



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

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



Rapport

R72:1988

Värme ur sandstensakvifer
Driftuppföljning av tvåbrunnssystem

Thomas Holm
Per Nilsson
Peter Wilén

R
Jull

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plad	Set

Byggeforskningsrådet

R72:1988

VÄRME UR SANDSTENSAKVIFER

Driftuppföljning av tvåbrunnssystem

Thomas Holm
Per Nilsson
Peter Wilén

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850201-4 från Statens råd för byggnadsforskning till Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

REFERAT

Rapporten behandlar ett grundvattenvärmesystem med två brunnar.

Anläggningen försörjer ett servicehus i Falköping och grundvattnet som utnyttjas tas ur en sandstensakvifer.

Uppföljningen gäller främst två delar:

- undersöka värmepumparnas funktion och prestanda
- undersöka sandstensakviferens funktion som värmekälla.

Kortfattat resultat: Värmepumpanläggningens täckningsgrad har varit 87.4% (ber. 81%). Värmefaktorn (årsmedel) 2.05, vilket är lägre än beräknat. Temperaturen på uttagsvattnet har sjunkit från 7.8°C till 5.5°C. Med hjälp av datorberäkning bedöms temperaturen efter ytterligare tre år ha sjunkit till 4.5°C. Vattenströmningen sker huvudsakligen via sprickzoner. Energieffektiviteten för värmepumpsystemet är 28.5 öre/kWh, vilket är konkurrenskraftigt jämfört med elvärme eller oljeeldning. 45% av anläggningens energibehov utgörs av förnyelsebar energi.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R72:1988

ISBN 91-540-4934-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1988

INNEHÅLL

sid

FÖRORD

SAMMANFATTNING

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Projektets omfattning	2
2	BESKRIVNING AV ANLÄGGNINGEN	3
2.1	Uppvärmningsobjekt	3
2.2	Värmepumpsystem	4
2.2.1	Värmeanläggningen	4
2.2.2	Styr- och regleranläggningen	6
3	GEOHYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	8
3.1	Geohydrologi, översikt	8
3.2	Brunnsborrning	9
3.3	Borrhålsloggning	10
3.4	Grundvattennivåer och grundvattenströmning	13
3.5	Provpumpningar	14
3.6	Grundvattenkemi	15
3.7	Spårämnesförsök	16
3.8	Sammanfattning av utförda undersökningar	19
4	DRIFTRESULTAT VÄRMEPRODUKTION	21
4.1	Inledning	21
4.2	Redovisning av driftresultat	21
4.3	Kommentarer till driftresultat	24
4.4	Driftserfarenheter	25
5	DRIFTRESULTAT VÄRMEKÄLLA	27
5.1	Flöden och temperaturer	27
5.2	Temperaturloggning	28
5.3	Grundvattenkemi	31
5.4	Långtidsaspekter på värmekällans funktion	33
6	EKONOMI	35
7	SLUTSATSER OCH KOMMENTARER	37
	REFERENSER	40

FÖRORD

Föreliggande rapport omfattar en driftuppföljning av en grundvattenvärmeanläggning i Falköping. Uppföljningen innefattar såväl värmeproduktion som funktion hos värmekälla och har pågått sedan anläggningens start, mars 1985 t o m februari 1987.

Tidigare har en förstudie utförts avseende möjligheterna att utnyttja ett grundvattenvärmesystem med återladdning, se Holm & Wilén (1986).

Förutom författarna har Annika Lindblad-Påsse medverkat vid driftuppföljningen och har därvid svarat för avsnittet om grundvattenkemi.

Vissa delar av det redovisade undersökningsmaterialet, brunnborrningar och vissa vattenanalyser, härrör från Kjessler & Mannerstråle, Halmstad, vilka haft kommunens uppdrag att undersöka förutsättningarna för en grundvattenvärmeanläggning.

Värdefull hjälp har biståtts med av personal vid Falköpings kommun, främst vaktmästare Gerhard Axelsson.

Projektet har utförts vid Geologiska institutionen, CTH/GU, i samarbete med Fastighetskontoret, Falköpings kommun, och har till största delen finansierats med medel från Statens råd för byggnadsforskning (BFR).

Texten är utskriven av Ann-Marie Hellgren och flertalet figurer har ritats av Marianne Johnson.

Göteborg och Falköping i november 1987

Thomas Holm

Per Nilsson

Peter Wilén

SAMMANFATTNING

Rapportens syfte är att redovisa driftuppföljningen för en grundvattenvärmeanläggning vid Ranlidens servicehem i Falköping. Uppföljningen har omfattat såväl värmekällans funktion som producerad värmeenergi från anläggningen.

Värmebehovet ombesörjdes tidigare med hjälp av 2 st oljepannor, årlig oljeanvändning ca 180 m^3 E01. Totalt effektbehov är ca 450 kW och energiförbrukningen normalår ca 1300 MWh.

Den utförda anläggningen omfattar ett tvåbrunnssystem, med en uttags- och en infiltrationsbrunn, där uppumpat vatten efter värmeuttag återförs till akviferen. Denna utgörs av en sandstensformation, belägen drygt 30 m under markytan och med en mäktighet av 30 m. Brunnarna är utförda med ett inbördes avstånd av 85 m och penetrerar hela sandstensformationen. Vattenföringen i sandstenen är huvudsakligen koncentrerad till sprickor/sprickzoner.

Från brunnarna pumpas grundvattnet till en öppen tank för vidare befordran till värmepumpar (6 st à 30 kW). Varmvattenberedning sker via laddningsväxlare och varmvattenackumulatorer. Även viss eftervärmning sker. Styr- och reglerutrustning för anläggningen består av ett programmerbart styrsystem, vilket påverkar en reglercentral.

Driftuppföljning avseende värmeproduktion har omfattat elmätare (kompressorer, pumpar), energimätare, oljeflöde- och gångtidsmätare. Mätperiod har varit 850701 till 860620.

För värmekällan har driftuppföljningen omfattat pumpflöden, vattentemperaturer, temperaturloggning i brunnar samt grundvattenkemisk påverkan.

Under mätperioden har anläggningen förbrukat 1113.4 MWh nettoenergi. Normalårskorrigerad nettoenergiförbrukning var 1085 MWh, vilket kan jämföras med uppskattad nettoförbrukning, 1240 MWh. Minskningen beror sannolikt på dels sänkt tappvarmvattentemperatur, dels ökad energimedvetenhet hos personalen.

Värmepumpanläggningens täckningsgrad har varit 87.4% jämfört med beräknad före installation, 81%. Den höga täckningsgraden beror på hög tillgänglighet för anläggningen och väl fungerande styr- och regler-system.

Värmefaktorns årsmedelvärde är 2.05, vilket är relativt lågt. Detta beror dels på uppfordringssystemets utformning, dels på konstant hög kondenseringstemperatur hos värmepumparna.

Medelpumpflödet vid uttag/infiltration har varit 6.4 l/s och vatten kyls ca 3°C före återföring till akviferen. Initiellt var uttagstemperaturen 7.8°C, temperaturgenombrottet kom dock redan efter någon vecka. Avkylningsförloppet är mest uttalat i början och efter drygt två år har temperaturen sjunkit till ca 5.5°C. Förloppet initiellt tyder på vattenföring via sprickor/sprickzoner och med hjälp av en numerisk modell har en prognos utförts. Efter 5 års drift har temperaturen på uttaget vatten därvid beräknats vara knappt 4.5°C. Detta medför att utvecklingen av avkylningsförloppet måste följas upp framgent, samtidigt som återladdning av akviferen kan bli aktuell inom några år.

En kostnadsjämförelse har utförts för normalåret enligt annuitetsmetoden. Under antagna förutsättningar blir energipriset för grundvattenvärmesystemet 0.285 kr/kWh, vilket kan jämföras med ren driftskostnad för anläggning med elpannor, 0.29 kr/kWh. Till detta kommer investerings- och underhållskostnad. Fortsatt drift av oljepannor ger en energikostnad av 0.277 kr/kWh, utan reinvesteringarkostnad för nya oljepannor. Jämförelsen är givetvis känslig för förändringar av el- och oljepriser, men med hänsyn tagen till reinvestering även vid fortsatt oljeeldning ger grundvattenvärmeanläggningen lägst energikostnad.

Kostnadsjämförelsen visar att den akutella värmeanläggningens energikostnad väl kan jämföras med andra alternativ. Beräkningarna visar även att 45% av Ranlidens energiförbrukning utgörs av förnyelsebar energi.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Hösten 1982 tog Falköpings kommun kontakt med Geologiska institutionen, CTH, angående möjligheten att utnyttja grundvatten som värmekälla för husuppvärmning med värmepump inom tätorten. Kommunen planerade en utvidgning av fjärrvärmenätet men ville, innan bindande beslut skulle tas, även beakta alternativa uppvärmningsmöjligheter. I Falköping finns möjligheter till grundvattenuttag ur en sandstensakvifer belägen på 30-40 m djup. Grundvatten från denna akvifer har tidigare använts för tätortens vattenförsörjning.

En hydrogeologisk bedömning av möjliga grundvattenuttag och översiktliga kostnadsberäkningar utfördes, se Jonasson & Wilén (1983). Resultatet blev att kommunen önskade få till stånd en pilotanläggning. Diskussionerna med kommunen omfattade förutom enbrunnssystem och tvåbrunnssystem (återföring av det nedkylda vattnet till akviferen) även möjligheter att sommartid återlagra den uttagna värmen.

Kommunen valde så småningom ut Ranlidens servicehus som ett lämpligt pilotprojekt. Det ligger utanför det område i tätorten som planeras för fjärrvärme och har en oljeförbrukning på ca $180 \text{ m}^3/\text{år}$. Kommunen avsatte medel för att bygga grundvattenvärmepumpsystem för Ranliden och Geologiska institutionen erhöll medel från BFR för en förstudie och senare för en mätuppföljning, som behandlas i denna rapport.

Den utförda anläggningen omfattar ett tvåbrunns grundvattenvärmsystem och togs i drift i mars 1985. Brunnsavståndet är dimensionerat för att större delen av den uttagna energimängden skall återföras sommartid. Detta innebär att temperaturen i uttagsbrunnen nu successivt sjunker så länge som återladdning ej görs sommartid. Avsikten är att anläggningen så småningom skall kompletteras med återladdning. Den utförda förstudien, Holm & Wilén (1985) visar att vattenföringen i sandstenen är koncentrerad till några få sprickor/sprickzoner, varför bl a driftstrategin ur termohydraulisk synpunkt är avgörande för systemets funktion och livslängd.

