



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.



JOHAN CLAEISSON
BENGT EFTRING
CARL-GUNNAR HILLSTRÖM

Säsongslagring i bergrum

R3: 1993

Utvärdering av
värmeförluster
Lyckebo Uppsala

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400129245



BYGGFORSKNINGSRÅDET

R3:1993

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
VÄG- OCH VATTENBYGGNAD
BIBLIOTEKET

SÄSONGLAGRING I BERGRUM

**Utvärdering av värmeförluster
Lyckebo Uppsala**

Johan Claesson
Bengt Eftring
Carl-Gunnar Hillström

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
850832-6 och 900607-0 från Byggforskningsrådet
till Stiftelsen Bergteknisk forskning, Stockholm.

REFERAT

Lyckebo solvärmeanläggning uppfördes i syfte att utveckla, demonstrera och utvärdera ett storskaligt fjärrvärmesystem baserat på solvärme med säsongslagring i öppet berggrum. Den mera intensiva utvärderingen avslutades i juli 1986. Det konstaterades efter hand att värmeförlusterna var högre än beräknat. Syftet med den utvärdering som fortsatte därefter var att genomföra en begränsad uppföljning och utvärdering av de långsiktiga förloppen. Vidare planerades speciella insatser för att försöka klarlägga orsakerna till avvikelsen mellan beräknade och uppmätta värmeförluster för lagret. Målsättningen var att (1) upprätta en korrekt energibalans för lagret, (2) att definiera möjliga åtgärder i Lyckebo samt i kommande värmelager av olika typer och (3) att kunna skilja på kvarstående effekter och "tillfälliga" (under anvärningen).

I början av 1987 utarbetade Markvärmegruppen vid Lunds Tekniska Högskola tänkbara hypoteser i frågan om de oplanerade lagerförlusterna. Man kom fram till hypotesen att merförlusterna kunde bero på vattenläckage från lagret via bergsprickor ut till tillfartstunneln som används som systemets expansionskärl.

Erfarenheterna från Lyckebolagret visar att lagrets termiska funktion är känslig för vattenflöden genom yttre strömvägar. Problemen kan emellertid bemästras genom en konstruktionsförändring. Vid byggande av nya berggrum bör man göra en termohydraulisk analys och utnyttja lärdomarna från Lyckebo.

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.

R3:1993

ISBN 91-540-5506-7
Byggeforskningsrådet, Stockholm

gotab 97203. Stockholm 1993

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	4	
1	BAKGRUND	5
1.1	Allmänt	5
1.2	Solvärme med säsongslager	6
2	UTVÄRDERINGENS MÅLSÄTTNING OCH UPPLÄGGNING	7
3	SYSTEMBESKRIVNING	8
3.1	Allmänt	8
3.2	Driftstrategier	9
4	ANALYS AV KONVEKTIVA FÖRLUSTER SAMT SLUTSATSER	11
4.1	Allmänt	11
4.2	Analys av konvektiva förluster	11
4.3	Slutsatser	14
4.4	Åtgärder för att minska förlusterna	15
4.5	Förändrad lagerkonstruktion	16
4.5.1	Expansionsvolym	16
4.5.2	Konstruktionstunnlar och anslutningar till bergrummet ...	16
5	REFERENSER	18
5.1	Referenser, Lyckeboprojektet ...	18
5.2	Referenser, övrigt	21

BILAGA 1 Analys av konvektiva förluster för
Lyckebobergrummet. Mätningar,
beräkningar och slutsatser.
Markvärmegruppen, Lund.

SAMMANFATTNING

Lyckebo solvärmeanläggning uppfördes i syfte att utveckla, demonstrera och utvärdera ett storskaligt fjärrvärmesystem baserat till 100% på solvärme med säsongslager i öppet berggrum.

Lyckeboprojektets utvärdering finns dokumenterad i två tidigare rapporter "Från idé till idrifttagning" samt "Utvärderingsresultat och driftserfarenheter", referens 1 respektive 24.

Den mera intensiva utvärderingen avslutades i juli 1986. Det konstaterades efter hand att värmeförlusterna var högre än beräknat. Syftet med den utvärdering som fortsatte därefter var att genomföra en begränsad uppföljning och utvärdering av de långsiktiga förloppen under perioden 1986-07-01--1987-12-31. Vidare planerades speciella insatser för att försöka klarlägga orsakerna till avvikelsen mellan beräknade och uppmätta värmeförluster för lagret. Målsättningen var

- att upprätta en korrekt energibalans för lagret
- att definiera möjliga åtgärder i Lyckebo samt i kommande värmelager av olika typer
- att kunna skilja på kvarstående effekter och "tillfälliga" (under anvärmningen).

I början av 1987 utarbetade Markvärmegruppen vid Lunds Tekniska Högskola tänkbara hypoteser i frågan om de oplanerade lagerförlusterna. Man kom fram till hypotesen att merförlusterna kunde bero på vattenläckage från lagret via bergsprickor ut till tillfartstunneln som används som systemets expansionskärl.

Ett förslag till temperaturmätningar i expansions-tunneln utarbetades och genomfördes. Tre borrhål borrades från markytan ner till tunneln. Via dessa hål samt en befintlig brunn vid tunnelmynningen monterades temperaturgivare. Mätperioden i lagret samt för de tillkommande mätningarna i tunneln utsträcktes till 1991/1992.

Beräkningarna av tunneltemperaturer och konvektiv värmetransport från berggrum till tunnel, jämfört med mätningar, stöder hypotesen att tunneln ingår i en sluten vattenströmningskrets där varmt vatten lämnar berggrummet, avkyles vid passagen genom tunneln och därefter återföres på en lägre nivå i berggrummet.

Erfarenheterna från Lyckebolagret visar att lagrets termiska funktion är känslig för vattenflöden genom yttre strömvägar. Problemen kan emellertid bemästras genom en konstruktionsförändring. Vid byggande av nya berggrum bör man göra en termohydraulisk analys och utnyttja lärdomarna från Lyckebo.

1 BAKGRUND

1.1 Allmänt

Lyckebo solvärmeanläggning uppfördes i syfte att utveckla, demonstrera och utvärdera ett storskaligt fjärrvärmesystem baserat till 100% på solvärme med säsongslager i öppet bergrum. Anläggningen, som baseras på svensk teknik och svenskt kunnande inom solvärmeområdet, är unik i sitt slag och har rönt ett mycket stort internationellt intresse.

Den intensivaste etappen av forsknings- och utvärderingsarbetet med Lyckebo avslutades i juli 1986. Denna etapp finns avrapporterad i rapporten "Utvärderingsresultat och driftserfarenheter" (ref. 24). I rapporten sammanfattas de viktigaste resultaten och erfarenheterna från denna etapp av projektet. I texten refereras till detaljredovisningar och analyser som presenterats fortlöpande i rapporter och konferensbidrag från respektive delprojekt.

Uppsala Energi AB initierade Lyckeboprojektet och var beställare. Projektets start, "Från idé till idrifttagning" har tidigare presenterats (ref. 1-3) liksom medverkande organisationer och företag (finansiärer, leverantörer, entreprenörer).

Forsknings- och utvärderingsprogrammet har i huvudsak bekostats av Byggforskningsrådet genom forskningsanslag till Stiftelsen Bergteknisk forskning.

Som grund för den fortsatta utvärderingen har Vattenfall Utveckling AB, Älvkarlebylaboratoriet, Björn Karlsson, svarat för mätningar, mätvärdesinsamling och mätvärdesbehandling, med syfte att upprätta en korrekt energibalans för lagret samt att kunna skilja på kvarstående effekter och "tillfälliga" (under anvärmningen).

Markvärmegruppen vid Lunds Tekniska Högskola, Johan Claesson och Bengt Eftring, har ställt upp hypoteser, utarbetat datormodell, utfört beräkningar, analyserat och dragit slutsatser. Markvärmegruppen har finansierat sina insatser inom sina egna ramanslag. Deras arbete finns redovisat i bilaga 1.

På uppdrag av Stiftelsen Bergteknisk Forskning har Carl-Gunnar Hillström, ORD och ENERGI AB, svarat för samordning och fungerat som redaktör för föreliggande sammanfattning av utvärderingen.

1.2 Solvärme med säsongslager

Lärdomar och erfarenheter från tidigare stora experimentbyggda solvärmeanläggningar och lagringsprojekt, t ex Lambohovprojektet, Ingelstadsprojektet och försöksanläggningen i Avesta för hetvattenlagring, spelade en viktig roll vid projekteringen av Lyckebo systemet.

Detta ledde till att en väl fungerande anläggning med goda prestanda kunde konstrueras. Även ekonomiskt representerar Lyckebo en brytpunkt i utvecklingen av solvärmsystem genom att såväl lager- som solfångarkostnaden blev avsevärt lägre än i föregående projekt.

En utförligare genomgång av svenska befintliga solvärmeanläggningar ges i ref. 31, tillsammans med allmänna synpunkter på dimensionering och systemuppbyggnad. Anläggningsdata och resultat från Avesta projektet har publicerats i flera rapporter, till exempel ref. 32, 33 samt i boken "Hot Water Storage in Rock Caverns" av Göran Reh binder, ref. 40.

För fjärrvärmeproduktion kan ca 10% av lasten täckas med solvärme utan lagring. I detta fall konkurrerar emellertid solvärmens med billig sommarvärme. För att täcka en större andel krävs lagring, för hög soltäckning säsongslagring.

Det billigaste alternativet idag för detta ändamål, för höga temperaturer i stora system, är oisolerade bergrum.

Temperaturnivån i fjärrvärmesystem är förhållandevis hög. Storskalig introduktion av solenergi i befintliga svenska fjärrvärmesystem kräver att solfångare och lager kan användas vid höga temperaturer. För att kostnaden för lagret skall kunna hållas låg måste vidare temperaturdifferensen mellan topp och botten hållas så hög som möjligt. Av dessa skäl testas i Lyckebo produktion och lagring av solvärme vid temperaturer upp till 95°C. Det nybyggda området, som försörjs med värme, är konstruerat för låga temperaturer på fjärrvärmevattnet så att returtemperaturen blir så låg som möjligt.

Lyckeboprojektets utvärdering finns dokumenterad i två tidigare rapporter "Från idé till idrifttagning" samt "Utvärderingsresultat och driftserfarenheter", referens 1 respektive 24.

Den mera intensiva utvärderingen avslutades i juli 1986. Det konstaterades efter hand att värmeförlusterna var högre än beräknat. Syftet med den utvärdering som fortsatte därefter var att genomföra en begränsad uppföljning och utvärdering av de långsiktiga förloppen under perioden 1986-07-01--1987-12-31. Vidare planerades speciella insatser för att försöka klarlägga orsakerna till avvikelsen mellan beräknade och uppmätta värmeförluster för lagret. Målsättningen var

- att upprätta en korrekt energibalans för lagret
- att definiera möjliga åtgärder i Lyckebo samt i kommande värmelager av olika typer
- att kunna skilja på kvarstående effekter och "tillfälliga" (under anvärmningen).

I början av 1987 utarbetade Johan Claesson, Markvärmegruppen vid Lunds Tekniska Högskola, tänkbara hypoteser i frågan om de oplanerade lagerförlusterna. Johan Claesson kom fram till hypotesen att merförlusterna kunde bero på vattenläckage från lagret via bergsprickor ut till tillfartstunneln som används som systemets expansionskärl. Tunneln skulle fungera som kylfläns och det avkylda vattnet rinna ner till lagrets botten via det borrade expansionshålet.

Med anledning av Johan Claessons hypoteser omformulerades utvärderingsprojektet och de speciella insatser som mot bakgrund av den nytillkomna informationen inte längre verkade intressanta slopades.

Ett förslag till temperaturmätningar i expansions-tunneln utarbetades och genomfördes. Tre borrhål borrades från markytan ner till tunneln. Via dessa hål samt en befintlig brunn vid tunnelmynningen monterades temperaturgivare. Mätningarna har i huvudsak utförts av Vattenfall Utveckling AB, Älvkarlebylaboratoriet. Närmare beskrivning finns i bilaga 1. Mätperioden i lagret samt för de tillkommande mätningarna i tunneln utsträcktes till 1991/1992.

