



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

R6:1988

# Vattenströmning till och från borrhålsvärmelager

Bengt Åberg  
Sam Johansson

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Placé *Set*

*K/A*

Byggeforskningsrådet

R6:1988

VATTENSTRÖMNING TILL OCH FRÅN  
BORRHÄLSVÄRMELAGER

Bengt Åberg  
Sam Johansson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830631-5  
från Statens råd för byggnadsforskning till AIB,  
Anläggningsteknik AB, Solna.

## REFERAT

Projektet avser utveckling av metoder för att beräkna vattenutbytet mellan borrhålen i s k öppna borrhålssystem och det omgivande berget. Beräkningsmetoder har framtagits dels för småsprickigt berg och dels för berg med en markerad spricka, sprickzon eller krosszon.

Beräkningsexemplen för tredimensionell strömning i småsprickigt berg pekar mot att vattenläckaget från lagret blir olämpligt stort om bergets hydrauliska konduktivitet överstiger  $K = 1,0 \cdot 10^{-6}$  à  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

Preliminärt visar beräkningsexemplen för en enstaka grov spricka som skär genom lagret att vattenläckaget blir olämpligt stort om spricktjockleken överstiger ca 0,4 mm. Följaktligen bör, preliminärt, alla genomgående sprickor som är mottagliga för cementinjektering cementinjekteras inom och närmast runt omkring lagret.

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.

R6:1988

ISBN 91-540-4829-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1988

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

## FÖRORD

## SAMMANFATTNING

	Sid
1. PROBLEMORIENTERING	1
1.1 Borrhålsvärmelagers funktion	1
1.2 Borrhålsvärmelagers tekniska utformning	2
1.3 Utredningens syfte	3
2. BERÄKNING AV GRUNDVATTENFLÖDE I BERG	5
2.1 Bergets vattengenomsläpplighet	5
2.2 Naturligt grundvattenflöde	8
3. VATTENFÖRLUSTER FRÅN BORRHÅLEN TVÅDIMENSIONELL BERÄKNING	10
3.1 Inledning	10
3.2 Tvådimensionell beräkningsmodell	11
3.3 Beräkningsexempel 1	15
3.4 Beräkningsexempel 2	19
3.5 Beräkningsexempel 3	22
3.6 Inverkan av valet av influensradie	24
3.7 Inverkan av skillnad i densitet hos kallt och varmt vatten	25
3.8 Inverkan av vertikal vattenströmning från borrhålen	28
4. VATTENFÖRLUSTER FRÅN BORRHÅLEN TREDIMENSIONELL BERÄKNING	31
4.1 Beräkningsmodell för jämnsprickigt homogent berg	31
4.2 Kontroll av datorprogrammet	37
4.3 Superposition	38
4.4 Beräkningsexempel	40
4.4.1 Beräkningsexempel 4 - 11	41
4.4.2 Beräkningsexempel 12 - 14	43
4.4.3 Influensradie, grova sprickor, sprick- och krosszoner utanför värmelagret	49

5.	VATTENFÖRLUSTER FRÅN BORRHÅLEN GENOM EN ENSTAKA SPRICKA	54
5.1	Inledning	54
5.2	Transmissivitet	54
5.3	Beräkningsmodell	55
5.4	Beräkningsexempel 15 - 22	59
6.	REFERENSER	65

#### BILAGOR

Bil. 1 Resultat från beräkningsexempel 4 - 14

## FÖRORD

AIB Anläggningsteknik AB (tidigare Allmänna Ingenjörbyrå AB), Solna, har från BFR-Byggforskningsrådet erhållit ett anslag för projektet "Värme- och vattenströmning till och från borrhålssystem".

Projektet avser utveckling av metoder för att beräkna vattenutbytet mellan borrhålen i s k öppna borrhålssystem och det omgivande berget. Projektet slutredovisas i föreliggande rapport.

För projektet har AIB som specialist anlitat Tekn lic Bengt Åberg, Byggvägen 6, Rimbo, tel 0175-703 33.

Solna juni 1987

AIB Anläggningsteknik AB



Sören Andersson





## SAMMANFATTNING

Borrhålsvärmelager i berg består av ett stort antal borrhål som perforerar en bergmassa, fig 1.1, jfr /1/ och /2/. I borrhålen cirkuleras en vätska som tillför eller bortför värme från bergmassan. I ett öppet cirkulationssystem står vätskan, som är vatten, i direkt kontakt med berget, fig 1.2a. I ett slutet cirkulationssystem cirkuleras vätskan i ett ledningssystem och har ej någon kontakt med berget, fig 1.2 b och c.

