsättningen är troligen liten i och kring brunnen.

Värmepumpen togs i drift 810315.

4. MÄTUTRUSTNING

4.1 Instrumentering

De utvalda brunnarna har instrumenterats med värmemängdsmätare (värme ur grundvattnet), flödesmätare, gångtidsmätare, separata elmätare till värmepump och grundvattenpump, samt termometrar på in- och utgående flöden till värmepumpen. Installationen framgår i princip av fig 4-1.

Värmemängdsmätarna är av fabrikat Svensk Värmemätning, (SVME-62) med givare som klassats parvis för mätning av små temperaturskillnader, upplösning $0,02^{\circ}\text{C}$. Givarna är motståndstermometrar Pt 100 i dyrkrör.

Gångtidsmätarna registrerar kompressorgång. Elenergi till värmepumpen mätes, dvs energi till kompressordrift, styrning och värmespiraler i kompressorns oljetråg. De sistnämnda energimängderna är mycket små jämfört med energin för kompressordrift. Inga cirkulationspumpar i uppvärmningssystemet är medtagna (t ex för radiatorer eller tappvarmvattensystem).

Elenergi till grundvattenpump eller till cirkulationspump för köldbärarvätska mätes separat. Gångtiden på dessa pumpar har i flera fall varit onödigt lång på grund av att dessa felaktigt startat när värmepumpen varit blockerad av den inbyggda startfördröjningen.

Temperaturen på in- och utgående grundvattenflöden avläses med termometrar med skalindelning $0,2^{\circ}\text{C}$. Termometrar på in- och utgående värmevatten har skalindelning 2° per streck.

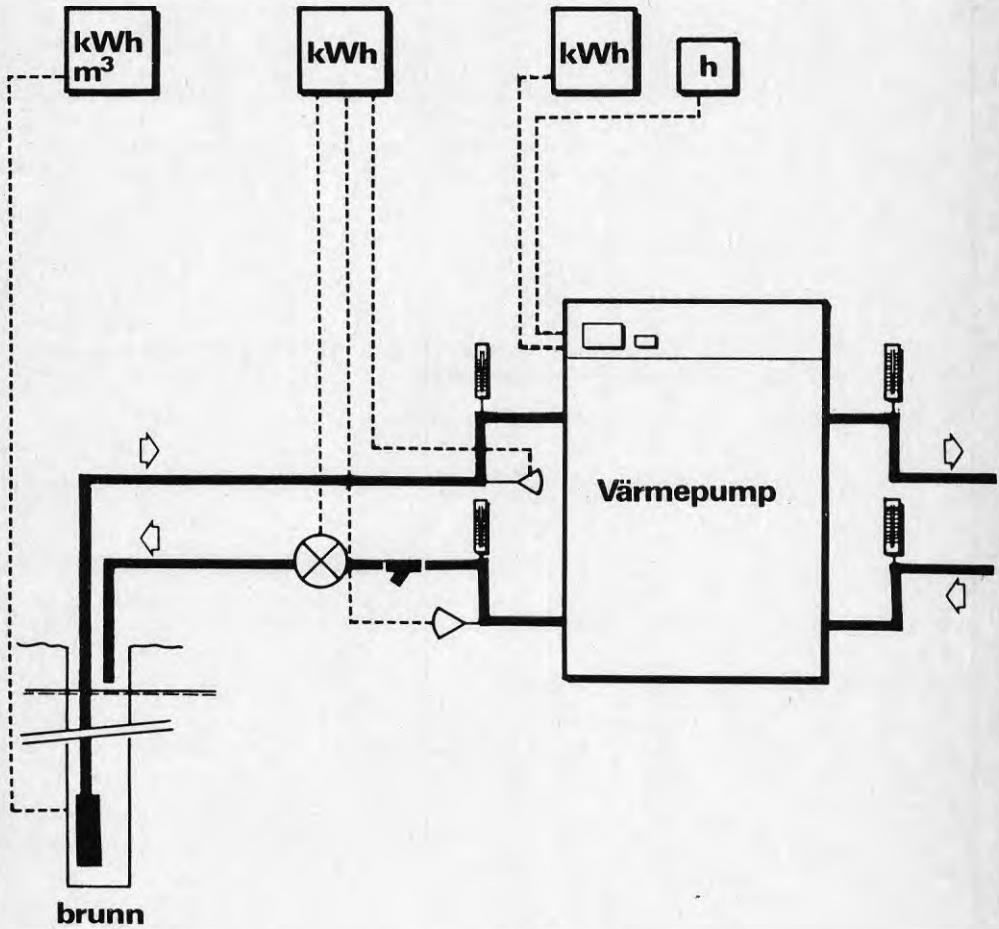
Avläsning av mätare och termometrar har som regel gjorts av husägaren med varierande tidsintervall. Vid avläsningstillfället noteras dessutom bl a utomhustemperatur, ev vattenuttag ur brunnen och driftstörningar.

4.2 Temperaturlodning

Temperaturprofiler i brunnarna har uppmätts med lod. Två typer av lod har använts, dels ett kabelljuslod (fabrikat OTT, Västtyskland, typ KLT) med upplösning $0,1^{\circ}\text{C}$ (max djup 100 m), dels med ett noggrannare lod lånat av SGU och med en upplösning väsentligt bättre än $0,01^{\circ}\text{C}$.

Temperaturprofiler har uppmätts i brunnarna före start samt, där så varit praktiskt möjligt, vid olika tidpunkter efter idrifttagning av brunnen. Nedföring av mätlo-

Instrumentering för uppföljning av recirkulationsbrunnar



Figur 4-1 Instrumentering. Principskiss.

det i brunnarna har i vissa fall förhindrats av utrymmesbrist i brunnstoppen efter installation av värmepumpen samt av snö och is. Vid ett par tillfällen har mätlodet fastnat mellan elkabeln och slangen till sänkpumpen varvid det har varit nödvändigt att lyfta upp pumpen. Av den anledningen har lodningarna av flera av provbrunnarna begränsats avseende antal och mätdjup.

4.3 Mätningarnas noggrannhet

Noggrannheten i värmemängdsmätning, elförbrukning etc har för de olika mätarna uppgivits vara av storleksordningen 0,5 - 4%. Kontroll av mätningarna mot uppgivna värden på prestanda på värmepumparna, sänkpumparna etc ger god överensstämmelse. Osäkerheten uppskattas vara väsentligt mindre än +/- 10%.

Flera av installationerna har av praktiska skäl ej varit komplett instrumenterade från start. Värmeuttag under perioden fram till instrumentering har då beräknats med hjälp av efterföljande mätresultat. Den tidsperiod som respektive installation ej varit fullt instrumenterad har varit kort och ökar inte nämnvärt osäkerheten i resultatet.

5. MÄTRESULTAT

5.1 Allmänt

Redovisade resultat är baserade på mätningar under knappt två eldningssäsonger. Installationerna togs i drift mellan november 1980 och mars 1981 och resultaten bygger på mätningar fram till sommaren 1982. Uppmätta energimängder, tider och temperaturer etc redovisas för respektive anläggning i 2 tabeller. Den första tiden från start fram till ungefär månadsskiftet april/maj 1981, dvs mellan 500 och 4800 timmars utvärderingsperiod redovisas i tabell 5-1. Ett års drift (maj 1981 till april 1982) redovisas i tabell 5-2. Nedan förklaras olika begrepp och termer som har använts för att utvärdera mätningarna och redovisa resultatet.

5.2 Uppföljda brunnar

5.2.1 Uttagen energi

Den uttagna energin kan härledas till tre olika källor:

- Energi, som tillförs brunnen via berget genom ledning på grund av att temperaturen i brunnen sänks under det omgivande bergets temperatur. Härvid har inräknats även de energitillskott som är att hänföra till eventuella grundvattenrörelser i berget mellan sprickor i borrhålet och i sprickor utanför borrhålet. Det har ej varit möjligt att särskilja dessa effekter.
- Energi, som tillföres genom påtvingad tillrinning av grundvatten genom uttag av vatten ur brunnen t ex genom att avleda en andel av returflödet från värmepumpen eller genom uttag av hushållsvatten. Den energimängd som på så vis tillföres energibrunnen är proportionell mot temperaturdifferensen mellan utgående flöde och det tillrinnande vattnets temperatur. Det innebär t ex att ett utsläpp av $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ 2-gradigt vatten ur en brunn med ursprunglig temperatur på 8° motsvarar ett energitillskott av $0,2 \times 1,16 \times (8-2) = 1,4 \text{ kWh/h}$ eller ett effekttillskott på 1,4 kW.
- Energi, som tillföres vattnet/kylvätskan via den pump som cirkulerar vätskan genom värmepumpens förångare.

Grundvattenpump: All den elektriska energi som tillföres en sänkpump i borrhålet omvandlas till slut via friktionsförluster till värmeenergi som tillföres grundvattnet.

Cirkulationspump: De cirkulationspumpar som används till kylslangbrunnar är vanligtvis skvåttordrivna pumpar, vilket medför att i det närmaste all tillförd elektrisk energi via tryckförluster omvandlas till värme i den cirkulerande vätskan. För cirkulationspumpar med friliggande (luftkyld) motor i här aktuella storlekar gäller att motorförluster på ca 15 % ej tillgodoses den cirkulerande vätskan.

Den totala värmemängd som tillförs fastigheten är summan av tillförd elektrisk energi till värmepumpen och ur förångaren upptagen energi. Förhållandet mellan avgiven värme från värmepumpen och tillförd drivenergi, värmefaktorn, är beroende på det totala uppvärmningssystemet som den bergborrande brunnen är en del av. I det följande koncentreras rapporten på att redovisa de energimängder och effekter som uttas ur brunnen. För att erhålla de energimängder som har levererats som värme i fastigheten skall följaktligen insatt elektrisk energi till värmepumpen adderas.

Den energimängd som upptagits ur grundvattnet respektive köldbärandevätskan har för de olika installationerna varierat mellan 11,1 och 30,6 MWh/år. Energiuttaget räknat per meter (vattenfyllt) borrhål har varierat mellan 122 och 211 kWh/m och år.

Vid installationerna i Linköping och Gamleby har vatten uttagits ur brunnen motsvarande ett "grundvattenvärmeuttag" på ca 1,7 respektive 2,1 MWh/år.

En pump till en öppen recirkulationsbrunn har oftast större energiförbrukning än en cirkulationspump till en motsvarande kylslangsbrunn. De energimängder som förbrukas av en sänkpump och tillförs brunnsvattnet kan vara betydande. En felaktigt dimensionerad sänkpump (eller slang) kan lätt sänka nettovärmefaktorn (och ekonomin) på anläggningen under acceptabel nivå. Ejektorpumpen är generellt olämplig i detta sammanhang på grund av dess höga specifika energiförbrukning. Cirkulationspumparna kan dimensioneras för lägre tryckuppsättning och förbrukar därmed avsevärt mindre energi. I de instrumenterade brunnarna har pumparnas energiförbrukning motsvarat 5-15% av den ur grundvattnet upptagna energin.

Den återstående och största energimängden som uttagits och som i det följande kallas för bergvärme är mellan 68 och 95% av totalt upptagen energi i de uppföljda brunnarna.

5.2.2 Uttagen effekt

Den effekt som uttagits ur brunnen per meter borrhål under gång av värmepump och det genomsnittliga effektuttaget under hela utvärderingsperioden har varierat avsevärt mellan de olika observerade installationerna.

I redovisningen har värmeuttaget ur brunnen fördelats över brunnens effektiva värmeutbytande längd. Denna effektiva längd har definierats som höjden på vattenpelaren mellan sänkpump och returledning. För kylslangbrunnen har avståndet mellan grundvattenytan och slangarnas nedersta punkt använts. För både recirkulations- och kylslangbrunnarna motsvarar denna längd i dessa fall i det närmaste hela höjden på vattenpelaren i borrhålet. Någon korrektion för dragningen genom mark mellan brunn och värmepump har inte gjorts. Dessa avstånd är mindre än ca 5 m för samtliga installationer utom i Tynnelsö, där avståndet är ca 35 m.

Uppmätta effekter och energimängder redovisas i tabellerna 5-1 och 5-2. Mängden elektrisk energi till grundvattenpumparna har för några av installationerna varit onödigt stor i början. En anledning till detta är att grundvattenpumpen i vissa fall varit i drift även under den tid då den inbyggda återstartsfördröjningen på värmepumparna varit i funktion.