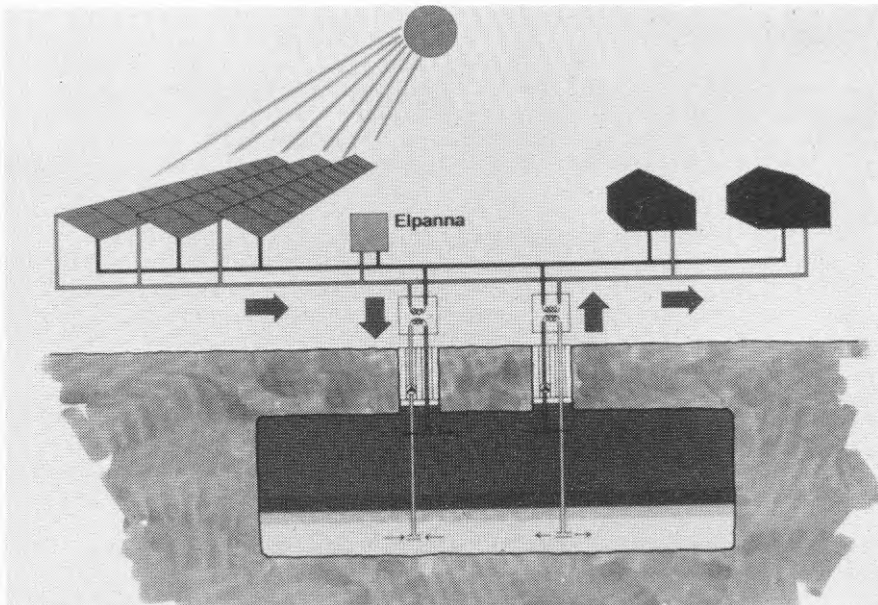
3 SYSTEMBESKRIVNING

3.1 Allmänt

Lyckebo är beläget i Storvreta samhälle 13 km norr om Uppsala. Solvärmeanläggningen byggdes under perioden 1981 till 1983 och från september 1983 sker värmeförsörjningen i området från värmelagret.

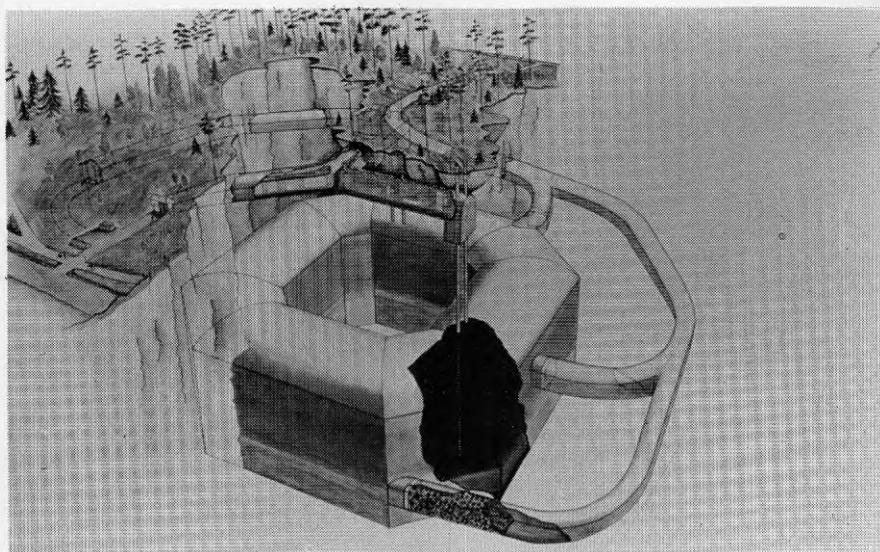
Anläggningen är dimensionerad för att försörja 550 lägenheter och småhus i ett nybyggt bostadsområde samt gemensamhetsbyggnader med värme och tappvarmvatten. Området är idag utbyggt till cirka 500 bostadsenheter. Värmeförsörjningen sker via ett separat fjärrvärmesystem som arbetar vid låg temperatur, max 70°C under vintern och max 55°C under sommaren.

Systemet består av solfångarfältet med högeffektiva plana solfångare, ett bergrum på 100 000 m³ för säsongslagring och distributionssystemet, se figur 3.1. Under en första etapp av projektet har 4 320 m² solfångare installerats. Detta motsvarar 15% av den erforderliga ytan för att täcka hela lasten. Den återstående solfångarytan simuleras med en 6 MW elpanna. Samma elpanna kan även utnyttjas som tillsatsvärmekälla om sådan behövs.



Figur 3.1 Principschema för Lyckebosystemet

Solfångarna lutar 42° mot horisontalplanet och är riktade mot söder. Det oisolerade bergrummet, vars hjassa är belägen 30 m under markytan, är ringformat med ytterdiametern 75 m, bredden 18 m och höjden 30 m, figur 3.2. Lagret är temperaturskiktat och värme lagras och urlagras på den nivå i lagret där motsvarande temperatur som produceras respektive krävs i lasten finns. Detta åstadkoms med två uppsättningar dubbla höj- och sänkbara teleskopprör. Detaljerad teknisk information för solfångarfält, lager och system har presenterats i flera rapporter (ref. 1, 4, 5).



Figur 3.2 Värmelagret

3.2 Driftstrategier

För styrning, reglering och övervakning av Lyckebosystemet installerades ett datorbaserat styrsystem. Detta innehåller 14 renodlade, delvis kombinerbara, driftfall (ref. 1). Ett teleskopprör i varje par jobbar mot övre halvan av lagret medan det andra jobbar mot nedre halvan. Detta erfordrar t ex för laddning av lagret två olika driftfall. Då lagret är mindre än halvfullt sker laddningen via ena paret av teleskopprör medan för mer än halvfullt lager sker laddningen via de nedre teleskopprören i respektive par.

Elpannan regleras så att ett solfångarfält med totalt 29 000 m² solfångare med prestanda enligt de installerade modulerna simuleras. Baserat på erhållen värme och temperatur från det installerade solfångarfältet under dagen styrs värmeproduktionen från elpannan under efterkommande natt. Korrekt värmeproduktion är prioritet före korrekt temperatur. I fall då eftersläpning för elvärme uppstår ackumuleras detta och avräknas snarast möjligt. Elpannan kan även utnyttjas som tillsatsvärmekälla om sådan behövs.

Som värmebärare i solfångarkretsen utnyttjas en 50-procentig lösning med vatten och propylenglykol. Dimensionerande temperaturhöjning i kretsen är ca 40°C och värmeväxlingen mot mellankulverten sker med en plattvärmväxlare. Flödet i solfångarkretsen och i inlagringskretsen styrs inom ett givet område beroende av solinstrålningen. Grundtanken är att producera mesta möjliga vatten vid temperaturnivån 90 till 95°C. Ett driftfall med lägre temperaturkrav utnyttjas under uppvärmningsperioder (morgontimmar) för kretsen liksom för ett vårdriftfall. Olika strategier för hur dessa driftfall skall utnyttjas har testats under åren.

Framledningstemperaturen i distributionsnätet bestäms dygnsvis beroende av aktuell utelufttemperatur. Temperaturen varierar mellan maximalt 70°C under vintern och är som lägst 55°C. Returledningstemperaturen bestäms av abonnenternas värmesystem, där returerna under 40°C har eftersträvat.

4 ANALYS AV KONVEKTIVA FÖRLUSTER SAMT SLUTSATSER

4.1 Allmänt

Hypoteserna över de oplanerade merförlusterna lanserades av Johan Claesson vid Lunds Tekniska Högskola.

I referens 2 i bilaga 1's referenslista diskuteras olika termiska processer som skulle kunna uppstå och som skulle ge ökade förluster för bergrummet. Analys av storleksordningar för de resulterande värmeförlusterna mynnar ut i grundhypotesen att en observerad sprickbildning vid lagrets överyta (iakttaga förskjutningar i mäthål) ger upphov till en sluten strömningsväg lagrets topp - spricksystemet - tunneln - expansionskanalen - lagrets botten. Ett medelvat-tenflöde av 0.5 l/s med en temperatursänkning om 50°C räcker för att förklara de ökade förlusterna.

Referens 2 (bilaga 1) mynnar bland annat ut i förslag om nya temperaturmätningar i tunneln på olika nivåer i syfte att testa hypotesen om vattenrörelser i tunneln.

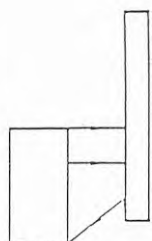
Om hypotesen är riktig skulle de extra värmeförlusterna kunna stoppas eller reduceras genom uppbyggnad av strömningskretsen eller genom ökning av strömningsmotståndet. En annan möjlighet skulle vara att åstadkomma en motpumpning som eliminerar den drivande tryckdifferensen. Se även referens 3 (bilaga 1).

4.2 Analys av konvektiva förluster

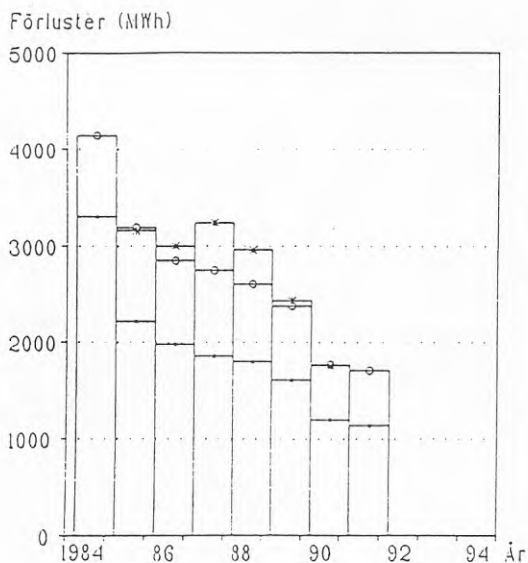
Markvärmegruppens arbete finns utförligt redovisat i bilaga 1.

I figur 4:1 nedan, hämtad ur bilaga 1, visas i diagram uppmätta förluster 1983/1984 till 1991/1992 tillsammans med beräknade konduktiva samt konvektiva förluster inklusive expansionsförluster. De konvektiva förlusterna avser ett fall (kallat fall 6 i bilaga 1) med kommunikation mellan bergrum och expansionsstunnel via två sprickplan samt expansionshålet, se figur nedan.

Fall 6 är det fall som uppvisar bäst samstämmighet mellan beräkningar och uppmätningar.



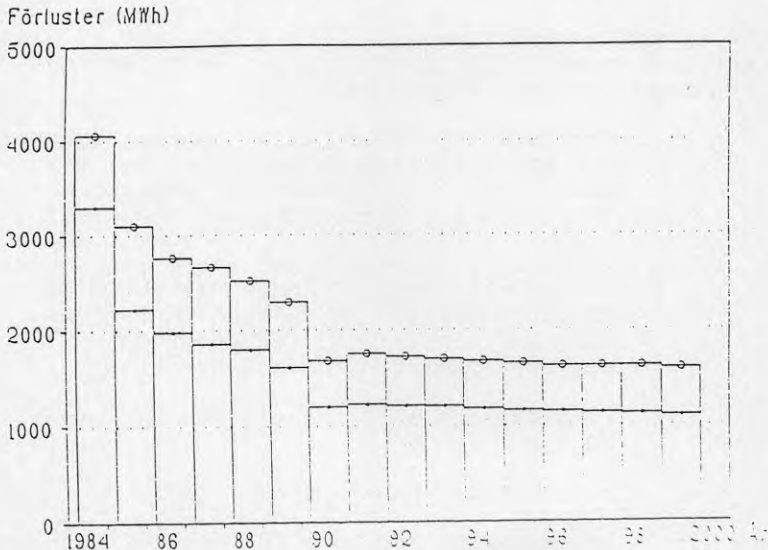
Fall 6



Figur 4:1 Uppmätta totala (*) samt beräknade konduktiva (•) och konduktiva + konvektiva (◦) förluster inklusive expansionsförluster (ur bilaga 1, Fig. 8)

Figur 4:1 visar mätta förluster och beräknade konduktiva och konvektiva förluster inklusive expansionsförluster enligt ovan. Strömningsvägar är definierade enligt Fall 6. De större avvikelserna under åren 86/87 och 87/88 ryms enligt uppgift inom den osäkerhet som är förknippad med utförda energimätningar.

I figur 4:2 nedan också hämtad från bilaga 1 redovisas en prognos över bergrumsförlusternas utveckling till år 2000 för det så kallade fall 6.



Figur 4:2 Beräknade bergrumsförluster 1983-1999 enligt Fall 6. Konduktiva (•) och konduktiva + konvektiva förluster (o) (ur bilaga 1, Fig. 9)

De totala förlusterna under lagringssäsongen 90/91 är 1760 MWh. Efter ytterligare åtta säsonger är de totala förlusterna 1600 MWh vilket innebär en minskning med 9 %. Det framgår av tabellen att lagerförlusterna endast ändrar sig långsamt efter de tio första lagringssyklerna. Säsongen 89/90 visar en lägre förlust än de omgivande säsongerna. Detta beror på lägre temperaturnivåer i lagret under denna säsong.

