



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

R6:1989

REF/Sbl

Driftuppföljning

**Värme och kylsystem med akvifärlager
i Kristianstad**

**Lars Kronqvist
Rune Simonsson**

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plag

ser

Byggeforskningsrådet

R6:1989

DRIFTUPPFÖLJNING

Värme och kylsystem med akvifärlager
i Kristianstad

Lars Kronqvist
Rune Simonsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
850307-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till VBB AB i samarbete med Malmergs i Yngsjö
AB.

REFERAT

Projektet har följt funktionen av ett energilagring i en akvifär. Energilagret har ingått i en värmepumpinstallation vid Ericsson Telecom AB, Kristianstad. Värmepumpen ger både kylning av processen och uppvärmning av fabrikslokalen.

Syftet med projektet har varit att insamla driftdata från grundvattensystemet och med hjälp av dessa data klargöra det termohydrauliska verkningssättet hos energilagret.

Resultatet av drygt 1 års uppföljning av driften visar att betydande energiöverskott har inlagrats i akvifären med stigande uttagstemperaturer som följd. Kylningen med hjälp av grundvatten försvårades härigenom. Genom bortledning av energi under 1987 har lägre grundvattentemperaturer uppnåtts.

En datormodell har uppställts och kalibrerats mot uppmätta förhållanden. Modellen har sedan utnyttjats för beräkning av temperaturer vid ett mer balanserat förhållande mellan inlagring och uttag av energi samt i ett fall med betydligt större energiuttag än inlagring.

Projektet mynnar i rekommendationer för fortsatt drift av anläggningen.

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.

R6:1989

ISBN 91-540-4996-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

INNEHÅLL

FÖRORD

SAMMANFATTNING

1.	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Projektbeskrivning	1
1.3	Målsättning	1
2.	SYSTEMUPPBYGGNAD	3
2.1	Systembeskrivning	3
2.1.1	Produktionstid	3
2.1.2	Icke produktionstid	3
2.2	Värmepumpar	3
2.3	Värmeväxlare	4
3.	GRUNDVATTENDELEN	5
3.1	Systembeskrivning	5
3.1.1	Driftfall - Grundvattencirkulation	5
3.1.2	Brunnar	5
4.	MÄTNINGAR	7
4.1	Systembeskrivning	7
4.2	Temperaturmätningar	7
4.2.1	I akvifären	7
4.2.2	I ledningsystemet	7
4.2.3	Lufttemperatur	7
4.3	Flödesmätningar	8
4.4	Värmemängdsmätningar	8
4.5	Övriga mätningar	8
4.6	Redovisning av mätningarna	8
5.	AKVIFÄREN	9
5.1	Geohydrologisk beskrivning	9
5.2	Beskrivning av aktuell lagerföljd	9
5.3	Regional grundvattenströmning	9
6.	DRIFTDATA	11
6.1	Energi	11
6.2	Temperaturnivåer	13
6.2.1	Vid produktion av kyla	13
6.2.2	Vid produktion av värme	13
6.3	Flöden	14
6.3.1	Vid produktion av kyla	14
6.3.2	Vid produktion av värme	14
6.4	Exempel på driftdata	15
6.4.1	Helg	16
6.4.2	Produktion	16
7.	AKVIFÄREN SOM VÄRMELAGER	17
7.1	Temperaturnivåer	17

8.	MODELL AV AKVIFÄREN	20
8.1	Databeräkningar	20
8.2	Fysisk representation av akvifären	20
8.3	Värmeledning	21
8.4	Värmekapacitet	21
8.5	Temperaturer	22
8.6	Inlagring och urlagring av energi	22
9.	MODELLBERÄKNING	23
9.1	Kalibrering av modellen	23
9.2	5 års oförändrad drift	24
9.3	Åtgärder mot förhöjda grundvatten- temperaturer	25
9.4	Simulering av balanserad drift	26
9.5	Simulering av större uttag än laddning	27
9.6	Utvärdering av modellberäkningen	29
10.	UTVÄRDERING OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT DRIFT	30
10.1	Tidigare drift	30
10.2	Nuvarande drift	30
10.3	Nuvarande kylbehov	30
10.4	Möjliga åtgärder	30
10.4.1	Alt 1 Utöka värmebehovet	31
10.4.2	Alt 2 Kylning av grundvattnet	31
10.5	Förslag till fortsatt drift	32
10.5.1	Öka energiuttaget ur akvifären	32
10.5.2	Undersök den regionala grundvatten- strömmen	32
10.6	Förslag till fortsatt uppföljning av driften	32

FÖRORD

Driftuppföljningen av akvifärlagret har genomförts för att erhålla erfarenheter och kunskaper om akvifärens termodynamiska verkningsätt.

Huvudansvarig för projektet har varit VBB AB, där docent Hans Hydén har planerat och påbörjat uppföljningen. För projektledning och utformningen av textdelen har civ ing Lars Kronqvist svarat. Civ ing Lars Malmström och civ ing Bertil Sundlöf har medverkat vid utformning och installationer av mätutrustningen. Projektet har utförts i samarbete med Malmergs i Yngsjö AB, som även har svarat för projektering och utförande av värmepumpsanläggningen inklusive grundvattensystemet. Projektledare på Malmergs i Yngsjö har varit civ ing Rune Simonsson som även medverkat vid författandet av texten.

För insamling av driftdata har huvudmannen för anläggningen Ericsson Telecom AB, med ing Thomas Svensson och Jan Klang, varit engagerade.

Stockholm i december 1987

Lars Kronqvist

SAMMANFATTNING

Utnyttjande av akvifärer för säsongslagring av energi har i allt större utsträckning börjat tillämpas. Speciellt intressant är tekniken då både kylbehov - sommartid och uppvärmningsbehov - vintertid föreligger.

Denna driftuppföljning avser ett akvifärlager som varit i drift sedan 1984. Lagret ingår som en del i ett system där värmepumpar dels svarar för produktion av kyla för kylning av en tillverkningsprocess och dels svarar för uppvärmning av fabriksanläggningen. Grundvattensystemet balanserar säsongsvariationer i kylbehovet och uppvärmningsbehovet.

Uppföljningen har pågått under perioden våren 1986 till hösten 1987. Härvid har det konstaterats att det råder en obalans mellan tillförd energi till lagret och bortförd energi vilket resulterat i allt högre temperaturer i akvifären. För att säkerställa grundvattnets kylfunktion har en bortförsel av energi från lagret införts.

En simuleringsmodell har upprättats och kalibrerats mot uppmätta värden. Modellen har sedan utnyttjats för simulering av olika driftförhållanden.

Med utgångspunkt från resultat av simuleringen föreslås att driften av anläggningen ändras så att energiuttaget ur akvifären ökar betydligt.

Projektet har insamlat en mängd driftdata som föreslås ligga till grund för en ingående utvärdering av simuleringsmodellen för verifiering av de teoretiska sambanden och utvärdering av de ingående parametrarnas betydelse.

Simuleringsmodellen, som här har utnyttjats, kan komma att bli ett nyttigt hjälpmedel vid beräkning av termodynamiska förlopp i akvifärsystem.

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Ericsson Telecom AB i Kristianstad är ett företag inom Ericsson-koncernen som tillverkar formsprutade plastkomponenter mestadels till telefon- och dataindustrin i Sverige. Vid denna tillverkning krävs att man för bort stora värmeenergimängder från formverktyget. Detta sker med hjälp av ett system med cirkulerande kylvatten. Överskottsvärmen fördes tidigare bort med hjälp av en konventionell kylanläggning med kylmaskiner och kyltorn. Temperaturen på kylvattnet var ca 12°C.

Våren 1983 tog företaget kontakt med Malmbergs i Yngsjö AB för att diskutera en återvinning av värmeenergin i kylvattnet. Malmbergs arbetade fram ett förslag som gick ut på att man "kopplade ihop" kylvattensystemet och det konventionella värme-systemet med hjälp av värmepumpar. Detta innebar att värmepumparna arbetade med det befintliga kylvattensystemet som värmekälla och värmesystemet som mottagare av kondensorvärmen. För att överbrygga skillnader mellan kylvattenenergin och värmesystemets energibehov byggdes ett värmelager i grundvattnet bestående av 2 st grusfilterbrunnar. Överskottsenergi lagras i detta lager och användes som värmekälla för värmepumparna då produktionen ej är igång.

Anläggningen beställdes våren 1984 och utfördes på totalentreprenad av Malmbergs i Yngsjö AB. Entreprenaden var färdigställd i november 1984. Anläggningen beställdes på helt konventionella grunder och först efter 1 års drift blev den föremål för BFR:s intresse.

1.2 Projektbeskrivning

Det här redovisade forskningsprojektet har följt anläggningens drift, framför allt avseende grundvattendelen, och studerat akvifärens termodynamiska verkningssätt.

Inom projektet har mätningar utförts på grundvattensystemet. Flöden, temperaturer och energi har mätts på det cirkulerade grundvattnet. Dessutom har två observationsbrunnar utförts i anslutning till de båda uttagsbrunnarna vari temperaturen på olika nivåer i akvifären har uppmätts.

Data från driften har utnyttjats för kalibrering av en grundvattenmodell. Modellen har sedan utnyttjats för beräkning av konsekvenserna vid olika framtida driftförhållanden.

Projektet har genomförts i samarbete mellan VBB AB och Malmbergs i Yngsjö AB och med medverkan av personal vid Ericsson Telecom AB i Kristianstad.