1.2 Projektets omfattning

Det här redovisade forskningsprojektet har haft till syfte att genom driftuppföljning av den utförda anläggningen undersöka såväl själva systemets som akviferens funktion enligt följande:

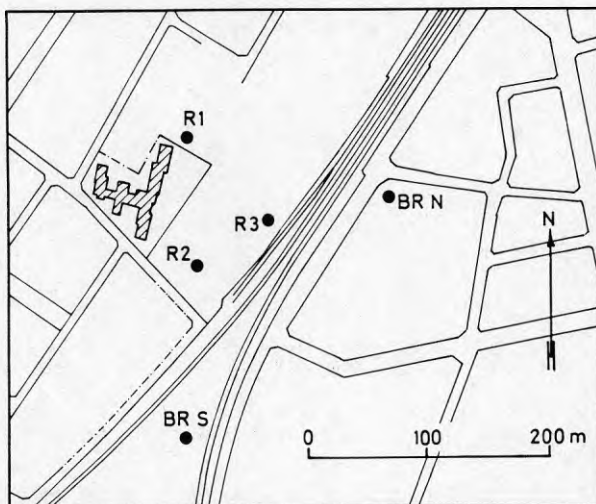
- * Undersöka systemets funktion och prestanda: värmefaktor hos värmepumpar, avgiven energi samt energibesparing i form av oljereduktion.
- * Undersöka sandstensakviferens funktion som värmekälla: grundvattentemperaturer, flöden och grundvattentrycknivåer.

Resultaten är dels av intresse ur forskningssynpunkt genom att de bidrar till den allmänna kunskapsbyggnaden vid värmeuttag/lagring i akviferer, dels är de av intresse för anläggningens fortsatta drift och funktion.

2 BESKRIVNING AV ANLÄGGNINGEN

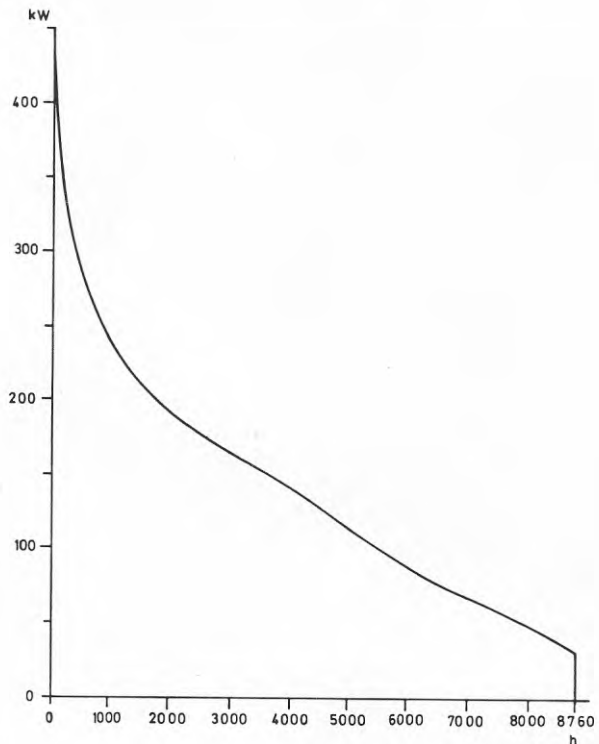
2.1 Uppvärmningsobjekt

Ranlidens servicehus är beläget centralt i Falköping, väster om järnvägen. Kommunen äger omkringliggande tomtmark varför brunnarnas lägen ur markägarsynpunkt kunde bestämmas relativt fritt. I figur 2.1 visas en situationsplan över området där även brunnarna är inplacerade. Ranliden är ett servicehus för åldringsvården med 98 platser. I byggnaden är dessutom en förskola inrymd. Byggnaden uppfördes i två etapper 1962 och 1972. Den innehåller boenderum, storkök, badavdelning, samlingsal, terapilokal, förskola och cafeteria. Total byggnadsyta är 7 823 m².



Figur 2.1 Situationsplan över Ranliden med utförda brunnar.

Byggnaden värmdes fram till mars 1985 enbart med oljeeldning (E01) i egen panncentral. Normalårsförbrukningen är ca 180 m³ per år. Ett varaktighetsdiagram för servicehuset framgår av figur 2.2. Byggnaden är ventilerad med FT-ventilation i etapp I (1962) och F-ventilation i etapp II (1972).



Figur 2.2 Varaktighetsdiagram för Ranlidens servicehus.

2.2 Värmepumpsystem

Under vintern 1984/85 installerades ett värmepumpsystem som togs i drift i mars 1985. I samband med installationen gjordes vissa ändringar i hela VVS-systemet för servicehuset.

2.2.1 Värmeanläggningen

Den befintliga värmeanläggningen utgjordes av ett konventionellt system med 2 st oljepannor för E01, vilka producerar hetvatten 80°C för distribution till shuntgrupper för ventilationsaggregat,

radiatorsystem samt varmvattenberedare. I systemet förekom grupper med konstant respektive variabelt vattenflöde på primärsidan.

I den ombyggda anläggningen ersattes hela varmvattenberedningen med nytt system med laddningsväxlare och 5 st 500 l varmvattenackumulatorer. Laddningsväxlaren utrustades med 2 st termiska laddningsventiler på tappvattensidan för att förhindra laddning med vatten av för låg temperatur. Växlaren försågs dessutom med styrventil på primärsidan för att förhindra höga returtemperaturer till värmepumparna. Varmvattenberedningen utföres centralt i panncentralen till 48-50°C tappvattentemperatur. Eftervärmning till högre temperatur utföres lokalt i anläggningen vid kök och sköljrum.

Shuntgrupper för ventilationsaggregat och radiatorgrupper har modifierats så att samtliga grupper har variabelt flöde på primärsidan.

Värmepumpanläggningen kopplades in på den samlade returledningen i serie med oljepannorna. Värmepumparna (6 st) är av typ Atlas Copco ACE 32 COMBI W med köldmedia R502.

Värmekällan är ett öppet grundvattensystem. Grundvatten pumpas till en öppen tank vid värmepumparna, från vilken varje värmepump tar sitt vatten vid drift, för att efter värmeuttag återföras till akviferen.

Systemuppkopplingen framgår av figur 2.3. Den installerade värmepumpanläggningen skiljer sig på två punkter från de uppgifter som framkom vid projekteringen och förstudien. Flödet var tänkt att begränsas till 5-6 l/s med hänsyn till den ursprungligt planerade anläggningen med återladdning av värme. Brunnarna har en högre kapacitet och den utförda anläggningen har ett grundvattenflöde på ca 9 l/s. Med hänsyn till igensättningsproblem på grund av utfällningar skulle grundvattensystemet vara slutet för att förhindra en syresättning av vattnet. Ur reglersynpunkt för grundvattenflödet installerades i stället en öppen utjämningsstank.

2.2.2 Styr- och regleranläggningen

Värmepumpanläggningen styrs av en reglercentral typ Billman RVL 41 med min. begränsning av framledningstemperaturen tillsammans med ett programmerbart styrsystem, PC-system, med enbart digitala in- och utgångar, typ Mitsubishi Melsec G.

Samtliga yttre signaler i anläggningen som varmvattentermostat m m samt öka/minska signaler från reglercentral är inkopplade till PC-systemets ingångar. Utgångarna styr sedan kontaktorer för värmepumpar (vp), inkoppling av oljepannor m m.

Vid ökande värmebehov startas vp steg 1 efter att reglercentralens öka-signal varit tillslagen sammanlagt 2 min. De övriga 5 vp-stegen inkopplas sedan med 10 min intervall på öka-signalen. Urkopplingen sker med 2 min intervall på minska-signalen.

Vid ett värmebehov, som är större än de 6 vp-stegen klarar, träder ett sjunde steg in. Detta steg startar en intern tidskrets som är inställd på 90 min. Efter denna tid tillåts shuntventilen SV2 vid oljepannorna reglera samtidigt som en ny tidskrets startar och efter ytterligare 20 min får oljepannorna starta. Vid minskande värmebehov kommer oljepannorna att stå i stand-by under 90 min efter det att shuntventil SV2 mot oljepannorna stängts. Detta innebär att inkoppling av oljepannorna under denna tid kan ske utan tidsfördröjning.

Varmvattenberedning sker kontinuerligt. Laddningen styrs av en tvåvägsventil SV1 på tappvattenväxlarens primärsida, vilken strävar efter att konstant hålla returtemperaturen från växlaren. På tappvarmvattensidan finns två självverkande ventiler, som styr vattenflödet, så att laddning hela tiden sker med 45⁰C.

För att få en jämn belastning och driftstid på varje värmepumpsteg utför PC-systemet varje dygn en omkoppling av startordningen, så att vp-steg 1 kopplas om till steg 6. Se figur 2.3.

3 GEOHYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

3.1 Geohydrologi, översikt

Den grundvattenresurs som är av störst intresse för användning som värmekälla till grundvattenvärme för Falköping är sandstens-akviferen. Detta på grund av att uttagsmöjligheterna allmänt sett är bäst inom denna akvifer. Den allmänna lagerföljden för de sedimentära bergarterna i Billingen-Falbygden framgår av figur 3.1.

I det aktuella området är delar av kalkstenen och hela den ovanför liggande lagerserien borteroderad. Sandstenen utgör således en sluten akvifer, överlagrad av alunskiffer och kalksten.

Geologisk indelning		Hydrogeologisk indelning	Mäktighet	Grundvattnets uppträdande
PERMO-KARBONSK DIABAS		Hydrogeologiska parametrar ej bestämda	Max 45m	Trots väl utbildade sprick-system saknas troligen grundvatten inom diabastacket. Däremot fungerar de förekommande sprickorna som ledare för perkolering och nederbörd till underliggande akvifer.
SILURISK LERSKIFFER		Lerskifferakvifären	46 m	Grundvattnet lokaliserat till förekommande sprick-system. Magasinet öppet.
OVERORDOVICISK LERSKIFFER				
Bentonit				
MELLANORDOVICISK KALKSTEN		Bentonitakvikluden	Ca 1,2 m	Den rena bentonitleran ej vattenledande. Genom omvandling till metabentonit torde dock de vattengenomsläppliga egenskaperna ha förändrats något.
UNDERORDOVICISK KALKSTEN		Kalkstensakvifären	54 m	Grundvattnet lokaliserat till förekommande spricksystem. Kommunikation huvudsakligen i vertikal led i kalkstenen och i horisontell och vertikal led i alunskiffern ovanför stora orstensbanken. Magasinet slutet där bentoniten överlagrar kalkstenen inom övriga områden är magasinet i huvudsak öppet som öppet.
OVERKAMBRISK ALUNSKIFFER Stora orstensbanken		Alunskifferakvikluden	14 m	Homogen alunskiffer innehåller inget grundvatten. Tektoniska zoner kan lokalt vara grundvattenförande.
Lingulidsandsten UNDERKAMBRISK SANDSTEN Mickwitzsandsten Konglomerat		Sandstensakvifären	31 m	Slutet grundvattenmagasin inom största delen av området. Tryckytan belägen i eller ovanför överlagrande akviklud.
Vittrad zon PREKAMBRISK JÄRNGNEJS		Urbergakvifären		Grundvattnet lokaliserat till förekommande sprickor.

Figur 3.1 Geologisk och hydrogeologisk indelning av bergartslagerföljden i Billingen-Falbygden. Från SGU (1974).

Sandstenens mäktighet uppgår inom Falbygden till ca 31 m, vilken stratigrafiskt kan indelas i en övre del (Lingulid-sandsten) och en undre (Mickwitzia-sandsten). Den övre delen är relativt homogen, medan det inom de undre delarna av formationen bl a förekommer lerskifferskikt (SGU, 1974).