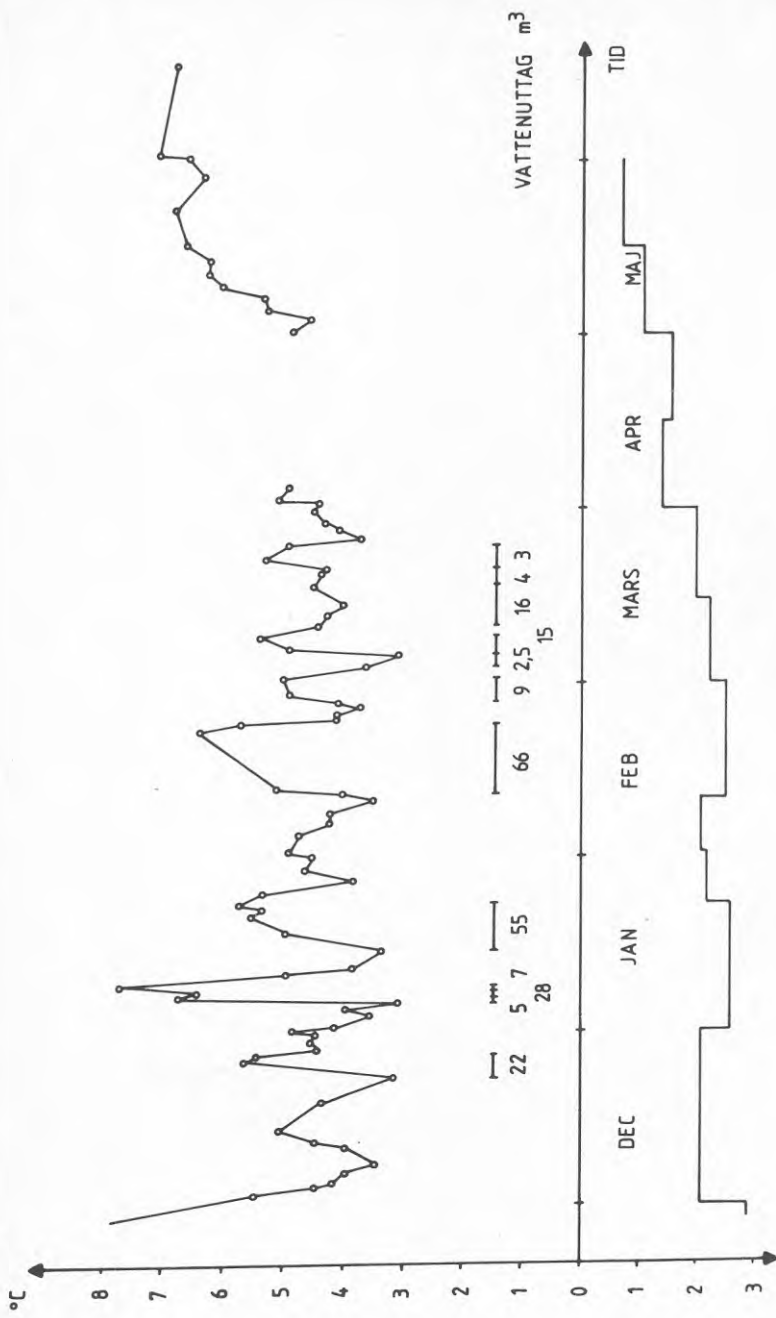
Den installerade kyleffekten har legat mellan 40 - 60 W/m aktivt borrhål för installationerna. Det rena bergvärmebidraget har varit mellan 28 - 51 W/m (tabell 5-2). Lagg märke till att kyleffekten är något högre i startperioden.

Det genomsnittliga effektuttaget (dvs den totalt uttagna energimängden utslagen över 1 år) varierar mindre. Totalt har ca 14 - 24 W/m borrhål uttagits, därav bergvärme 10 - 21 W/m borrhål. Det lägre värdet gäller Linköping, där temperaturen på grundvattnet till värmepumpen med avsikt ej tillåts gå under 4^o. Det högre gäller Tynnelsö Gård, en kylslangbrunn som utgör basvärmekälla för fastigheten.

Den energimängd som uttas ur bergmassan är proportionell mot temperatursänkningen i brunnen. Genom kontinuerliga avläsningar på in- och utgående grundvatten till värmepumpen är det möjligt att göra en uppskattning av korrelationen mellan temperatursänkningen i brunnen och effektuttaget. Skillnaden mellan den uppskattade drifttemperaturen under perioden och ursprungstemperaturen ger en drivande temperaturdifferens.

Det genomsnittliga effektuttaget av bergvärme kan då uppskattas grovt till 3,2 - 4,2 W/m, °C för perioden efter start; tabell 5-1. Någon uppskattning av medeltemperaturen under ett helt års drift är inte meningsfullt att göra i dessa fall.

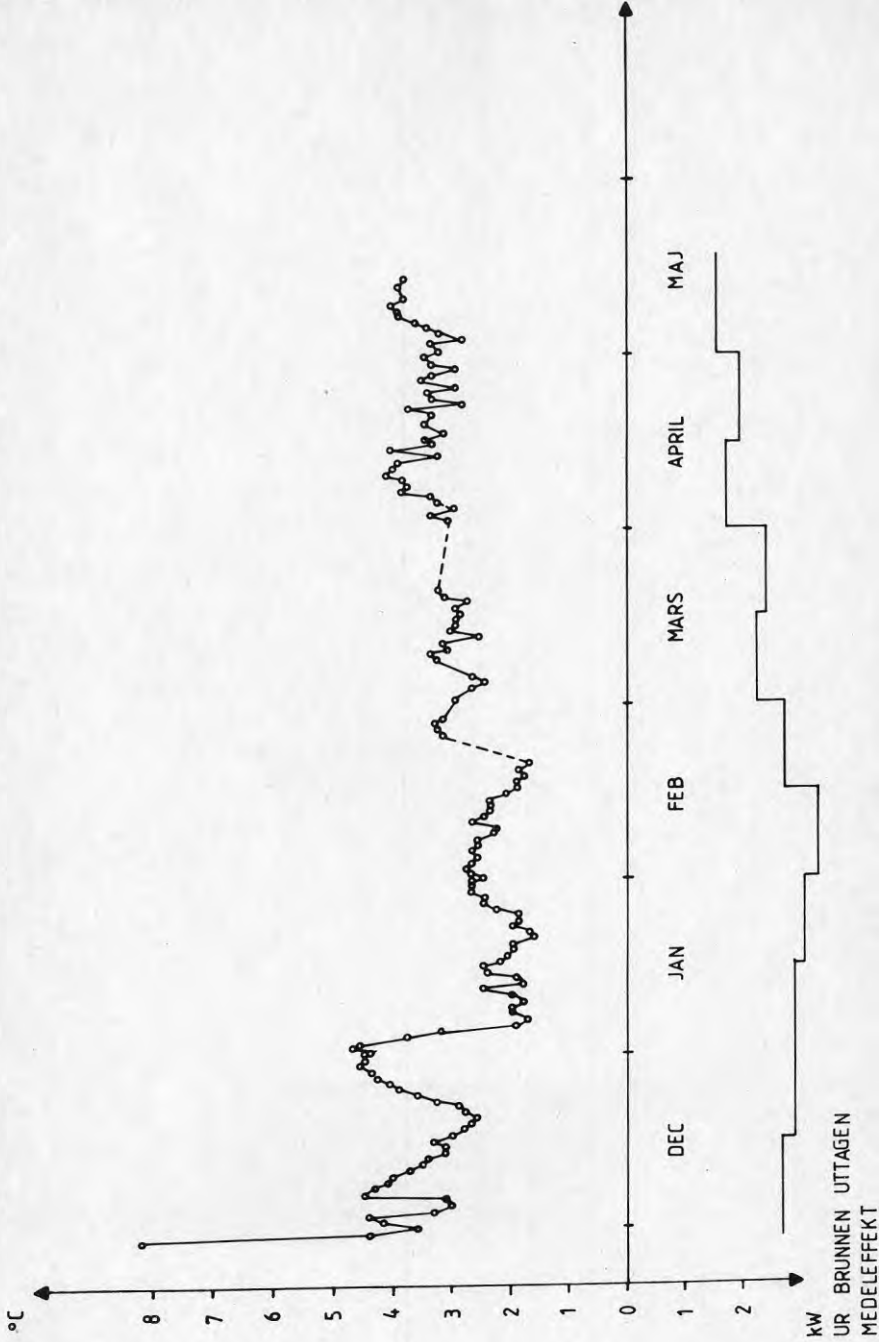
TEMPERATUR PÅ
INGÅENDE VATTEN
TILL VÄRMEPUMP



kw
UR BRUNNEN UTTAGEN
MEDELEFFEKT

Figur 5-1 Kombinationsbrunn, Linköping. Ingångstemperatur på vatten in till värmepump, uttagen medeleffekt ur vattnet samt tillfälliga uttag av grundvatten ur brunnen.

TEMPERATUR PÅ
INGÅENDE VATTEN
TILL VÄRMEPUMP



Figur 5-2 Recirkulationsbrunn, Gamleby. Ingångstemperatur på vatten in till värmepump samt uttagen medeleffekt ur det cirkulerade vattnet. Vattenuttag har under perioden varit i medeltal 20 l/h (0,48 m³/dygn) för hushållsbehov.

5.2.3 Temperatur i brunnen vid start och under drift

Recirkulationsbrunn

Omedelbart efter start av en energibrunn sjunker temperaturen anmärkningsvärt snabbt. Temperatursänkningen avtar emellertid efter en kortare driftperiod, i föreliggande fall efter några dagar till en vecka, och sjunker därefter avsevärt långsammare. I fig 5-1 och 5-2 återges temperaturförlopp och effektuttag i Linköping och Gamleby. Den redovisade temperaturen gäller ingående grundvatten till värmepumpen. Temperatursänkningen över värmepumpen är i Linköping ca 1,8° och i Gamleby ca 1,9°. Eftersom värmepumpen inte har gått kontinuerligt måste även hänsyn tagas till stilleståndsperioder vid uppskattning av en medeltemperatur i brunnarna.

Kylslangbrunn

Temperatursänkningen i köldbäraren i en kylslangbrunn blir större än sänkningen av temperaturen på cirkulerande grundvatten i en motsvarande recirkulationsbrunn. Värmet måste transporteras från bergväggen genom det mer eller mindre stillastående brunnsvattnet och genom slangmaterialet in i glykollösningen. Dessa tillkommande värmeöverföringsmotstånd övervinns till kostnad av en temperaturförlust. Temperaturfallet är direkt belastningsberoende. I Tynnelsö och Kinna är temperaturfallet i storleksordningen 2 - 4°. Exakta mätningar har inte varit möjliga att utföra.

Temperaturförloppet i Tynnelsö Gård ges som exempel.

Tid (timmar)	Temperatur på köldbärare		
	$t_{in}^{\circ C}$	$t_{ut}^{\circ C}$	$t_{in}-t_{ut}$
0	7,6	7,6	
2	4,8	1,0	3,8
25	2,4	-0,8	3,2
250	1,8	-0,9	2,7
1500	+0,4	-2,2	2,6

Temperaturen på ingående köldbärarvätska sjönk från 7,6° vid start till 4,8° efter 2 timmars drift. Efter 25 timmars drift var temperaturen 2,4°. Det kraftiga temperatursänkingsförloppet avtog vid ca 2° på propylenglykollösningen för att därefter långsamt sjunka till som lägst ca +0,4°. Värmepumpen hade då gått i det närmaste kontinuerligt i 1500 h (ca 50 dygn) med ca 28 W/m kyleffekt.

Notera även den kraftiga förändringen i värmepumpens kyleffekt i detta fall när glykollösningens temperatur sjunker.

Brunn	1	2	3	4	5
Ursprunglig temp	7,8	7,9	7,8	7,3	7,6
Drifttemp 1)	3,6	1,8	3	7,5)	
Temperatursänkning	4,4	6,1	4,8	-	
Utvärderingsperiod	3672	3336	4800	1547	294
Gångtid, värmepump	1529	1779	1740	1423	
Uttagen energi ur brunnen 4)					
därav bergvärme 2)	8000	8740	9300	6080	2500
vattenuttag 2)	5440	5970	8500	5750	2300
el till grund- vatteppump	1360	670	0	0	0
Medeleffekt 3)	1200	2100	800	330	220
uttagen effekt totalt 4) W/m 4)	55,1	54,6	61	29,4	60,9
därav bergvärme	38,7	37,3	56	27,9	55,4
Medeleffekt					
uttagen effekt totalt 4)	23,7	29,1	22	27,1	
därav bergvärme	16,1	19,9	20	25,7	
uttagen effekt totalt 4) W/m, °C 8)	5,4	4,7	4,6		
därav bergvärme	3,7	3,2	4,2		

- 1) Medeltemperatur i borrhålet, uppskattad ur driftjournal
- 2) Se definition i text
- 3) När värmepumpen arbetar
- 4) För totallevererad värme från värmepumpen tillkommer elenergin till VP
- 5) Ca 0°C på brine-lösningen
- 6) Uppskattade temperaturer, baserade på både recirkulations- och kylslangskopplad drift
- 7) Under värderingsperioden
- 8) Dessa värden är osäkra; bygger på en uppskattad medeltemperatur
- 9) Gäller först installerad VP (se tab 3-1)

Tabell 5-1 Uppmätta energimängder och effekter i uppföljningsbrunnarna från start fram till ca maj 1981. Observera att värdena avser endast utbyten mellan värmepump och brunn. För totalt levererad värme till fastigheterna tillkommer drivenergin till värmepumpen.

1 år Typ	Kombinations- brunn Linköping	Kombinations- brunn Gamleby	Kylslang- brunn Kinna ⁶⁾	Kylslangbrunn Tynnelsö Gård 8)	Recirkula- tionsbrunn Älvsjö
Ursprunglig temp	7,8	7,9	7,8	7,3	7,6
Drifttemperatur ¹⁾	ca 2,0	ca 0,3	ca -4	ca -4	ca 1,8
Utvärderingsperiod	8760	8760	8760	8760	8760
Gångtid, värmepump	2280	3330	2695	5194	2368
Uttagen energi ur brunnen ⁴⁾	12210	15450	11136	30615	17065
därav bergvärme ²⁾	8200	9336	10700	26422	15627
vattenuttag ²⁾	1730	2144	-	-	-
el till grund- vattenpump	2280	3970	436	4193 ⁹⁾	1438
Installerad kyleffekt ³⁾ totalt ⁴⁾	58,2	51,6	46,5	40,7	51,5
därav bergvärme	39,1	31,2	45,6	35,1	47,1
Medeleffekt ⁷⁾ uttagen effekt totalt ⁴⁾	15,2	19,6	14,6	24,1	13,9
därav bergvärme	10,2	11,8	14,0	20,80	12,7
Värmefaktor: netto ⁵⁾ brutto	2,15 2,71	ca 1,8 ca 2,5	2,10 2,20	2,06 2,60	2,46 2,84

1) Lägsta under året (från värmepump)

2) Se definition i text

3) När värmepumpen arbetar

4) För totallevererad värme från värmepumpen till-

kommer elenergi till VP

5) Hänsyn tagen till energi förbrukad av köldbärarpump

6) Kylslangkopplad drift, stillestånd 21/12-

11/2 på grund av kompressorhavveri

7) Under utvärderingsperioden

8) Ej korrigerat för 65 m rörgrav mellan hus
och brunn

9) 85% av köldbärarpumpens förbrukade energi

Tabell 5-2 Energimängder och effekter för 1 års värmeuttag. Observera att värdena avser endast utbyten mellan värmepump och brunn. För totalt levererad värme till fastigheterna tillkommer drivenergin till värmepumpen.