4.3 Slutsatser

Beräkningarna av tunneltemperaturer och konvektiv värmetransport från bergrum till tunnel stöder hypotesen att tunneln ingår i en sluten vattenströmningskrets där varmt vatten lämnar bergrummet, avkyles vid passagen genom tunneln och därefter återföres på en lägre nivå i bergrummet.

De uppmätta tunneltemperaturernas temperaturnivåer och tidsdynamik möjliggör analyser av strömningsvägarnas geometri enligt följande:

- 1 Det termiska förloppet i tunneln är känsligt för strömningsvägens geometri. Fel strömningsvägar ger fel termiskt förlopp i tunneln. Följande slutsatser kan dras:

- a) Utloppet från bergrummet måste ligga nära bergrummets topp. I annat fall blir den drivande kraften på vattencirkulationen bergrum/tunnel för liten under de perioder lagret är urladdat.
- b) Förbindelsen till tunneln kan ej vara belägen

- vid tunnelns högsta punkt.

Det erhållna termiska förloppet i tunneln avviker kraftigt från mätta värden.

- flera meter under bergrummets taknivå.

Det erhållna termiska förloppet i tunneln avviker kraftigt från mätta värden.

Detta indikerar att huvudströmningsvägen går från bergrummets topp och ungefär horisontellt ut till tunneln. Ju högre upp förbindelsen ligger i tunneln desto större blir avvikelserna från mätta temperaturer.

- 2 Sålunda bestämd strömningsväg ger ett enda möjligt strömningsmotstånd för att korrekta tunneltemperaturer skall erhållas vid beräkningen. Detta strömningsmotstånd motsvaras till exempel av en spricka med bredden 1 m, längden 10 m och öppningen cirka 1 mm.
- 3 De på detta vis definierade strömningsförutsättningarna bestämmer de konvektiva förlusterna enligt Fall 6. Till dessa förluster skall årliga expansionsförluster om cirka 90 MWh/år adderas.

Analys av resultat från mätningar och beräkningar visar klart att man har en sluten vattencirkulation genom bergrummet och den runt om bergrummet liggande tunneln. Flera parallella strömningsvägar kan finnas men huvudflödet måste gå från bergrummets topp och ut till tunneln. Tillbakaflödet till bergrummet torde ske genom det konstruerade expansionsröret som förbinder bergrummets botten med tunneln.

Varmt vatten lämnar bergrummets topp, kyls under passagen av tunneln och återförs till bergrummets botten. Bergrummet belastas på detta sätt av en konvektivt betingad värmeförlust. Denna vattencirkulation orsakar den större delen av de ökade värmeförlusterna från värmelagret.

På grund av volymexpansionen (baserad på att hela lagervolymer pendlar mellan 50 och 80°C) kommer vattnet i tunnelns översta del att rinna ut över grundvattenytan för att senare, när volymen minskar, ersättas av grundvatten med temperaturen 6°C. Detta förorsakar en ytterligare årlig förlust om cirka 90 MWh. Vattenanalyser visar ett grundvattentillflöde till bergrummet som motsvarar volymexpansionen.

4.4 Åtgärder för att minska förlusterna

De konvektiva förlusterna orsakas av förekomsten av en stor "kylfläns" (tunneln) och en sluten strömningsväg genom kylflänsen. Några förslag till åtgärder är:

1 Minska effekten av kylflänsen.

Blockering av tunnelns övre del i nivå med bergrummets tak. Detta medför att förlusterna reduceras från cirka 500 MWh/år till cirka 200 MWh/år.

2 Bryta den slutna slingan

Detta medför att förlusterna reduceras från cirka 500 MWh/år till cirka 200 MWh/år.

Det är av viss betydelse var slingan bryts. Detta har sin orsak i tidigare nämnda volymexpansion av bergrummets vatten. Antag att tunneltemperaturen sjunker till 20°C när den slutna slingan bryts upp. Om övre strömningsvägar tätas kommer 50-gradigt bottenvatten från bergrummet att ersättas av 20-gradigt tunnelvatten genom expansionsröret. Om i stället expansionsröret är blockerat kommer 85-gradigt toppvatten att ersättas av 20-gradigt tunnelvatten. Expansionsförlusterna för de två fallen blir 70 respektive 150 MWh/år.

4.5 Förändrad lagerkonstruktion

Vid konstruktionen av ett bergrumslager skall man undvika konvektiva förluster och expansionsförluster.

Konvektiva förluster är följden av att man har ett kontinuerligt vattenflöde längs en sluten strömningsväg där en tillräckligt stor "kylfläns" ingår. En sådan fläns kan utgöras av en konstruktionstunnel, och en sluten slinga kan bildas om det finns två kanaler på olika nivåer mellan bergrummet och konstruktionstunneln.

Nedan redovisas några idéer om hur en sluten slinga kan undvikas.

4.5.1 Expansionsvolym

Expansionsrörelser kan tas upp av en helt separat konstruktion. Man kan till exempel ha ett vertikalt rör från lagrets botten upp till en värmeisolerad volym av tillräcklig storlek ovanför bergrummet. Ingen del av detta system får ha hydraulisk kontakt med omgivningen. På så sätt kan man undvika de konvektiva förlusterna som annars kan uppstå om det finns två strömningsvägar mellan bergrum och tunnel.

4.5.2 Konstruktionstunnlar och anslutningar till bergrummet

Huvudtunneln från markyta till botten av bergrummet bör dras så långt bort från bergrummet att tunneln ligger i ett område med liten termisk påverkan från bergrummet. Detta minskar risken för att man skall få termiskt orsakade sprickbildningar som når hela vägen mellan bergrum och tunnel. Om sprickan ändå skulle nå hela vägen kommer spricköppningen troligen att vara mindre än om tunneln ligger på litet avstånd från bergrummet. Dessutom minskar vattenflödet och energiförlusten med en faktor 1000 om spricköppningen minskar med en faktor 10. Anslutningstunnlar mellan bergrum och huvudtunnel blir på detta sätt längre och de delar som är längst från bergrummet går genom en termiskt stabil miljö.

En god lösning kan vara att blockera anslutningstunnlar genom pluggning på två ställen med fyllning mellan pluggarna. Den yttre pluggen placeras så långt från bergrummet som möjligt. Fyllningen förhindrar konvektiv värmetransport mellan pluggarna. De yttre pluggarna verkar därmed i en termiskt stabil miljö varför temperaturspänningar i pluggar och omgivande berg är kraftigt reducerade. Risken för eventuell sprickbildning vid pluggarna minskas.

Man har i Lyckebo konstaterat sidoförskjutningar i borrhål nära lagrets topp. Denna sprickbildning har observerats efter uppvärmning av lagervolymen. Det är rimligt att anta att ett ringformat lager av Lyckebo-typ på grund av lagrets geometriska asymmetri (inåt/utåt) har större benägenhet till termiskt orsakad sprickbildning än ett lådformat lager. Bergrumslagret i Avesta (lådformat, 15 000 m³) har fungerat utan indikationer på vattenflöden i slutna slingor av den typ som förekommer i Lyckebo. Det kan således finnas skäl att undvika lagerkonstruktioner som innebär onödig asymmetri och därmed ökad risk för sprickbildning i omgivande berg.

Erfarenheterna från Lyckebolagret visar att lagrets termiska funktion är känslig för vattenflöden genom yttre strömvägar. Problemen kan emellertid bemästras genom en konstruktionsförändring. Vid byggande av nya bergrum bör man göra en termohydraulisk analys och utnyttja lärdomarna från Lyckebo.

5 REFERENSER**5.1 Sammanställda referenser för Lyckeboprojektet**

1. C-G Hillström, L Åstrand, m fl. Solvärme med säsongslagring i berg i Lyckebo - från idé till idrifttagning, BFR, R43:1985.
2. L Åstrand, E Kjellsson, Solar district heating in Uppsala, Sweden, Proc. Solar World Congress, Perth, Australia, 1983.
3. E Kjellsson, The Lyckebo project - Solar district heating with seasonal storage in a rock cavern, Proc. the Int. Conf. on Subsurface Heat Storage, Stockholm, Sweden, 1983.
4. P Holst, H Zinko, Performance and operating results for the solar district heating plant at Lyckebo, Uppsala, Sweden, Proc, IEA-Workshop on the design and performance of large solar thermal collector arrays, San Diego, California, 1984.
5. C Brunström, M Larsson, C-G Hillström, The Lyckebo rock cavern seasonal storage, Proc. IEA-Workshop on Solar assisted heat pumps with ground coupled storage, Vienna, Austria, 1985. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 85:3.
6. C Brunström, m fl, The Lyckebo project - a Swedish central solar heating plant with seasonal storage, Proc. INTERSOL 85, Montreal, Canada, 1985. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 85:13.
7. C Brunström, m fl, The Lyckebo rock cavern seasonal storage plant - experience of one year of operation, Proc, ENERSTOCK 85, Toronto, Canada, 1985.
8. C Brunström, A-L Merckell, Lyckebo solvärmeanläggning - driftresultat 1984/85, SEAS-konferensen, Stockholm, Sverige, 1985. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 85:26.
9. C Brunström, Lyckebo central solar heating plant - results of first year of operation, final report. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-A 86:1.

10. H Pilebro, C Brunström, M Larsson, The Lyckebo project - thermal energy storage in a rock cavern, Proc, LRC'86 the Int. Conf, on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:15.
11. C-G Hillström, C Brunström, M Larsson, The Lyckebo project - economy and measured performance, Proc, IECEC Thermal Energy Storage Session, San Diego, California, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:5.
12. C Brunström, M Larsson, The Lyckebo rock cavern seasonal storage plant-performance and economy. Proc. ASES Conference, Boulder, Colorado, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:6.
13. C Brunström, A-L Merckell, M Larsson, The Lyckebo project - thermal performance of system and storage, Proc. North Sun '86, Copenhagen, Denmark, 1986. Älvkarlebylaboratoriet, UL-FUD-B 86:4.
14. C Brunström, Lyckeboprojektet - solfjärrvärme med säsongslagring i bergrum, VVS & Energi, 11/1986.
15. H Wallestun, P Holst, H Zinko, Performance and operating results for the solar district heating plant at Lyckebo/Uppsala, Sweden, Studsvik report EI-85/46.
16. H Wallestun, A Östergren, Solfångaranläggning i Lyckebo/Uppsala - resultat för 1985, Studsvik arbetsrapport ED-86/19.
17. C Brunström, A-L Merckell, Intensivmätningar sommaren 1986.
18. G Rehbinder, Lyckeboprojektet - mätning av bergets töjningar, BeFo 109:2/84.
19. G Rehbinder, Strains in the rock around an unlined hot water storage cavern, Proc. ENERSTOCK 85, Toronto, Canada, 1985.
20. G Gustafson, M Liedholm, Lyckeboprojektet - utvärderingsprogram geologi/geohydrologi, BeFo 109:1/84.
21. T Claesson, H Westas, Värmelager - Lyckebo, utvärdering av förändringar i vattenkemin, BeFo 109:3/86.

22. Å Nordqvist, Dokumentation av vegetation på värmelagret i Lyckebo/Storvreta/Uppsala kommun, Arbetsrapport F:A Markplan, Uppsala, November 1984.
23. H Wallestun, MINSUNsimuleringar av Lyckeboanläggningen - systemsimuleringar och kostnadsminimeringar, Studsvik Arbetsrapport ED-87/4.
24. C Brunström, C-G Hillström, Lyckeboprojektet, solfjärrvärme med säsongslagring i bergrum. Utvärderingsresultat och driftserfarenheter, BFR R86:1987.
25. Claesson, Eftring, Hellström. Studie av värmeförluster för Lyckebo värmelager i berg, 1981-04-14.
26. Claesson. Några synpunkter och funderingar angående de oväntat höga värmeförlusterna för värmelagret i Lyckebo. 1987-02-25.
27. Claesson. Synpunkter och förslag till åtgärder för värmelagret i Lyckebo. 1989-06-22.
28. Claesson. Termohydraulisk modell för bergrum och tunnel. 1989-06-22.
29. Eftring. Delrapport över Lyckeboprojektet. 1990-11.
30. Eftring, Claesson. Delrapport för Lyckeboprojektet. 1991-05-20.