Grundvattnets förekomst och rörelse inom sandstensakviferen är betingad av porositet och sprickor i sandstenen. Den effektiva porositeten uppskattas till 1-5% utifrån provpumpningar vid Ranstad och Gudhem, SGU (1974) och den är till stor del beroende av sprickfrekvensen. Enligt samma referens torde den totala porositeten i hela akviferen vara i genomsnitt ca 11%.

Enligt SGU (1974) varierar sandstenens transmissivitet (T) i Billingen-Falbygden mellan 10^{-5} och 10^{-3} m²/s, medan översiktlig analys av provpumpningar i Falköpings tätort indikerar transmissiviteter mellan $6 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-3}$ m²/s (Jonasson & Wilén, 1983).

Sandstensakviferen användes tidigare för Falköpings vattenförsörjning.

3.2 Brunnsborrning

Borrningsprogrammet omfattade borrning av ett brunnspar, mellan vilka vattnet cirkuleras.

Borrningarna utfördes med foderrör ned till sandstenens överyta, varefter borrningen fortsatte genom sandstenen, några meter ner i urberget. Under borrningarna utfördes mätning av borrsjunkning, kapacitetsbestämning samt provtagning av borrkax. Efter borrning utfördes stegprov-pumpning.

Brunnsborrningarna startade i maj 1985 och sammanlagt tre brunnar utfördes, R1, R2 och R3, se figur 2.1, varav den förstnämndas kapacitet visade sig vara betydligt lägre än vad som förväntades/krävdes. De båda övrigas kapacitet bedömdes utifrån stegprov-pumpningar vara minst 15 l/s.

Resultaten från borrhningarna av R2 och R3 samt mätningar av borrhjunkning och kapacitetsbestämning framgår av figur 3.2 respektive figur 3.3.

Kapacitetsbestämningarna visade att man först vid ett djup av 45 m erhåller ett vattenflöde som är i nivå med det för anläggningen erforderliga.

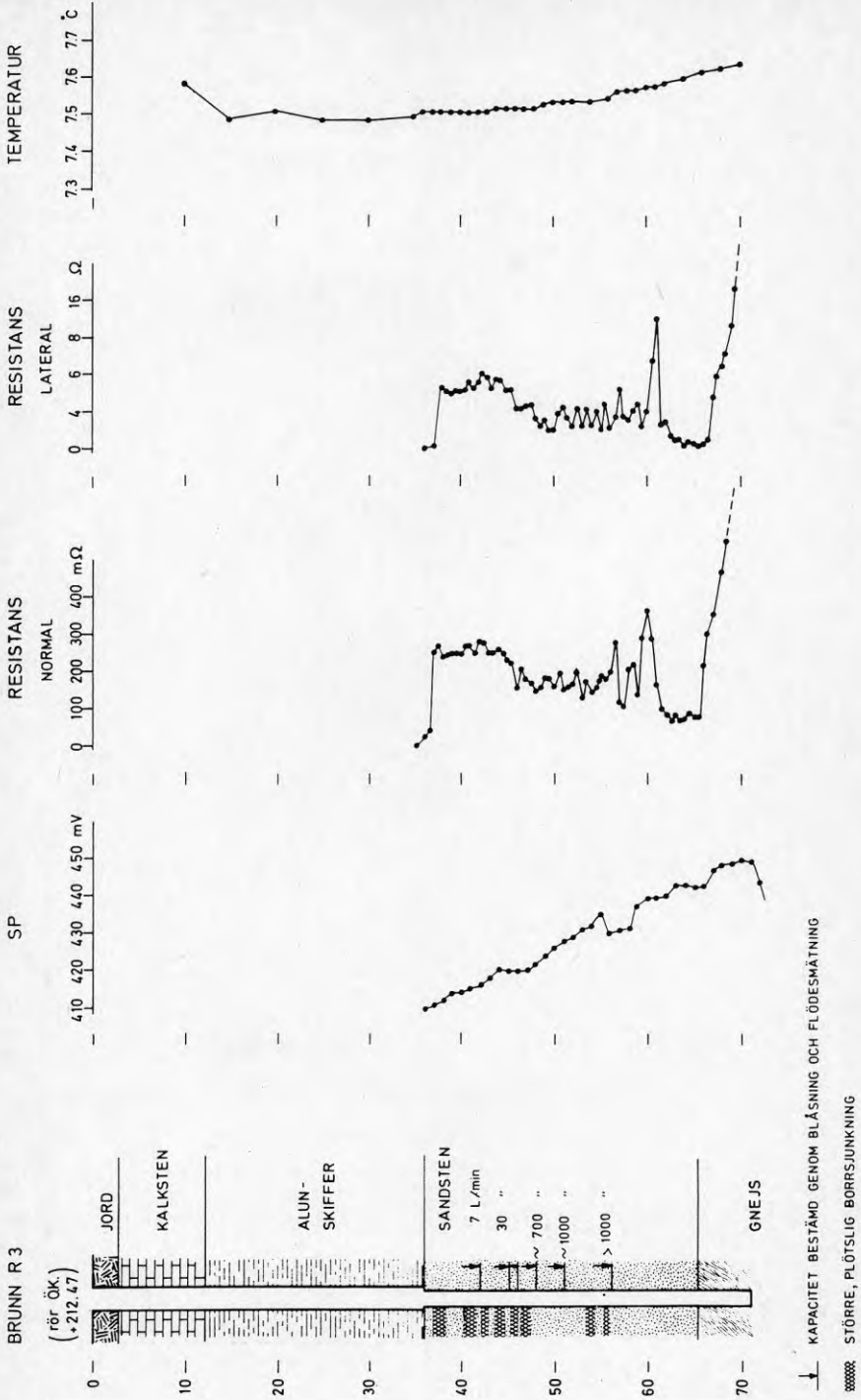
Registering av större, plötslig borrhjunkning som kan indikera sprick- och krosszoner, visar framför allt på förekomst av sådana på nivåerna 40-48 m (R3).

Kaxprov togs för undersökning av bergarter och bergartsgränser, lagerföljd samt sandstenens mineralinnehåll. Sandstenens överyta är belägen på ca 36 m u my och är ca 30 m mäktig. Ur kornstorlekssynpunkt består sandstensformationen huvudsakligen av sandsten med inslag av mosten, lersten och skiffer. Mosten och lersten förekommer endast på några nivåer och uppgår då till maximalt några procents volymsandel. Lerskiffer förekommer däremot i stort sett genomgående, speciellt vid nivåerna 63-68 m (R2) och 56-57 m (R3) där volymsandelen uppgår till 5-10%. På båda dessa nivåer finns även bergartsfragment med lerskifferlinser upp till 5 mm tjocklek.

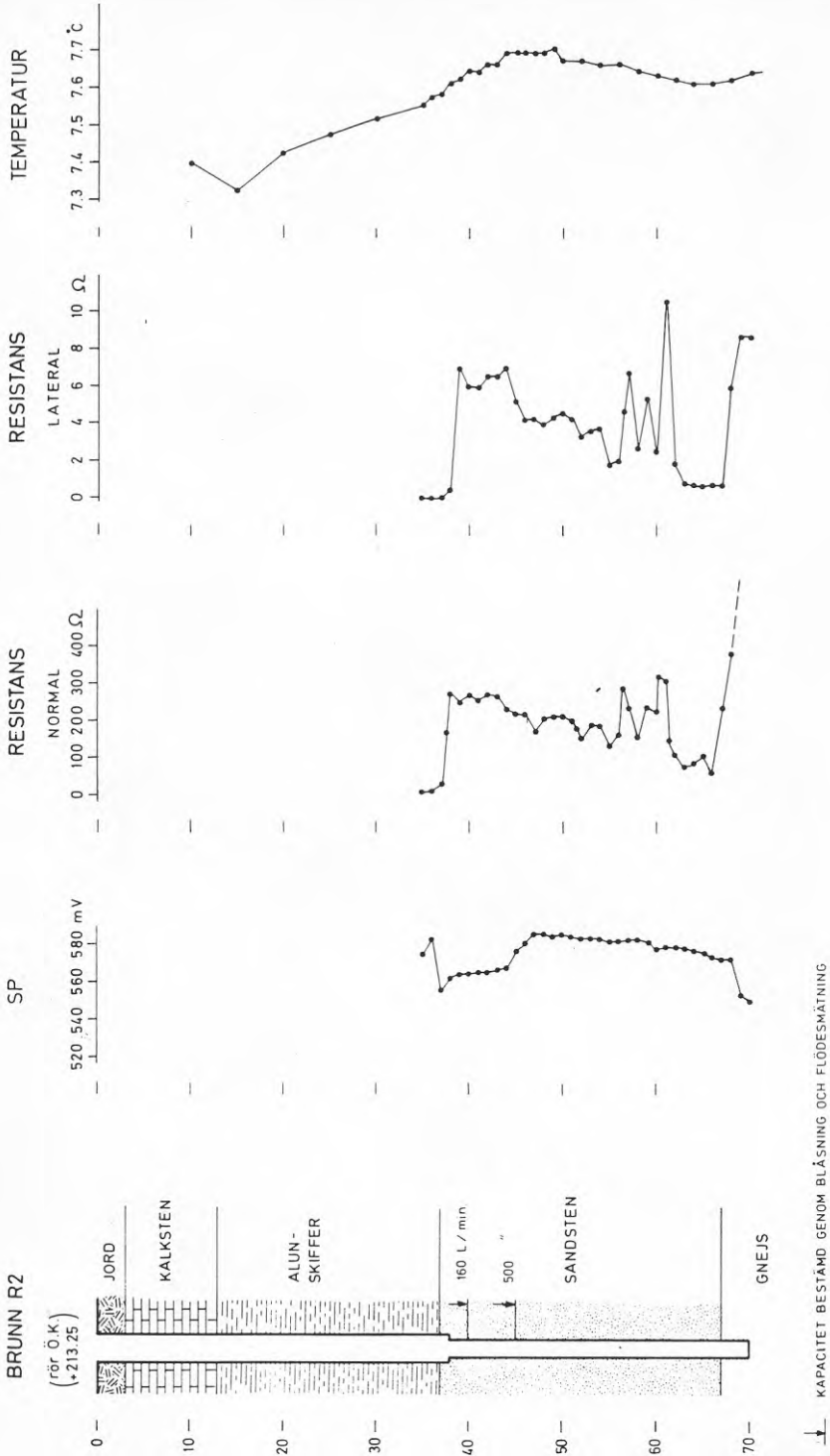
Den mineralogiska undersökningen redovisar genomgående en kvartshalt av mellan 75-85%. Delar av ren kvartssandsten förekommer, medan sandstenen i övrigt har ett matrix av lermineral (kalcit, cericit) av större eller mindre omfattning.

3.3 Borrhålsloggning

Syftet med borrhålsloggningen var att undersöka förhållanden hos sandstenen, som ur hydraulisk/termisk synvinkel kan ha betydelse för den kommande anläggningen. Detta innefattar sandstenens homogenitet, förekomst och utsträckning av vattenförande zoner, tätande/isolerande skikt m m.