1.3 Målsättning

Målsättningen med projektet har varit att studera värmelagret och grundvattendelens funktion och insamla driftdata för dessa. Driftdata skall sedan kunna utnyttjas som underlag för kalibrering av dimensioneringsmodeller för denna typ av akvifärlager.

Projektet skall även kunna ge underlag för framtida dimensionering av liknande värmelagringssystem.

För denna speciella anläggning skall även en utvärdering av den aktuella driftstrategin avseende grundvattensystemet genomföras och på grundval av utvärderingen ge förslag till åtgärder för att förbättra driftförhållandena.

2. SYSTEMUPPBYGGNAD

2.1 Systembeskrivning

Anläggningen har utförts enligt nedan redovisade systemschema, se figur 2.1, dvs med 2 st värmepumpar/kylmaskiner som dels har till uppgift att kyla processvattnet och dels att bidra till fastighetens uppvärmning. Som spets- och reserveffekt på värmesidan används en oljeeldad panna. För att överföra värme till/från lagret har det installerats 2 st värmeväxlare. Anläggningen styrs och övervakas av ett PC-system.

Man kan konstatera att anläggningen har två helt skilda driftsituationer nämligen;

- o under produktionstid
- o under icke produktionstid.

2.1.1 Produktionstid

Under denna tid, som normalt omfattar sön 2200 - fred 2200, pågår produktion i industrin vilket innebär att kylning av processvattnet krävs. Värmepumparna arbetar då för att hålla en konstant temperatur på utgående kylvattenflöde (11°C). Om motsvarande värmeeffekt blir för hög kyls överskottet bort i VVX1 med hjälp av grundvatten som pumpas upp från den "kalla brunnen" och efter nedkylningen av processvattnet infiltreras i den "varma brunnen". Om inte kyleffekten i VVX1 är tillräcklig så shuntas värmeväxlare 2 in som kyler bort överskottet på värmepumpens varma sida.

Om värmepumparnas motsvarande värmeeffekt är för låg kopplas oljepannan in och producerar erforderlig spetseffekt.

2.1.2 Icke produktionstid

Under denna tid, som normalt omfattar fred 2200 - sön 2200, pågår ej någon produktion vilket också innebär att det inte föreligger något kylbehov. Anläggningen arbetar då som en ren värmeproduktionsanläggning. Grundvatten pumpas upp från den "varma brunnen" som överför värme via VVX1 till en cirkulationskrets på värmepumparnas förångarsida. Anläggningen styrs i detta fall efter erforderlig värmeeffekt i värmesystemet.

2.2 Värmepumpar

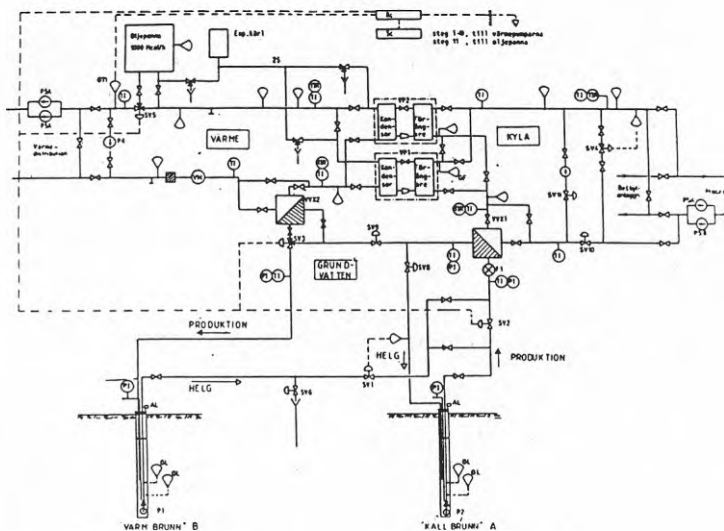
I anläggningen ingår 2 st värmepumpar/kylmaskiner med följande data.

Fabrikat	Carrier
Typ	30 HM 190-III
Köldmedium	R12
Köldbärartemp, ut	10°C
Värmebärartemp, ut	60°C
Kyleffekt	2x289 kW
Värmeeffekt	2x422 kW

Tillförd eleffekt 2x133 kW
 Max utgående värmebärartemp 70°C

2.3 Värmeväxlare

VVX1	Fabrikat	Alfa-Laval
	Typ	A10 BFM
	Överförd effekt	250 kW
	Kylvattentemp, in/ut	16/13°C
	Grundvattentemp, in/ut	9/15°C
VVX2	Fabrikat	Alfa-Laval
	Typ	A10 BFM
	Överförd effekt	400 kW
	Värmevattentemp, in/ut	38/28°C
	Grundvattentemp, in/ut	15/25°C



Figur 2.1 Systemschema värmepumpsanläggning

3. GRUNDVATTENDELEN

3.1 Systembeskrivning

Värmepumpen är via två värmeväxlare i förbindelse med ett system av cirkulerande grundvatten, se systemschema figur 2.1. Grundvattensystemet består av två brunnar med en pump och en returledning till respektive brunn. Ledningarna är sammankopplade till ett cirkulationssystem där möjligheter finns att cirkulera grundvatten från valfri brunn till värmeväxlarna.

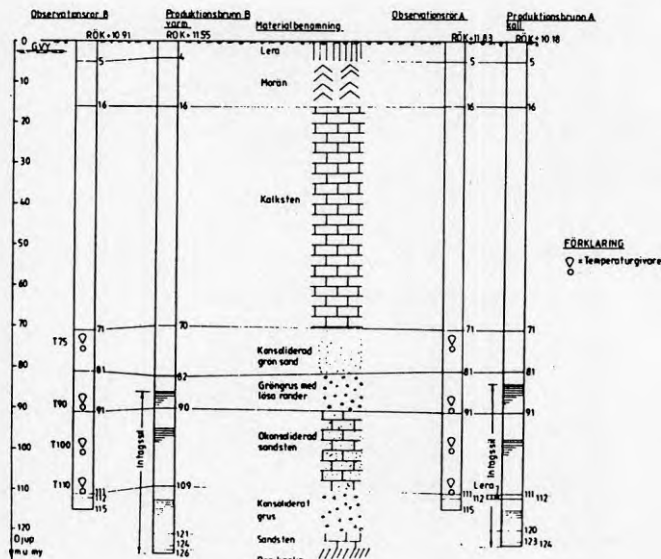
3.1.1 Driftfall - Grundvattencirkulation

Produktion: Vid produktion av kyla pumpas grundvatten från den kalla brunnen först till värmeväxlare 1 för kylning på kalla sidan. Vid behov går vattnet vidare till värmeväxlare 2 för kylning av värmepumpens varma sida för att därefter infiltreras i den varma brunnen.

Helg: Vid endast värmeproduktion tas vatten från den varma brunnen och leds till värmeväxlare 1 där den avger värme till värmepumpens kalla sida. Det avkylda vattnet återleds till den kalla brunnen.

3.1.2 Brunnar

De två brunnarna är nedförda genom kalkstenslager till underliggande vattenförande lager bestående av sandsten och glaukonit-sand, se figur 3.1.



Figur 3.1 Sektion genom akvifären med brunnar och observationsrör

Brunnarna är 126 respektive 124 m djupa med vardera 40 m kontinuerligt slitsade silrör med diamtern 140-168 mm. Brunnarna är utförda av rostfritt stål (SIS 2333). Brunnarna provpumpades under utbyggnaden med ca 20 l/s med en avsänkning av 12-14 m vilket indikerar en transmissivitet (ett mått på genomsläppligheten) av $2-3 \times 10^{-3}$ m /s.

Brunnarna är vardera utrustade med undervattenspump med nominell kapacitet av 10 l/s vid 50 m uppfodringshöjd.

Återföringsledningen mynnar under grundvattenytan. Det cirkulerande grundvattnet luftas således ej.

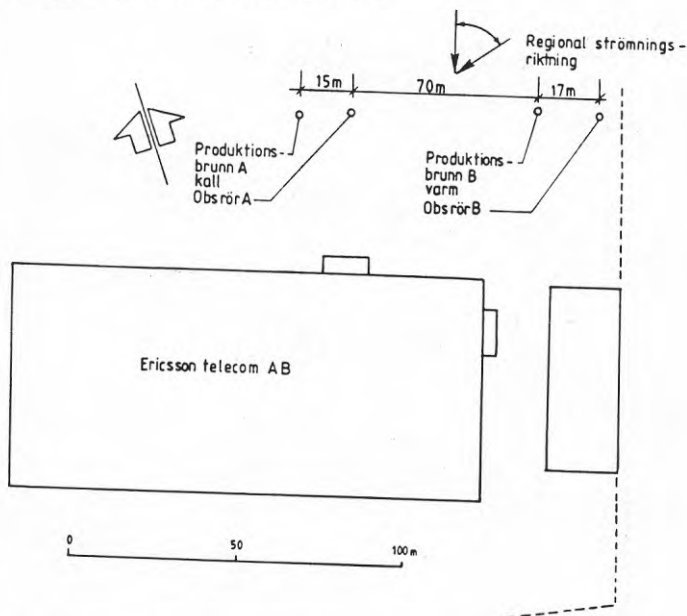
Brunnarna utnyttjas växelvis för infiltration och för uttag. Härigenom sker en viss rensumpning. Hittills under 2 års drift har inga problem med igensättning i brunner eller dylikt noterats.

Brunnarna ligger på ca 70 m avstånd från varandra.

Grundvattennivån ligger normalt kring nivån +7 m, dvs ca 4 m under markytan (Kristianstads höjdsystem).