5.2 Referenser, övrigt

31. J-O Dalenbäck. Solvärmeteknik i stor skala - synpunkter på systemuppbyggnad och dimensionering. BFR för publicering under 1987.
32. Beskrivning av anläggning och forskningsprogram, Avestaprojektet, rapport nr 1981:1, BeFo.
33. B Vasseur, Uppmätta och beräknade temperaturer och energiförluster, Avestaprojektet, rapport nr 1986:1, BeFo.
34. C Brunström, B Karlsson, M Larsson, Climatic limitations and collector performance in the middle of Sweden, Proc. North Sun '86, Copenhagen, Denmark, 1986.
35. J Claesson, Thermodynamics of sensible heat storage systems - thermality concept, Dep. of Mathematical Physics, Lund University, Sweden, August 1979.
36. G Hellström, Comparison between theoretical models and field experiments for ground heat systems, Proc. the Int. Conf. on Subsurface Heat Storage, Stockholm, Sweden, 1983.
37. V Chant, R Håkansson, The MINSUN simulation and optimization program application and user's guide, International Energy Agency-Task VII, September 1985, Canada.
38. P-Å Andersson, Å Askling, J-O Dalenbäck, SIMSYS-Simuleringsprogram för värmecentraler med ny energiteknik, Avd. för Installations-teknik, CTH, I24:1986.
39. T Claesson, G Hultmark, T Jilar, Säsongs-lagrad solvärme i Kungälv - sammanfattning av en förundersökning, BFR, T9:1986.
40. G Rehbinder, Hot Water Storage in Rock Caverns. Stockholm 1988. ISBN: 91-971074-0-9.

Analys av konvektiva förluster för Lyckeobergrummet

Mätningar, beräkningar och slutsatser

Bengt Eftring, Johan Claesson

Juni 1992

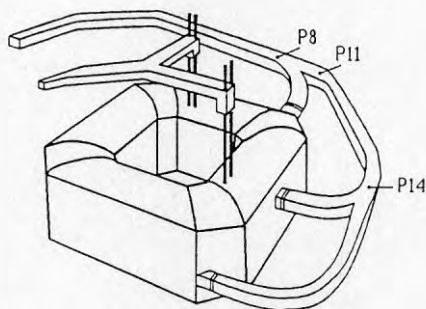
Markvärmegruppen, Lund

Innehåll

1	Berggrumsvärmelager i Lyckebo	3
2	Uppmätta och beräknade förluster	4
3	Hypoteser över den ökade värmeförlusten	5
4	Mätningar i tunneln	5
	4.1 Mätresultat	6
	4.2 Slutsats	8
5	Beräkningsmodell	8
6	Beräkningar	10
	6.1 Beräkningsresultat	10
	6.1.1 Bedömning av strömningsvägar	10
	6.1.2 Sprickgeometri	17
	6.1.3 Energimängder	18
	6.1.4 Några spekulativa diskussioner	21
	6.1.5 Vattenflöden	23
	6.1.6 Slutsats	23
	6.2 Prognos till år 2000	24
	6.3 Effekt av olika åtgärder	25
7	Sammanfattning	27
	7.1 Åtgärder för att minska förlusterna	28
	7.2 Förändrad lagerkonstruktion	28
8	Referenser	30

1 Bergrumsvärmelager i Lyckebo

I Lyckebo konstruerades i början av 1980-talet ett vattenfyllt bergrum med syfte att säsongslagra värme. Bergrummets geometri kan beskrivas som en utsprängd cylinder med radien 38 m och höjden 30 m. Se figur 1.



Figur 1. Bergrumslagret i Lyckebo. P8, P11 och P14 anger mät-punkter i tunneln

I cylinderns centrum har man låtit en bergkärna med radien 20 m vara orörd. Den vattenfyllda volymen ($100\ 000\text{ m}^3$) är således ringformig. Avståndet mellan markytan och cylinderns överyta är 35 m. Bergets värmeledningsförmåga är satt till 3.1 W/mK och dess värmekapacitet till $2.16\text{ MJ/m}^3\text{K}$.

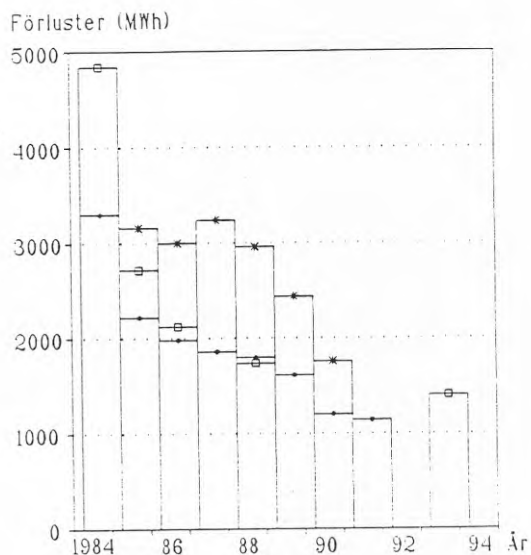
Vid byggandet av bergrummet konstruerades en transporttunnel vilken i en spiral runt bergrummet går från botten av bergrummet och upp till markytan. Tunneln fullbordar $3/4$ varv runt bergrummet. Hälften av tunnelns längd ligger mellan bergrummets tak och markytan. Medelavståndet mellan tunneln och bergrummets yteryta är för den nedre halvan av tunneln 20 m. Tunnelns tvärsnittsytta är cirka 33 m^2 . Från tunneln har horisontella transporttunnlar byggts till lagrets topp och till dess mittpunkt. Dessa båda tunnlar användes vid byggandet av bergrummet men har sedan, liksom anslutningen vid bergrummets botten, pluggats igen för hindra vattenflöde ut till den spiralformade tunneln. Den spiralformade tunneln benämns i fortsättningen "tunneln". Tunneln är vattenfylld upp till grundvattennivån som ligger cirka tio meter under markytan och således cirka 20 m över bergrummets tak.

Vatten som värms expanderar. För att ta hand om denna volymexpansion har man konstruerat en expansionskanal som utgår från en punkt 0.5 m över lagrets botten och som mynnar i tunneln i en punkt 13 m över lagrets botten. Kanalens diameter är 0.15 m.

Lagret har genom mätningar konstaterats ha större värmeförluster än planerats. Iakttagelserna har diskuterats i ett antal tidigare delrapporter. Se referenser. För att närmare studera detta bildades en analysgrupp. Mätningarna har huvudsakligen utförts av Vat-

tenfalls laboratorium i Älvkarleby. Denna rapport redovisar beräkningar och analyser baserade på dessa mätningar.

2 Uppmätta och beräknade värmeförluster



Figur 2. Uppmätta totala värmeförluster (*), beräknade konduktiva värmeförluster baserade på uppmätta berggrumstemperaturer (●) samt förluster enligt förstudie (□)

Laddning av värme i berggrummet inleddes i mars 1983. I figur 2 visas uppmätta årliga förluster (från april till mars efterföljande år) för värmelagret. I figuren återges även beräknade konduktiva förluster enligt en förstudie från 1981-04-14 (referens 1). Vid denna beräkning antogs årsmedeltemperaturen i berggrummet vara 65 °C. Vidare visas i figuren beräknade konduktiva förluster där den använda lagertemperaturen utgörs av de under driften uppmätta verkliga temperaturerna i lagret. Mätvärdena är i stort sett givna dygnsvis. De beräknade värmeförlusterna avser värmeförluster på grund av ren värmeledning genom berggrummets omslutande ytor till det omgivande berget.

Man erhåller en kraftig avvikelse mellan de beräknade konduktiva förlusterna och de uppmätta förlusterna. Avvikelsen är extra stor under det tredje och fjärde året. Den

största avvikelserna är i storleksordningen 1200 MWh. Frånsett år två och tre är avvikelserna cirka 50 % av de konduktiva förlusterna. Observationerna indikerar att någon typ av vattentransport är inblandad i den process som ökar värmeförlusterna från lagret.

3 Hypoteser över den ökade värmeförlusten

I referens 2 diskuteras olika termiska processer som skulle kunna uppstå och som skulle ge ökade förluster för bergrummet. Analys av storleksordningar för de resulterande värmeförlusterna mynnar ut i grundhypotesen att en observerad sprickbildning vid lagrets överyta (iakttagna förskjutningar i mäthål) ger upphov till en sluten strömningsväg lagrets topp - spricksystemet - tunneln - expansionskanalen - lagrets botten. Ett medelvattenflöde av 0.5 l/s med en temperatursänkning om 50 °C räcker för att förklara de ökade förlusterna.

Referens 2 mynnar bland annat ut i förslag om nya temperaturmätningar i tunneln på olika nivåer i syfte att testa hypotesen om vattenrörelser i tunneln.

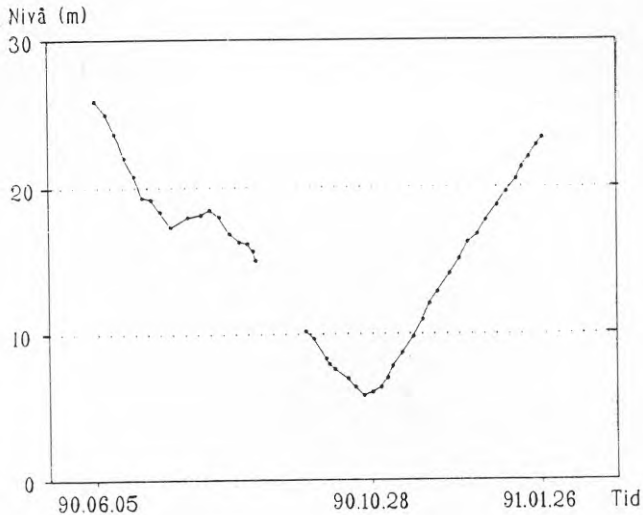
Om hypotesen är riktig skulle de extra värmeförlusterna kunna stoppas eller reduceras genom uppbrytning av strömningskretsen eller genom ökning av strömningsmotståndet. En annan möjlighet skulle vara att åstadkomma en motpumpning som eliminerar den drivande tryckdifferensen. Se även referens 3.

4 Mätningar i tunneln

Vattenfall inledde i juni 1990 temperaturmätning i tunneln på fyra olika nivåer. Temperaturen överst i tunneln mäts via en brunn. Temperaturen mäts även genom tre nya borrhål ner till tunneln. De tre borrhålen ligger P8, P11 och P14 visas i figur 1. I P8 och P11 mäts temperaturen i fyra punkter; 0.4 m över golvytan samt 2, 4 och 6 m högre upp. I borrhålet P14 mäts temperaturen endast i tunnelns mittpunkt. Mätningarna i borrhål P8 och P11 lappar över varandra i vertikalled. Se figur 5.

I slutet av mars 1991 skiftar man utrustning i borrhålen P8 och P14 så att man därefter mäter temperaturen i fyra punkter i P14. Se figur 5. Den lägsta temperaturpunkten hamnar nu 3 meter längre ned. Syftet var att erhålla bättre beskrivning av en antydd vertikal temperaturprofil på P14-nivån.

4.1 Mätresultat



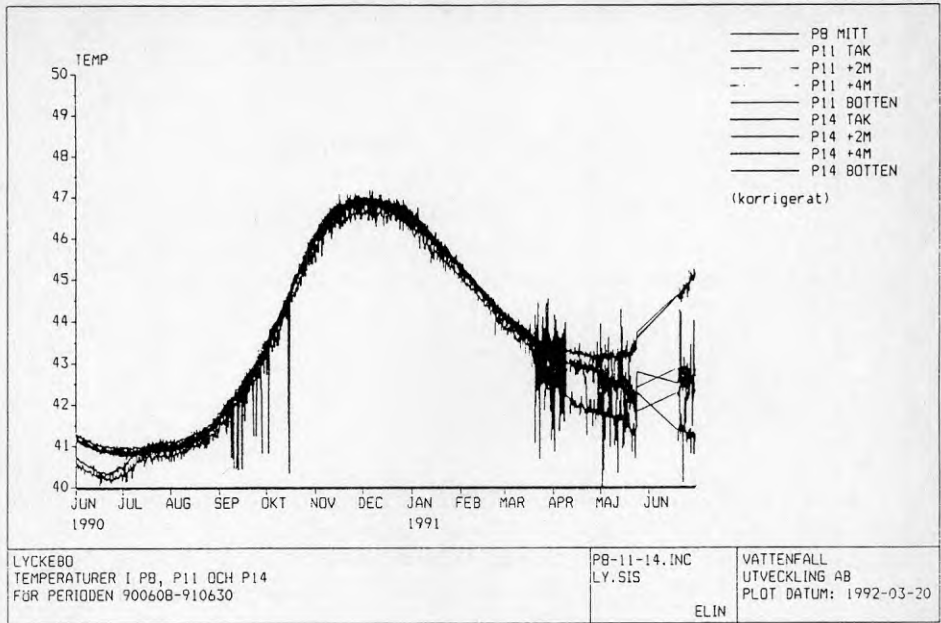
Figur 3. Temperaturfrontens (65 °C) vertikala position i lagret

Temperaturen i vattnet i berggrummet karakteriseras framförallt av en temperaturfronts läge, vilken skiljer överliggande varmt vatten (80-65 °C) från underliggande kallt vatten (65-35 °C).