Figur 3.2 Resultat av brunnsborrning och borrhålsloggning, brunn R2. Från Holm & Wiltén (1986).



Figur 3.3 Resultat av brunnsborrning och borrhålsloggning, brunn R3. Från Holm & Wilén (1986).

De parametrar som studerades var självpotential (SP), resistivitet (normal och lateral) samt temperatur. Borrhålsloggningen utfördes 84-10-11 och resultatet redovisas i figur 3.2 (R2) och figur 3.3 (R3).

Tidigare hade ett spårämnesförsök utförts, 84-09-10--84-09-14, där vatten cirkulerades mellan brunnarna. Vatten pumpades upp ur R3 och injekterades i R2. Detta försök inverkar på resultaten från loggningen, vilket framgår av temperatur- och SP-kurvor från båda brunnarna.

Utvärderingsarbetet har inriktats på att identifiera sprickor, vattenförande zoner, tätande och/eller isolerande lager. En schematiserad beskrivning av sandstenen kan därvid utföras.

Sandstenens övre del, ca 36-55 m under markytan, karakteriseras av en relativt homogen bädd, vilken innehåller två detekterade sprickzoner, på 44 respektive 48 m nivå. Vattenflödet förefaller att öka mot djupet i denna del, vilket överensstämmer med resultat från kapacitetsbestämningar vid borrning.

Denna underlagras av en inhomogen del, ca 55-61 m under markytan. Skikt med varierande resistans har detekterats, varav flera har väsentligt högre värden än omgivningen. Dessa anomalier förekommer på samma nivåer i båda brunnarna och påverkas sannolikt av lerskifferlager med stor horisontell utsträckning. Kaxprov från denna nivå visar att sandstenen är uppblandad med lerskiffer.

Sandstensserien avslutas med en relativt homogen del, på nivån 61-66 m, vilken möjligen (enligt resultat från loggningen av brunn R2) kan innehålla en sprickzon på nivån 62 m.

3.4 Grundvattennivåer och grundvattenströmning

Utförda mätningar i äldre och nya brunnar visar att grundvattenstrycknivån är belägen ca 2-6 m ovanför bergartsgränsen kalksten/alunskiffer. Detta innebär att trycknivån är belägen drygt 25 m ovanför sandstenens överyta, vilket är av betydelse för största möjliga tillåtna avsänkning vid uttag.

Den undersökta sandstenen utgör ett slutet magasin, ca 30 m mäktigt, vilket har stor utsträckning i horisontell ledd. Enligt SGU (1974) strömmar grundvattnet i detta område, östra delarna av Mösseberg, mot norr till Slafsans dalgång. Utifrån observationer utförda vid denna undersökning, kan detta dock inte säkert bekräftas. Detta orsakas av områdets mycket flacka hydrauliska gradient (uppmätt till maximalt någon tiondels ‰) och de kraftiga störningar av den slutna akviferens grundvattentrycknivå som skett vid själva undersökningarna.

3.5 Provpumpningar

Två provpumpningar utfördes under sommaren 1984 i samband med anläggningens utförande.

Anläggningens utformning som ett tvåbrunns grundvattenvärmesystem innebär att vattnet cirkuleras mellan två brunnar. Detta medför att provpumpningarna endast har haft någon veckas utsträckning i tid, eftersom eventuella hydrauliska gränser och deras inverkan är av liten betydelse för systemet.

Provpumpning 1 utfördes som en korttidsprovpumpning av brunn R2 med 10 l/s, med brunn R1, brunn 1 och brunn 2 som observationsbrunnar (brunn R3 var ej utförd). Se figur 2.1.

Vid provpumpning 2 utnyttjades brunn R3 som pumpbrunn, med ett uttag av 12 l/s. Brunn R1, R2, 1 och 2 var observationsbrunnar.

God överensstämmelse råder dels mellan avsänkings- och återhämtningsförmåga vid samma pumpning, dels mellan datakurvor från olika pumpningar.

För korta tider kan förhållandena i akviferen antas vara isotropa och en utvärdering med Theis' metod har utförts. Resultatet av denna redovisas i tabell 1.

Tabell 1 Beräknade värden på T och S utifrån provpumpningar.

	Provpumpning 1		Provpumpning 2	
	T(m ² /s)	S (-)	T(m ² /s)	S (-)
R1	1.8x10 ⁻³	7.1x10 ⁻⁵	-	-
R2	Pumpbrunn		1.9x10 ⁻³	6.3x10 ⁻⁵
R3	-	-	Pumpbrunn	
Brunn 1	2.0x10 ⁻³	4.2x10 ⁻⁵	2.5x10 ⁻³	5.5x10 ⁻⁵
Brunn 2	1.6x10 ⁻³	3.3x10 ⁻⁵	3.4x10 ⁻³	1.6x10 ⁻⁵

Sammanfattningvis ger en utvärdering av de båda provpumpningarna att akviferen, för kortare tider, har en transmissivitet av ca $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ och en magasinskoefficient av ca 5×10^{-5} .

3.6 Grundvattenkemi

Vattenanalyser har utförts på vatten från brunnarna R1, R2 och R3, se tabell 2. Från brunn R2 togs även vattenprover vid tre olika tidpunkter under provpumpning 1 (840628 och 840704). Detta gjordes för att se om vattnets sammansättning förändrades vid en längre tids pumpning. Som synes i tabell hade vattnet samma sammansättning vid alla tre provtagningstillfällena.

Järn. Järnhalten i vattnet från brunnarna är låg, i allmänhet < 0.1 mg/l. Risken för igensättning av systemet på grund av järnutfällningar är därför liten. Även små järnhalter kan dock ge problem, speciellt om anläggningen körs intermittent eller om järnbakterier finns i vattnet.

Järnhalten i brunn R1 är enligt tabell 0.59 mg/l. Detta värde är osäkert eftersom vattenprovet togs i samband med brunnsborrningen.

Kalcium. Samtliga vattenanalyser visar att vattnet är hårt, dvs innehåller mycket kalcium. Lösligheten för kalcium påverkas bl a av tryck och temperatur. Höjs temperaturen respektive sänks trycket, sjunker lösligheten och kalcium fälls ut som kalciumkarbonat, s k pannsten.

Kalk-kolsyrajämvikten för vattnet från brunnarna är enligt beräkningar mycket känslig. Höjs temperaturen på vattnet är risken för kalkutfällningar stor. Det är även stor risk att trycket förändras när vattnet pumpas. Detta kan också ge utfällningar.

Svavelväte. Vattnet luktade starkt av svavelväte, H_2S , vid samtliga provtagningar. Förekomst av svavelväte kan medföra risk för korrosion på metallinstallationer i systemet.

Vid utförande av en anläggning som utnyttjar grundvattenvärme med återladdning kommer det, enligt ovan, att vara viktigt att följa upp anläggningens funktion. Detta gäller speciellt för de delar av systemet där temperaturhöjning eller trycksänkning sker (värmväxlare, pumpar, brunnar).

Tabell 2 Resultat av vattenanalyser.

Datum	Prov	Ca mg/l	Mg	Na	K	Mn	Si	pH	κ $\mu S/cm$	HCO_3^- mg/l	Fe	Cl^-	SO_4^{2-}
840529	R1	52				(0.05)		7.7	460	285	0.59	14	2
840613	R2							7.7			0.20	17	
840628	R2	54	6.4	46.2	2.7	(0.05)	2.9	7.6	520	322	(0.1)	15	0.5
840629	R2	46	6.0	47.5	3.2	(0.05)	2.9	7.6	510	319	(0.1)	15	0.5
840704	R2	48	6.0	40.5	3.0	(0.05)	2.9	7.6	485	300	(0.1)	15	0.5
840828	R3	78				(0.05)		7.7	516	315	0.09	20	6
840831	R3										(0.05)		

3.7 Spårämnesförsök

Under drift kommer det avkylda vattnet att återföras till akviferen via infiltrationsbrunnen. Detta innebär att en avkylning av akviferen kommer att ske på sikt. Hur snabbt avkylningen sker och hur kraftig den kommer att vara, beror (förutom driftstrategin) på akviferens termohydrauliska funktion.

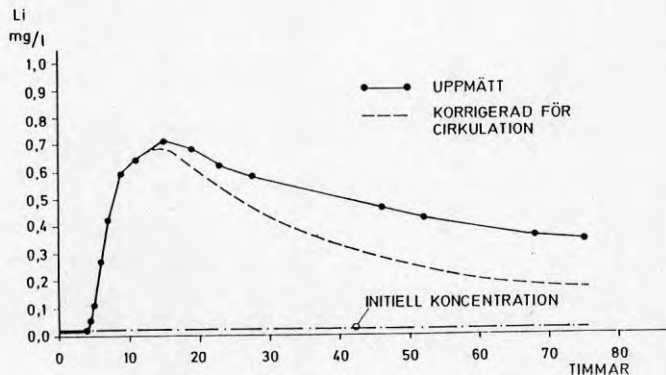
En viktig del av den termohydrauliska funktionen är grundvattnets transportvägar. Dessa styr till stor del avkylningsförloppet i

akviferen. Ur denna synpunkt är det i hög grad intressant att söka uppskatta de vattenförande zonerna och deras förekomst och egenskaper.

Resultat från borrningarna i sandstenen indikerade att vattenflödet mellan brunnarna kan vara koncentrerat till några få, dominerande sprickzoner. En möjlighet att undersöka detta förhållande var att vid driftförhållanden tillsätta ett spårämne och studera transporttiden och dennas spridning mellan brunnarna. Resultatet av ett sådant spårämneshörsök mellan två brunnar kan dock inte kopplas direkt till hur temperaturutbredningen sker i akviferen. Kunskapen om samband mellan partikel- och värmetransport i naturliga akviferer är fortfarande mycket begränsad. Spårämneshörsök i syfte att undersöka en sprickakvifers lämplighet som värmelager har dock utförts tidigare, se Gedda & Ejdeling (1982).

Spårämneshörsöket utfördes i samband med ett cirkulationshörsök och påbörjades 84-09-11. Brunn R3 pumpades med kapaciteten 6 l/s, varefter vattnet leddes till och infiltrerades i R2. Syftet var från början att driva hörsöket ca en vecka. På grund av pumpavbrott avslutades dock hörsöket efter drygt tre dagar.

Som spårämne användes 7 kg LiCl, vilket injekterades i R2. Prov togs av det ur R3 uppfordrade vattnet, vilket analyserades med avseende på litiumhalt. En sammanställning av det uppumpade vattnets Li-halt och dess variation med tiden redovisas i figur 3.4.