För observation av temperaturen i akvifären har två observationsrör utförts i anslutning till respektive uttagsbrunn. Observationsrören har försetts med temperaturgivare på fyra olika nivåer.

I nedanstående figur 3.2, visas läget av observationsrören och produktionsbrunnarna. En regional grundvattenström, orsakad av uttag i centrala Kristianstad, med en ungefärlig riktning enligt figuren redovisas även.

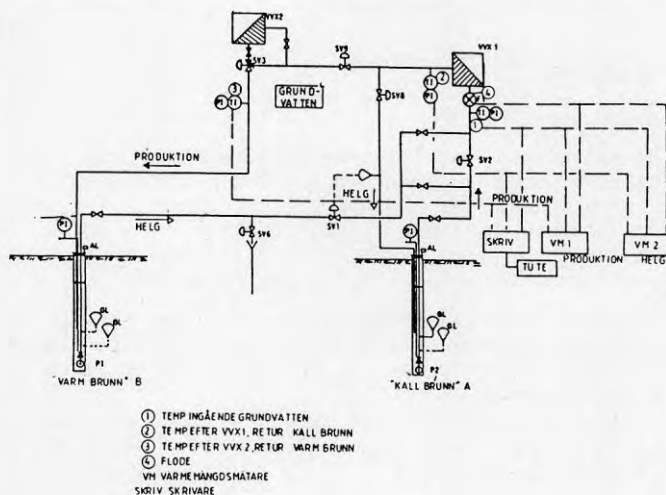


Figur 3.2 Brunnarnas planläge

4. MÄTNINGAR

4.1 Systembeskrivning

Mätningar har genomförts på det cirkulerande grundvattnet och i akvifären i två observationsbrunnar belägna i anslutning till de båda produktionsbrunnarna. Läget av mätpunkterna redovisas i systemschemat, se figur 4.1.



Figur 4.1 Systemschema - mätinstallationer

4.2 Temperaturmätningar

4.2.1 I akvifären

På 75, 90, 100 och 110 m nivå i två observationsbrunnar tillsammans åtta mätpunkter. Manuella mätningar 1 g/vecka.

4.2.2 I ledningssystemet

- o På tillloppsledningen från brunnarna A och B
- o På returledningen till brunn A
- o På returledningen till brunn B

Automatisk mätning redovisas på skrivare samt ingångsvärde till värmemängdsmätare, se nedan.

4.2.3 Lufttemperaturen

Automatisk mätning redovisad på skrivare.

4.3 Flödesmätningar

- o Uttagen grundvattenmängd från brunn A
- o Uttagen grundvattenmängd från brunn B

Automatisk mätning som ingångsvärde till värmemängdsmätare samt manuell registrering av samma värde 1 g/vecka.

- o Bortfört energiflöde

Mätning av bortfört energiflöde från **varm** brunn (brunn B), tillkommen efter ca 1 års drift.

4.4 Värmemängdsmätningar

- o Mätning av värmemängd som tillförs akvifären (VM1).
Genom en integrering av flödet från brunn A med skillnaden mellan temperaturen från brunn A och returtemperaturen till brunn B erhålls ett mått på till akvifären tillförd värmemängd (uttryckt i MWh).
- o Mätning av värmemängd som uttas ur akvifären (VM2).
Genom en integrering av flödet från brunn B med skillnaden mellan temperaturen från brunn B och returtemperaturen till brunn A erhålls ett mått på från akvifären uttagen värmemängd (uttryckt i MWh).

4.5 Övriga mätningar

Förutom de här redovisade mätningarna på grundvattendelen har anläggningen följts upp med veckorapporter där aktuella data angående värmepumpsanläggningens drift har antecknats.

4.6 Redovisning av mätningarna

Resultatet av mätningarna redovisas i diagramform.

Diagrammen redovisas i samband med respektive textavsnitt.

5. AKVIFÄREN

5.1 Geohydrologisk beskrivning

Den utnyttjade akvifären ingår i en större sammanhängande grundvattenförekomst i ett glaukonitsands lager som underlagrar Kristianstadslättens kritbergarter.

Tillförsel av grundvatten till akvifären sker dels genom infiltration i randområdena och dels genom läckage från ovanliggande kalkstenslager. Stora grundvattenuttag görs i ett antal brunnsområden i Kristianstad.

5.2 Beskrivning av aktuell lagerföljd

Den aktuella lagerföljden redovisas i figur 3.1. Lera och morän överlagrar ett mäktigt kalkstenslager. Grundvattenuttaget sker ur sandstens- och gruslager under kalkstenslagret.

Akvifären är stratifierad med god genomsläpplighet i horisontella skikt med grövre material växelvis med lägre genomsläpplighet i skikt med finare material. Skillnaderna i genomsläpplighet i horisontalld påverkar temperaturspridningen. Akvifären underlagras av kaolin, med låg genomsläpplighet, ovanför urberget av gnejs.

5.3 Regional grundvattenströmning

Den regionala grundvattenströmningen påverkas av stora grundvattenuttag framför allt för dricksvattenförsörjningsändamål. Inom Kristianstad finns tre brunnsområden. Grundvattenuttagen uppgår till ca 160 l/s fördelade på de tre brunnsområdena. Detta uttag skapar en regional grundvattenström mot uttagsplatserna i centrum, se figur 5.1.

I det aktuella området är den regionala strömningen riktad mot syd till sydväst medan energilagrets brunnar ligger längs en väst- östlig linje. Den regionala strömningen sker således troligen något snett mot systemets huvudaxel.

Uttagsbrunnarna är valda så att den brunn som troligen ligger något uppströms fungerar som varm brunn medan den som bedöms ligga nedströms fungerar som kall brunn. Detta är inte optimalt med hänsyn till den regionala grundvattenströmningen och med hänsyn till överskottet av energi i anläggningen.

Den regionala strömningens riktning dess storlek och dess betydelse för energilagret bör utredas närmare innan åtgärder vidtas i lagret.



Figur 5.1 Lagrets läge inom avsänkingsområdet för Kristianstads vattenförsörjning

6. DRIFTDATA

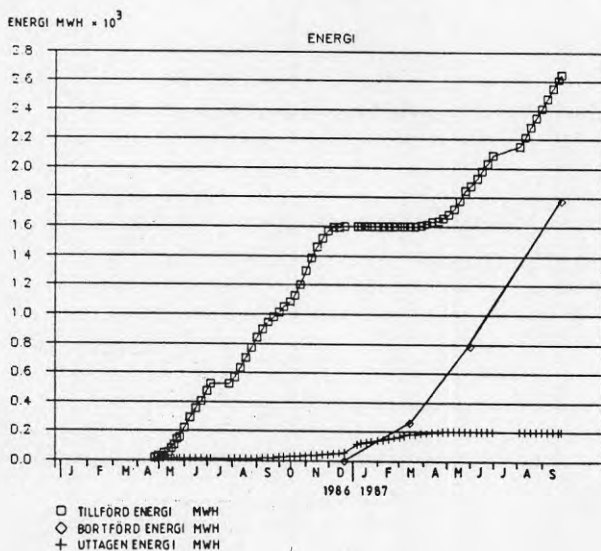
6.1 Energi

En utvärdering av energibalansen i akvifären kan utföras med hjälp av energimängdsmätningarna. Av dessa framgår att till akvifären tillförd energi under perioden april 1986 till september 1987 uppgår till 2 600 MWh. Under samma period bortfördes ca 200 MWh genom uttag till värmepumpen, dessutom bortleddes ca 1 800 MWh genom bortförsl av energi under 1987.

Tillförslen av energi till värmelagret överstiger uttaget med ett överskott på ca maximalt 500 MWh.

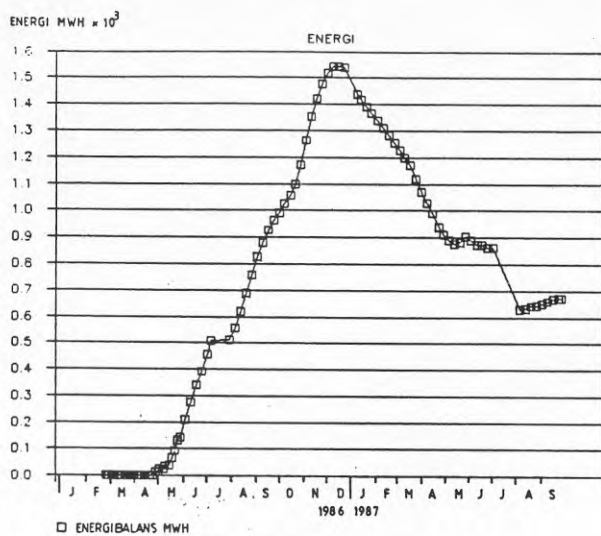
Bortförslen av energi under 1987 har reducerat överskottet betydligt. Noteras bör att lagret varit i drift under en längre period än mätningarna pågått.

Energiflöden och energibalansen redovisas i figur 6.1 och 6.2.