I figur 3 visas temperaturfrontens läge (65 °C) från 5.6.1990 till 26.1.1991. Mätdata saknas under en period i augusti/september. Fronten sjunker under laddningen ned till nivån 6 m över berggrummets botten. En korttidsurladdning sker i juli/augusti.

Figur 4 visar översiktligt tunneltemperaturer som funktion av tiden för de ovan nämnda mätpunkterna. De visade mätvärdena är kalibrerade för varje enskild mätgivare. Mätnoggrannheten är angiven till någon hundraleds grad. Karakteristiskt för mätningarna är den avtagande temperaturen i början av sommaren och att temperaturerna efter ett minimum åter börjar stiga kraftigt i september. Temperaturen i de olika punkterna är väl samlade. Dock ligger botten temperaturen i P11 0.5 °C lägre under juni. Tidsvariationen för botten temperaturen får därmed ett karakteristiskt utseende som stämmer väl överens med temperaturvariationen i mätpunkten P14. Denna mät punkt ligger cirka 4 m under P11's botten temperaturen punkt.

Det verkar vidare som om den ovan beskrivna jämna storskaliga temperaturvariationen har ett trendbrott i juli/augusti (gäller framförallt P11 och P14) då temperaturökningen inte är lika stor eller där man till och med kan utläsa en temperatursänkning. Detta trendbrott sammanfaller i tiden med en urladdningsperiod i lagret.



Figur 4. Mätta tunneltemperaturer i punkterna P8, P11 och P14

Följande tabell sammanfattar tunnelmätningarna på det sätt som användes vid senare jämförelse med beräknade tunneltemperaturer.

	uppmätt
topp	46
max	41
min	
P8	46.9
	40.8
P11	46.8
	40.5
P14	46.6
	40.2

På varje uppmätt nivå P8, P11 och P14 varierar tunneltemperaturen mellan en högsta

och en lägsta temperatur under året. Temperaturen i brunnen (tunnelns topp) varierar sålunda mellan 41 °C (juli 90) och 46 °C (dec 90). Det framgår att max- och min-temperaturen är ungefär densamma på alla nivåerna.

4.2 Slutsats

Nivån på de uppmätta temperaturerna i tunnel liksom deras tidsvariation styrker hypotesen om att tunneln står i hydraulisk kontakt med bergrummet.

5 Beräkningsmodell

Temperaturförloppet, då tunneln är hydrauliskt kopplad till bergrummet med en övre spricka av något slag och expansionskanalen, är komplicerat. För att kunna analysera mätningarna har en ny modell utvecklats. Detta har varit ett omfattande arbete. Modellen kommer att redovisas senare i en separat rapport. I referens 5 finns en första beskrivning.

Modellen beräknar tredimensionellt temperaturen i berget. Härvid användes de uppmätta bergrumstemperaturerna med variation i höjdded och tid som indata. I tunneln är vattnet temperaturstratifierat med varmare och lättare vatten överst. Tunnelvattnets tids- och höjdberoende temperatur beräknas i modellen med hänsyn tagen till temperaturförloppet runt tunneln och temperaturpåverkan från bergrummet. Tunnelvattnets temperatur bestäms av en balans mellan värmefflöde till omgivande berg på varje höjdnivå och konvektivt värmefflöde då vattnet förflyttas längs tunneln.

Varmt vatten kan lämna bergrummet på någon nivå och genom till exempel ett spricksystem nå ut till tunneln. Man erhåller en nedåtriktad vattentransport i tunneln varvid vattnet avkyles på grund av värmeförlust till omgivningen. Vattenflödet går tillbaka till bergrummet genom expansionskanalen som förbinder tunneln med bergrummets botten.

Volymflödet i en på detta vis slutna strömningsslinga kan bestämmas på följande sätt. Strömningsskretsen har en högsta och en lägsta punkt vilka delar in den slutna slingan i två halvor. Vattenslingan kan tryckmässigt beskrivas som bestående av två vattenpelare. På grund av olika temperaturfördelningar i de två halvorna och vattens temperaturberoende täthet erhålles olika tyngd av de båda vattenpelarna. Skillnaden i tyngd resulterar i ett drivande tryck ΔP som pressar vattnet runt den slutna slingan. När vatten strömmar i förbindelsekanalerna erhålles ett tryckfall längs strömningssvägen. Det resulterande vattenvolymflödet bestäms av att det erhållna tryckfallet precis balanserar det drivande trycket.

Expansionsröret antas utgöra den nedre förbindelsekanalen. Rörets diameter (0.15 m) är så stor att strömningssmotståndet vid aktuella volymflöden kan försummas. Hela strömningssmotståndet i slingan åstadkommes av flödet i den övre förbindelsekanalen.

Volymflödet Q_{sp} (m^3/s) i en tidpunkt ges av:

$$\Delta P = Q_{sp} \cdot R_{sp}(T)$$

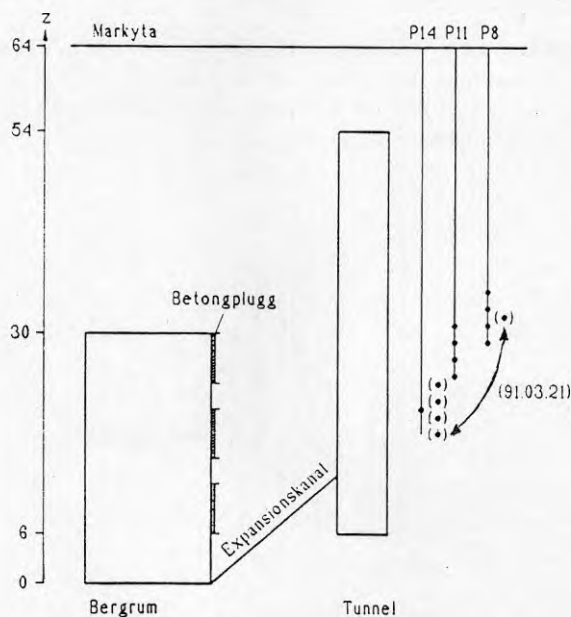
Här är ΔP (Pa) det drivande trycket, vilket vid varje tidpunkt bestäms av temperaturerna i bergrum och tunnel, och $R_{sp}(T)$ (Pa/(m³/s)) spaltens strömningsmotstånd. Temperaturberoendet kan beskrivas på följande sätt:

$$R_{sp}(T) = R_{sp,geom} \cdot \mu(T)$$

Det totala strömningsmotståndet bestäms av strömningsvägens geometri (konstant värde $R_{sp,geom}$ för given geometri) och av den temperaturberoende viskositeten $\mu(T)$ (kg/ms) för vattnet i förbindelsekanalen. Vid passningsberäkning kan sprickans motstånd anges vid någon referenstemperatur (här vald till 85 °C). Man kan då skriva:

$$R_{sp}(T) = R_{sp,ref} \cdot \frac{\mu(T)}{\mu(85)}$$

Vattnets strömningsväg är vid beräkningen geometriskt definierad till hela sin sträckning så när som på den övre förbindelsekanalen. Dennas väsentliga egenskaper utgörs av läget på anslutningspunkterna till bergrum och tunnel samt av dess geometriskt betingade strömningsmotstånd $R_{sp,geom}$. Det är *dessa tre storheter som passas* när beräknade värden jämföres med uppmätta värden.



Figur 5. Höjdlägen i bergrum och tunnel relativt bergrummets golv

Figur 5 visar höjdlägen i bergrum och tunnel som de beskrivs i beräkningsmodellen. Man har i modellen stor frihet att välja strömningsgeometri, det vill säga nivåer för sprickor vid bergrum och tunnel.

6 Beräkningar

Vid beräkningarna med syftet att bestämma temperaturutbredningen från bergrummet användes en gitterstruktur med cirka 1100 celler. Den minsta cellerna har sidan 1 meter. Vid beräkningarna av tunneln med dess termiska koppling till det omgivande berget användes ett tredimensionellt Cartesiskt koordinatsystem med cirka 25 000 celler. Tunnelvattnets temperaturer beskrivs i höjddled med en upplösning av 1 meter.

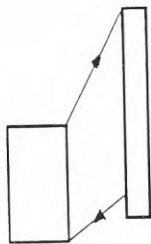
6.1 Beräkningsresultat

Varje beräkning för tunnel och berg genomförs med start från det ögonblick bergrummet börjar värmas (1983). Som indata användes uppmätta temperaturer i bergrummet.

6.1.1 Bedömning av strömningsvägar

Problemet innehåller nu *tre* okända parametrar: sprickornas höjdnivåer vid bergrum och vid tunnel samt sprickornas strömningsmotstånd $R_{sp,ref}$. I de sju fallen nedan varieras de två höjdnivåerna. I vart och ett av fallen beräknas hela temperaturförloppet för ett antal värden på strömningsmotståndet $R_{sp,ref}$.

Fall 1



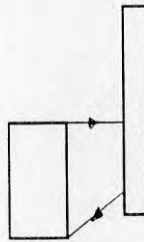
Fall 1

Vattnet antas gå från bergrummets topp till tunnelns översta del (vid brunnen) och föres via tunnel och expansionskanal tillbaka till bergrummet. Beräkningarna genomföres för olika $R_{sp,ref}$. Med ett vattenflöde enligt denna strömningsväg visar det sig att

beräknade vattentemperaturer kraftigt sjunker med ökande djup i tunneln. Detta beror på värmeförlust till det omgivande berget. Uppmätta temperaturer i tunneln på nivån P14 och vid tunnelns översta del varierar ungefär inom intervallet 41 - 47 °C . För att vid beräkningen erhålla dessa temperaturer på P14-nivån måste $R_{sp,ref}$ väljas så att temperaturen i tunneln topp varierar inom intervallet 64 - 78 °C .

Det antagna strömningsförloppet kan ej vara det verkliga eftersom de erhållna beräknade temperaturerna i tunneln på ett avgörande sätt avviker från uppmätta värden.

Fall 2



Fall 2

Vattnet går från bergrummets topp horisontellt ut till tunneln. Om detta vatten har högre temperatur än vattnet i tunneln sker en omblandning uppåt i tunneln. Vatten med den eventuellt omblandade temperaturen strömmar nedåt i tunneln. Återflödet sker genom expansionskanalen. Vid beräkningen har passning av strömningsmotståndet gjorts så att temperaturen överst i tunneln stämmer med uppmätta värden. Uppmätta och beräknade värden återges i tabellen nedan.

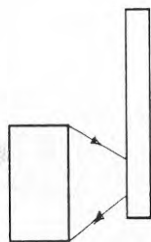
		uppmätt	beräknat
topp	max	46	46.4
	min	41	40.4
P8		46.9	46.3
		40.8	40.3
P11		46.8	44.1
		40.5	38.9
P14		46.6	39.8
		40.2	36.3

Tabellen visar att de beräknade temperaturerna på nivå P11 och framför allt nivå P14 är för låga. Vid transporten nedåt i tunneln (under inloppsnivån i tunneln) tappar vattnet så mycket värme till omgivningen att temperaturen sjunker för mycket jämfört

med mätta värden.

Det antagna flödesförloppet återger uppmätt temperaturförlopp väl förutom minimumtemperaturen på P11-nivån och både min- och maxtemperaturen på P14-nivån.

Fall 3



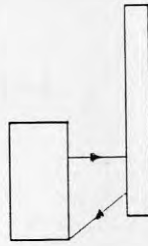
Fall 3

Vattnet går från bergrummets topp snett nedåt till tunneln. Återflödet sker genom tunnel och expansionskanal. De beräknade temperaturerna i tunnelns topp varierar inom ett stort intervall under året. Passning av $R_{sp,ref}$ kan göras så att antingen max- eller min-temperatur stämmer med uppmätta värden. Temperaturintervallet för vattnet i tunnelns översta del blir 41-63 eller 34-47 °C. Vid korrekt max-temperatur blir min-temperaturen för låg.

Temperaturförloppets avvikelse från Fall 2 kan förklaras med att under lagrets urladdade period förses tunneln med för liten tillförsel av varmt vatten från bergrummet. Bergrummets översta del har hög temperatur hela året. Den övre, nedåtriktade förbindelsekanalen får hög temperatur även under den period när lagret är som mest urladdat. Det drivande trycket på vattenflödet blir därmed under denna tidperiod mindre än i Fall 2 där förbindelsekanalen är horisontell.

Det antagna flödesförloppet kan ej återge de uppmätta temperaturerna.