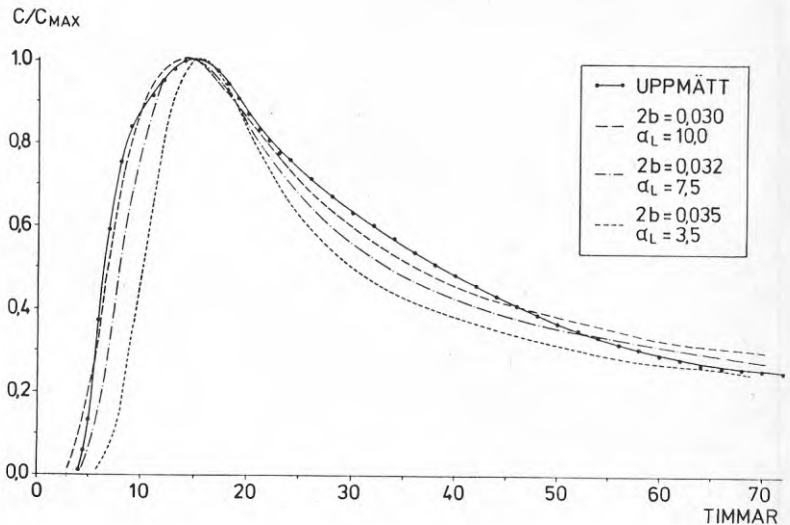
Figur 3.4 Litiumhalt vid spårämneshörsök.

Av figuren framgår att viss del av det i R2 tillförda spårämnet redan efter 4 timmar når R3. Den högsta koncentrationen i det uppumpade vattnet, drygt 0.7 mg/l, uppmättes efter ca 17 timmar. Därefter sjönk halten Li, till en början i relativt snabb takt, efter några dygn allt långsammare.

En modell för att analysera spårämnesförsök i tvåbrunnssystem har utvecklats, se Holm (1987). Denna har utnyttjats för att utvärdera det aktuella spårämnesförsöket.

Modellen utnyttjar analytiska uttryck för att beskriva strömningmönstret i ett tvåbrunnssystem, vilket kombinerats med analytiska lösningar av advektions-dispersionsekvationen. Ingående parametrar är sprickvidd, porositet, flöde och dispersivitet.

Resultaten från några olika beräkningar med skilda ingångsvärden på parametrarna sprickvidd ($2b$) och longitudinell dispersivitet (α_L) kan i figur 3.5 jämföras med uppmätta värden. Tilläggas bör att vid fältförsöket återcirkulerades det utpumpade vattnet innehållande spårämne kontinuerligt till infiltrationsbrunnen. Detta har kompenserats för vid beräkningarna.



Figur 3.5 Spårämnesförsök, jämförelse mellan uppmätta och beräknade värden. Från Holm (1987).

Sammanfattningsvis kan följande slutsatser dras utifrån en analys av spårämnesförsöket enligt Holm (1987).

- * Den korta genombrottstiden för spårämnet tyder på att sandstenen är en sprickakvifer.
- * "Avbrotten" i kurvan efter ca 8-10 timmar tyder på att minst två, troligen flera, sprickor/sprickzoner, utgör de huvudsakliga vattenförande zonerna.
- * Genom att flera sprickor/sprickzoner deltar kommer förloppet, speciellt i början, att avvika från de teoretiska på grund av "fasförskjutningen".
- * Den använda modellen tar enbart hänsyn till advektion och longitudinell dispersion, ej diffusiv eller transversell dispersion. Detta kan förklara skillnader mellan uppmätta och beräknade resultat, inte minst under senare del av försöket.
- * Effektiv sprickvidd är enligt analysen av storleksordningen 0.030-0.035 m.
- * Longitudinell dispersivitet α_L för kviferen är av storleksordningen 5-10 m.

3.8 Sammanfattning av utförda undersökningar

Två brunnar separerade 85 m är borrade i sandstenen med en kapacitet av minst 15 l/s i båda (med måttlig avsänkning).

Sandstenskviferens överyta är belägen på ca 35 m djup under markytan och den totala kvifermäktigheten är ca 30 m.

Mineralogiska undersökningar indikerar att sandstenen har en kvartshalt av 75-85% och att värmeledningsförmågan därför är hög, ca 5.3 W/m⁰C.

Kapacitetsmätningar under borrning indikerar att inströmning av vatten sker på nivån 45-50 m och därunder.

Borrhålsloggningen indikerar flera sprickzoner, varav en "större" vid ca 48 m under markyta (R2) och en mindre vid ca 44 m under markyta.

Den regionala grundvattengradienten är liten och regional grundvattenströmning därmed försumbar.

Provpumpningarna visar att förhållandena är relativt likartade inom området, med ett T-värde ca $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ och en magasinkoefficient av $5 \cdot 10^{-5}$.

Järnhalten är relativt låg medan däremot kalk-kolsyrajämvikten är känslig för störningar, vilket kan orsaka problem vid temperatur- och tryckförändringar. Svavelväteförekomst indikerar risk för korrosion.

Spårämnesförsöket visar att akviferen är en sprickakvifer (två eller flera sprickor/sprickzoner) med förhållandevis korta transporttider. "Total effektiv sprickvidd" har beräknats vara 0.030-0.035 m och longitudinell dispersivitet 5-10 m.

4 DRIFTRESULTAT VÄRMEPRODUKTION

4.1 Inledning

Driftuppföljningen på anläggningen har gjorts från starten i mars 1985. Hela mätprogrammet på värmepumparna kom igång under sommaren 1985 och ett helt mätår från 1/7 1985 till 20/6 1986 redovisas här.

För mätning och uppföljning finns följande utrustning monterad, se även figur 2.3.

- Elmätare för mätning av tillförd el till värmepumparnas kompressorer, uppfodringspump till samlingstank (P-GV1), grundvattenpumpar på varje värmepump (PVP1-PVP6) samt cirkulationspump P2.
- Energimätare för mätning av avgiven energi från värmepumpanläggning. Flödesmätare av induktiv typ med temperaturgivare och integreringsverk.
- Oljeflödesmätare på varje oljepanna.
- Gångtidsmätare för varje värmepumpsteg.

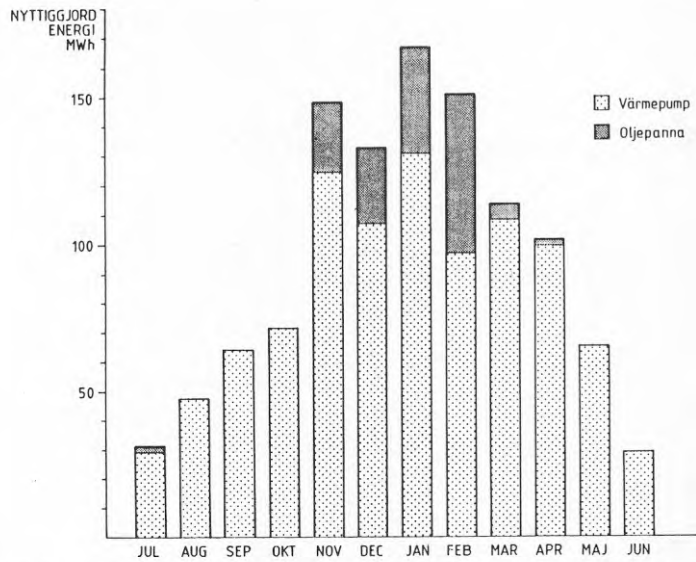
Avläsning sker 1 gång/vecka vid exakt samma tid och utföres av anläggningens driftpersonal.

4.2 Redovisning av driftresultat

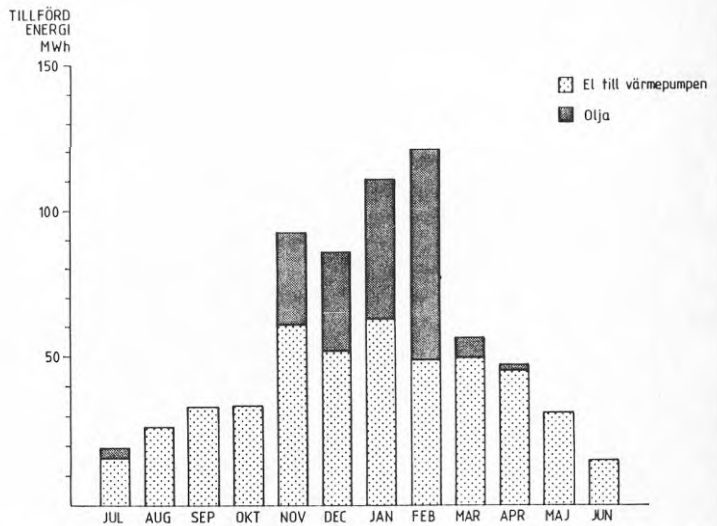
I diagram 4.1-4.4 redovisas i form av stapeldiagram producerad nyttiggjord energi, tillförd köpt energi, värmefaktor och energitäckning.

I diagram 4.1 redovisas dels den uppmätta avgivna energin från värmepumparna, dels den till värmeanläggningen avgivna energin från oljepannorna (70% verkningsgrad).

Producerad energi från oljepanna i juli månad hänför sig till en driftstörning i systemet och är således ej normal.



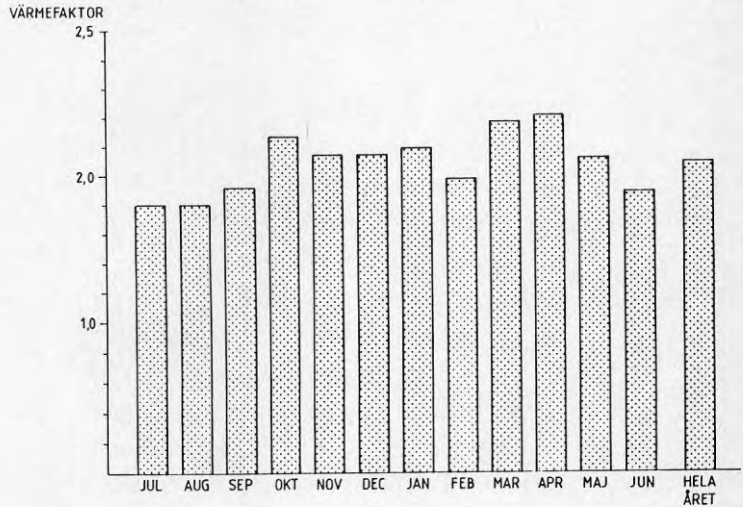
Figur 4.1 Producerad nyttiggjord energi varje månad under perioden 850701 till 860630.



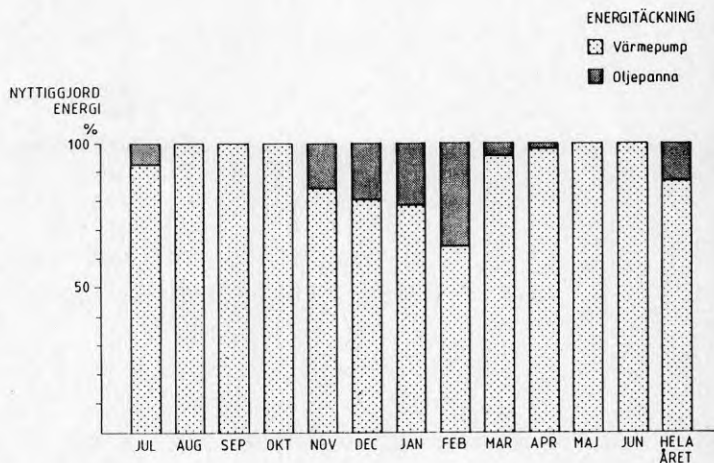
Figur 4.2 Tillförd köpt energi varje månad under perioden 1/7 1985 - 30/6 1986.