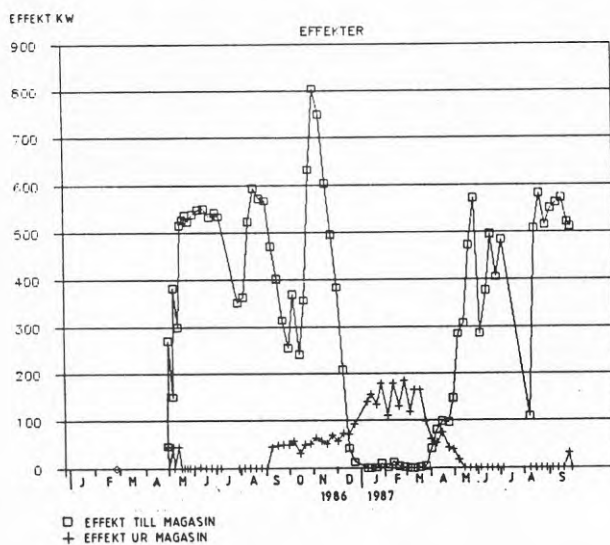


Figur 6.1 Uppmätta energiflöden

Energien har tillförts respektive bortförts från grundvattenssystemet med en medeleffekt vilken kan beräknas med hjälp av energimängdsmätningarna och kännedom om varaktigheten av produktionsdriften respektive helgdriften. I figur 6.3 redovisas de beräknade effekterna.



Figur 6.2 Beräknad energibalans i akvifären

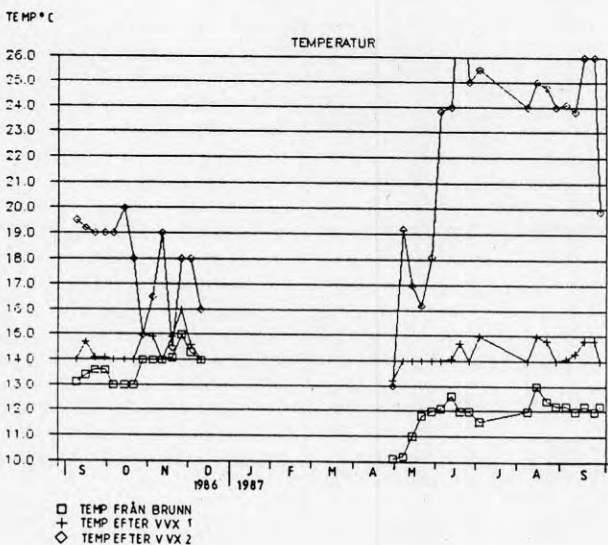


Figur 6.3 Beräknade medeleffekter vid tillförsel respektive uttag ur magasinet

6.2 Temperaturnivåer

6.2.1 Vid produktion av kyla

I figur 6.4, redovisas uppmätta temperaturer i grundvattenssystemet vid produktion av kyla. Mätningarna är utförda manuellt 1 g/vecka. En kontrollberäkning av tillförd energi och aktuella flöden visar att temperaturen i flödet till akvifären (efter värmeväxlare 2) under första delen av mätningarna (hösten 1986) skall vara betydligt högre. En temperaturökning av 8-16°C bedöms vara mer relevant. Den manuella mätningen har under tiden troligen skett vid en tidpunkt som ej varit representativ för driften under en veckoperiod.



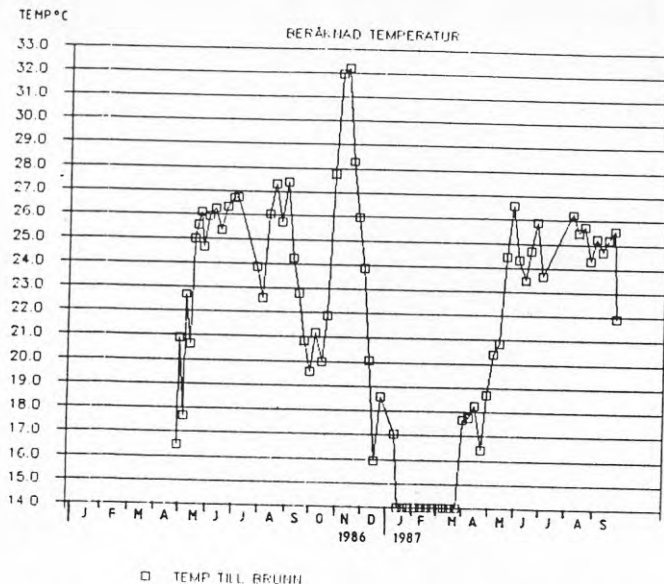
Figur 6.4 Uppmätta temperaturer i grundvattenssystemet

I figur 6.5, redovisas beräknade temperaturnivåer på utgående vatten vid produktion av kyla (med ett antagande av ingående vattentemperatur av 14°C). Av detta diagram framgår att utgående vatten har en temperatur kring 20-27°C, dvs en temperaturhöjning av 6-13°C.

Under produktionen av kyla under 1987 sänktes ingående temperatur från kalla brunnen till ca 12°C som en funktion av bortför-seln av energi.

6.2.2 Vid produktion av värme

Ingående temperaturnivå varierar mellan 16 och 24°C. Med aktuella energiuttag och uttagsflöden erhålls en temperatursänkning av 4-10°C, dvs flödet till kalla brunnen är nedkyllt till ca 10-16°C.



Figur 6.5 Beräknade temperaturer i tillflödet till akvifären

6.3 Flöden

6.3.1 Vid produktion av kyla

Uttagsflödet vid produktion av kyla är i genomsnitt 10-12 l/s.

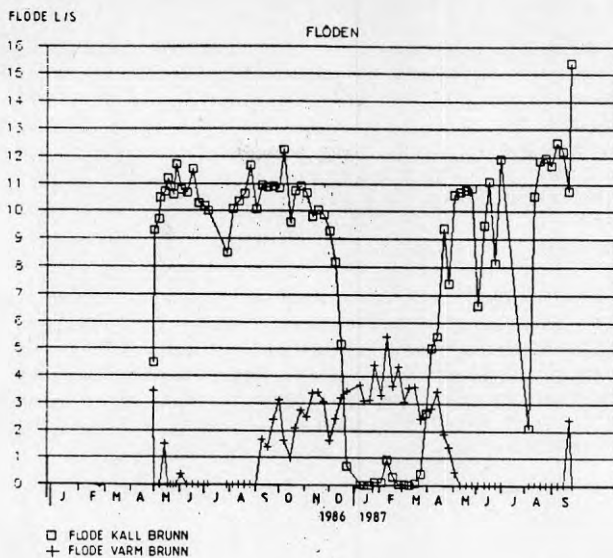
Under en 1-årsperiod uttogs en mängd motsvarande ett genomsnittligt grundvattenuttag ur kalla brunnen av 4,4 l/s.

6.3.2 Vid produktion av värme

Uttagsflödet vid produktion av värme varierar mellan 1 och 5 l/s.

Ur varma brunnen uttogs under 1 år i genomsnitt 0,7 l/s.

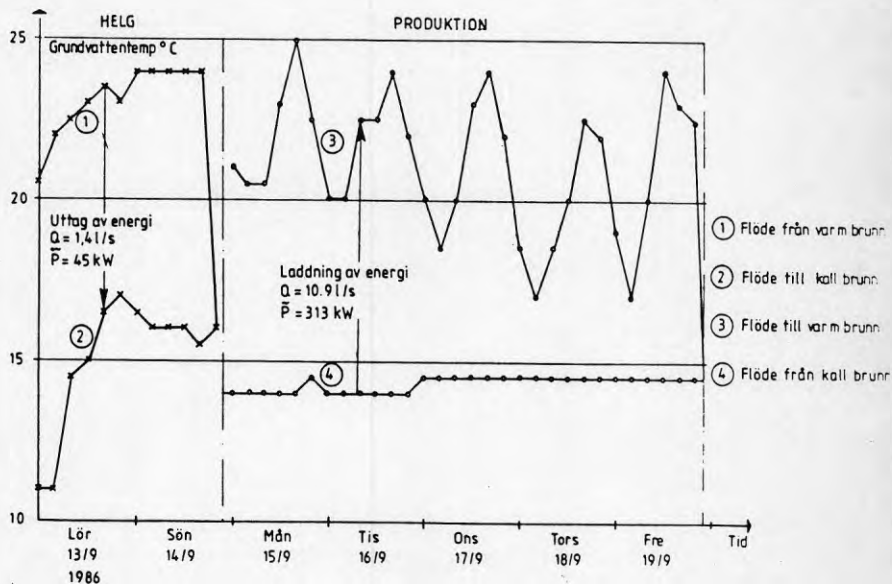
Ett diagram redovisande momentana flöden vid produktion av kyla respektive produktion av värme redovisas i figur 6.6.



Figur 6.6 Momentana uttagsflöden vid produktion av kyla och värme

6.4 Exempel på driftdata

För att belysa driftförhållandena under en vecka med både produktion av kyla under driften av fabriken i 3-skift söndag kl 2200 till fredag kl 2200 samt produktion av värme under helgen redovisas aktuella data från 1986-09-12--09-20, se figur 6.7.



Figur 6.7 Temperatur i flödet från brunnarna under en vecka

6.4.1 Helg

Sammanlagd värmemängd uttagen från akvifären, 2,16 MWh, vilket under 48 timmar ger en genomsnittseffekt av 45 KW. Uttagsflödet från den varma brunnen håller en temperatur kring 22-24°C, uttaget uppgår till 1,4 l/s. Returflödet till den kalla brunnen erhåller en temperatur kring 14-16°C. Temperatursänkningen av ca 8°C stämmer väl med uttagen energi och flöde vilket ger en beräknad temperatursänkning av 7,6°C.