Fall 4



Fall 4

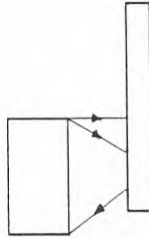
Vattnet lämnar bergrummet i nivå med den näst översta tunnelanslutningen (se figur 1 och 5) och går horisontellt ut till tunneln. Återflöde sker genom tunnel och expansionskanal. Uppmätta och beräknade värden återges i tabellen nedan.

	uppmätt	beräknat
topp	46	50.4
max		
min	41	36.8
P8	46.9	50.4
	40.8	36.8
P11	46.8	50.4
	40.5	36.8
P14	46.6	50.4
	40.2	36.8

Den beräknade tunneltemperaturen varierar inom ett för stort intervall. Liksom i Fall 3 blir det drivande trycket för litet under tidsperioder när bergrummet är urladdat.

Det antagna flödesförloppet kan ej återge de uppmätta temperaturena.

Fall 5



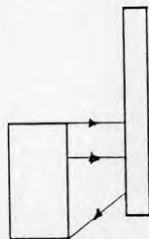
Fall 5

Fallet innebär en kombination av två flödesvägar enligt Fall 2 och 3. Fallet kan till exempel beskriva effekten av ett snett sprickplan som förbinder berggrummets översta del med tunneln på olika nivåer. Mätta och beräknade värden ges i tabellen nedan. Beräkningarna har utförts med $R_{sp,ref} = 10 \cdot 10^6$ för den övre förbindelsekanalen samt $R_{sp,ref,nedre} = 5 \cdot 10^6$ och $10 \cdot 10^6$ (Pa/(m³/s)) för den nedre.

	uppmätt	beräknat		
		$R_{sp,ref,nedre} = 10 \cdot 10^6$	$R_{sp,ref,nedre} = 5 \cdot 10^6$	
topp	max	46	45.5	48.1
	min	41	39.0	39.6
P8		46.9	44.6	48.1
		40.8	38.9	39.5
P14		46.6	44.6	48.1
		40.2	36.7	37.6

Resultatet ligger nära de uppmätta värdena men uppvisar ett något för stort temperaturintervall och något för låg min-temperatur på nivå P14. Med det lägre motståndet är temperaturdifferensen mellan min-temperatur vid tunnelns topp och P14-nivån 2.0 °C att jämföra med 4.1 °C för Fall 2 med endast en övre strömningsväg. Temperaturprofilen är något jämnare i vertikalled än vad som erhålles enligt Fall 2.

Fall 6



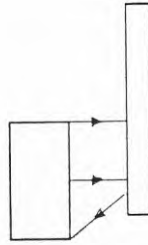
Fall 6

Fallet innebär en kombination av flödesvägar enligt Fall 2 och 4. Beräkningen har gjorts med $R_{sp,ref}$ -värdet $10 \cdot 10^6$ för både den övre och den nedre förbindelsekanalen till tunneln. Uppmätta och beräknade värden ges i tabellen nedan.

		uppmätt	beräknat
topp	max	46	47.1
	min	41	39.5
P8		46.9	47.1
		40.8	39.5
P11		46.8	47.1
		40.5	38.7
P14		46.6	47.1
		40.2	38.3
exp.rör			40.6
			34.0

Resultatet ligger nära de uppmätta värdena men uppvisar något för stort temperaturintervall och något för låga min-temperaturer.

Fall 7



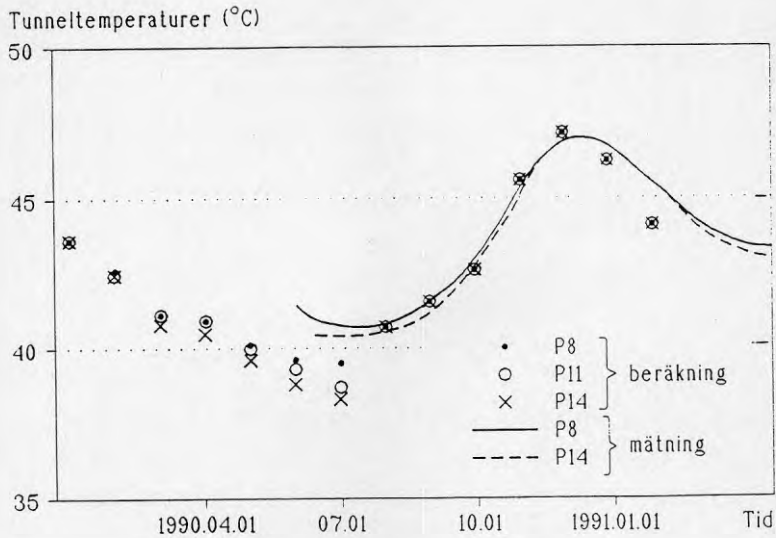
Fall 7

Den horisontella flödesvägen enligt Fall 2 kompletteras med en horisontell flödesväg från den nedersta tunnelanslutningens översta del. Beräkningen har gjorts med $R_{sp,ref}$ -värdena $10 \cdot 10^6$ för både den övre och den nedre kanalen. Mätta och beräknade värden ges i tabellen nedan.

		uppmätt	beräknat
topp	max	46	47.5
	min	41	38.7
P8		46.9	47.5
		40.8	38.7
P14		46.6	47.5
		40.2	38.5

Fallet återger temperaturvariationen i tunneln på ungefär samma sätt som Fall 5 och 6.

Strömningsvägarna i fallen 5-7 liknar alla Fall 2 med skillnaden att tunneln dessutom förses med vatten från bergrummet till en lägre nivå i tunneln. Denna tillförsel av bergrumsvatten innebär att de i Fall 2 för låga tunneltemperaturerna lyfts till en högre temperaturnivå. Fall 6 får representera denna grupp av strömningsfall. Vid korrekta beräknade max-temperaturer i hela tunneln blir min-temperaturerna i tunneln 1.5-2 °C för låga.



Figur 6. Uppmätta och beräknade (Fall 6) tunneltemperaturer

Figur 6 visar mätta och beräknade tunneltemperaturer enligt Fall 6. Den termiska dynamiken i beräkningen stämmer väl överens med mätningarna. Den uppmätta temperaturstegringen under sommaren och hösten återges utmärkt. Under vinter och vår sjunker de beräknade temperaturerna lite för snabbt. Avvikelsen är dock mindre än cirka 2 °C.

Temperaturdifferensen mellan mätta temperaturer i punkterna P8 - P14 varierar under året. En likartad variation erhålles i de beräknade temperaturerna.

6.1.2 Sprickgeometri

Beräkningsresultaten ovan ger vid handen att ett för strömningsvägarna typiskt sprickmotstånd vid referenstemperaturen 85 °C är av storleksordningen $R_{sp}(85) = 10 \cdot 10^6$ (Pa/(m³/s)). Enligt tidigare har man:

$$R_{sp}(T) = R_{sp,geom} \cdot \mu(T)$$

Med $\mu(85) = 335 \cdot 10^{-6}$ (kg/(ms)) kan $R_{sp,geom}$ (1/m³) beräknas:

$$R_{sp,geom} = 29.9 \cdot 10^9$$

$R_{sp,geom}$ bestäms av sprickans geometri. För en ideal spricka med den konstanta sprickvidden b , längden L i flödesriktningen och bredden B (m) erhålles enligt referens 2 följande samband:

$$R_{sp,geom} = \frac{12L}{b^3 \cdot B} = 29.9 \cdot 10^9$$

Om vi ersätter vårt sprickssystem med denna *ekvivalenta* ideala spricka erhålles

$$b = \sqrt[3]{\frac{12L}{B \cdot 29.9 \cdot 10^9}} = \sqrt[3]{L/B} \cdot 0.737 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

Man erhåller för $L = B = 10, 1$ eller 0.1 m:

$$\frac{L}{B} = 1 \quad \rightarrow \quad b = 0.74 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

Kombinationen $L=5$ m och $B=0.5$ m eller $L=1$ m och $B=0.1$ m ger:

$$\frac{L}{B} = 10 \quad \rightarrow \quad b = 1.5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

Kombinationen $L=2$ m och $B=20$ m ger:

$$\frac{L}{B} = 0.1 \quad \rightarrow \quad b = 0.34 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

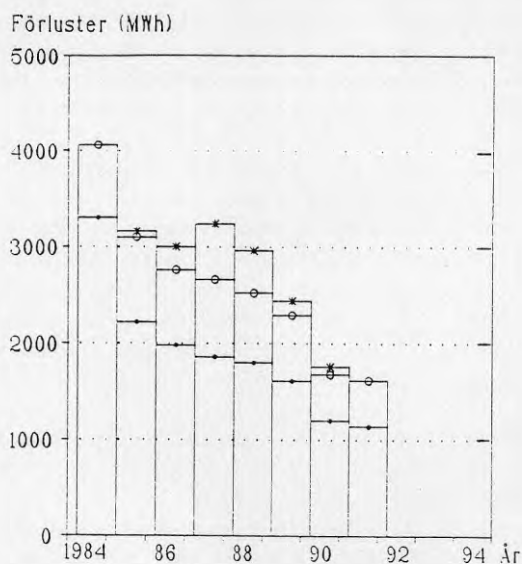
De erhållna värdena på sprickvidden b överensstämmer med de skattade värdena enligt referens 2 (1987) där storleksordningen angavs till $b \approx 1$ mm.

Det bör observeras att de två fallen där sprickplanet är $10 \cdot 10$ m² och $0.1 \cdot 0.1$ m² ger samma strömningsmotstånd.

6.1.3 Energimängder

Följande tabell visar beräknade *konvektiva* värmeförluster från bergrummet på grund av vattenutbytet med tunneln enligt Fall 6.

år	MWh
83/84	763
/85	901
/86	836
/87	763
/88	736
/89	667
/90	494
90/91	520



Figur 7. Uppmätta totala (*) samt beräknade konduktiva (•) och konduktiva + konvektiva (o) förluster

Figur 7 visar mätta förluster och beräknade konduktiva och konvektiva förluster enligt Fall 6. Avståndet mellan uppmätta och beräknade värden har krympt betydligt. Det är endast åren 86/87 och 87/88 som ger stora avvikelser. Enligt uppgift ryms dessa större avvikelser inom den osäkerhet som är förknippad med utförda energimätningar.

Den mindre avvikelse som erhålles för övriga år skulle kunna reduceras ytterligare något enligt följande *spekulativa* resonemang. Enligt analysen ovan av den temperaturvariation som erhålles med kombinationen av två slutna strömningsvägar får man något för låga minimum-temperaturer i tunneln. Om man antar att man har en tredje flödesväg på lägre nivå från berggrum till tunnel kommer berggrummet, vars temperatur i de nedre regionerna är 45-50 °C, att kunna "lyfta" tunneltemperaturen till uppmätta nivåer. Detta betyder ett utökat vattenutbyte mellan berggrum och tunnel och därmed en ökad konvektiv värmetransport från berggrummet. Effekten av denna process på de totala konvektiva förlusterna från berggrummet torde dock vara liten.

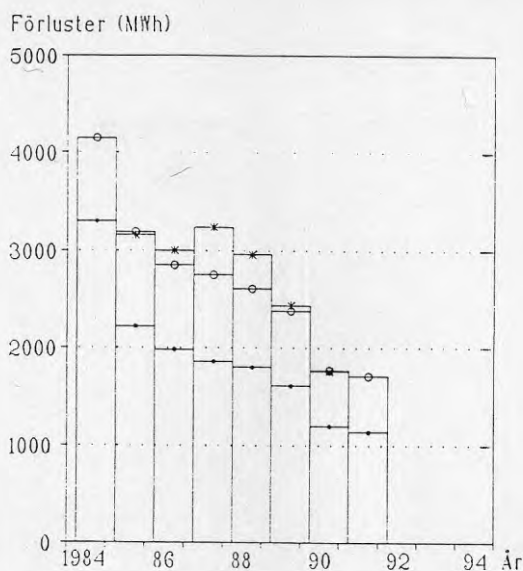
En fysikaliskt motiverad energiförlust som inte beskrivs av beräkningsmodellen har sin grund i *vattens volymförändring* vid olika temperaturer. När 100 000 m³ värms från 50 till 80 °C ökas volymen med cirka 2000 m³. Denna vattenvolym trängs genom expansionskanalen ut i tunneln varvid vattenytan i tunnelns översta del stiger. Tunnelns horisontella

tvärsnittsytta är cirka 200 m² varför höjningen motsvarar 10 m. Det är rimligt att detta cirka 45-gradiga vatten vid tunnelns översta del rinner bort längs grundvattenytan. När berggrummets temperatur sjunker minskar vattenvolymen och motsvarande vattenvolym rinner (sugs) tillbaka in i berggrummet. Tunnelvattnets överyta sjunker motsvarande 10 m och grundvatten rinner in till tunnelns övre del. Skiftet av denna vattenvolym där vatten med cirka 45 °C ersätts av vatten med cirka 6 °C motsvarar en värmeförlust av omkring 90 MWh.