5.2.4 Temperaturprofiler

Normalt varierar temperaturen i markytan beroende på årstidernas temperaturvariationer för att stabilisera sig vid ca 40 m djup. Därefter ökar temperaturen med ca 0,5 - 1,5° per 100 m djup. Exempel på detta visas bl a i /Andersson 80/. I alla brunnar i projektet var gradienten normal. Vid de temperaturprofiler som uppmättes i detta projekt noterades

- att vid kylning av brunnen parallellförflyttas temperaturkurvan, dvs brunnen kyls lika mycket utmed hela djupet
- ingen skillnad mellan öppna och slutna system.

Som exempel redovisas temperaturkurvor för den brunn i Djursholm, som redogörs för i avsnitt 6. I figur 5-3 är kurvorna inritade för ostört hål samt vid det återhämtningsförlopp som följde efter 3.000 timmars kontinuerlig drift. Startförutsättningarna ges av kurva noll (0), kurva 1 anger temperaturen efter drygt 3.000 timmars kontinuerlig drift, kurva 2 efter 0,5 timmars stillestånd, kurva 3 efter 8 timmars stillestånd och kurva 4 efter 24 timmars stillestånd. Vid återupptagen drift sjönk temperaturen på 8 timmar till en nivå motsvarande kurva 2. Se vidare avsnitt 6.

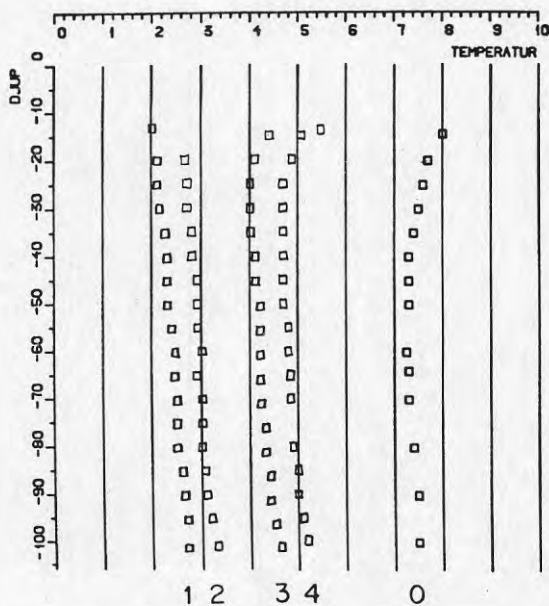


Fig 5-3 Temperaturprofil i en energibrunn i Djursholm (öppet system) före start (0), efter 3.000 h kontinuerlig drift (1), därefter 0,5, 8 och 24 timmars driftuppehåll, kurva (2), (3) och (4)

6. ERFARENHETER FRÅN ENERGIBRUNNAR UTANFÖR PROJEKTETS MÄTPROGRAM

Inom projektet har vid sidan av de instrumenterade brunnarna följts ytterligare ett antal brunnar. I tabell 6.1 redovisas utgångsförutsättningar och resultat för två av dessa. En kort beskrivning av installationerna ges nedan.

Nr 6 Djursholm

En villa i Djursholm har en värmepump Lotico T2 som basvärmekälla. Värmepumpen är kopplad parallellt med oljepannan som stöttar vid utetemperaturer under ca 0°.

Brunnen är 106 m djup och borrar i Stockholmsgranit. Den ligger på en höjd på nivån ca +35m.

Grundvattenytan ligger 15 m under markytan. Kapaciteten har uppskattats till 1800 l/h. Något nämnvärt vattenuttag har inte gjorts ur brunnen. Några grundvattenuttag i omgivningen är ej kända. Det är troligt att grundvattenytan naturligt ligger ca 15 m under markytan (ca +20) och dräneras till omgivande dalgångar, där markytan ligger på ca +10. Avståndet till Stora Värtan är ca 1 km.

Grundvattenomsättningen bedöms vara liten.

Värmepumpen startade 801211 och har i det närmaste gått kontinuerligt som recirkulationsbrunn till början av maj 1981. Gångtid och temperatur på utgående vatten har noterats kontinuerligt. Den övervägande delen av tiden har värmepumpen arbetat med vattentemperaturer mellan 2 och 3° i förångaren och med en utgående temperatur på vattnet från kondensorn på 50-55°. Vid dessa förhållanden är kyleffekten 2,7 kW enligt typprovning. Sänkpumpen (typ DEBE, mod C9) har antagits förbruka 0,7 kWh/h.

Uttag av bergvärme har över den installerade tiden beräknats vara 23 W/m borrhål eller ca 4,6 W/m, °C.

Den 14--15/5 1981 gjordes ett antal temperaturloggningar i brunnen efter 3450 timmars drift av totalt 3670 möjliga. I fig 6-1 återges medeltemperaturen i borrhålet vid start och efter 3450 h drift. Dessutom har den teoretiska medeltemperaturen redovisats. (Vid beräkningen har använts $\lambda = 3,5 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$ $R = 0,055 \text{ m}$, $Q = 23 \text{ W/m}$, $a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Se avsnitt 2.3). Efter mätningen stannades värmepumpen i 24 timmar och brunnen temperaturloggades efter 1/2, 8 och 24 timmar, varefter driften återupptogs.

Brunn	Djursholm 6	Upplands-Väsby 7
Start	80-12	80-07
Bergart	Sthlms-granit	
Utgångstemp i borrhål; på 50 m djup(°C)	7,3	ca 11
Totaldjup (m)	106	103
Borrhålsdimension (mm)	110	110
Kapacitet (l/h)	1800	ca 300
Grundvattenyta (från markytan) (m)	13	4
Effektivt djup (m)	87	99
Typ av energibrunn (se fig 2.2)	recirk	kombination ¹⁾
Grundvattenpump/ kylvätskecirkulationspump (kW)	sänkpump/ 0,55	0,37
Värmepump, fabrikat	LOTICO T2	VÖLUND 3 moduler
Nominell värmeeffekt (6°/50°) (kW)	7,5	13
Drifttemp ²⁾ (°C)	2,4	ca 2,5
Δt (°C)	4,9	8,5
Tid, totalt installerad (h)	3096	3100
Gångtid (h)	3014	7666 ³⁾
Uttagen energi ur brunnen ⁴⁾ (kWh)	8100	17000
därav bergvärme ⁵⁾ (kWh)	6000	6800-10800
vattenuttag ⁵⁾ (kWh)	0	5000- 9000
el till grundvattenpump (kWh)	2100	1200
Installerad kyleffekt		
totalt ⁴⁾ (W/m)	31	67
därav bergvärme (W/m)	23	37-63 ⁶⁾
Genomsnittligt uttag		
totalt ⁴⁾ (W/m)	30	55
därav bergvärme (W/m)	23	22-35
totalt ⁴⁾ (W/m, °C)	ca 6,0	ca 6,5
därav bergvärme - " -	ca 4,6	2,6-4,1

1) utsläpp jan-mars, 250-320 l/h vid gång av värmepump

2) uppskattad ur driftjournal

3) ackumulerad gångtid på 3 kompressorer

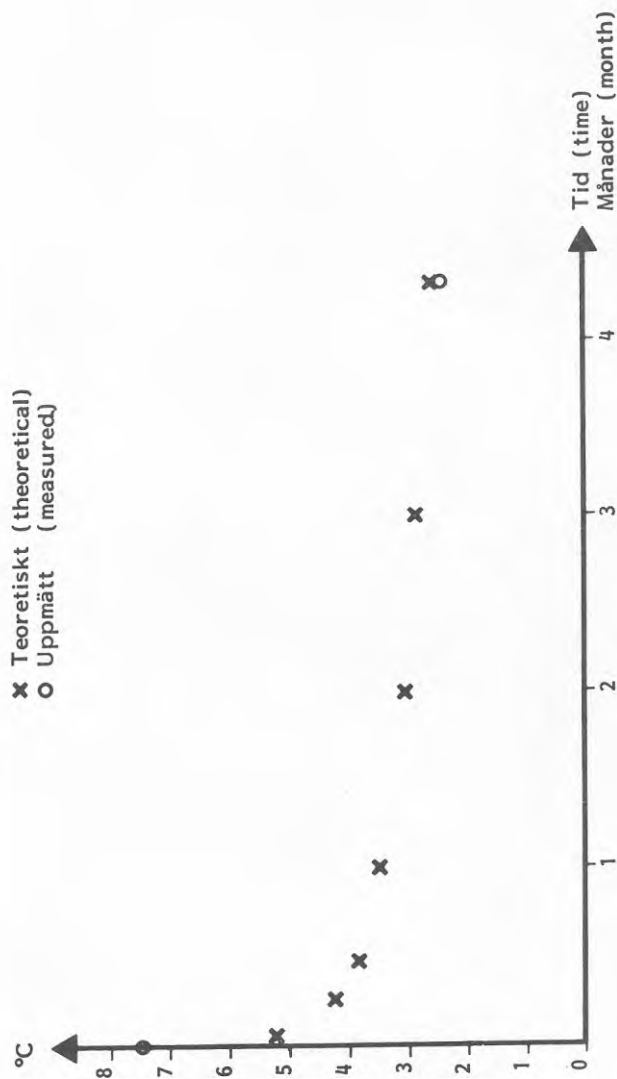
4) W/m effektivt djup

5) se definition i text

6) beroende på aktuellt vattenutsläpp

Tabell 6-1 Förutsättningar och beräknade energiuttag för två extensivt följda energibrunninstallationer

Djursholm



Figur 6-1

Djursholm. Uppmätt och teoretiskt beräknad medeltemperatur i brunnen efter 3450 timmars värmepumpdrift. Se i texten för aktuella förutsättningar.

Temperaturen på 60 m djup har redovisats i fig 6-2, där även teoretiska värden har införts. Efter en halv timmes stillestånd hade temperaturen ökat med $0,6^{\circ}$, efter 8 timmar med $1,8^{\circ}$ och efter 24 timmar med $2,4^{\circ}$. Återhämtningen av brunnen sker som synes snabbt och överensstämmer väl med de beräknade temperaturerna. Vid återupptagen drift sjönk temperaturen snabbt, även det i god överensstämmelse med de teoretiska beräkningarna.

Den temperaturpåverkade bergmassan kring brunnen har beräknats teoretiskt och redovisas i fig 6-3. Efter drygt 4 månaders drift har medeltemperaturen i borrhålet beräknats till $2,7^{\circ}$, en sänkning av ursprunglig temperatur med $4,7^{\circ}$. 0,1 m från borrhålscentrum är temperatur-sänkningen $4,3^{\circ}$ och på 1 m avstånd $1,7^{\circ}$. Ur dessa beräkningar kan t ex framläsas att om borrhålet varit \varnothing 165 mm, i stället för som nu \varnothing 110 mm, hade temperaturen i borrhålet varit $0,4^{\circ}$ högre.

Nr 7 Upplands Väsby

En fastighet i Upplands Väsby har installerat en värmepump, typ Völund, 3 moduler, som tar värme ur en 103 m djup brunn. Brunnen är inkopplad enligt recirkulationsprincipen. Termometrar finns på in- och utgående vattenledning och modulernas gångtid mätes.

Brunnsvattnet pumpas genom en plattvärmväxlare av en 0,35 kW pump (Grundfos CPE 32-4) och värmepumpen erhåller värme via en glykolslinga. Temperaturnivåerna över värmväxlaren har vid ett tillfälle uppmätts. Vid $3,5/1,5^{\circ}$ på grundvattnet var temperaturen på glykolslingan $-5,5/-2,5^{\circ}$.

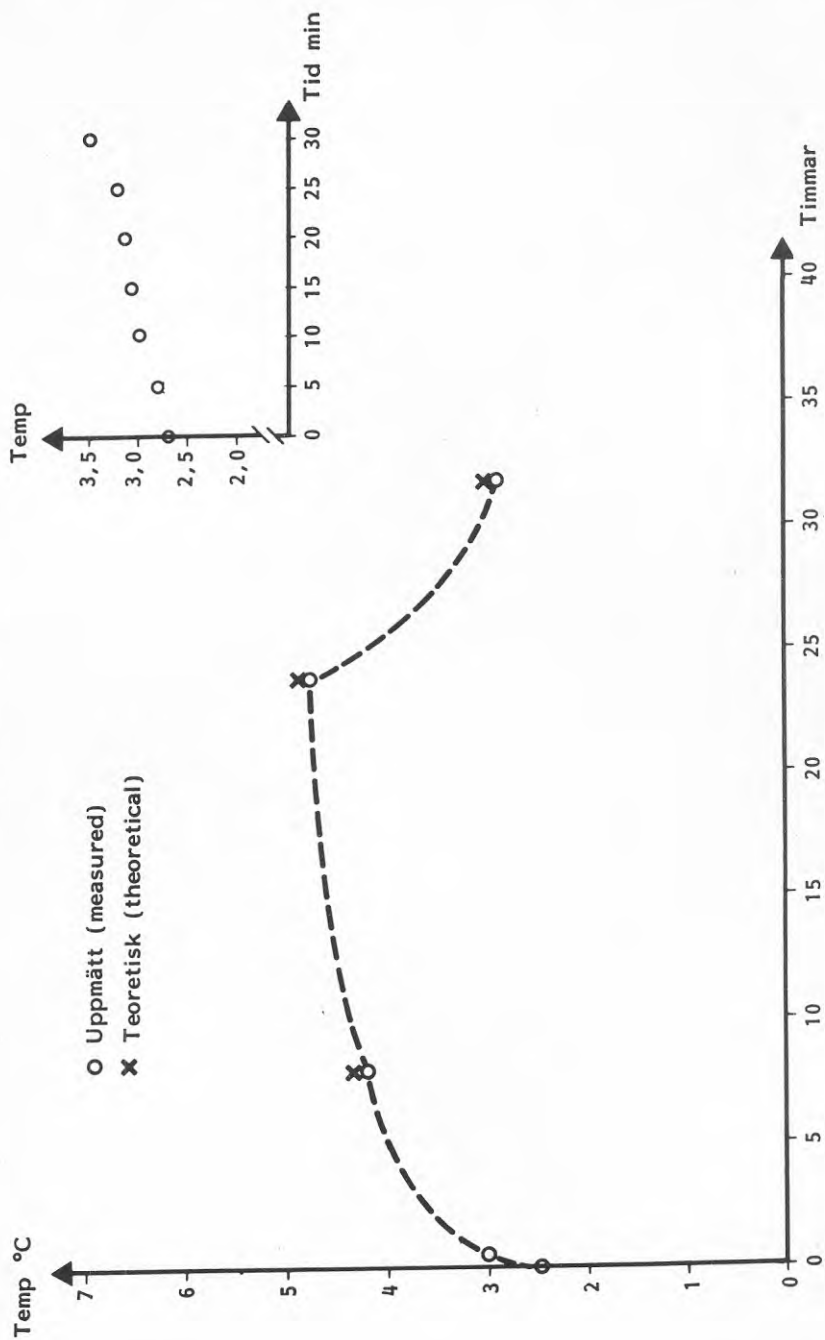
Installationen togs i drift 800723 och har levererat värme och varmvatten. Under vintern har en i värmepumpen inbyggd elpatron samt separata elradiatorer kopplats in vid behov.