I diagram 4.2 redovisas dels den uppmätta tillförda elenergin till värmepumpanläggningen med kringutrustning dels den tillförda uppmätta oljemängdens värmeinhåll (10 MWh/m^3).

I diagrammet 4.3 redovisas värmefaktorn som kvoten mellan uppmätt producerad energi från värmepumpanläggningen och tillförd el till värmepumpanläggningen med kringutrustning.



Figur 4.3 Värmefaktor, medelvärde per månad under perioden 1/7 1985 - 30/6 1986.



Figur 4.4 Energitäckning per månad under perioden 1/7 1985 - 30/6 1986.

I diagram 4.4 redovisas energitäckningen för värmepumpar resp oljepannor i procent av totalt producerad nyttiggjord energi.

4.3 Kommentarer till driftresultat

Värmefaktorn ligger på ett årsmedelvärde av 2.05, vilket får anses inte särskilt högt för en grundvattenvärmeanläggning. Anledningarna till detta finns troligtvis i konstruktionen av uppfordringen av grundvattnet samt att värmepumparna har en konstant hög kondenseringstemperatur.

Grundvatten uppfordras i ett öppet system till en samlingstank varifrån pumpning sker till varje värmepump och åter till grundvattenbrunn. Detta öppna system innebär högre energiförbrukning för pumpningen än ett slutet skulle innebära. Anläggningen arbetar dessutom med ett förhållandevis högt flöde på grundvattensidan ($36 \text{ m}^3/\text{h}$ vid full drift) och är dimensionerat med ganska små rördimensioner (R-värde=110 mm vp/m).

Värmepumparna arbetar med en framledningstemperatur som är min. begränsad till 48°C för att hålla tappvarmvattentemperaturen. Under uppvärmningssäsongen kan framledningstemperaturen från värmepumparna öka ytterligare några grader. Detta medför förhållandevis höga kondenseringstemperaturer och därmed minskad värmefaktor. Periodvis under vintern slår värmepumparna ifrån på grund av hög returtemperatur då oljepannorna gått in och spetsat. Detta sänker värmepumpanläggningens täckningsgrad något.

Under mätåret har anläggningen förbrukat 1113.4 MWh nettoenergi. Antalet graddagar har varit 4050 mot normalårets 3946. Värmepumpanläggningens täckningsgrad har varit 87.4%.

Beräknad täckningsgrad vid installation var 81% baserat på en nettoenergiförbrukning normalt på 1240 MWh.

Täckningsgraden måste betecknas som mycket god beroende på en hög tillgänglighet på anläggningen och väl fungerande styr- och regler-system. Det enda egentliga driftavbrott som noterats skedde i juli -85 då strömavbrott gjorde att PC-systemet tappade programmet då batterierna visade sig vara för dåliga.

Ur mätresultaten kan utläsas en ren energibesparing vid installation av värmepumpinstallationen. Den tidigare normalårskorrigerade nettoenergiförbrukningen var 1240 MWh. Normalårskorrigerad nettoenergiförbrukning under mätåret var 1085 MWh.

Viss besparingseffekt ligger i en sänkt tappvarmvattentemperatur, från 65°C till 45°C. Detta är den enda tekniska åtgärd som kan förklara besparingen men troligtvis ligger en stor del av spareffekten på ökad energimedvetenhet både hos driftpersonal och användare.

4.4 Driftserfarenheter

Värmepumpinstallationen är placerad i ett f d garage i källare med servicelägenheter omedelbart ovanför. Ljudnivån på installationen har visat sig mycket låg beroende på kompressortypen (helhermetisk) och inga som helst ljudproblem har förekommit.

Kondensproblemen på grundvattensidan är ganska stora. Ej överisolerade ventiler och kopplingar får korrosionsangrepp. Kompletterande isolering utfördes under hösten -86.

Vissa problem har förekommit med att pannorna löser ut på säkerhetstermostaterna. Orsaken till problemen är att vattenflödet genom pannorna i fall med liten tillsatsvärme blir så litet att den ackumulerade värmen i panngodset kan lösa säkerhetstermostaten efter driftstermostatens frånslag. En intern cirkulationspump kommer att monteras på pannorna för att klara problemet.

Varmvattenvärmning sker i panncentral till ca 47°C. Eftervärmning sker i elberedare utplacerade i installationen där så erfordras. Eftervärmning utföres till kök och sköljrum. Systemet har visat sig fungera mycket bra. Inga problem har förekommit med varmvattentemperaturen ca 45°C vid tappställe för personlig hygien m m.

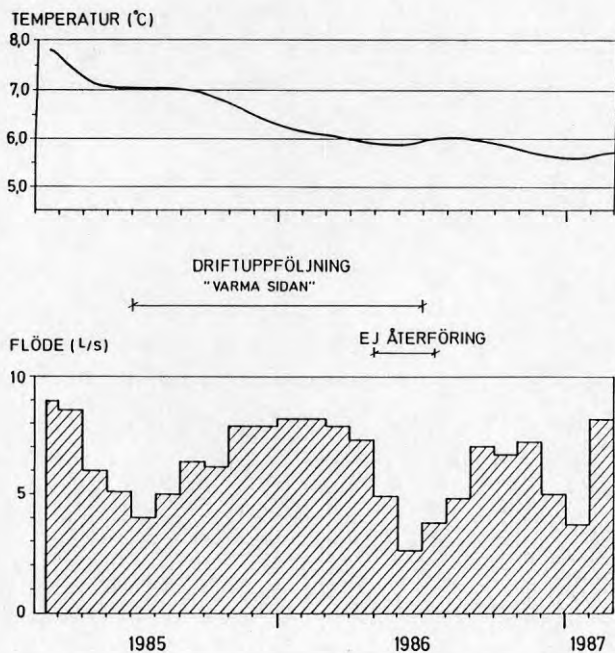
En av installationens klart positiva sidor har varit den goda styr- och reglerfunktionen. Systemet med en normal reglercentral som arbetar ihop med ett programmerbart styrsystem är mycket användarvänligt samtidigt som möjligheten till ett omfattande och relativt komplicerat styr- och reglerförlopp finns.

Anläggningen har fungerat mycket bra från idrifttagandet med endast två driftstörningar. Den ena var att urkopplingstiden mellan vp-stegen i början var satt för lång (10 min minska-signal) vilket innebar att värmepumparna vid minskande värmebehov hann slå ifrån på högtryckspressostaterna innan PC-systemet kopplade bort dem. Efter omprogrammering till urkopplingstiden 2 min minska-signal har problemet försvunnit. Den andra driftstörningen inträffade vid strömbortfall då batterier för back-up var förbrukade och programmet försvann.

5 DRIFTRESULTAT VÄRMEKÄLLA

5.1 Flöden och temperaturer

Vattenflöden och temperaturer på inkommande vatten har registrerats, se kapitel 4.2, och redovisas för perioden mars 1985 till mars 1987 i figur 5.1.



Figur 5.1 Uppmätta flöden och vattentemperaturer.

Vid anläggningens start i mars 1985 var medelflödet ca 9 l/s vilket sedan successivt minskade fram till juli månad då årets lägsta månadsmedelflöde, ca 4 l/s inträffade. Därefter ökade flödet till maximalt 8.2 l/s påföljande vinter.

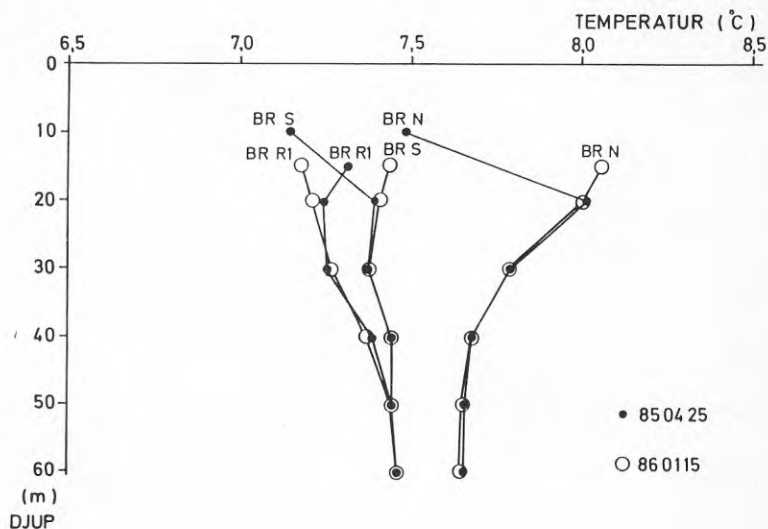
Det inkommande vattnets temperatur uppgick vid anläggningens idrifttagande (mars -85) till 7.8°C. Redan efter någon vecka sker temperaturgenombrott med åtföljande temperaturminskning, vilken varar fram till sommarperioden. Under hösten fortsätter sedan temperaturen på inkommande vatten att minska. Efter ett års drift är den totala minskningen ca 1.8°C.

Av figur 5.1 framgår tydligt hur pumpflödet (dvs energiuttaget) påverkar temperaturen på uppumpat vatten.

5.2 Temperaturloggning

För att undersöka förekomst av vattenförande zoner i infiltrations- respektive pumpbrunn samt eventuell temperaturpåverkan på omgivningen, utfördes temperaturloggning i såväl anläggningens som omgivande brunnar. De brunnar som utnyttjades härvidlag förutom R2 och R3, var brunnarna R1, brunn 1 och brunn 2, se figur 2.1.

Temperaturloggning av omgivande brunnar visar att inga av dessa har påverkats termiskt av grundvattenvärmeanläggningen. I figur 5.2 redovisas temperaturprofiler för brunnarna R1, brunn 1 och brunn 2 från två tillfällen dels strax efter driftstart (850426), dels efter nära ett års drift (860226). Klimatets inverkan på marktemperaturen sträcker sig ca 20 m under markytan, resterande skillnader mellan uppmätta temperaturprofiler kan hänföras till mätutrustningen.

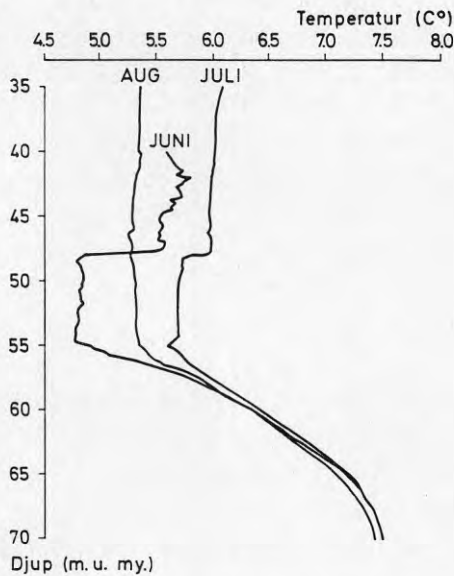


Figur 5.2 Temperaturprofiler i omgivande brunnar.