6.4.2 Produktion

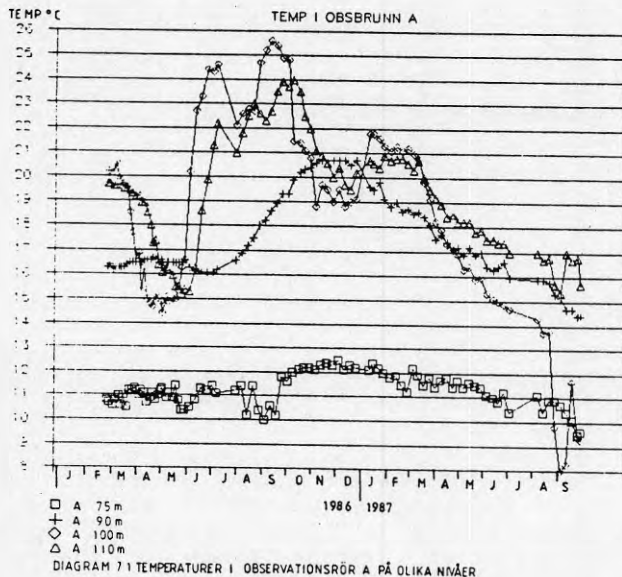
Sammanlagd värmemängd tillförd akvifären 37,60 MWh under 120 timmar medför en genomsnittseffekt av 313 KW. Uttagsflödet från den kalla brunnen håller en konstant temperatur kring 14,5°C. Uttaget uppgår till 10,9 l/s. Returtemperaturen till den varma brunnen varierar mellan +17 och +25°C med ett medelvärde av +21,5°C. Temperaturhöjningen är således ca 7°C i medeltal vilket överensstämmer med den beräknade höjningen, 6,8°C.

7. AKVIFÄREN SOM VÄRMELAGER

7.1 Temperaturnivåer

Temperaturmätningarna i observationsrören visar hur akvifären reagerar under driften av anläggningen.

Observationsrörens läge i förhållande till den **varma** och den **kalla** brunnen är inte symmetriskt. Observationsrör A står mellan de båda brunnarna medan observationsrör B står utanför den varma brunnen. Temperaturmätningarna i respektive rör redovisas på figur 7.1 och 7.2.



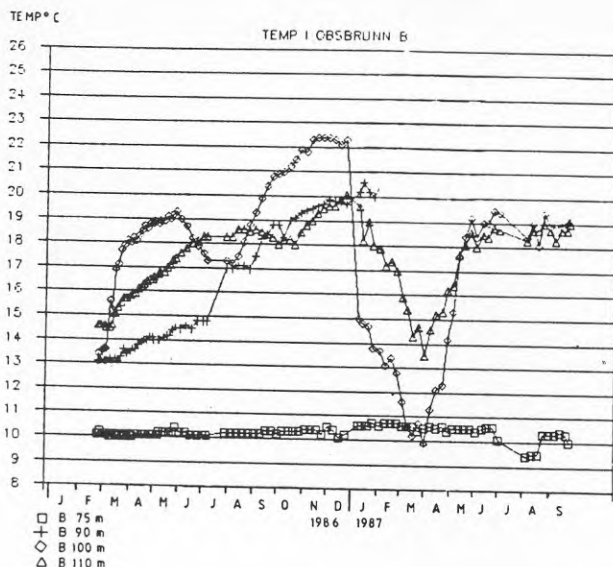
Figur 7.1 Temperaturer i observationsrör A på olika nivåer

Observationsrör A uppvisar relativt stabil temperatur, 11-12°C, på 75 m djup. Detta är ovanför brunnarnas silnivå i en konsoliderad grönsand. På samma nivå i observationsrör B är temperaturen även konstant och något lägre, 10-10,5°C.

Den stabila temperaturnivån tolkas som att grundvattenströmningen i detta skikt ej är så omfattande. Förhöjningen i temperaturen, i förhållande till ursprunglig nivå kring +10°C, kan huvudsakligen hänföras till vertikal värmspridning från underliggande lager.

På övriga nivåer i rören avspeglar temperaturerna förändringar i uttag och inlagring till akvifären.

På 90 m djup sker reaktionen på inlagring till akvifären med en fördröjning på ca 4 månader i rör A och ca 2 månader i rör B, vilket kan bero på att grundvattenflödet i detta skikt är mindre än i de skikt där reaktionerna är mer direkta. Amplituden på temperatursvängningarna är 5°C.



Figur 7.2 Temperaturer i observationsrör B på olika nivåer

Temperaturerna på djupet 100 m och 110 m i rör A följer lagringscykeln med 1-2 månaders fördröjning. Temperaturnivån varierar betydligt med en lägsta nivå på $+14,5^{\circ}\text{C}$ och en högsta nivå på $+25,5^{\circ}\text{C}$ på djupet 100 m respektive $+15,0^{\circ}\text{C}$ till $+24,0^{\circ}\text{C}$ på djupet 110 m. Den snabba reaktionen och de höga temperatursvängningarna tyder på en effektiv värmetransport genom grundvattenströmmen på 100 och 110 m djup. Noteras bör att temperaturen i grundvattenuttaget i den intilliggande kalla brunnen ligger konstant kring $+12$ till $+15^{\circ}\text{C}$, dvs genomgående lägre än temperaturen i observationsrör A vid de nivåer där strömningen huvudsakligen sker.

I rör B är temperaturstegringen vid inlagring av energi till akvifären fördröjd och nivån utjämnad. På 100 m djup stiger temperaturen till maximalt $+22^{\circ}\text{C}$ medan temperaturen på 110 m djup stiger till maximalt 20°C .

Vid bortledning av energi i kombination med ökat värmebehov och minskad kylning i december 1986 sker en snabb sänkning av temperaturerna på 100 respektive 110 m djup (temperaturmätningen på 90 m nivå i rör B ger ej relevant temperatur efter december 1986). Efter 3 månader med endast uttag av energi är temperaturen på 100 m djup 10°C och på 110 m djup $13,5^{\circ}\text{C}$.

Den relativt snabba återgången till normal grundvattentemperatur speciellt på 100 m djup i rör B kan ge indikationer på att värmefronten inte sträcker sig speciellt långt utanför den varma brunnen. Den regionala grundvattenströmmen kan vara en tänkbar förklaring till den ringa utbredningen av värmeströmningen åt uppströmshållet.

Vid återgång till laddning under våren 1987 under samtidig bortförsel av energi stabiliseras temperaturnivåerna i observationsrören på en lägre nivå än under säsongen 1986. Uttagstemperaturen i den kalla brunnen har även sänkts ca 2°C från ca 14°C till ca 12°C.

8. MODELL AV AKVIFÄREN

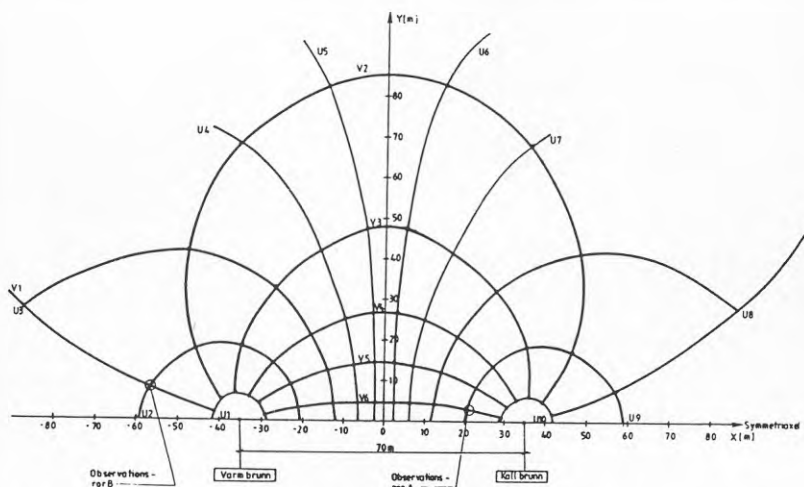
8.1 Databeräkningar

Värmelagrets funktion har simulerats i en datamodell. Modellen och programmet är framtaget på Lunds universitet av markvärme-gruppen och finns beskriven i, "Model of Aquifer Storage System Manual for computer code", Hellström, Bennet, Claesson, 1982.

Modellen är modifierad och anpassad till att gälla två brunns-system (Doublet Well Version). Beräkningarna har utförts med en PC-AT.

8.2 Fysisk representation av akvifären

Akvifären indelas i X- och Y-led i ett konformt koordinatsystem $v = V(X, Y)$, $u = U(X, Y)$ med 10×6 beräkningpunkter. Akvifären antas vara homogen i X- och Y-led utan några hydrauliska gränser, se figur 8.1.

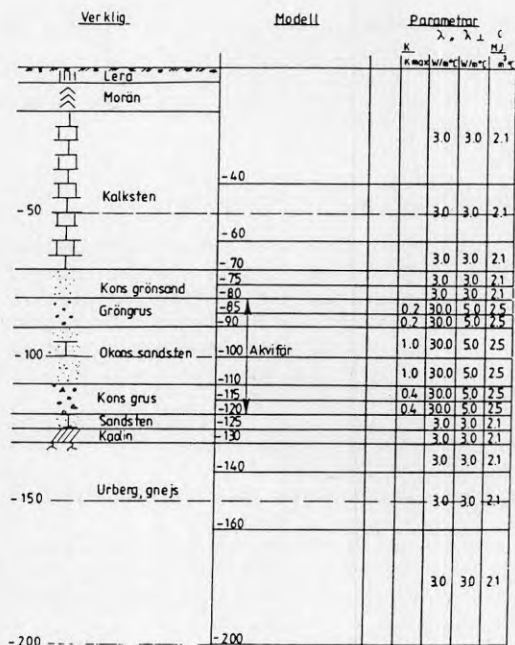


Figur 8.1 Modell av akvifären i plan

I Z-led indelas akvifären i 16 lager, se figur 8.2. De fem översta lagren representerar de täckande morän och kalkstenslagren. Ingen grundvattenströmning beräknas ske i dessa skikt.