Den höga utgångstemperaturen på grundvattnet, $+11^{\circ}\text{C}$ (uppmätt av fastighetsägaren), kan bero på den 100 m norr om fastigheten gående Käppala-tunneln.

Temperaturen på ingående grundvatten sjönk från start (800723) till $+9^{\circ}$ (27/9), 8° (15/10), $3,5^{\circ}$ (15/1), $3,1^{\circ}$ (21/1), $4,0^{\circ}$ (19/3) och $2,0^{\circ}$ (24/4).

Under perioden jan-mars 1981 släpptes 250 - 320 l/h till avlopp kontinuerligt för att undvika isbeläggning på och i plattvärmväxlaren.

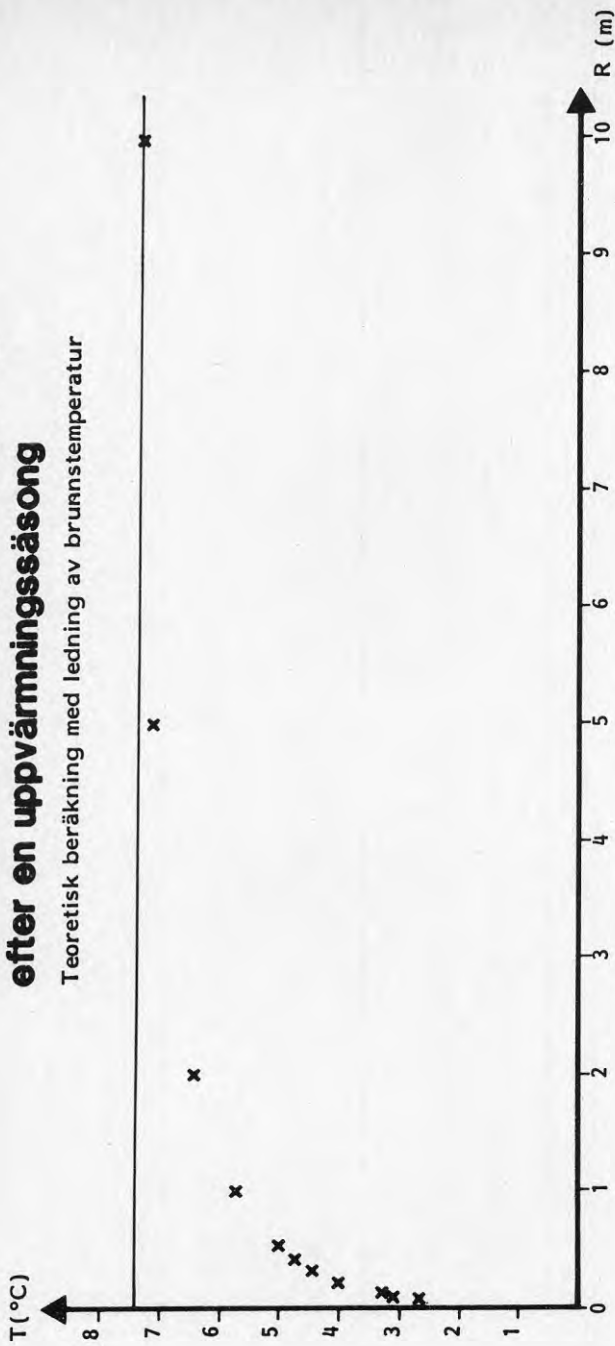
Djursholm



Figur 6-2 Uppmätt samt teoretiskt beräknad medeltemperatur vid 24 timmars stopp av värme-
pump efter 3450 h drift. Se vidare i text för aktuella förutsättningar.

Djursholm, temperaturpåverkad zon efter en uppvärmningssäsong

Teoretisk beräkning med ledning av brunnstemperatur



R (m)	0,055	0,07	0,0825	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	5	10
Δt °C	4,72	4,46	4,09	3,37	2,94	2,41	2,41	1,70	1,00	0,26	0,02
Akt temp	2,69	2,94	3,11	3,31	4,03	4,46	4,99	5,70	6,40	7,14	7,38

Figur 6-3 Teoretiskt beräknad temperaturpåverkad zon efter 3450 h kontinuerlig drift med uttag 23 W/m berg och värmeledningstal 3,25 W/m, °C.

Under perioden 6/1 - 15/5 1981 har värmepumpen arbetat med i det närmaste konstanta betingelser. Vid en temperatur på glykolslingan till värmepumpen på ca $-2,5^{\circ}$ och på utgående värmevatten $+40^{\circ}$ är varje moduls kyleffekt ca 2,2 kW. Under denna period har totalt extraherats ca 17.000 kWh ur brunnen. Av denna mängd kan 5000-9000 kWh hänföras till grundvattenuttaget och ca 1200 kWh till värmeenergi avgiven från grundvattenpumpen.

Uttag av bergvärme uppskattas till i genomsnitt 22 - 35 W/m. Intervallet beror på osäkerheten i mängden uttaget vatten ur brunnen. Med en uppskattad medeltemperatur på $2,5^{\circ}$ i brunnen ger detta ett bergvärmeuttag på 2,6-4,1 W/m, $^{\circ}\text{C}$.

Den redovisade perioden motsvarar den senare hälften av uppvärmningssäsongen 1981 efter ca 6 månaders drift. Under tiden från start fram till januari -81 har inget vatten tagits ut och mellan 15/10 -80 till 6/1 -81 bör bergvärmeuttaget i genomsnitt ha varit ca 50 W/m.

7. JÄMFÖRELSE MELLAN MÄTRESULTAT OCH TEORETISKA BERÄKNINGAR

7.1 Förutsättningar

De energi- och effektuttag som uppmätts för de olika anläggningarna har använts som indata vid simulering med hjälp av dator. Programmet arbetar efter finita differensmetoden (FDM) och är utvecklat vid institutionen för matematisk fysik, LTH, Lund. I beräkningsmodellen tas inte hänsyn till s k randeffekter i borrhålets topp och botten utan behandlar endast värmeledning radiellt ut från borrhålet. Detta är tillräckligt vid simulering av de första 10 - 20 årens energiuttag. Vid simulering ges som indata, förutom när och hur mycket energi som tas ur borrhålet även

bergets värmeledningsförmåga	(W/m, °C)	
bergets värmekapacitet	(MJ/m ³ °C)	(2,16 x 10 ⁶)
borrhålets diameter	(mm)	(enligt tabell 3-1).

Den beräknade temperaturen kan därefter jämföras med verklig temperatur. Genom att pröva olika värmeledningstal vid datormuleringen kan man ringa in det aktuella bergets värmeledningsförmåga.

7.2 Begränsningar

De uppföljda energibrunnarna har ej varit utrustade med kontinuerlig mätning av aktuell brunnstemperatur. De temperaturer som regelbundet avlästs är in- och utgående flöde av grundvatten respektive köldbärare. Om värmepumpen går kontinuerligt ger dessa temperaturer aktuell medeltemperatur i brunnen på köldbäraren respektive grundvattnet. Den medeltemperatur som råder i brunnen, eller snarare i borrhålsväggen, vid avläsningstillfället (den drivande kraften för värmeledningen genom berget) är beroende av värmeöverföringsmotståndet mellan den vätska som kyls i värmepumpen och borrhålsväggen. Ett öppet system (där grundvattnet är köldbärare) ger ett mycket litet sådant värmeöverföringsmotstånd och detta kan försummas vid utvärdering av resultaten. En kylslangbrunn däremot har flera grader lägre temperatur på köldbäraren än den medeltemperatur som råder i brunnen. Detta har behandlats i kapitel 5.

För de anläggningar som går diskontinuerligt kommer de avlästa temperaturnivåerna att variera beroende på hur lång tid som går mellan tillslag av värmepumpen och temperaturavläsningen. Alldeles efter tillslaget erhålls en hög temperatur genom att brunnen "återhämtat" sig under

viloperioden. Analogt följer att den temperatur som avläses i slutet av ett drifttillfälle är lägre än brunnens representativa medeltemperatur.

Dessa avlästa temperaturer på den cirkulerande vätskan har kompletterats med mätningar i brunnen med lod. Detta har givit ett antal kända brunnstemperaturer.

Av dessa anledningar redovisas endast de temperaturer som bör vara mest representativa och informativa.

Vid simulering av uttagna energimängder har det varit nödvändigt av praktiska skäl att förenkla verkligheten. De varierande effektuttagen har vid simuleringen givits som en medelbelastning över en period. Längden på denna period har varierats efter tillgång på data och förändring av värmebehovet.

7.3 Resultat

Simuleringsresultaten redovisas nedan i diagramform. I diagrammen är även infört ett urval uppmätta temperaturer, som anses vara intressanta att jämföra.

Linköping

Installationen i Linköping är som framgått av tidigare avsnitt en kombinationsbrunn. I figur 5-1 har tidigare redovisats temperaturer och vattenuttag under de första 7.000 timmarna. Dessa vattenuttag har i möjligaste mån tagits hänsyn till vid simuleringen av denna period. Korrektionen är gjord enligt avsnitt 2.6. Vid vattenuttag därefter, dvs från uppvärmningssäsongen vintern 1981/82, har ej varje tillfälle med vattenuttag simulerats, utan istället har brunnens medelbelastning använts. Resultat av simuleringarna redovisas i figur 7-1. Simuleringarna tyder på att ett ansatt värmeledningstal av knappt 3 W/m, °C ger en relativt god överensstämmelse med experimentella data. När bergvärmeuttaget är så litet som i detta fall, är det inte möjligt att med dessa mätningar göra en mer exakt uppskattning av värmeledningensförmågan. Därtill är temperaturskillnaderna för små.

Notera att i beräkningarna tas inte hänsyn till olika värmeledningstal i olika lagerföljder utan det är ett "genomsnittligt" värde. I Linköping är jordlagret djupt, 13 m, vilket motsvarar 10% av vattenpelarens höjd, och detta ger naturligtvis ett lägre genomsnittligt värmeledningstal eftersom jord generellt har lägre värmeledningensförmåga än berg.

Gamleby

I figur 7-2 har simulerats temperaturförloppet i brunnen i Gamleby för värmeledningstalen 2,25, 2,50 och 2,75 W/m, °C.