Även uttags- och infiltrationsbrunnar har temperaturloggats regelbundet. Detta gäller främst den sistnämnda eftersom temperaturdifferenserna där är kraftigare än i uttagsbrunnen.

De uppmätta temperaturerna i brunnprofilerna är en funktion dels av driftförhållandena, dvs infiltrationsvattnets flöde och temperatur, infiltrationens varaktighet och eventuella pumpstopp, dels av akviferens termohydrauliska egenskaper.

Resultat från temperaturmätningar "under drift" i infiltrationsbrunnen redovisas i figur 5.3.



Figur 5.3 Temperaturloggning i infiltrationsbrunn vid tre olika tidpunkter.

Som framgår av figuren är avkylningen i vissa delar av brunnen betydligt kraftigare än i omgivningen, vilket indikerar förekomst av vattenförande zoner.

Den skillnad i avkylningens storlek mellan de olika loggnings-tillfällena som framgår av figuren beror av driftförhållandena, se figur 5.1. Eftersom värmebehovet och därigenom pumpflödet suc-

cessivt har minskat till ett minimum under juli månad, har en viss återhämtning (uppvärmning) av brunnen skett efter vårens avkylning.

En analys av temperaturprofilerna från sandstensformationen (37-67 m) visar att denna termohydrauliskt grovt kan indelas i tre delar, vilka ur avkylningssynpunkt uppvisar olika förlopp.

I den övre delen av sandstenen (37-48 m) har en begränsad avkylning skett (juni och juli) jämfört med närmast underliggande del. Temperaturanomolier förekommer inom övre delen, se juni-kurvan, men genomgående kan en något förstärkt avkylning konstateras vid nivåerna 45 m och 46-47 m.

Utvärdering av avkylningen i sandstenens övre del tyder på att sandstensakviferen här har begränsade vattenförande egenskaper och att avkylningen till stor del är betingad av värmeutbyte genom ledning mellan den "kalla vattenpelaren" i borrhålet och dess omgivning. Anomalierna vid 45 m och 46-47 m orsakas sannolikt av mindre vattenförande zoner, vilket förstärker avkylningen. Under borrhningen utförda kapacitetsbestämningar visar även på ökad vattenmängd under dessa nivåer.

Sandstensformationens "mellanzon" omfattar nivåerna 48-55 m. Temperaturfördelningen inom denna del är relativt likformig, men avviker väsentligt från ovan- och underliggande delar. Speciellt är temperaturgradienterna mot dessa delar kraftiga. Även inom denna del finns vissa partier med kraftigare avkylning.

För att förklara skillnaden i temperatur gentemot ovanförliggande del, måste den ökande nedkylningen betingas av en ökad vattenföring (dvs konvektion kombinerad med vertikal ledning). Den kraftiga gradienten vid 48 m-nivån kan förklaras med en kraftigt ökande vattenföring eventuellt i kombination med ett isolerande skikt (t ex lersten) strax ovanför den vattenförande zonen.

Den långtgående temperaturutjämnningen inom "mellandelen" tyder på förekomst av ett flertal sprickor (förutom de som avgränsar delen uppåt och nedåt) samt en hög värmeledning som jämnar ut temperaturerna i vertikalled.

Brunnarnas undre del omfattar dels sandsten 55-65 m, dels gnejs 65-71 m. Samtliga loggningsprofiler uppvisar liknande temperaturförhållanden som de som redovisas i figur 5.3.

Temperaturprofilerna tyder på att vattenföringen i denna del av akviferen är ringa och att den från termohydraulisk synpunkt främst medverkar genom vertikal ledning.

5.3 Grundvattenkemi

Vattenprovtagning med åtföljande vattenanalyser har skett tre gånger (860113, 860612 samt 860909) efter anläggningens start, våren 1985. Resultaten redovisas i tabell 3. Som framgår av denna har dessutom vattenprov analyserats från olika delar av systemet; inkommande vatten, vatten efter samlingstank samt i infiltrationsbrunn.

Tabell 3 Resultat av vattenanalyser under driftperioden.

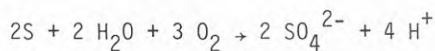
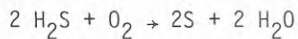
		860113	860612			860909		
		Ing. vatten	Ing. vatten			Ing. vatten		
		1	2	3	4	5	6	7
		före tank	efter tank o.v.p.	inf. brunn	före tank	efter tank o.v.p.	inf. brunn	
pH		7.7	7.5	7.7	7.2	7.6	7.8	7.3
Eh	mV	-	35	95	-	50	80	150
σ_t	$\mu\text{S}/\text{cm}$	480	450	490	-	465	485	490
HCO_3^-	mg/l	295	298	290	-	296	294	289
SO_4^{2-}	"-	<2	<2	44	-	8	10.6	12.5
Cl^-	"-	22	12	12.5	-	-	-	-
Ca^{2+}	"-	36.8	25.4	27.2	-	-	-	29.8
Mg^{2+}	"-	4	4.8	4.8	-	-	-	3.9
Na^+	"-	40	50.4	49.3	-	-	-	42
K^+	"-	2	2.2	2.5	-	-	-	2.0
Fe_{tot}	"-	0.01	<0.05	0.07	1.75	0.06	0.1	0.5
Mn_{tot}	"-	<0.05	0.05	0.04	-	<0.05	0.05	0.06
TOC	"-	2.5	1.5	3.1	-	10.5	10.8	11.8
Si	"-	3.9	3.7	3.8	-	-	-	-
Al	"-	<0.1	0.03	0.03	-	-	-	-
H_2S	"-	-	stark	lukt	-	stark	lukt	-

Vattenprov togs i förekommande fall från speciella provtagningskranar, förutom ur infiltrationsbrunnar. Där genomfördes provtagningen 860612 med hjälp av vattenhämtare, medan provtagningen 860909 genomfördes med hjälp av pump, efter ca en timmas pumpning.

Mätningar i fält av pH och redoxpotential har skett, samtidigt som halten svavelväte uppskattats med fältanalysutrustning.

De flesta analyserade parametrarna varierar mycket lite, dels mellan de olika provtagningspunkterna i systemet, dels mellan de olika provtagningsstillfällena. De parametrar som förändras vid passage genom systemet är i första hand redoxpotential, sulfathalt och i viss mån pH. Redoxpotentialen får ett högre värde efter samlingstanken, beroende på att vattnet luftas. I samband med luftningen oxideras svavelvätet i vattnet till sulfat. Denna reaktion katalyseras sannolikt av svaveloxiderande bakterier, vilket bestyrkts via mikroskopanalys av utfällningar från samlings-tanken.

Följande reaktion sker då svavelväte oxideras



Reaktionen innebär att sulfathalten ökar. Sulfat och vätejoner bildar svavelsyra, vilket medför risk för korrosion i systemet.

Järn och sulfathalter är högre i infiltrationsbrunnen än i inkommande vatten. Vid tidigare provtagning, se tabell 1, har inget järn och mycket lite sulfat påträffats. Den förhöjda järnhalten kan förklaras med att vatten innehållande syre infiltreras i brunnen. Syret i vattnet kan medföra oxidation av järnsulfid vilket medför ökade järn- och sulfathalter.

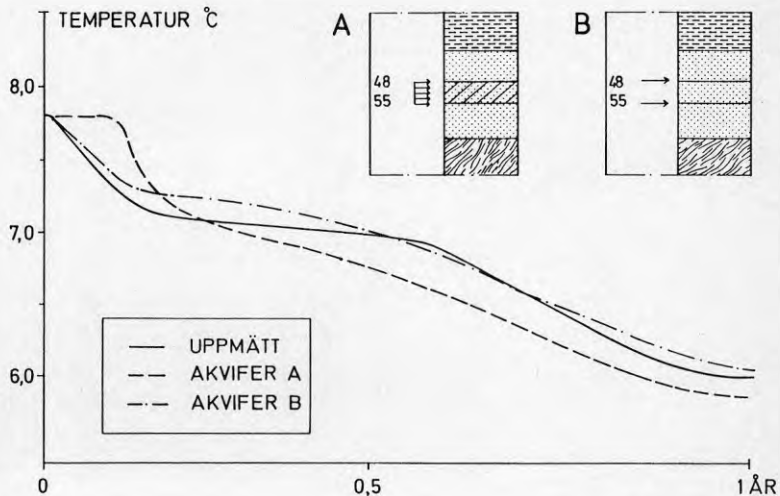
5.4 Långtidsaspekter på värmekällans funktion

Uppumpat grundvatten avkyls i värmepumpar (ca 3°C), varefter det återförs till akviferen via infiltrationsbrunnen. Genom att den termiska genombrotts tiden är kort, påverkas temperaturen på uppumpat grundvatten av avkylningsförloppet. Från mars 1985 till mars 1987 har temperaturen på inkommande vatten minskat från 7.8°C till ca 5.5°C , se figur 5.1. Medelpumpflödet under samma period är ca 6.3 l/s.

Returvattnet avkyls ca 3°C enligt ovan. Eftersom avkylningen av värmekällan fortgår är dess långtidsfunktion av stort intresse för hela anläggningens funktion. Lägsta tänkbara returvattentemperatur är ca $1.0\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$.

För att beräkna avkylningsförlopp vid tvåbrunnssystem kan antingen analytiska uttryck, se Claesson et al (1985), eller numeriska modeller, se Bennet et al (1984), utnyttjas. Eftersom den termiska genombrotts tiden är relativt kort och uppumpat grundvatten påverkas snabbt av avkylning, har den senare beräkningsmodellen använts.

Utifrån utförda hydrogeologiska undersökningar och driftuppföljning, har några olika akvifertyper simulerats, se figur 5.4.

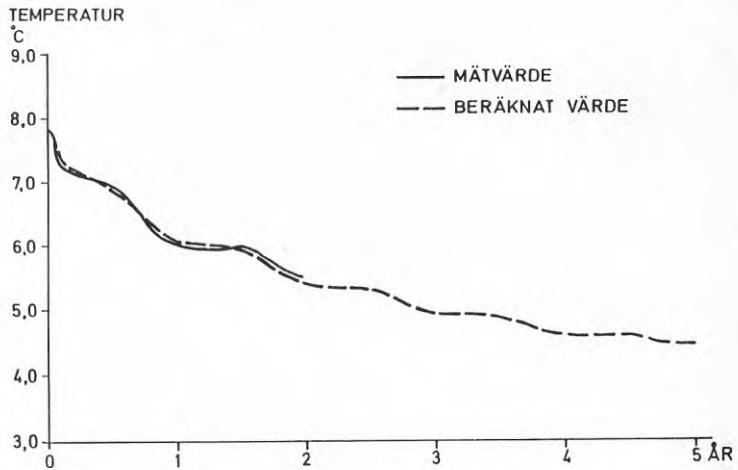


Figur 5.4 Jämförelse av uppmätta värden på inkommande vattentemperatur med resultat från numerisk simulering.

Som framgår av figuren ger de olika akvifertyperna något olika temperaturförlopp. Speciellt avkylningen under en initiell period skiljer sig åt beroende på om vattenföringen sker i homogena, mäktiga zoner, eller via enskilda sprickplan.