Det nämnda förloppet innebär att tunneln under kylningsperioder av lagret tar emot grundvatten vid tunnelns överyta. Detta kalla vatten kommer att blanda sig nedåt i tunneln så att en stabil temperaturprofil erhålles i tunneln. Den ökade avkylningen av tunnelvattnet kan kompenseras av att de passade sprickmotstånden minskas något varvid man får ett ökat tillskott av varmt vatten till tunneln. Se även trendbrottet i mätta tunneltemperaturer (juli/augusti 1990) under en kortare urladdningsperiod i lagret. Trendbrottet indikerar en ökad avkylning i tunneln under den kortare urladdningsperioden.

Vattenkemiska analyser indikerar att tillskottet av vatten från omgivningen är maximalt cirka 3000 m³ under en observerad 20 månaders period. Värdet överensstämmer väl med vad som skulle erhållas genom ovan nämnda "expansionsomsättning" av vatten i berggrummet. Observationen innebär även att möjligheten av ett större nettovattenflöde från omgivningen genom berggrummet kan uteslutas.

Introduktion i beräkningsmodellen av nämnda grundvattenflöde till tunneln skulle, i kombination med en enda strömningsväg enligt Fall 2, genom större vattenomblandning troligen innebära en jämnare beräknad temperaturfördelning i vertikalled i tunneln än vad som redovisas i fall 5-7. En ytterligare förbättring av överensstämmelsen mellan mätning och beräkning skulle erhållas. Volymen 2000 m³ kan jämföras med de årliga volymflöden genom de två sprickplanen enligt Fall 6. Se avsnitt 6.1.5.



Figur 8. Uppmätta totala (*) samt beräknade konduktiva (•) och konduktiva + konvektiva (o) förluster inklusive expansionsförluster

Figur 8 visar mätta förluster och beräknade konduktiva och konvektiva förluster inklusive expansionsförluster enligt ovan. Strömningsvägar är definierade enligt Fall 6. De större avvikelserna under åren 86/87 och 87/88 ryms enligt uppgift inom den osäkerhet som är förknippad med utförda energimätningar.

6.1.4 Några spekulativa diskussioner

En *spekulativ* variant av expansionsförluster är följande. Om lagret på grund av nämnda expansion i stället förlorar vatten från berggrummets topp med temperaturen 85 °C och detta ersätts av grundvatten med temperaturen 6 °C så skulle detta motsvara en värmeförlust av 184 MWh. Flödet från berggrummets topp måste passera en strömningskanal med mindre strömningsmotstånd än det som erhålles via expansionsröret så att det blir vatten från berggrummets topp som trycks ut.

En *spekulativ* variant av Fall 1 är följande. Typiskt för tunneltemperaturerna vid strömning enligt Fall 1 är att de sjunker kraftigt med ökande djup i tunneln. Ett ökat vattenflöde genom tunneln skulle kunna medföra en jämnare temperaturprofil. För att inte tunnelns temperaturer skall stiga ytterligare jämfört med Fall 1 antas att vattnet som lämnar berggrummets topp avkyles till lämplig nivå under transporten till tunnelns övre

del. Denna variant fungerar dock inte av följande skäl.

De årliga *konvektiva* förlusterna från bergrummet för Fall 1 och 6 ges av tabellen nedan.

år	Fall 6 MWh	Fall 1 MWh
83/84	763	1222
/85	901	1278
/86	836	1124
/87	763	1018
/88	736	962
/89	667	891
/90	494	711
90/91	520	690

Förlusterna enligt Fall 6 ger tillsammans med expansionsförluster enligt tidigare totala förluster som ligger nära uppmätta värden. Vid cirkulationsväg enligt Fall 1 måste vattenflödet öka kraftigt för att temperaturvariationen i vertikalled längs tunneln skall bli liten. Vattnet som lämnar bergrummet har emellertid oförändrat hög temperatur. Med till exempel dubbla volymflödet skulle de konvektiva bergrumsförlusterna bli dubbelt så stora som enligt Fall 1 i tabellen ovan. Ett förlopp av denna typ är *inte förenligt med uppmätta förluster*.

En annan *spekulativ* strömningsvariant är följande. Antag att bergrummets topp är i vertikalled förbunden med någon avtappningsmöjlighet. Man skulle då på grund av tryckskillnaden i bergum och tunnel kunna få ett nettovattenflöde från grundvattennivå nedåt genom tunneln, genom expansionsröret, uppåt genom bergrummet och vidare genom den tänkta avtappningsvägen. Man skulle då få ett grundvattenflöde till tunnelns övre del av grundvatten med temperaturen 6 °C . För att lyfta tunneltemperaturerna till uppmätta temperaturnivåer har man dessutom en flödesväg enligt Fall 2 vid vilken varmt vatten lämnar bergrummets topp och går horisontellt ut till tunneln. Man erhåller då en omblandning i tunnelns övre del och man erhåller en jämn temperaturprofil kombinerat med ett nedåtriktad vattenflöde genom hela tunnelns längd.

Med denna tänkta strömningskombination av kylning uppifrån och värmning nedifrån torde man kunna efterlikna uppmätta tunneltemperaturer samt, genom lämplig kombination av strömningsmotstånd längs de två strömningsvägarna, dessutom kunna åstadkomma fritt vald storlek på de konvektiva förlusterna från bergrummet.

Varianten kräver emellertid en tänkt vertikal avtappningsväg från bergrummets topp vilken hittills inte blivit observerad och genom vilken stora mängder (tusentals kubikmeter) 85-gradigt vatten skulle passera obemärkt. Detta verkar mindre troligt. Beräkningmässigt skulle varianten kunna testas genom att vattenflödena till och från tunneln får påverka temperaturerna i bergrummet. Beräknade temperaturer i bergrummet skulle sedan kunna jämföras med uppmätta värden. Eventuellt kan man få tillräckligt stor upplösning för att kunna göra någon bedömning.

Emellertid behöver inte större förluster förklaras än vad som sker enligt Fall 6 i kombination med expansionsförluster. Dessutom indikerar vattenanalyser att ett vattengenomflöde av denna typ inte är för handen.

6.1.5 Vattenflöden

Det beräknade årliga vattenflödet genom de två strömningskanalerna enligt Fall 6 ovan ges av följande tabell:

år	övre kanal (m ³)	nedre kanal (m ³)
83/84	7650	3320
/85	10800	4910
/86	10800	5190
/87	9670	4390
/88	9940	4700
/89	9350	4430
/90	7580	3070
90/91	7700	3420

Vattenflödet genom den nedre kanalen är mindre än flödet genom den övre. Detta orsakas av flera samverkande faktorer. Den drivande kraften är mindre i den nedre strömningskretsen då såväl vertikal utsträckning som medeltemperaturdifferens mellan berggrum och tunnel är mindre än för den övre slingan. Vidare är temperaturen på det vatten som rinner genom förbindelsen berggrum/tunnel lägre för den nedre kanalen. Vattnets viskositet har därmed större värde och strömningsmotståndet blir större.

6.1.6 Slutsats

Beräkningarna av tunneltemperaturer och konvektiv värmetransport från berggrum till tunnel stöder hypotesen att tunneln ingår i en sluten vattenströmningskrets där varmt vatten lämnar berggrummet, avkyles vid passagen genom tunneln och därefter återföres på en lägre nivå i berggrummet.

De uppmätta tunneltemperaturernas temperaturnivåer och tidsdynamik möjliggör analyser av strömningsvägarnas geometri enligt följande:

A Det termiska förloppet i tunneln är känsligt för strömningsvägens geometri. Fel strömningsvägar ger fel termiskt förlopp i tunneln. Följande slutsatser kan göras:

- Utloppet från berggrummet måste ligga nära berggrummet topp. I annat fall blir den drivande kraften på vattencirkulationen berggrum/tunnel för liten under de perioder lagret är urladdat.
- Anslutningen till tunneln kan *ej* vara belägen

- vid tunnelns topp.
Det erhållna termiska förloppet i tunneln avviker kraftigt från mätta värden.
- flera meter under berggrummets taknivå.
Det erhållna termiska förloppet i tunneln avviker kraftigt från mätta värden.

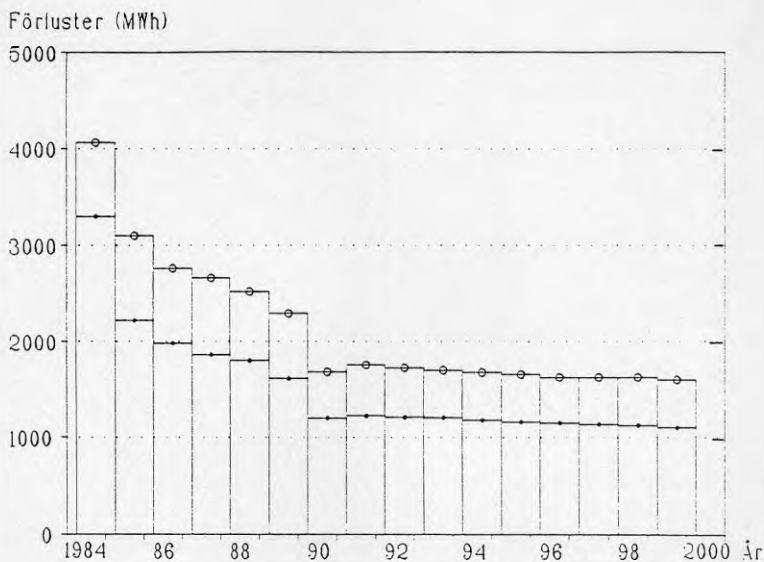
Detta indikerar att huvudströmningsvägen går från berggrummets topp och ungefär horisontellt ut till tunneln. Ju högre upp anslutningen ligger i tunneln desto större blir avvikelserna från mätta temperaturer.

- B Sålunda bestämd strömningsväg ger *ett enda möjligt strömningsmotstånd* för att korrekta tunneltemperaturer skall erhållas vid beräkningen. Detta strömningsmotstånd motsvaras till exempel av en spricka med bredden 0.1 m, längden 1 m och öppningen cirka 1 mm.
- C De på detta vis definierade strömningsförutsättningarna bestämmer de konvektiva förlusterna enligt Fall 6. Till dessa förluster skall tidigare nämnda årliga expansionsförluster om cirka 90 MWh adderas. Se figur 8.

6.2 Prognos till år 2000

I tabellen nedan visas resultat från en beräkning där bergrumslagret står i hydraulisk kontakt med tunneln via två slutna strömningskretsar enligt Fall 6 ovan. Tabellen ger årliga energiförluster från berggrummet. Beräkningen omfattar 16 årscykler vilket innebär att berggrummet följts fram till år 1999. En årscykel innebär tiden från 1.4 till 31.3 följande kalenderår. Den första säsongen 83/84 börjar dock i mars och omfattar därför 13 månader. Det senaste året med kompletta mätta bergstumtemperaturer har använts år efter år som bergstumtemperaturer från 1990. Se även figur 16.

år	konduktiva förluster	konvektiva förluster	totala förluster
	MWh	till tunnel MWh	(avrundade) MWh
83/84	3315	764	4080
/85	2213	901	3110
/86	1946	836	2780
/87	1866	763	2630
/88	1798	736	2530
/89	1603	667	2270
/90	1196	494	1690
/91	1237	520	1760
/92	1219	507	1730
92/93	1201	504	1710
95/96	1152	492	1640
98/99	1120	479	1600



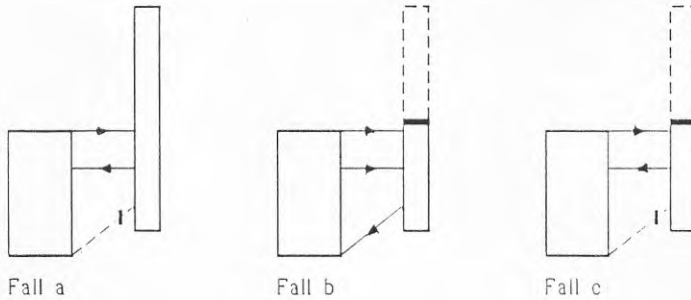
Figur 9. Beräknade bergrumsförluster 1983-1999 enligt Fall 6.
 Konduktiva (●) och konduktiva + konvektiva förluster (○)

De totala förlusterna under lagringssäsongen 90/91 är 1760 MWh (avvikelsen mellan förlusterna under åren 90-92 mellan figurerna 7 och 9 beror på att mätdata för bergrumstemperaturerna fanns tillgängliga endast till februari 1991. Fiktiva bergrumstemperaturer ordnades på något olika sätt vid de två beräkningarna). Efter ytterligare åtta säsonger är de totala förlusterna 1600 MWh vilket innebär en minskning med 9 %. Det framgår av tabellen att lagerförlusterna endast ändrar sig långsamt efter de tio första lagringscyklerna. Säsongen 89/90 visar en lägre förlust än de omgivande säsongerna. Detta beror på lägre temperaturnivåer i lagret under denna säsong.