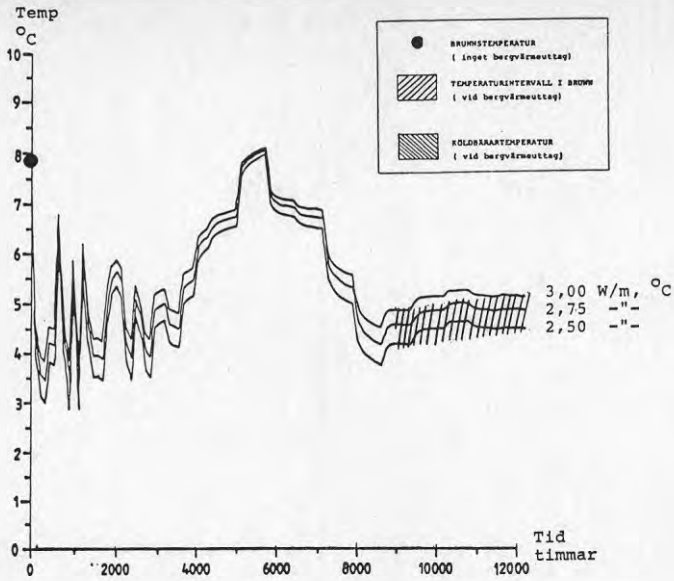


Fig 7-1 Linköping

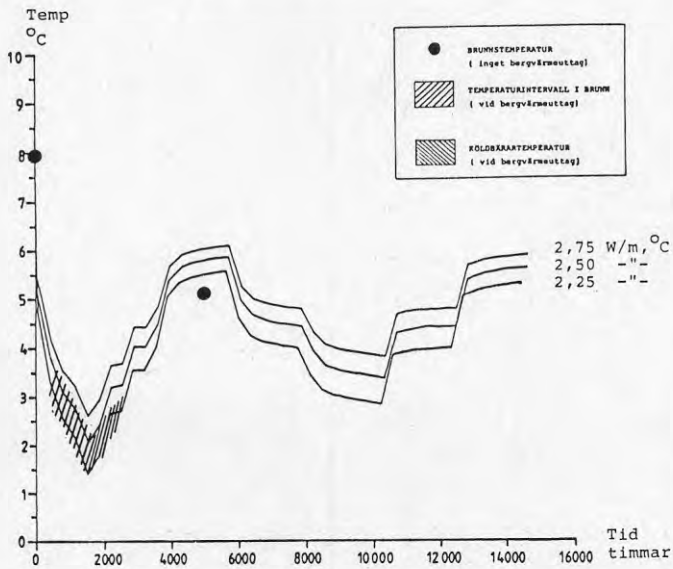


Fig 7-2 Gamleby

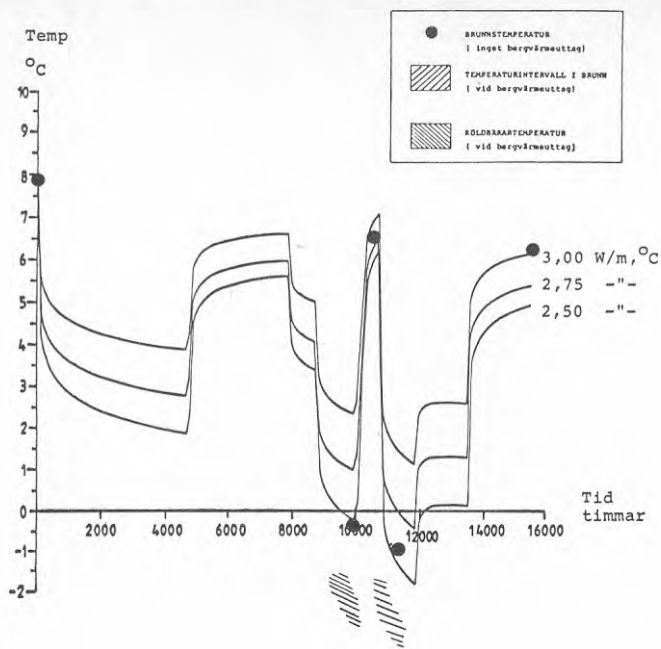


Fig 7-3 Kinna

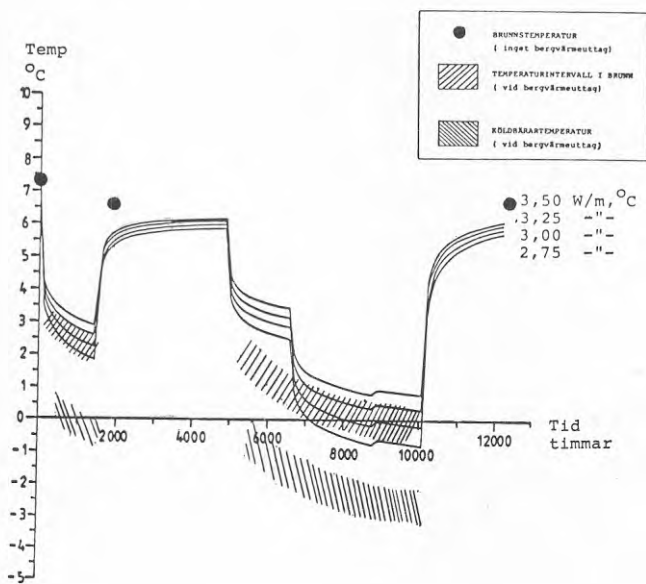


Fig 7-4 Tynnelsö

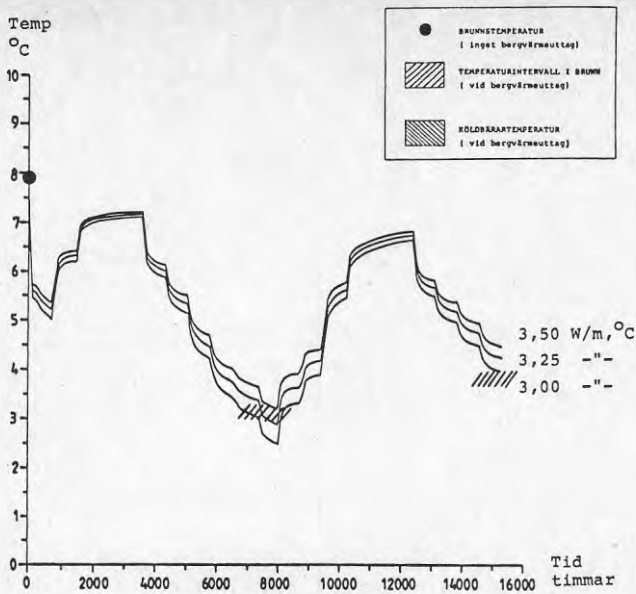


Fig 7-5 Älvsjö

I figur 5-2 finns även redovisat temperatur och effektuttag för tiden från start och ca 4.000 timmar framåt. Bästa överensstämmelse erhålls med ett anmärkningsvärt lågt värmeledningstal, ca $2,2 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$.

Kinna

Energibrunnsanläggningen i Kinna har varit utsatt för tre stopp under första uppvärmningssäsongen (se avsnitt 3). Den ojämna belastningen har ej simulerats utan i stället har det genomsnittliga uttaget använts. Stilleståndet i dec 1981 har däremot simulerats noggrant. Av figur 7-3 framgår att med ett värmeledningstal på ca $2,5 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$ erhålls bästa överensstämmelse med experimentella data. Temperaturskillnaden mellan köldbärarens uppmätta medeltemperatur och brunnens medeltemperatur har uppskattats till 2,8 grader.

Tynnelsö

Anläggningen i Tynnelsö har haft en mycket lång gångtid och jämn belastning av brunnen. Ett värmeledningstal på $3 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$, figur 7-4, ger bästa överensstämmelse. Temperaturskillnaden mellan köldbärarens medeltemperatur och brunnens medeltemperatur har uppskattats till 2,5 grader.

Älvsjö

Anläggningen i Älvsjö har simulerats med en antagen normal fördelning av det uppmätta årliga energiuttaget. När belastningen på brunnen är relativt låg, som i detta fall, blir den mätbara temperaturskillnaden vid olika värmeledningstal på bergmassan naturligtvis liten och detta ger svårigheter att utvärdera resultaten. I Älvsjöanläggningen har temperaturen legat som lägst på 3,2 grader (medeltemperatur) och mestadels relativt konstant en halv grad däröver under vintern 1981/82, motsvarande ungefär perioden 6.000 till 9.000 timmar i figur 7-5. Med ett värmeledningstal på 3,25 W/m, °C på bergmassan erhålls bästa överensstämmelse mellan simulering och uppmätta lägsta temperatur, men med beaktande av osäkerheten i mätningarna är det fullt rimligt att bergmassans värmeledningsförmåga ligger inom ett intervall av 3 och 3,5 W/m, °C.

7.4 Generella erfarenheter från simuleringen

Simuleringen av dessa anläggningar har, trots de begränsningar som projektet har haft, givit vid handen att effekterna av olika energiuttag relativt väl kan beräknas. Den lägsta temperatur som brunnarna har nått stämmer med simuleringen av bergarter med värmeledningsförmåga i de intervall som olika mätningar har visat, bl a (SGU 1982).

En avvikelse mellan simulering och praktiska erfarenheter har emellertid antytts. Det verkar som om brunnstemperaturens insvängningsförlopp i verkligheten är kortare än vad simuleringen visar. Vad detta beror på - simuleringsmodellen, mätosäkerhet eller annat - är inte klarlagt.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att erhållna resultat pekar på:

- att teoretiska beräkningar och praktiska mätningar relativt väl stämmer överens
- att värmeledningsförmågan i olika bergarter varierar så pass att vid varje individuell energi-brunnsanläggning så måste de lokala förutsättningarna tas i beaktande, såvida inte anläggningen dimensioneras för "värsta" fallet
- att inom projektets fem anläggningar synes bergarternas värmeledningsförmåga variera mellan ca 2,2 och ca 3,3 W/m, °C.

8. EKONOMI

En beräkning över den ekonomiska lönsamheten för en energibrunnsanläggning är alltid svår att göra. För varje enskilt fall varierar främst finansieringsmöjligheterna, dvs låne- och bidragsförutsättningar och tillgång till eget kapital.

Nedan anges troliga investeringskostnader för varje anläggning om den byggs 1983 samt den energibesparing som installationen ger i förhållande till direktverkande el eller olja.

Vid beräkningarna har följande förutsättningar använts.

Brunn, ϕ 115 mm		
Jordlagerborrning (Odex), 3 m å	375*	kr/m
bergborrning	120*	kr/m
slang för köldbärare	15	kr/m
cirkulationspump (köldbärare)	1.000	kr
sänkpump + slang (öppet system)	6.000	kr
markarbeten	2.000	kr
Värmepump, nominell effekt vid $+6^{\circ}/50^{\circ}$		
7 kW	20.000	kr
10 kW	25.000	kr
15 kW	30.000	kr
Installation		
rör	10.000	kr
el	3.000	kr

Det finns emellertid två utvecklingslinjer för den framtida anläggningskostnaden och som drar åt olika håll. Den ena är att priserna följer den allmänna inflationen vilket varit en dominerande utveckling hittills. Den andra utvecklingslinjen är att borrning, installation och värmepumputförande standardiseras, förenklas och rationaliseras i takt med en ökande marknad. Idag är en stor del av kostnaden rena försäljningskostnader i form av kundbesök, framtagningsav system och teknikunderlag samt ojämn beläggning av den kostsamma borrarutrustningen. Det finns följaktligen möjligheter att sänka kostnaden i framtiden om den bergborede brunnen även i framtiden har en gynnsam ställning i förhållande till andra värmekällor.

* ca 10% dyrare vid 140-160 mm dimension

Typ av brunn/anläggning Kostnader	1 Linköping kombination	2 Gamleby hushålls- vattenuttag	3 Kinna kylslang	4 Tynnelsö Gård kylslang	5 Älvsjö recirkula- tion
Investering (kr)					
brunn	22 000	23 000	19 500	27 500	28 000
värmepump	20 000	25 000	25 000	30 000	25 000
installation el, rör	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000
Summa	55 000	61 000	57 500	70 500	66 000
Årliga kostnader					
Avskrivning (kr/år)	880	920	780	1 100	1 120
brunn (25 år)	2 200	2 500	2 500	2 900	2 500
VP + installation (15 år)	3 080	3 420	3 280	4 000	3 620
Summa					
Ränta (15%; 50% marginalskaft)	4 100	4 600	4 300	5 300	4 900
År 1					
Underhåll*	300	300	300	300	300

* Ett servicebesök per år

Tabell 8-1 Beräknad investeringskostnad (prisnivå jan -83) och årliga fasta kostnader för de aktuella anläggningarna

8.1 Investerings och fasta kostnader

Investeringskostnaden för en energibrunnsanläggning spänner mellan ca 55.000 och 70.000 kronor, om arbetet köps som entreprenad. Det är inte någon anmärkningsvärd skillnad mellan en kylslangbrunn och ett öppet system, räknat med samma borrhjup. Prisskillnaden mellan de två vanliga borrhålsdimensionerna \varnothing 115 mm och \varnothing 160 mm är ca 10% för samma borrhjup men skillnaden kan ibland (av lokala och konjunkturberoende skäl) vara mindre eller ingen alls.

I tabell 8-1 sammanställs investeringskostnader (kostnadsnivå jan -83) och fasta kostnader för de aktuella brunnarna. Investeringskostnaderna är relativt tillförlitliga medan däremot kostnaderna för avskrivning av brunnen och värmepumpen kan diskuteras. I praktiken är en brunn aktuell att använda i kanske 50 till 100 år eller kanske ännu längre tid men i en ekonomisk kalkyl är det rimligt att skriva av den på kortare tid. I detta exempel har vi valt 25 år. Själva värmepumpen bör ha en livslängd på 10 - 15 år. Dessa kostnader anges för att belysa totalkostnaden för värmekällan och värmepumpsystemet. Vid jämförelse med andra uppvärmningsmetoder kan detta vara ett användbart sätt att jämföra investeringskostnader.

8.2 Energikostnader

Energikostnaderna för anläggningarna med de prestanda som uppmätts och angivits i tabell 5-2 presenteras i tabell 8-2. Kostnaden för elenergi utslagen på levererad värme blir mellan 10,1 och 13,7 öre/kWh värme för de anläggningar som täcker hela energibehovet med värmepumpsystemet och ej använder någon tillsatsenergi.

För Tynnelsö (värmepumpen dimensionerad för 50% av effektbehovet) ökar energikostnaden till en genomsnittlig energikostnad på 15,4 öre/kWh värme. Värmeenergin som levererades av värmepumpsystemet kostade ca 12,2 öre/kWh. Merkostnaden för tillsatsen av elvärme vid temperaturer under ca $+2^{\circ}$ ökade genomsnittskostnaden med 3,2 öre/kWh värme.

Vid dessa beräkningar har oljepriset satts till 2500 kr/ m^3 och elpriset till 0,25 kr/kWh. I tabell 8-2 framgår även den besparing som värmepumpsystemen ger i jämförelse mellan direkt elvärme och oljeeldning. Denna och framtida besparingar skall finansiera den merkostnad som värmepumpsystemen innebär (inte totalkostnaden som redovisas i tabell 8-1).

En annan aspekt är den energibesparing som användningen av värmepumpsystemen medför. Denna har betydelse för både kraftproducenterna och för landets handelsbalans.

Dessa effekter värderas inte här men vid en total (samhällelig) bedömning av energibrunnsystemens lämplighet väger dessa faktorer tungt. Eventuella bidrag, förmånliga lån etc avsedda att styra den privata lönsamheten för önskvärd teknik, är för närvarande och troligtvis en tid framöver avgörande för utvecklingen av marknaden för olika energibrunnsystem.

Typ av brunn	1	2	3	4	5
	Linköping kombination	Gamleby hushålls- vattenuttag	Kinna kylslang	Tynnelsö kylslang	Älvsjö recirkula- tion
Värmebehov	kWh	25 400	23 200 ²⁾	67 000 ²⁾	26 400
värme från kollektorn	kWh	15 400	11 100	30 600	17 100
el VP	kWh	7 200	9 300	19 400	9 300
Summa	kWh	19 300	20 400	50 000	26 400
Tillsatsenergi	kWh	0	2 800 ²⁾³⁾	17 000	0
El, VP + cirkpump alt grundvattenpump	kWh	9 000	9 700	24 300	10 700
Kostnad¹⁾					
Värme från VP-systemet	kr/år öre/kWh	3 475 13,7	2 425 11,9	6 075 12,2	2 675 10,1
Tillsatsvärme ¹⁾	kr/år öre/kWh	0	1 000 ³⁾ 35,7 ³⁾	4 250 ⁴⁾ 25,0 ⁴⁾	0
Totalkostnad	kr/år öre/kWh	3 475 13,7	3 425 14,8	10 325 15,4	2 675 10,1
Besparing jämfört med Olja (70% v-grad)	kr/år kr/kWh	4 640 24	4 850 20,9	13 600 20,3	6 750 25,6
El	kr/år kr/kWh	2 570 13,3	2 370 10,2	6 430 9,6	3 930 14,9

1) elpris 25 öre/kWh, olja 2 500 kr/m³

2) beräknad

3) olja 0,4 m³ (p g a kompressorhaveri)

4) el

Tabell 8-2 Energikostnad för drift av energibrunnsanläggningarna
(prisnivå jan -83)

9. DRIFTERFARENHETER

Allmänt kan sägas att anläggningarna har fungerat tillfredsställande, fränsett en del barnsjukdomar (som alltid vid ny teknik), som relativt lätt har kunnat åtgärdas. En kort lista över inträffade fel redovisas i detta avsnitt. Erfarenheterna uppdelas efter inverkan på anläggningens funktion, styr- och reglerfel och livslängd.