Bäst anpassning ger den akvifermodell som innehåller två sprickplan, på 48 respektive 55 m nivå under markytan. Denna modell har därefter utnyttjats för att beräkna långsiktig avkylning av värmekällan.

Avkylningsförloppet under 5 års drift redovisas i figur 5.5. Varje driftår delas upp i två sexmånadersperioder där medelflödet under "vinterperioden" är 8.0 l/s och under "sommarperioden" 5.5 l/s. Avkylningen är mest markerad under det första året, ca 1.7°C, varefter avkylningshastigheten successivt minskar till 0.2°C mellan fjärde och femte driftåret. Totalt sänks temperaturen från 7.8°C till ca 4.4°C efter fem års drift, under antagna förutsättningar.



Figur 5.5 Beräknat avkylningsförlopp under 5 års drift.

6 EKONOMI

Kostnaden för den energi som produceras med grundvattenvärmepumpsystemet och oljepannor har beräknats för normalåret. Beräkningen har gjorts med annuitetsmetoden och följande beräkningsgrunder:

- investeringskostnad	1 100 000 kr
- avskrivningstid 15 år och kalkylränta 6%, vilket ger annuitetsfaktorn	0.103
- elpris	0.30 kr/kWh
- oljepris eol	1800 kr/m ³
- underhållskostnad 2% av investeringskostnaden per år	
- nettoförbrukning normalår	1085 MWh
- årsvärmefaktor	2.05
- täckningsgrad av värmepumpsystemet	87.6%

(Elpriset var inklusive skatten och fasta avgifter under 1986 0.29 kr/kWh och oljepriset 1/7-87 för eol 1769 kr/kWh.)

Av nettoenergiförbrukningen på 1085 MWh producerar värmepumpen 948.3 MWh varav 462.6 MWh är el. Oljepannorna producerar 136.7 MWh netto, vilket motsvarar 19.5 m³ eol vid 70% verkningsgrad. Ur grundvattnet tas 485.7 MWh, vilket innebär att ca 45% av Ranlidens energiförbrukning utgörs av förnyelsebar energi.

Med en energiförbrukning fördelad enligt ovan blir energipriset ca 0.285 kr/kWh.

En motsvarande anläggning med elpannor har en ren driftskostnad på 0.29 kr/kWh. Till detta kommer kostnaden för investering i elpannor och underhållskostnad. Fortsatt drift av oljepannorna skulle ge en energikostnad på 0.277 kr/kWh, räknat med samma underhållskostnad som värmepumpsystemet (22 000 kr) men utan kostnad för reinvestering i oljepannor.

Värmepumpsystemet ger därmed en lägre kostnad än el men något högre än oljeeldning skulle ge vid aktuella olje- och elpriser. Vid ett oljepris på ca 1900 kr/m³ blir värmepumpalternativet billigare än oljealternativet och om reinvestering i nya oljepannor medtas blir kostnaden för oljeeldning högre redan vid aktuellt

oljepris. Detta är den mest realistiska jämförelsen, varför grundvattenvärmeanläggningen ger den lägsta energikostnaden av de tre alternativen.

7 SLUTSATSER OCH KOMMENTARER

* Anläggningens utformning

Projekteringen gjordes för ett temperaturutnyttjande, Δt , och lägre flöde än vad som blivit fallet i den färdiga anläggningen. Det har mindre betydelse då anläggningen körs som ett renodlat grundvattenvärmesystem. Då strömningen mellan brunnarna är koncentrerad till ett fåtal sprickplan sker värmeströmmen huvudsakligen i vertikal led till de horisontella sprickplanen. Det kan beskrivas som ett naturligt, värmepumpbaserat HDR-system.

Den praktiska betydelsen av det höga pumpflödet är att pumpenergin blir hög, vilket sänker värmefaktorn på systemet. Systemutformningen med en utjämnings tank med nivåvakter till vilken grundvatten uppfordras med grundvattenpumpen och 6 värmepumpar med var sin cirkulationspump, parallellkopplade är ur den synpunkten inte helt lyckad. Pumpenergiåtgången är högre än nödvändigt, dels då sänkpumpen är något överdimensionerad, dels då separata cirkulationspumpar dessutom pumpar vattnet genom varje värmepump. Den öppna tanken medför att grundvattnet luftas, vilket inte orsakat några direkta problem hittills i Falköping (utfällning, igensättning, korrosion). Den utfällning som skett i tanken har inte haft någon inverkan på driften.

* Värmeproduktion

Värmeproduktionen har varit högre än beräknat främst på grund av hög tillgänglighet på anläggningen och väl fungerande styr- och regler-system. Anläggningens täckningsgrad har varit 87.4%.

Under vinterperioden har värmepumparna slagit ifrån på grund av hög returtemperatur. En komplettering av radiatorytan, eller ytterligare inreglering skulle kunna öka tillgängligheten.

* Värmekälla

De geohydrologiska undersökningarna, se kapitel 3, visar på att vattenföringen i sandstensakviferen är koncentrerad till några enstaka sprickor/sprickzoner, samt att vattnets uppehållstid mellan brunnarna är kort.

Ur värmespridningssynpunkt innebär detta att avkyllt vatten, konvektivt kommer att transporteras i sprickorna, men att den "termiska fronten" väsentligt kommer att fördröjas beroende på vertikal ledning. Eftersom värmeledningsförmågan är hög i sandstenen, enligt Holm & Wilén (1986) är $\lambda=5.3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, är den utjämnande effekten stor.

Avkylningsförloppen för en akvifer bestående av ett begränsat antal sprickor, jämfört med en akvifer med viss effektiv mäktighet skiljer sig dock från varandra, framför allt under en initieell fas, se figur 5.4. Det uppmätta, snabba temperaturgenombrottet, samt formen på det fortsatta avkylningsförloppet visar därför att akviferen även från termohydraulisk synpunkt uppträder som en sprickakvifer.

En konsekvens av detta är att avkylningsförloppet kommer att fortsätta, även om avkylningshastigheten minskar. Efter 5 år har temperaturen hos uttaget vatten beräknats uppgå till knappt 4.5°C . Detta ska jämföras med avkylningen i värmepumparna, ca 3°C . På sikt krävs därför någon åtgärd för anläggningen, t ex i form av återladdning av akviferen.

* Återladdning

Den tidiga studien (Jonasson & Wilén, 1983) på uppdrag av kommunen visade att grundvattenvärmesystem i tätorten bör utföras med återladdning om systemen skall få betydelse för tätortens uppvärmning. Vid renodlat uttag sker en nedkylning av akviferen vid återföringsbrunnen som sprids ut och det försämrar på sikt värmekällan för den egna näraliggande brunnen. Av den anledningen planerades anläggningen i Ranliden för återladdning och brunnsavståndet dimensionerades med tanke på återladdning.

Nedkylningen har inte gått lika fort som de tidiga beräkningarna visade. Dels sker flödet i ett fåtal sprickzoner, dels är driftstrategin annorlunda än den vid beräkningarna. Detta gör att anläggningen i Ranliden kan fortsätta med renodlat uttag i ytterligare 3-4 år. För att möjliggöra fler anläggningar i området och för att säkerställa värmekällan till Ranliden bör anläggningen så

småningom kompletteras med återladdning. Det kan göras med lågtemperatursolfångare, vindkonvektorer eller fläktbatterier placerade på taken till servicehuset. Takyterna är mer än tillräckliga och det är lätt att göra nödvändigt montage på de platta taken.

Kostnaden för återladdningssystemet påverkar ekonomin för anläggningen negativt. Det är för varje enskild anläggning inte ekonomiskt motiverat att återladda. På sikt erhålls en konstant och högre temperatur på värmekällan, vilket gör livslängden obegränsad och värmefaktorn förbättras något jämfört med ett tvåbrunnssystem med ensidigt uttag (och avståndet mellan brunnarna kan minska betydligt). För ett större område, t ex en stadsdel, innebär dock återladdningen att betydligt fler hus kan utnyttja grundvattenvärme och därmed kan en betydligt större del förnyelsebar energi utnyttjas inom ett begränsat område. Det är möjligt att energikostnaden totalt för området blir lägre än konventionell uppvärmning även om det för ett enskilt objekt blir dyrare än samma objekt utfört utan återladdning.

* Ekonomi

Energikostnaden för värmen producerad i den utförda anläggningen är lägre än för de konventionella alternativen oljeeldning eller elpannor (om kostnaden för reinvestering i nya pannor inkluderas). Detta gäller vid de relativt låga priser på el och olja som gäller 1987. Lönsamheten för värmepumpanläggningen ökar vid ökade priser på köpt energi. Den specifika investeringskostnaden är ca 6100 kr/kW och är relativt normalt för en grundvattenvärmeanläggning.

Anläggningen borde kunna förbättras något vad gäller värmefaktorn. Energitäckningsgraden däremot är hög. Ett slutet grundvattensystem och en lägre kondenseringstemperatur skulle förbättra värmefaktorn som borde åtminstone vara ca 2.5 för den här typen av anläggning. Energitäckningsgraden är hög trots att värmepumpen då och då slagits ut på grund av höga returtemperaturer.

Energikostnaden vid en värmefaktor på 2.5 (övriga uppgifter enligt kapitel 6) ger en energikostnad på ca 26 öre/kWh. Då är drygt 52% förnyelsebar energi.

REFERENSER

- Bennet J, Claesson J, Eftring B, Eskilsson P, Hellström G, 1984: Manuals for computer codes. Heat Storage in the ground. (Department of Mathematical Physics, University of Lund). Lund.
- Claesson J, Eftring B, Eskilsson P, Hellström G, 1985: Markvärme. En handbok om termiska analyser. (Byggforskningsrådet) T18:1985. Stockholm.
- Gedda C, Ejdeling G, 1982: Värmelagring i grundvattenmagasin. Fältförsök i kalkstensakvifer, Landskrona. (Byggforskningsrådet) Rapport R32:1982. Stockholm.
- Holm T, 1987: Termohydrauliska egenskaper hos olika akvifertyper. Värmeutbredning samt undersökningsmetoder, speciellt spårämnesförsök, vid värmelagring i akvifer. (Geologiska institutionen, CTH/GU) Konzept.
- Holm T, Wilén P, 1986: Grundvattenvärme med återladdning. Geohydrologiska undersökningar och termiska beräkningar för ett pilotprojekt i Falköping. Förstudie. (Geologiska institutionen, CTH/GU) Publ. B294. Göteborg.
- Jonasson S A, Wilén P, 1983: Grundvattenvärme i Falköping. (Geologiska institutionen, CTH/GU) Internrapport. Göteborg.
- SGU, 1974: Hydrogeologiska synpunkter på planerad brytning av uranskiffer i dagbrott och gruva vid Ranstad och av kalksten vid Rådene, Skaraborgs län. (Sveriges Geologiska Undersökning) Rapport. Uppsala.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850201-4
från Statens råd för byggnadsforskning till
Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.**

R72: 1988

ISBN 91-540-4934-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6708072

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

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

Cirkapris: 33 kr exkl moms