Akvifären representeras av sex lager med varierande relativ permeabilitet. Permeabiliteten har valts så att den högpermeabla zonen kring djupet 100-110 m har erhållit en relativ permeabilitet av 1,0 medan randzonerna ovanför och under har erhållit lägre relativa permeabiliteter.

Akvifären underlagras av fem lager, där liksom i de överliggande lagren grundvattenströmning ej beräknas ske.



Figur 8.2 Modell av akvifären i profil

8.3 Värmeledning

För varje lager anges en horisontell och en vertikal värmeledningsförmåga. I de lager där ingen strömning sker har dessa antagits till $3,0 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$ i både horisontell och vertikalled.

För akvifären representerar värmeledningsförmågan dels en diffusiv värmeledning och dels en dispersiv värmeledning. Den senare uppkommer på grund av inhomogen strömning.

I horisontalled har värmeledningsförmågan antagits till $30,0 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$. I vertikalled har den antagits till $5,0 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$.

8.4 Värmekapacitet

Den volymetriska värmekapaciteten är sammanvägd dels av materialets värmekapacitet och dels av vattnets värmekapacitet. Porositeten, dvs vattnets totala volym i blandningen av vatten och fast material avgör sammanvägningsfaktorn.

För överliggande och underliggande lager har värmekapaciteten antagits till $2,1 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$. För akvifären har värmekapaciteten antagits till $2,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

8.5 Temperaturer

I akvifären påläggs en utgångstemperatur med $+9,0^\circ\text{C}$ i ytan och en vertikalgradient med $+1^\circ\text{C}$ per 100 m.

Lufttemperaturens årstidsväxlingar simuleras med en medeltemperatur av 8°C och en amplitud av 5°C .

8.6 Inlagring och urlagring av energi

Inlagring och uttag av energi simuleras genom att ange temperaturen på det tillförda flödet samt flödets storlek. Modellen förutsätter att samma mängd vatten cirkulerar i akvifären. Temperaturen på det uppumpade vattnet beräknas i programmet. Inlagrad respektive uttagen effekt erhålls genom att beräkna $T = T_{\text{ut}} - T_{\text{in}}$ och multiplicera detta med flödet och vattnets värmekapacitet ($P = Q \cdot T \cdot C_w$).

Det totala energiflödet erhålls i programmet.

Inlagring och uttag av energi kan ske med valfria tidsperioder.

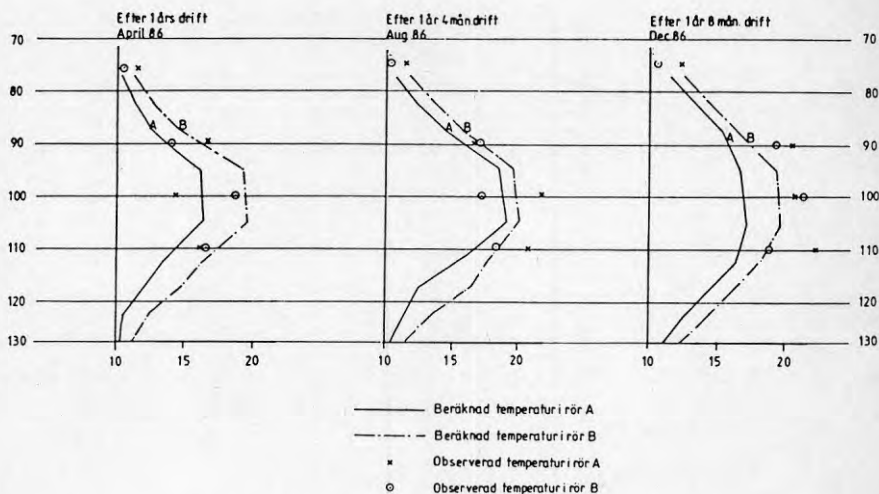
Genom att inlagrings- och uttagseffekterna ej kan beräknas på förhand måste inmatade temperaturer anpassas till erhållna temperaturen iterativt för att en riktig energibalans skall kunna erhållas.

9. MODELLBERÄKNING

9.1 Kalibrering av modellen

Modellen har kalibrerats mot verkliga driftförhållanden.

De parametrar som har varierats är framför allt relativa permeabiliteten i de olika lagren i akvifären. Härvid har den temperaturprofil som uppmätts i observationsrören kunnat efterliknas med någorlunda överensstämmelse, se figur 9.1.

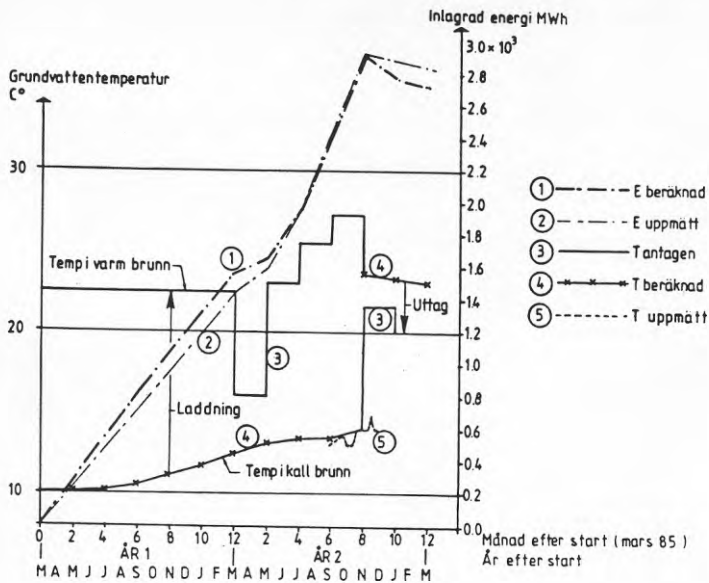


Figur 9.1 Jämförelse mellan beräknade och uppmätta temperaturer

Energiflödet till och från akvifären har också kalibrerats fram genom att anta laddnings- och uttagstemperaturer som tillsammans med framräknade temperaturer på flödet till och från akvifären ger beräknat energiflöde.

För akvifären, som varit i drift sedan hösten 1984, med huvudsaklig laddningsperiod från april 1985, har energiflödet beräknats för 2 års drift med relativt god överensstämmelse, se figur 9.2.

En exakt kalibrering av modellen mot verkligheten har ej eftersträvat i detta projekt. Målsättningen har i stället varit att undersöka användbarheten av denna typ av modeller. Överensstämmelsen mellan modell och verklighet är så god att modellen bedöms kunna utnyttjas för en beräkning av framtida temperaturnivåer.



Figur 9.2 Kalibrering av modell

9.2 5 års oförändrad drift

En beräkning av driften av lagret, baserad på det första årets energiflöden, har genomförts för en oförändrad drift under en 5-årsperiod.

Följande energiflöden avses simuleras.

Laddningsperiod: April-November, 8 mån/år

Flöde: 6,3 l/s

Medeleffekt: 220 KW (även kylning på varma sidan)

T_{ut} År 1, 13°C, årlig ökning med 0,8°C antas

T_{in} År 1, 21,3°C, årlig ökning med 0,8°C

Uttagsperiod: December-Mars, 4 mån/år

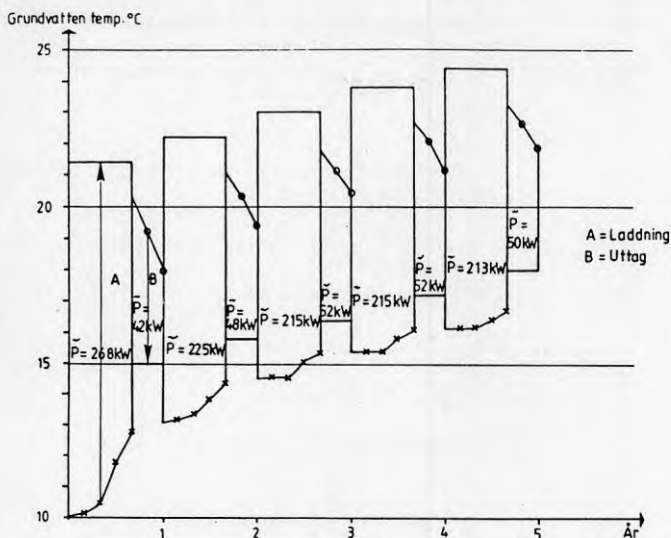
Flöde: 2,8 l/s

Medeleffekt: 50 KW

T_{ut} År 1, 19,2°C, antag 0,8°C ökning årligen

T_{in} År 1, 15,9°C, årlig ökning med 0,8°C

Resultatet av simuleringen redovisas i följande figur 9.3.



Figur 9.3 Grundvattentemperaturer under 5-års oförändrad drift

Av diagrammet framgår att kylvattnet erhåller en allt högre temperatur vid samma kyleffekt.

I verkligheten accentueras denna ökning eftersom kylningen av processen på den kalla sidan är beroende av temperaturer under 15°C . Vid ökande kylvattentemperaturer måste en allt större del av kylningen ske på värmepumpens varma sida, vilket innebär att värmepumpens eltillskott även måste kylas bort. Effektbehovet ökar alltså med $1/3$ vid kylning över 15°C .