9.1 Funktion

9.1.1 Öppna system

Frysning i förångaren har troligtvis skett i 3 av 4 anläggningar vid något tillfälle. Detta har skett vid olika temperatur på ingående grundvatten vid olika anläggningar trots ungefär lika stora flöden. Olika förångarkonstruktioner och olika dimensionering av förångarna är troliga orsaker.

I Linköping börjar en isskorpa frysa på i förångaren vid $+4^{\circ}$ in (motsvarande $+2^{\circ}$ ut). Vid denna temperatur koppas brunnen om till kombinationsbrunn. Detta ger ingen funktionsstörning.

I Gamleby har vid ett tillfälle noterats en temporär nedgång i avlämnad effekt, troligtvis beroende på påfrysning. Temperaturen på ingående grundvatten var då $+1,7^{\circ}$ (och ca $0,2$ ut). Påfrysningen störde inte funktionen. När belastningen minskade försvann isskorpan i förångaren.

I Kinna belastades brunnen avsiktligt mycket hårt, totalt 61 W/m, varvid förångarna upprepade gånger frös igen. Efter detta byggdes brunnen om till kylslangbrunn.

Det bör påpekas att påfrysning av förångarna inte har föranlett något haveri eller skada på någon av värmepumparna.

Igensättning av smutsfilter har skett vid ett tillfälle. Efter rengöring fungerade anläggningen felfritt. Orsaken var att sänkpumpen hade lyfts upp strax innan för att frigöra den temperaturmätningsskropp som fastnat vid temperaturlodning av brunnen. Avbrottet hade troligtvis undvikits om smutspartiklarna i brunnen hade fått tid att sätta sig.

Inga problem har noterats hittills vad gäller förslitning av förångare (korrosion, erosion), utfällning av järn eller manganoxider eller annat att hänföra till grundvattnets beskaffenhet. Sänkpumparna har fungerat utan anmärkning, fränsett ett elektriskt relä, som fallerat, placerat utomhus i en cementerad brunnsring.

9.1.2 Slutna system

Inga problem har observerats, varken med luft i systemen, vid frysning av brunnen eller med bakterietillväxt i glykolsystemen eller liknande. Ingen av anläggningarna har haft något läckage av köldbärare.

Viktigt är att slingan i brunnen förankras väl och tål den lyftkraft som ispåfrysningen på slingorna ger. Kopp-lingen i botten av brunnen måste utföras omsorgsfullt. Vidare måst köldbärarledningen inomhus isoleras för att undvika kondens och ispåväxning.

Dessa erfarenheter pekar på att kylslangbrunnen är en funktionssäker lösning. Mer erfarenhet önskas emellertid innan några mer definitiva slutsatser kan dras.

9.2 Styr- och reglersystem

Styr- och reglersystemen har kännetecknats av flera onödiga fel, dels på grund av att oprövade system installerats, dels på grund av att oprövade komponenter använts som ej klarat att uppfylla sin funktion. Nu torde dessa fel vara sällsynta och barnsjukdomarna borta i och med att systemen har utprovats.

Det gäller bl a den utomhustemperaturreglerade framledningstemperaturen (instabilitet i ett fall, svår att ställa in i ett annat fall) och placering av givarna för varmvattenberedaren respektive framledningstemperatur. Dessutom har cirkulationspumpen/grundvattenpumpen i något fall arbetat när värmepumpen varit spärrad av sin återstartsfördröjning.

När värmepumpen har styrts efter en enkel intern termostat för konstant temperatur har inga problem noterats.

9.3 Livslängd

Den relativt korta period som anläggningarna följts kan egentligen inte utgöra underlag för några livslängdstes-ter. Förutom den utrustning som byttes för att avhjälpa fel i styr- och reglerfunktionerna har samtliga komponenter arbetat felfritt med ett undantag.

I anläggningen i Kinna noterades i december 1981, 6 månader efter ombyggnationen till kylslangbrunn, att värmepumpens avlämnade effekt var anmärkningsvärt låg. Tillkallad kylreparatör diagnosticerade felet till ventilhaveri i kompressorn. Värmepumpen hade då gått knappt 3.000 timmar. Orsaken till haveriet är okänt.

10. JÄMFÖRELSE MELLAN ÖPPNA OCH SLUTNA ENERGIBRUNNS-SYSTEM

I tabell 10-1 är olika fördelar och nackdelar med öppna och slutna system redovisade. Det är inte möjligt att ge en generell rekommendation av lämpligt system, utan de specifika förutsättningarna för varje enskild anläggning är av betydelse.

Recirkulation (öppet system) Kylslang (slutet system)

Fördelar

- | | |
|---|---|
| - bättre prestanda på värmepumpen | - mindre känslig för störningar |
| - kombinationsbrunnar kan ge hög effekt | - lätt att ladda/kombinera med sol/luft-värme |
| - dricksvattenuttag möjligt | - större uttagsmöjligheter |

Nackdelar

- | | |
|--|--|
| - begränsade värmeuttag på grund av frysrisk | - sämre prestanda på värmepumpen |
| - kräver stor cirkulationspump | - svårt kombinera med vattenuttag |
| - kräver noggrannare dimensionering | - frysning av borrhålet kan ge problem |
| - geografiskt mer begränsad | |

Tabell 10-1 Fördelar och nackdelar med energibrunnar med öppet respektive slutet system

Några faktorer är kanske speciellt intressanta. Kylslangbrunnen är avsevärt mindre känslig för kortare perioder av högt energiuttag. I värsta fall leder det till att temperaturen i köldbäraren blir så låg att värmepumpen lämnar otillräcklig effekt för att fylla hela sin avsedda funktion. Anläggningen ger i alla fall alltid värme. Ett öppet system kan inte "överbelastas" utan att hela anläggningens funktion äventyras. Detta väger tungt vid val av system.

Kylslangbrunnar är även lättare att kombinera med sol- och luftvärmekollektorer.

Det öppna systemet kan däremot vid samma effektbehov vanligtvis klara sig med en mindre värmepump. Detta beror på att vattentemperaturen är högre i ett öppet system än temperaturen på köldbäraren i ett slutet system,

samtidigt som köldbärarna alltid har sämre värmeöverförande egenskaper än rent vatten. Om förutsättningarna är lämpliga kan det vara mycket enkelt att göra den till en kombinationsbrunn eller en förbrukningsbrunn, vilket kan ge avsevärt förbättrade effektuttagmöjligheter. Det är även enklare att kombinera det öppna systemet med uttag av hushållsvatten.

De olika förutsättningarna för öppet och slutet system kan kanske sammanfattas sålunda.

Enklast, snabbast och mest okänslig för feldimensionering är kylslangbrunnen. Något uttag av grundvatten sker ej, vilket är av betydelse, speciellt i tätorter.

När förutsättningarna för ett öppet system är goda, dvs hög brunnskapacitet, möjligheterna att avleda uttaget vatten är goda och grundvattentillgången stor, är ett öppet system mycket intressant.

Recirkulationsbrunnar med öppet system, utan några vattenuttag blir troligen sällsynta i framtiden beroende främst på stort borrhjup och därmed högre investeringskostnad.

11. UTVECKLINGSTENDENSER

11.1 Allmänt

Några av de utvecklingstendenser vi noterat eller som är troliga i framtiden redogörs i korthet för i detta avsnitt.

De energibrunnsanläggningar som denna rapport behandlar kan kallas för "första generationen" energibrunnar. De var avsedda att inte kyla brunnen under noll grader. Investeringarkostnader, vattenkvalitet m m har bidragit till att driva utvecklingen mot slutna system och grundare borrhål på bekostnad av en litet högre driftskostnad.

Utvecklingen idag pekar mot ökad andel av

- kylslangbrunnar (med 3 slangar i borrhålet)
- kylslangbrunnar för basvärmeproduktion
- kylslangbrunnar kombinerade med sol- och luftkolektorer
- applikationer på flerbostadshus (både med och utan laddning)

Energibrunnarnas konkurrenter bland värmepumpar är främst uteluft- och ytjordvärmepumparna. Det är troligt att kombinationer av kolektorer i mark, luft och berg blir vanliga.

Marknaden och utvecklingen av energibrunnar kommer i likhet med andra energibesparande men investeringstunga alternativ ännu en tid att vara mycket beroende av normer, lånemöjligheter och bidrag.

På längre sikt blir det troligtvis nödvändigt att vid val av värmepumpsystem ta hänsyn till vilket energislag som tillgodoser toppeffektbehovet. Exempel på system som bör premieras (sett ur kraftleverantörens synvinkel) är t ex energibrunnar som klarar av hela värmebehovet eller energibrunn alternativt uteluft som basvärmekälla kombinerat med oljeeldning för toppning. Ett olämpligt system är t ex uteluftvärmepump kombinerat med elpatroner. I framtiden kommer detta antagligen att avspeglas i eltaxorna för olika system om värmepumpsystemen får en betydande omfattning.

En trolig utveckling för installation av bergvärmeanläggningar i småhus är i:

Nybebyggelse: Energibrunnanläggningen dimensioneras för 100% av värmebehovet

Befintliga hus: Större oljeledade och fastbränsleledade hus kompletteras med en energibrunnsläggning som täcker 50-70% av effektbehovet, motsvarande 75-90% av energibehovet. Oljeledade mindre hus samt eluppvärmda hus dimensionerar energibrunnsläggningen för hela effektbehovet.

Utvecklingen kommer emellertid att vara mycket avhängig av bestämmelser och lånevillkor samt av konkurrerande värmepumpsteknik, främst uteluftvärmepumpar.

11.2 Småhus

Proportion mellan borrhjup och annan kollektor

För villor prövas möjligheten att minska borrhjupet och kombinera bergvärme med luft- och solkollektorer. På detta sätt strävar man främst mot att minska investeringskostnaden genom att solkollektorerna skall kunna erhållas till en kostnad som är lägre än det antal bormeter som ersätts. Proportionerna mellan borrhjup och solkollektoryta framgår av figur 11-1.

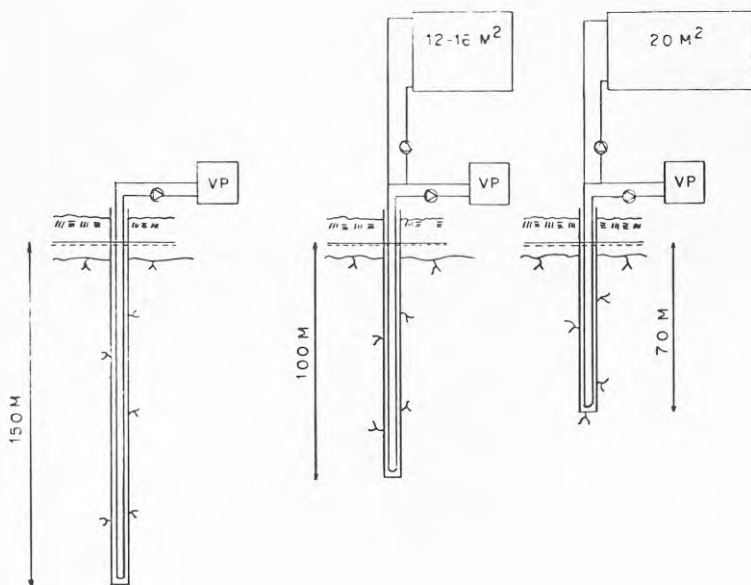
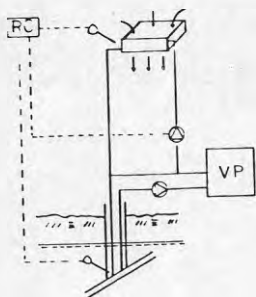


Fig 11-1 Investeringkostnaderna för värmekollektorn kan troligtvis minskas genom utbyte av borrhjup mot solkollektorer, typ enkla takkollektorer eller gummimattor. Proportionerna i figuren avses att provas av Vattenfall.

Vilken utformning som är den lämpligaste med avseende på teknik och ekonomi återstår att se.

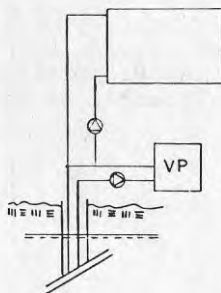
Olika kollektorer

Flera olika typer av kollektorer är tänkbara som komplement till energibrunnen. Dessa kan t ex vara luftkonvektorer (egenkonvektion), plana ytor (gummimattor, takkollektorer etc) eller slangpaket. Dessa kan enkelt kopplas in när temperaturen vid kollektorn överstiger temperaturen i brunnen genom att en liten cirkulationspump startas och leder ett delflöde av köldbäraren till kollektorn, figur 11-2.



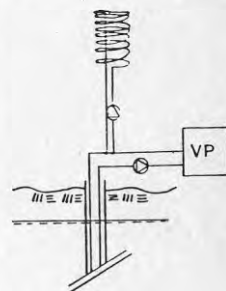
Värmekälla
luft

Princip
egenkonvektion
flänsbatteri



Värmekälla
sol och luft

Princip
enkla solfångare,
diffus och direkt-
strålning, vind



Värmekälla
luft, sol

Princip
slangpaket,
påtvungad kon-
vektion (vind),
diffus och
direktstrålning

Fig 11-2 Exempel på olika kollektorer att kombinera med energibrunn

11.3 Flerbostadshus

Vid större bergvärmeanläggningar kan borrhålen anläggas antingen utspjitt (utan återladdning) eller mer koncentrerat, kombinerat med laddning.