6.3 Effekt av olika åtgärder

De konvektiva förlusterna som är redovisade i tabellen ovan är ett resultat av de antagna cirkulationsvägarna mellan bergrum och tunnel (två slutna kretsar). Man kan från denna utgångspunkt undersöka olika möjligheter att begränsa effekterna av den hydrauliska kontakten mellan bergrum och tunnel. Tre olika varianter har studerats med beräkningsmodellen. I figur 10 visas åtgärderna schematiskt. Deras resultat redovisas i

tabellen nedan.



Figur 10. Schematiskt beskrivna blockeringsåtgärder

Fall a innebär att flödet i expansionskanalen mellan bergrummets botten och tunneln har blockerats. Den slutna strömningskretsen omfattar därmed bergrum, övre förbindelsekanal, tunnel och nedre förbindelsekanal. Vattenflödet bromsas av flödesmotståndet i båda förbindelsekanalerna. Det drivande trycket på vattencirkulationen reduceras då nivåvariationen i den slutna kretsen är mindre än i Fall 6.

Fall b innebär att tunneln blockerats i nivå med bergrummets tak. I övrigt är strömningens geometri densamma som i Fall 6. Effekten av denna åtgärd är att en mindre del av tunneln kommer att bli uppvärmd av vattnet från bergrummet. Tunnelns funktion som yttre "kyllfläns" till bergrumslagret kommer därigenom att minska i betydelse.

Fall c är en kombination av åtgärderna i Fall a och Fall b.

år	Fall 6	Fall a	Fall b	Fall c
	MWh	MWh	MWh	MWh
83/84	764	157	199	147
/85	901	214	321	185
/86	836	246	353	198
/87	763	255	317	197
/88	736	257	316	190
/89	667	249	288	177
/90	494	208	208	142
/91	520	190	215	135
/92	507	186	209	132
92/93	504	185	207	131
95/96	492	184	200	129
98/99	479	182	195	126

I tabellen ovan visas de konvektiva förlusterna för de fyra definierade fallen under lagringssäsongerna 1983-1999. De förändrade geometrierna har ansatts från beräkningens *start*. Fall a avser således ett fall där expansionsröret inte konstruerats. Tabellen visar att förlusterna ändrar sig långsamt efter de tio första lagringssäsongerna. Åtgärder enligt Fall a (blockering av expansionskanalen) minskar förlusterna från 479 till 182 MWh under det sextonde året. Minskningen är cirka 300 MWh (60 %).

Fall b (blockering av tunneln) innebär ungefär samma reducering av de konvektiva förlusterna som Fall a. Blockeringen av tunneln ovanför bergrummets taknivå minskar den uppvärmda längden av tunneln med ungefär 60 %. Likheten mellan effekten av de två åtgärderna är en tillfällighet. Man kan se att de två fallen innebär olika tidsförlopp för den konvektiva förlusten. Största förlusten för Fall a inträffar under den femte säsongen. Fördröjningen jämfört med Fall 6 och 3 torde bland annat bero på att återflödet från tunnel till bergrum i fall a sker genom ett sprickplan med icke försumbart flödesmotstånd. Detta innebär att temperaturen på returvattnet från tunneln påverkar viskositeten och därmed flödesmotståndet i återflödeskanalen. Returvattnets temperatur är låg från början och stiger sedan säsong för säsong. Denna höjning medför minskat strömningsmotstånd i returkanalen. Temperaturhöjningen i tunneln medför samtidigt ett minskat drivande tryck på cirkulationen. Efter de fem första åren blir denna effekt dominerande och värmeförlusterna minskar.

Kombinationsåtgärder enligt Fall c medför att förlusterna minskar från 479 till 126 MWh under det sextonde året (säsongen 98/99). Minskningen är cirka 350 MWh (74 %).

För de redovisade fallen har strömningegeometrin varit oförändrad genom hela beräkningen. Fall a visar således hur de konvektiva förlusterna skulle varit om expansionskanalen varit blockerad från början. Om kanalen varit öppen till och med säsongen 91/92 och därefter blockeras kommer den konvektiva förlusten under det följande året inte att bli 185 MWh som det anges i tabellen ovan. Förlusterna under det första blockerade året blir mindre eftersom berget runt tunneln i denna situation är mer uppvärmt än det skulle vara med en från början blockerad expansionskanal. Förlusterna torde emellertid redan efter något år svänga in mot de värden runt 180 MWh som erhålles i Fall a enligt tabellen.

De beräknade förlusterna för säsongen 98/99 bör således ge riktlinjer för hur mycket man kan sänka värmeförlusterna från lagret. Detta förutsätter att vattencirkulationen till och från bergrummet verkligen går i de antagna strömningsvägarna och att vattenflöden verkligen kan stoppas enligt de antagna förutsättningarna. Förekommer till exempel flera flödesvägar mellan bergrummets nedre del och tunneln (till exempel på grund av sprickor, poröst berg eller av andra orsaker) hjälper det inte att blockera expansionskanalen. Man har i alla fall kvar en situation med två slutna strömningsvägar för vilken de utförda beräkningar gäller.

7 Sammanfattning

Analys av resultat från mätningar och beräkningar visar klart att man har en sluten vattencirkulation genom bergrummet och den runt om bergrummet liggande tunneln. Flera parallella strömningsvägar kan finnas men huvudflödet måste gå från bergrummets topp och ut till tunneln. Tillbakaflödet till bergrummet torde ske genom det konstruerade

expansionsröret som förbinder bergrummets botten med tunneln.

Varmt vatten lämnar bergrummets topp, kyls under passagen av tunneln och återföres till bergrummets botten. Bergrummet belastas på detta sätt av en konvektivt betingad värmeförlust. Denna vattencirkulation orsakar den större delen av de ökade värmeförlusterna från värmelagret. Jämförelser mellan mätta och beräknade energiförluster visas i figur 7.

På grund av volymexpansionen (baserad på att hela lagervolymen pendlar mellan 50 och 80 °C) kommer vattnet i tunnelns översta del att rinna ut över grundvattenytan för att senare, när volymen minskar, ersättas av grundvatten med temperaturen 6 °C. Detta förorsakar en ytterligare årlig förlust om cirka 90 MWh. Vattenanalyser visar ett grundvattentillflöde till bergrummet som motsvarar volymexpansionen. Figur 8 visar mätta och beräknade värmeförluster inklusive nämnda expansionsförluster. De större avvikelserna under åren 86/87 och 87/88 ryms enligt uppgift inom den osäkerhet som är förknippad med utförda energimätningar.

Figur 9 visar beräknade årliga förluster för lagret fram till 1999 under förutsättning av oförändrade driftsvillkor. Säsongen 90/91 är förlusterna 520 MWh och 98/99 är förlusterna 480 MWh (exklusive expansionsförluster).

7.1 Åtgärder för att minska förlusterna

De konvektiva förlusterna orsakas av förekomsten av en stor "kylfläns" (tunneln) och en sluten strömningsväg genom kylflänsen. Några förslag till åtgärder är

1. Minska effekten av kylflänsen

Blockering av tunnelns övre del i nivå med bergrummets tak. Detta medför att förlusterna reduceras från cirka 500 MWh till cirka 200 MWh

2. Bryta den slutna slingan

Detta medför att förlusterna reduceras från cirka 500 MWh till cirka 200 MWh

Det är av viss betydelse var slingan bryts. Detta har sin orsak i tidigare nämnda volymexpansion av bergrummets vatten. Antag att tunneltemperaturen sjunker till 20 °C när den slutna slingan bryts upp. Om övre strömningsvägar tätas kommer 50-gradigt bottenvatten från bergrummet att ersättas av 20-gradigt tunnelvatten genom expansionsröret. Om i stället expansionsröret är blockerat kommer 85-gradigt toppvatten att ersättas av 20-gradigt tunnelvatten. Expansionsförlusterna för de två fallen blir 70 respektive 150 MWh.

7.2 Förändrad lagerkonstruktion

Vid konstruktionen av ett bergrumslager skall man undvika konvektiva förluster och expansionsförluster.

Konvektiva förluster kräver att man har ett kontinuerligt vattenflöde längs en sluten strömningsväg. I denna strömningsväg måste en tillräckligt stor kylfläns ingå. En sådan fläns kan utgöras av en konstruktionstunnel. En sluten slinga innebär att det måste finnas två kanaler på olika nivåer mellan bergrum och konstruktionstunnel.

Några ideer om hur en sluten slinga kan undvikas är

1. Expansionsvolym

Expansionsrörelser kan tas upp av en helt separat konstruktion. Man kan till exempel ha ett vertikalt rör från lagrets botten upp till en värmeisolerad volym av tillräcklig storlek ovanför bergrummet. Ingen del av detta system får ha hydraulisk kontakt med omgivningen. För att få de konvektiva förlusterna måste *två strömningsvägar* mellan bergrum och tunnel uppstå av andra orsaker.

2. Konstruktionstunnlar och anslutningar till bergrummet

Huvudtunneln från markyta till botten av bergrummet bör dras så långt bort från bergrummet att tunneln ligger i ett område med liten termisk påverkan från bergrummet. Detta minskar sannolikheten för att man skall få termiskt orsakade sprickbildningar som når hela vägen mellan bergrum och tunnel. Om sprickan skulle nå hela vägen kommer spricköppningen troligen att vara mindre än om tunneln ligger på litet avstånd från bergrummet. Dessutom minskar vattenflödet och energiförlusten med en faktor 1000 om spricköppningen minskar med en faktor 10. Anslutningstunnlar mellan bergrum och huvudtunnel blir på detta sätt längre och de delar som är längst från bergrummet går genom en termiskt stabil miljö.

En god lösning kan vara att blockera anslutningstunnlar genom pluggning på *två* ställen med fyllning mellan pluggarna. Den yttre pluggen placeras så långt från bergrummet som möjligt. Fyllningen förhindrar konvektiv värmetransport mellan pluggarna. De yttre pluggarna verkar därmed i en termiskt stabil miljö varför temperaturspänningar i pluggar och omgivande berg är kraftigt reducerade. Risken för eventuell sprickbildning vid pluggarna minskas.

Man har i Lyckebo konstaterat sidoförskjutningar i borrhål nära lagrets topp. Denna sprickbildning har observerats efter uppvärmning av lagervolymen. Det är rimligt att anta att ett ringformat lager av Lyckebo-typ på grund av lagrets geometriska asymmetri (inåt/utåt) har större benägenhet till termiskt orsakad sprickbildning än ett lådformat lager. Bergrumslagret i Avesta (lådformat, 15 000 m³) har fungerat utan indikationer på vattenflöden i slutna slingor av den typ som förekommer i Lyckebo. Det kan således finnas skäl att undvika lagerkonstruktioner som innebär onödigt asymmetri och därmed ökad risk för sprickbildning i omgivande berg.

Erfarenheterna från Lyckebo-lagret visar att lagrets termiska funktion är känsligt för vattenflöden genom yttre strömvägar. Problemen kan emellertid bemästras genom en konstruktionsförändring. Vid byggande av nya bergrum bör man göra en termohydraulisk analys och utnyttja lärdomarna från Lyckebo.

8 Referenser

1. Claesson, Efring, Hellström. Studie av värmeförluster för Lyckebo värmelager i berg. 1981-04-14.
2. Claesson. Några synpunkter och funderingar angående de oväntat höga värmeförlusterna för värmelagret i Lyckebo. 1987-02-25.
3. Claesson. Synpunkter och förslag till åtgärder för värmelagret i Lyckebo. 1989-06-22.
4. Claesson. Termohydraulisk modell för bergrum och tunnel. 1989-06-22.
5. Efring. Delrapport över Lyckebo-projektet. 1990-11.
6. Efring, Claesson. Delrapport för Lyckebo-projektet. 1991-05-20.

R3:1993

ISBN 91-540-5506-7

Byggforskningsrådet, Stockholm

Art.nr: 6813003

Abonnemansgrupp:

Ingår ej i abonnemang

Distribution:

Svensk Byggtjänst

171 88 Solna

 **BYGGFORSKNINGSRÅDET**

Cirkapris: 87 kr inkl moms