9.3 Åtgärder mot förhöjda grundvattentemperaturer

Den simulerade temperaturstegringen har även skett i verkligheten. Åtgärder mot förhöjda grundvattentemperaturer har fått vidtas efter drygt 2 års drift. Den åtgärd som vidtagits är bortförsel av energi från varma brunnen. Härvid erhålls en återgång i akvifären till lägre temperaturer. Akvifärens funktion som värmelager utnyttjas ej. Den pågående bortförseln av energi bedöms ej vara en lämplig långsiktig lösning.

En mer långsiktig lösning för att undvika ökande temperaturnivåer i akvifären är att skapa ökad balans mellan inmatad energi och uttagen energi. Enklast sker detta genom att öka energiuttaget ur akvifären vintertid.

9.4 Simulering av balanserad drift

Målsättningen bör vara att skapa balans mellan laddning av energi under sommarhalvåret och uttag av energi under vinterhalvåret. I detta speciella fall bör en så låg grundvattentemperatur som möjligt eftersträvas för att erhålla möjlighet att kyla processen på den kalla sidan.

En beräkning av erhållna temperaturnivåer vid balanserade uttags- och laddningsförhållande redovisas nedan.

Förutsättningarna vid en balanserad drift antas vara följande.

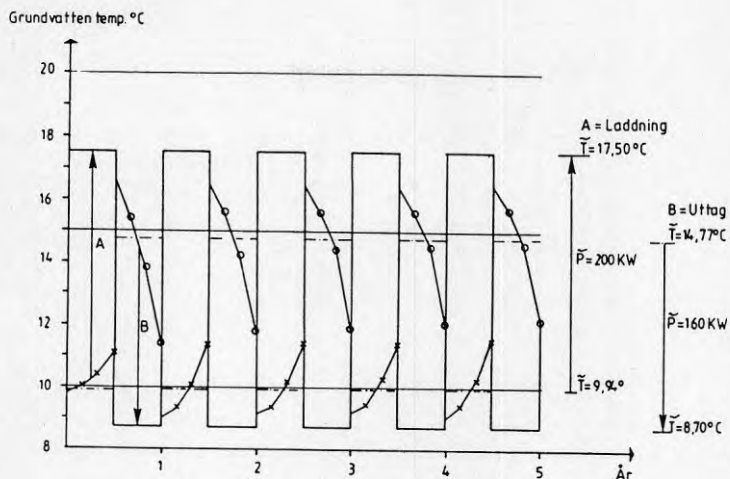
Laddningsperiod:	April-September, 6 mån/år
Flöde:	6,3 l/s
Medeleffekt:	180 KW (200 KW beräknad)
T_{ut}	10,7°C antagen (9,4°C beräknad)
T_{in}	17,5°C
Uttagsperiod:	Oktober-Mars, 6 mån/år
Flöde:	6,3 l/s
Medeleffekt:	180 KW (160 KW beräknad)
T_{ut}	15,5°C antagen (14,8°C beräknad)
T_{in}	8,7°

Resultatet av simuleringen redovisas i följande figur 9.4.

I detta fall beräknades laddningseffekten under halva året till ca 200 KW medan uttagseffekten uppgick till 160 KW.

Trots att systemet inte är helt i balans råder nära nog stationära temperaturförhållanden. En obetydlig temperaturökning år från år sker dock. Den säsongsmässiga variationen i temperatur uppgår till ca 2,5°C på den kalla sidan och ca 4,5°C på den varma sidan.

Av simuleringen framgår att systemet inte är helt beroende av att laddning och uttag blir exakt lika stora för att stabila förhållanden skall erhållas.



Figur 9.4 Grundvattentemperaturer under 5-års balanserad drift

9.5 Simulering av större uttag än laddning

För att undersöka vilka temperatureffekter ett överuttag av energi ur akvifären skulle innebära har en simulering utförts med följande ingångsvärden.

Laddningsperiod: Maj-September, 5 mån/år

Flöde: 10 l/s

Medeleffekt: 200 KW

T_{ut} 7°C ($7,10^{\circ}\text{C}$ beräknad)

T_{in} 12°

Uttagsperiod: Oktober-April, 7 mån/år

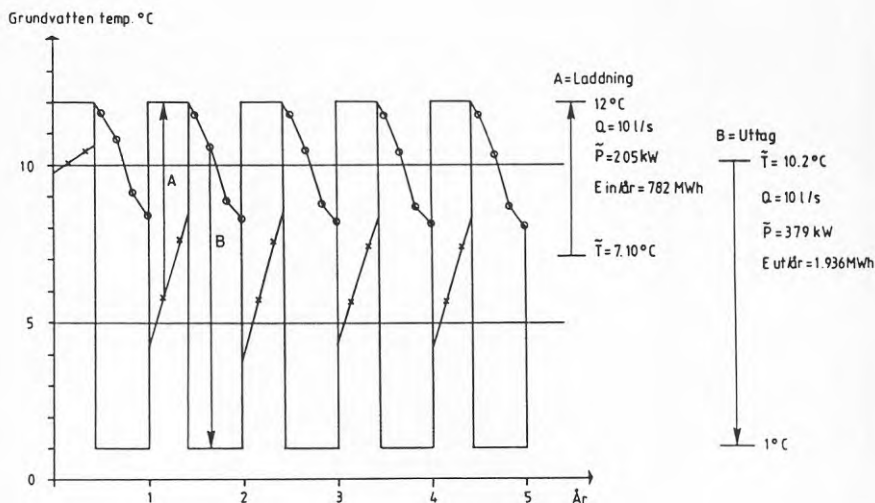
Flöde: 10 l/s

Medeleffekt: 380 KW

T_{ut} $1,0^{\circ}\text{C}$

T_{in} $10,0^{\circ}\text{C}$ ($10,02^{\circ}\text{C}$ beräknad)

Resultatet av simuleringen redovisas i figur 9.5.



Figur 9.5 Grundvattentemperaturer under 5-års drift med större uttag än laddning

Av simuleringen framgår att det årliga energiuttaget ur akvifären beräknas uppgå till ca 2000 MWh medan laddningsenergin uppgår till ca 800 MWh, dvs ett överuttag 1 200 MWh sker ur akvifären.

Relativt stabila förhållanden råder år från år. Inom varje årscykel varierar temperaturen ca 4°C i flödet från den kalla ($4\text{--}8^{\circ}\text{C}$) och den varma ($12\text{--}8^{\circ}\text{C}$) brunnen.

Överuttaget av energi ur akvifären sänker temperaturen i flödet från den kalla brunnen så mycket att en kylning av processen med hjälp av enbart grundvatten bedöms vara möjlig under sommarperioden.

Simuleringen visar även att akvifären kan utnyttjas som värmekälla med ett effektuttag av minst 380 KW. En viss utplanning av temperatursänkningen noteras i slutet av varje uttagsperiod. Temperatursänkningen, i förhållande till opåverkade förhållanden, är knappt 2°C varför betydligt större effektuttag bedöms kunna ske.

Med det befintliga värmepumpssystemet är kyleffekten (uttagseffekten) begränsad till ca 580 KW varav kylningen av processen kräver ca 300 KW varför tillgänglig kyleffekt är begränsad till ca 280 KW.

Det regionala grundvattenflödet innebär i detta driftfallet en höjning av temperaturerna i förhållande till den här redovisade simuleringen.

9.6 Utvärdering av modellberäkningen

Den presenterade modellen av akvifären har visats vara användbar vid utvärderingen av akvifärens funktion.

Modellen bör ses som ett hjälpmedel till en bedömning av förloppen i akvifären. För att få modellen att helt efterlikna naturliga förhållanden krävs ett omfattande kalibreringsarbete med god kännedom om de yttre förutsättningarna genom mätningar i systemet.

I detta fall har inget omfattande arbetet lagts ner vid kalibreringen av modellen, bl a har den regionala grundvattenströmningen ej kunnat medtas, men trots detta bedöms modellen ge en relativt god bild av förhållandena i akvifären.

Med modellen kalibrerad kan sedan olika driftförhållanden simuleras för att erhålla konsekvenserna i akvifären under en längre tids drift.

Vid simuleringen framgår att den ursprungliga driften med betydligt större laddning än uttag av energi relativt snart leder till oönskade temperaturhöjningar i lagret. Situationen blir instabil vilket även driften av anläggningen har visat.

Den nuvarande driften av anläggningen med bortförsl av energi för att sänka akvifärens temperatur har inte simulerats eftersom akvifärens roll i ett sådant system är obetydlig.

Ett förslag till en mer balanserad drift med någorlunda balans mellan uttag och laddning av energi har simulerats. Simuleringen visar att trots att balans ej helt råder uppnås nära nog stabila förhållanden mellan de olika säsongerna. Inom en säsong varierar temperaturerna 2,5-4,5°C.

En beräkning av ett driftfall där energiuuttaget är betydligt större än laddningen visar att temperaturerna i akvifären kan sänkas så att en kylning av processen med hjälp av enbart grundvatten kan åstadkommas under sommarperioden. Dessutom visar beräkningen att akvifären medger ett effektuttag som överstiger 380 KW under vinterperioden.

Effekten av den naturliga grundvattenströmningen i akvifären har inte simulerats. Detta innebär att de beräknade förhållandena är konservativa, dvs temperaturnivåerna kommer i verkligheten att ligga närmare akvifärens naturliga temperatur.

10. UTVÄRDERING OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT DRIFT

10.1 Tidigare drift

Driften från hösten 1984 fram till årsskiftet 1986-1987 innebar en årlig nettoinlagring till akvifären av ca 1 400 MWh med successivt förhöjda grundvattentemperaturer som följd. Härvid omöjliggjordes nästan all kylning med grundvatten av processen på den kalla sidan före värmepumpen. Härigenom ökade kylbehovet, samtidigt som elförbrukningen vid driften av värmepumparna ökade.