Vid dessa tillämpningar är det viktigt att värmepumps-systemen får en genomtänkt lösning. Risken är annars uppenbar att felaktig dimensionering leder till avsevärda problem efter några års drift. Om inte laddningssystemet ger den önskade återladdningen eller om inte hänsyn har tagits till att näraliggande borrhål influerar varandra, kommer anläggningarna inte att uppfylla vad som utlovats. Dessa effekter kommer först efter några års drift och kan accentueras efter 5, 10 eller ännu flera års drift. Det är rimligt att en flerhålsanläggning dimensioneras att uppfylla sina prestanda åtminstone 25 år eller att det klargörs vid vilken tidpunkt återladdning kan bli nödvändig.

Genom att borra ett flertal hål kvastformigt från en punkt kan en stor bergvolym nås utan att kräva en stor markyta. Systemet förutsätter emellertid att bergmassan återladdas under sommarperioden, figur 11-3. För en anläggning på 120 kW värme belägen i Nälsta, strax väster om Stockholm, provas proportionerna 1250 m borrhål och 300 m² trapetskorrugerat plåttak med infalsade kopparrör som takkollector. Taket beräknas återladda 80-90% av den energi som tas ut ur bergmassan.

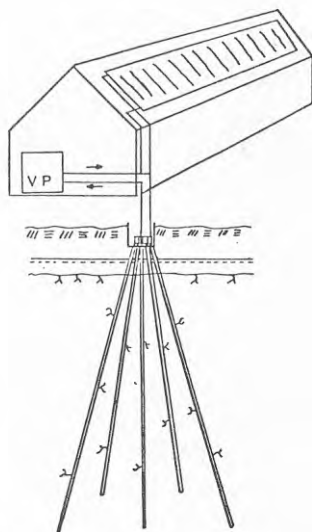


Fig 11-3 Exempel på tät förläggning av borrhålen. Brunnarna borrar "kvastformigt" från en central punkt och bergmassan återladdas sommartid via någon enkel värmekollector.

Det är även möjligt att ta hänsyn till den påverkan som näralliggande brunnar har på varandra och dimensionera anläggningen med hänsyn till detta. Ett exempel är en anläggning i Näsby Park, där 7 borrhål à 150 m är fördelade på en ca 3.500 m² stor tomtyta, figur 11-4. Värmepumpanläggningen är på 80 kW värme och skall utgöra basvärmekälla till två flerfamiljsfastigheter. Inget återladdningssystem är nödvändigt, förutsatt att inte även näralliggande fastigheter kommer att utnyttja bergvärmsystem.

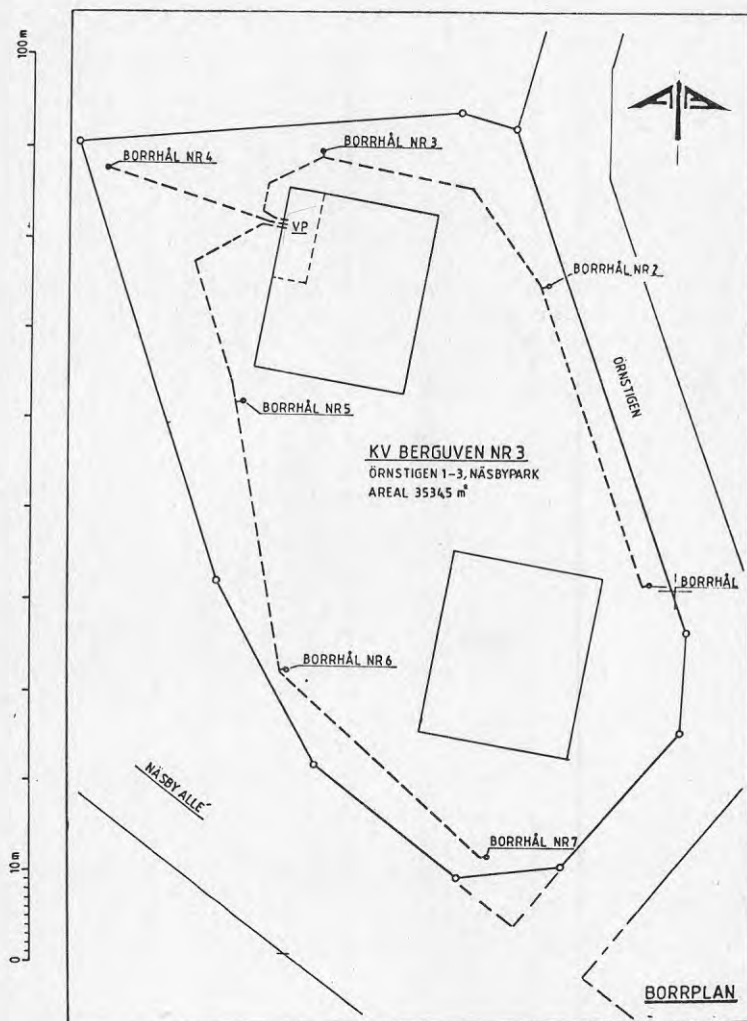


Fig 11-4 Plan över borrhålsplacering för en 80 kW värme bergvärmeanläggning i Näsby Park, Täby

Ett intressant presentationssätt av beräkningsresultaten av influensen mellan näraliggande brunnar visas i figur 11-5. I figuren framgår isotermerna kring 10 borrhål vintertid efter 25 års värmeuttag, ett av de utvärderade alternativen i Näsby Park.

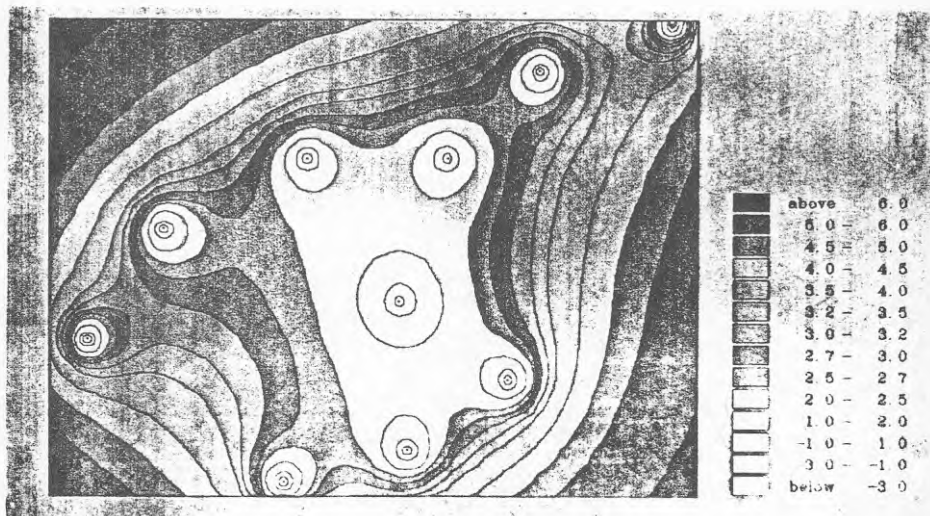


Fig 11-5 Isotermerna kring 10 näraliggande brunnar 25 år efter idrifttagandet. Ett av flera utvärderade alternativ för energibrunnsanläggningen i Näsby Park. Slutligen valdes 7 borrhål. Beräkningarna är utförda i samarbete med Lunds tekniska högskola.

Det finns flera alternativ att från en begränsad markyta utnyttja en större bergvolym genom att snedställa borrhålen.

Borrhålen kan som regel utan praktiska svårigheter lutas 15-20 grader från vertikalplanet. En lutning på 20 grader av varje hål i ett tvåhålssystem enligt figur 11-6 ger för 100 m hål en spridning i botten på 68 meter och vid 150 m hål 102 meter. Det kan grovt uppskattas till ett fiktivt medelavstånd mellan brunnarna på 34 respektive 51 meter. För närvarande utvecklas beräkningsrutiner att hantera snedställda borrhålskonfigurationer exakt.

Vid ett tre- respektive fyrhålssystem, i princip enligt figur 11-6, blir avstånden mellan hålen vid en borrhåls-längd på 150 m 88 respektive 72 m (till närmaste hål). Det innebär att man även vid mycket små tillgängliga markytor kan nå avsevärda bergvolymen, och på så sätt avsevärt minska borrhålens inbördes termiska influens.

Man bör emellertid ha i åtanke att den sträcka som köldbärarledningarna dras i markytan mellan borrhålen dels utgör ett värmebidrag i form av ytjordvärme och dels ger en viss återladdningseffekt om köldbäraren cirkuleras under sommarperioden. En maximal utbredning av borrhålen är ur värmeteknisk synvinkel alltid gynnsammast.

Ur juridisk synpunkt bör framhållas att om brunnarna borras så att någon går in på en intilliggande fastighet, måste tillstånd härför införskaffas av berörd fastighetsägare.

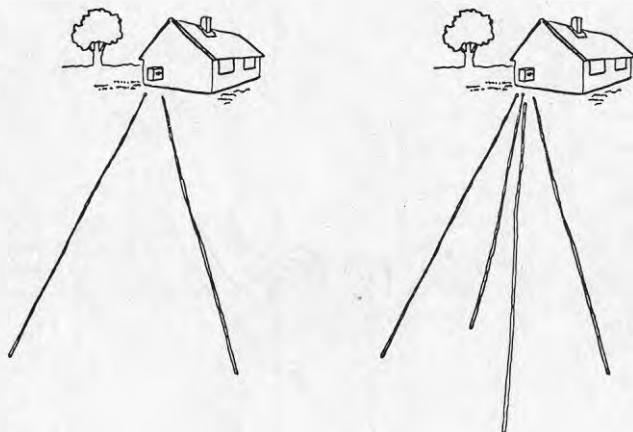


Fig 11-6 Genom att snedställa två, tre eller fyra borrhål (upp till ca 20 grader från lodlinjen) kan en avsevärd bergmassa utnyttjas. Hänsyn måste ändock tas till borrhålens inbördes termiska influens.

Ofta är det bara möjligt att sprida de nödvändiga borrhålen mer eller mindre utmed en linje. Om t ex tre borrhål borras med 5 m mellanrum med 20 graders lutning med maximal separation av hålen, ger detta ett inbördes avstånd vid 150 m djup på $88 + 5 = 93$ m, dvs endast en obetydlig ökning jämfört med föregående exempel. Analogt kan naturligtvis ett stort antal brunnar borras på detta sätt. Minskningen av den inbördes termiska influensen mellan brunnarna blir med denna princip naturligtvis betydelsefullare ju färre hål som ingår i systemet.

12. ANGELÄGNA FORSKNINGSSOMRÅDEN

Flera forskningsområden kring bergvärme är angelägna. Dessa områden kan naturligt uppdelas i tre kategorier

- värmepumpsystemet
- geologiska förutsättningar
- kompletterande beräkningsmodeller för värmeuttag.

12.1 Värmepumpsystemet

Följande områden är idag mycket intressanta

- * Noggrann analys av två-, tre- och fyrslangsystem i borrhålen med avseende på värmeöverföring, lämplighet vid frysning, passande borrhålsdiameter och djup, (tekniskt och ekonomiskt) lämpligt slangmaterial samt metodik för en rationell installation av slangarna.
- * Utformning av lämpligaste slangkoppling i brunnen, kanske systemets känsligaste punkt.
- * Utformning av och prestanda hos enkla luft- och markkolektorer i kombination med bergvärme.
- * Utvärdering av olika köldbärarmedia med avseende på fysikaliska egenskaper, brandrisk, giftighet (inkluderande korrosionsinhibitorer), nedbrytbarhet, åldersbeständighet, m m.

12.2 Geologiska förutsättningar

Av stort intresse är

- * fortsatt undersökning av olika bergarters praktiska värmeledningsförmåga vid bergvärmertilämpningar. Av speciellt intresse är de sedimentära bergarterna, som är mycket litet studerade
- * utvärdering av bergartskartorna med avseende på bergarternas troliga värmeledningsförmåga för att användas som dimensioneringsunderlag
- * undersökning av de naturliga variationerna i bergarters värmeledningsförmåga
- * undersökning av olika bergarters tålighet för upprepad nedfrysning samt följd effekter för bergvärmeinstallationer.

12.3 Beräkningsmodeller

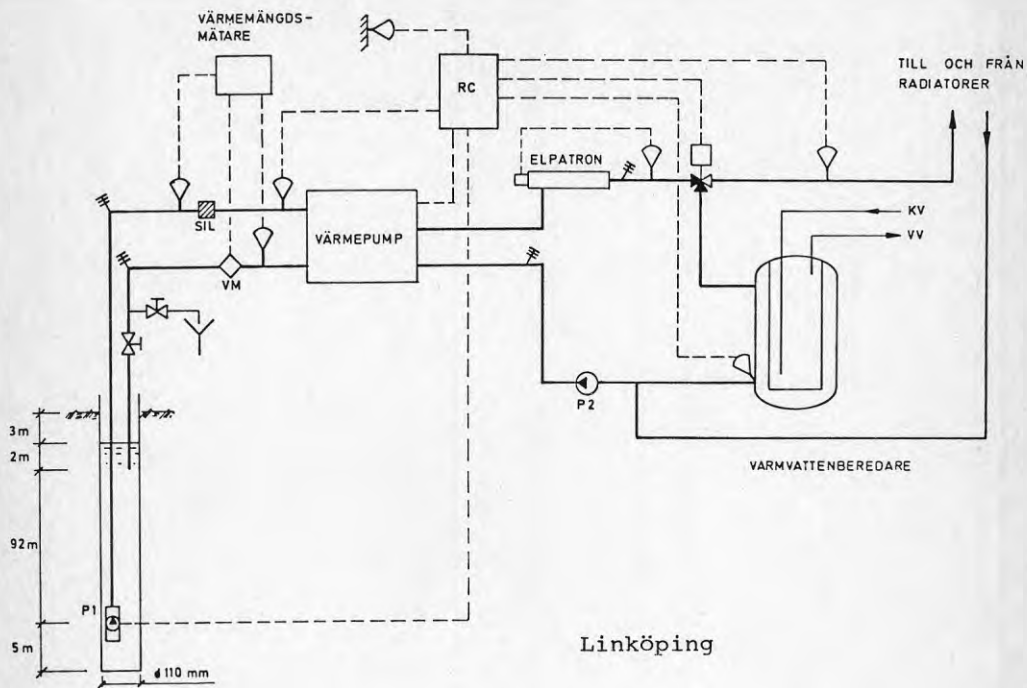
Inom den teoretiska behandlingen av bergvärmeuttag saknas idag främst

- beräkningsmodell för värmeuttag vid borrhålskonfigurationer med snedställda hål.

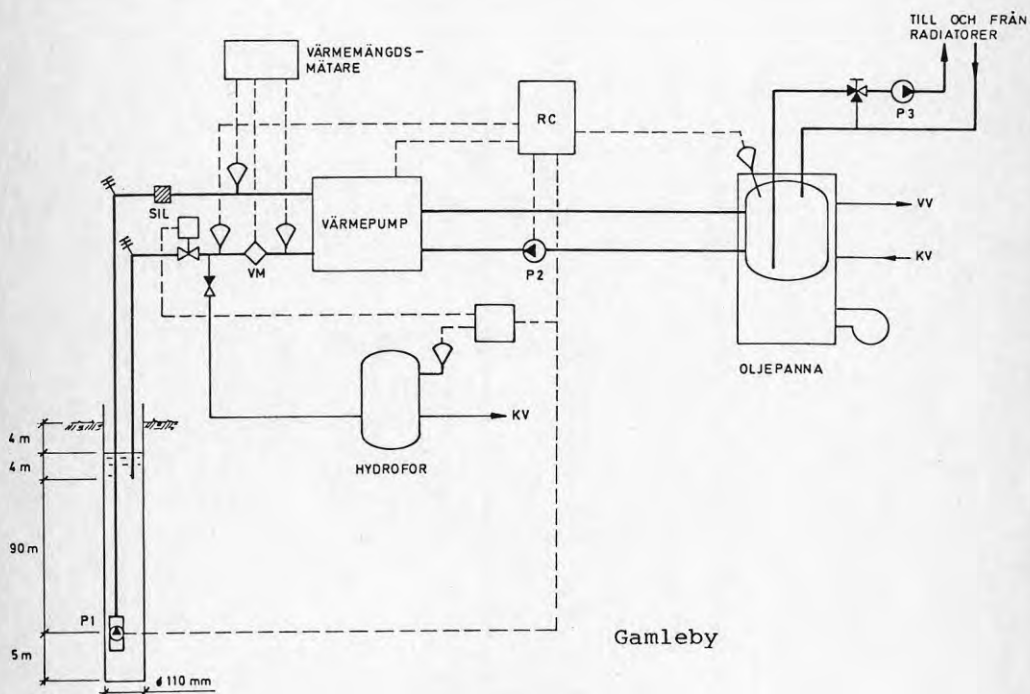
13. REFERENSER

- Andersson 80 Andersson, S, Eriksson, A,
 Åbyhammar, T
 Utvinning av värme ur bergborrade
 brunnar. Förstudie; Byggforsknings-
 rådet, R142:1980
- Claesson 80 Claesson, Johan
 Radiellt värmeuttag från brunn, LTH
 1980-03-21
- Eskilson 82 Eskilson, Per
 Värmeuttag ur bergborrade brunnar.
 Influens mellan brunnar; Lunds
 Tekniska högskola;
 Rapport Lund-Mph-82/09, 1982
- SGU 1982 Energigeologi, Sveriges Geologiska
 Undersökning; rapport 29, 1982

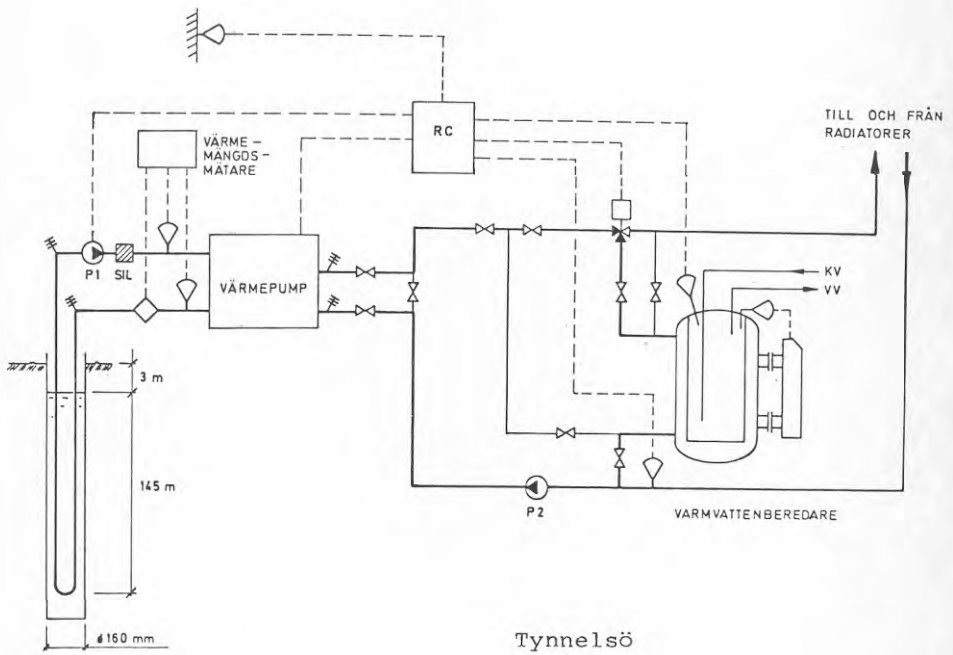
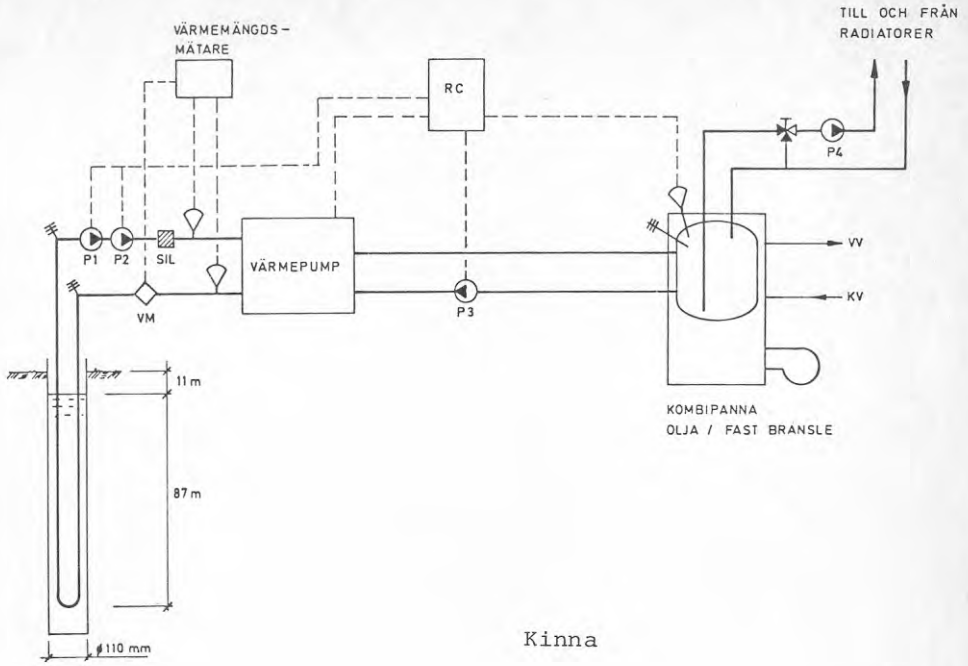
Principiell inkoppling av de redovisade energibrunns- installationerna

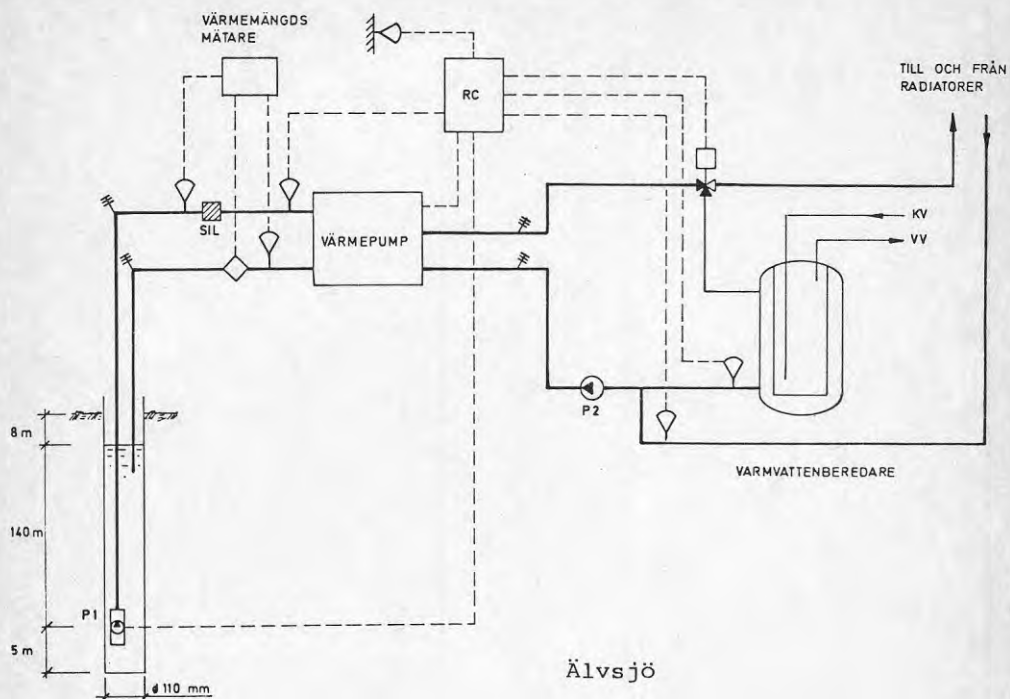


Linköping

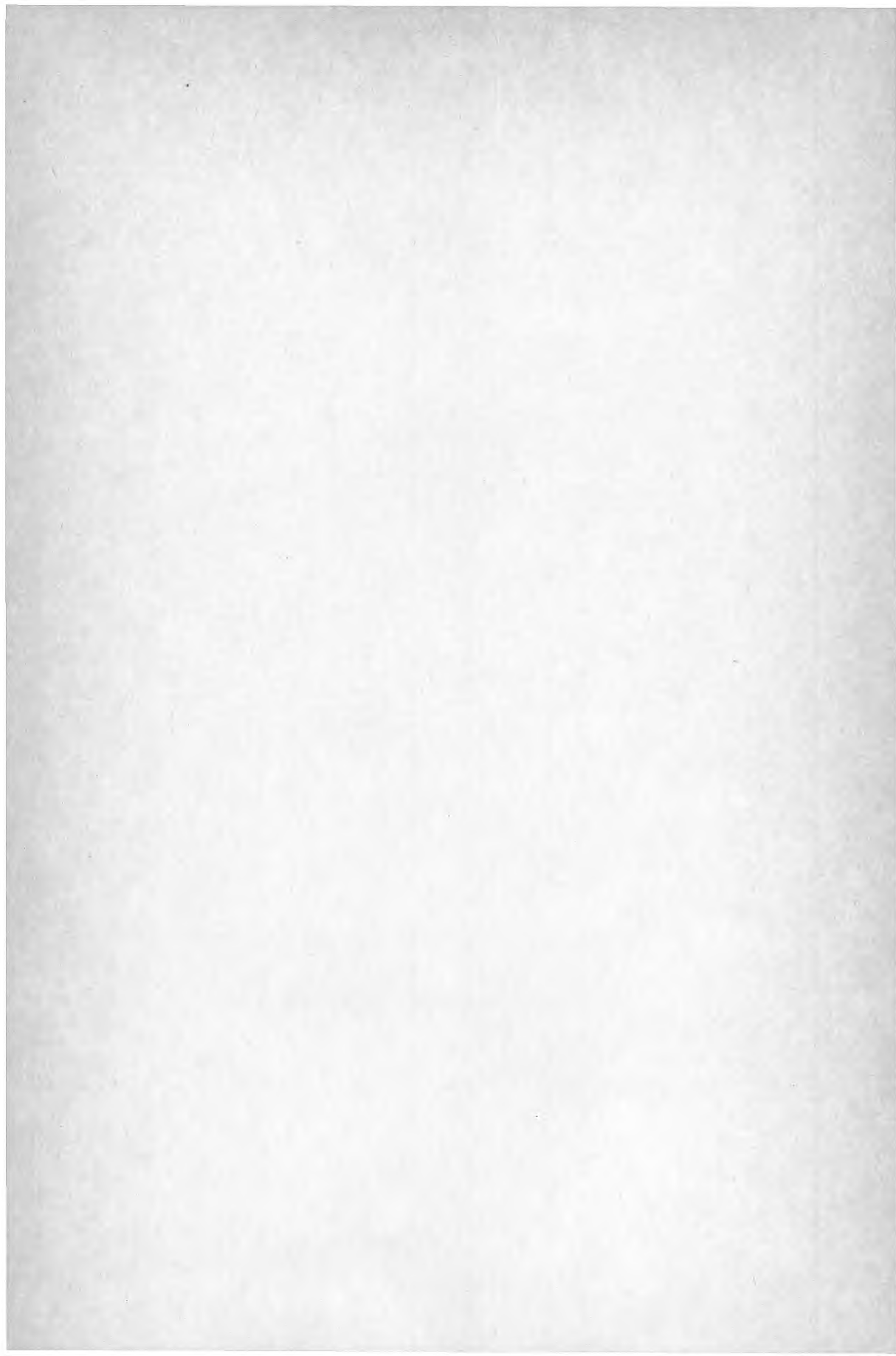


Gamleby











**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
800640-5 från Statens råd för byggnadsforskning
till Allmänna Ingenjörbyrå, Stockholm.**

R148: 1983

ISBN 91-540-4047-7

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Art.nr: 6700848

**Abonnemangsgrupp:
V. Anläggningsteknik**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 30 kr exkl moms