10.2 Nuvarande drift

Driftförhållandena efter årsskiftet 1986-1987 ändrades genom att energi från den varma brunnen bortleds. Härigenom bedöms ett nettouttag av energi från en tidigare förhöjd nivå ha skett ur akvifären under den studerade perioden fram till september 1987.

Lägre grundvattentemperaturer och en ökad kylning på den kalla sidan av processen har åstadkommit. Bortförseln av energi bedöms dock ej vara en långsiktig lösning.

10.3 Nuvarande kylbehov

Under perioden har kylbehovet i grundvattensystemet legat kring 400-500 KW under produktionen med kylning på varma sidan. Denna effekt motsvarar ett kylbehov i produktionen av ca 325 KW vid kylning enbart på kalla sidan. För att möjliggöra denna kyleffekt med grundvatten på kalla sidan (upp till +15°C) erfordras en grundvattentemperatur av ca +7°C vid det aktuella grundvattenflödet.

Omgivande akvifär har en temperatur kring 10°C. För att åstadkomma grundvattentemperaturer under omgivande akvifärens temperatur erfordras ett större energiuttag än energiladdning.

Ett ökat energiuttag ur akvifären är en förutsättning för att säkerställa lagrets funktion vid kylning av processen.

En ökning av cirkulationsflödet bedöms ej vara en lämplig metod att öka kyleffekten på grundvattnet. Redan vid det beräknade grundvattenflödet av i genomsnitt 6,3 l/s erhålls en beräknad temperaturstegring av 2-4°C under en halvårsperiod.

10.4 Möjliga åtgärder

Så länge kylbehovet är övervägande i anläggningen bör åtgärder vidtas för att minska värmebelastningen på akvifären och helst balansera överskottet av inlagrad energi sommartid med ett motsvarande eller större uttag av energi vintertid.

10.4.1 Alt 1 Utöka värmebehovet

En möjlighet är att öka värmebehovet i anläggningen t ex genom att ansluta fler fastigheter med uppvärmningsbehov till systemet. Härigenom kan befintliga värmepumpar utnyttjas till full effekt under en längre tid.

Den installerade värmepumpseffekten ger en möjlig värmeproduktionskapacitet av ca 850 KW med motsvarande kyleffekt av ca 600 KW. Överkapacitet för värmeproduktion med den befintliga värmepumpsanläggningen bedöms finnas under ca 90 % av tiden.

Om värmepumpen tillåts gå som baslast bedöms ett effektbehov av maximalt 3-4 000 KW vara lämpligt att ansluta. Fabrikens maximala effektbehov har bedömts uppgå till 900 KW.

Förutom den energivinst som de förbättrade driftförhållandena i akvifären skulle medföra kan överskottet av energi och eventuellt en del naturligt tillförd energi till akvifären tillgodogöras.

Med befintlig värmepumpsinstallation skulle ca 4 000 MWh värme kunna produceras jämfört med nuvarande produktion av ca 2 000 MWh.

Detta alternativ är att föredra förutsatt att värmen kan tillgodogöras.

En alternativ möjlighet till att utnyttja den befintliga värmepumpen är att cirkulera grundvattnet till andra värmepumpsanläggningar.

10.4.2 Alt 2 Kylning av grundvattnet

Kylningen av grundvattnet kan även åstadkommas genom luftkylning i en värmeväxlare. En värmeväxlare ger mest effekt då temperaturskillnaden mellan den varma och den kalla sidan är störst. Värmeväxlaren skulle i första hand installeras på utgående grundvatten till akvifären där grundvattentemperaturen tidvis kan uppgå till +25°C.

Installation av värmeväxlare på ingående grundvatten förutsätter låga lufttemperaturer för att möjliggöra kyleffekt. Eftersom anläggningen ej kyls med grundvatten under de kallaste månaderna är det tveksamt om en kylning av ingående grundvatten med en temperatur kring 10-14°C är möjlig under en så lång tid att en installation på kalla sidan blir lönsam.

För att erhålla en balans i systemet erfordras en kylning av ca 1 400 MWh årligen. Vid en kylning under 6 månader erfordras en kyleffekt av ca 300 KW i genomsnitt.

10.5 Förslag till fortsatt drift

10.5.1 Öka energiuttaget ur akvifären

Detta kan ske enligt alternativ 1 eller alternativ 2 ovan.

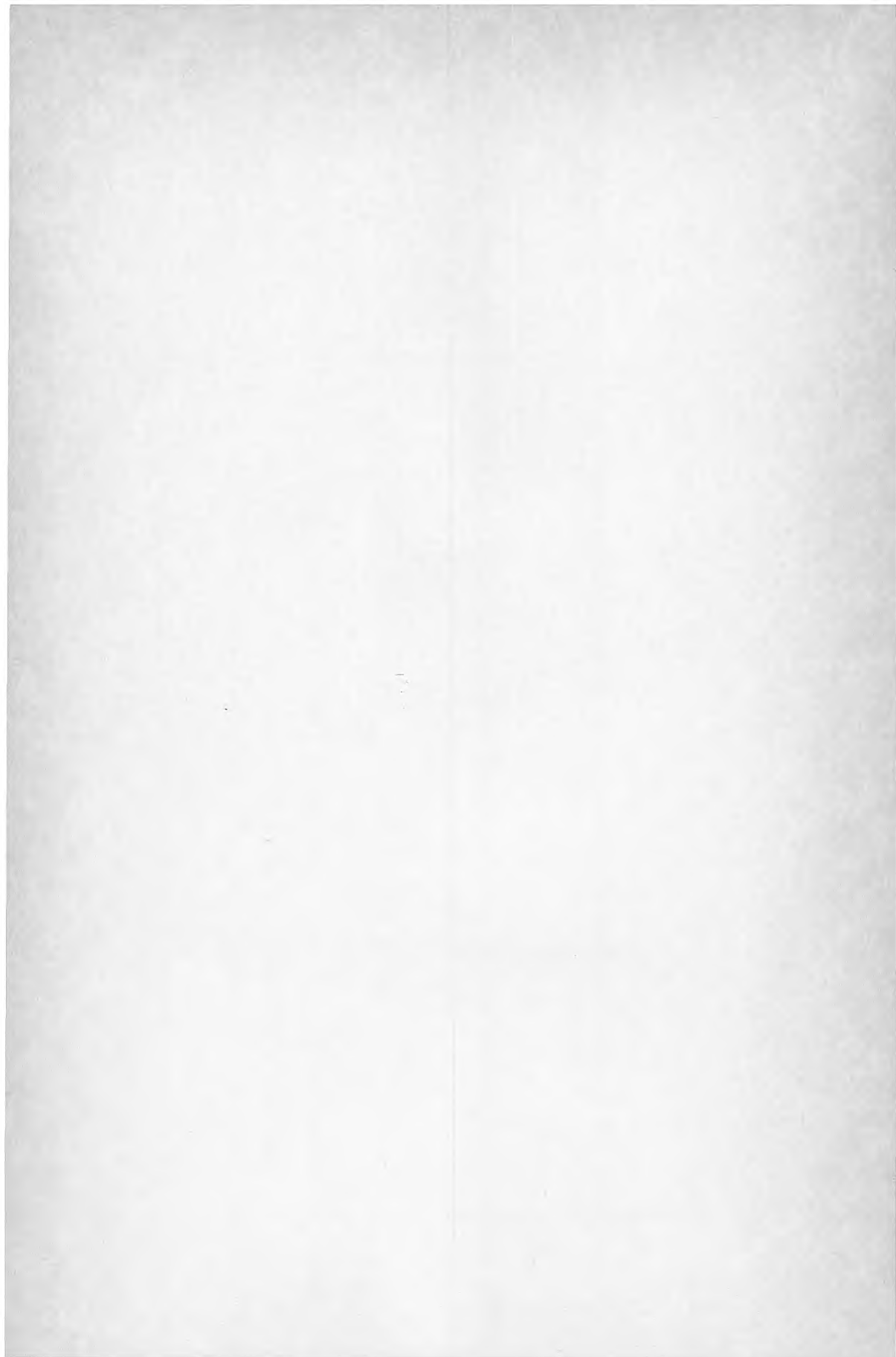
10.5.2 Undersök den regionala grundvattenströmmen

En undersökning av den regionala strömningens storlek, riktning och betydelse för temperaturförhållandena i akvifären bör utföras. Om en sådan utredning visar att strömmen är betydelsefull och riktningen är snett från den varma brunnen mot den kalla, bör vid fortsatt överskott av energi i akvifären uttagsbrunnarna skifta så att den regionala grundvattenströmmen bättre utnyttjas för borttransport av energi ur akvifären.

10.6 Förslag till fortsatt uppföljning av driften

Eftersom driften av anläggningen föreslås förändras bör uppföljningen av driften fortsätta. De erforderliga installationerna och rutinerna för driftuppföljningen är redan i funktion. En fortsättning av detta arbete med en förnyad utvärdering kräver små insatser.

Datasimuleringen har utnyttjat en modell framtagen av markvärmegruppen vid LTH. Det finns ett intresse från denna grupp att medverka i en utvärdering av datamodellen mot verkliga driftdata. En sådan utvärdering föreslås ske.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850307-9
från Statens råd för byggnadsforskning till VBB AB i samarbete med
Malmbergs i Yngsjö AB.**

R6: 1989

ISBN 91-540-4996-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709006

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna**

Cirkapris: 37 kr exkl moms