Värmeförlusterna från ett borrhålsvärmelager består av värmeledning i berget och värmetransport via passerande grundvatten. Vid borrhålsvärmelager med öppet system kan vattenläckage från borrhålen orsaka ytterligare värmeförluster.

Värmeförlusterna som orsakas av vattenläckage beror av bergets permeabilitet och lagrets trycknivå. Beräkning av vattenläckaget har utförts dels för småsprickigt berg (homogent isotropt medium), dels för en enstaka grov spricka, sprick- eller krosszon som skär tvärs genom borrhålsvärmelagret.

För det småsprickiga berget gjordes först preliminära beräkningar med hjälp av en tvådimensionell modell och därefter mer exakta beräkningar med hjälp av en tredimensionell modell. Den senare beaktar även att fördelningen av vattentrycket inom lagret (i förhållande till grundvattentrycket) är ojämn p g a dels skillnaden i densitet mellan kallt grundvatten i berget och det varmare vattnet i borrhålen, dels strömning förluster i de rörledningar som förbinder borrhålen och de slangar som finns nedförda i borrhålen, fig 1.3.

För att förenkla beräkningarna förutsattes lagren ha cirkulär planform men beräkningsmetoderna kan lätt anpassas till lager av godtycklig planform. Jämförelser mellan de två- och tredimensionella beräkningarna visade att tredimensionella beräkningar är nödvändiga för att man skall få rätt uppfattning om vattenläckagets storlek och fördelning inom borrhålsvärmelagret.

I de tredimensionella beräkningarna delas borrhålen upp i små element, fig 4.1. Varje element betraktas som en linjekälla/linjesänka med känt vattentryck men okänd vattenföring till/från det småsprickiga berget. Genom tillämpning av superpositionsprincipen (laminär strömning) beräknas de okända vattenföringarna ur ett ekvationssystem som innehåller lika många ekvationer som antalet borrhålelement. Ekvationssystemet blir därför stort och beräkningarna måste genomföras med hjälp av en dator. Olika randvillkor vid bergytan liksom enstaka grova sprickor, sprick- eller krosszoner i berget kan beaktas genom spegling, fig 4.3 och 4.12.

Beräkningar för ett värmelagers olika driftsfall underlättas genom att olika tryckfördelningar inom lagret kan delas upp i fyra grundkomponenter, fig 4.5. För olika driftsfall kan sedan såväl det totala vattenläckaget från lagret som vattenläckagets fördelning inom lagret lätt beräknas genom superposition av grundkomponenternas vattenföringar.

Aktuella fördelningar av vattenföringar och vattentryck, se t ex fig 4.8, 4.9 och bilagorna 1.1-1.11, visar att vatten kan strömma ut från borrhålen i vissa delar av lagret samtidigt som vatten strömmar in i borrhålen i andra delar av lagret.

I beräkningarna för en enstaka grov spricka, sprick- eller krosszon som skär tvärs genom lagret antogs berget vara vattentätt på båda sidor om sprickan etc. Vattenströmningen i sprickan är då tvådimensionell och den behandlades med hjälp av superpositionsprincipen och spegling. Endast konstant vattentryck i lagrets borrhål behandlades men beräkningarna kan lätt vidareutvecklas så att komplicerade tryckfördelningar kan behandlas med hjälp av uppdelning i grundkomponenter.

Ett stort antal beräkningsexempel behandlar ett värmelager med 50 m radie och 468 borrhål som har längden 100 m, diametern 150 mm och inbördes avståndet 4 m. Såväl vattengenomsläpplig som vattentät (lertäckt e dyl) bergyta behandlas. Närmast bergytan finns 5 m forderrör, fig 4.6. Beräkningarna visar att vattenläckaget från lagret blir avsevärt större om bergytan är vattengenomsläpplig än om den är vattentät.

Beräkningsexemplen för tredimensionell strömning i småsprickigt berg pekar mot att vattenläckaget från lagret blir olämpligt stor om bergets hydrauliska konduktivitet överstiger  $K = 1,0 \cdot 10^{-6}$  à  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

Om pumpar, rörledningar m m som ingår i systemet för vattencirkulation genom borrhålen kan göras helt vatten- och lufttäta blir vattenläckaget från lagret automatiskt noll. Trots detta sker ett vattenutbyte mellan borrhålen och berget. Varmt vatten strömmar ut från borrhålen i vissa delar av lagret samtidigt som kallt grundvatten strömmar in i borrhålen i andra delar av lagret. Beräkningsmetoden kan vidareutvecklas så att den möjliggör detaljstudium av dessa vattenströmmar.

Preliminärt visar beräkningsexemplen för en enstaka grov spricka som skär genom lagret att vattenläckaget blir olämpligt stort om spricktjockleken överstiger ca 0,4 mm. Följaktligen bör, preliminärt, alla genomgående sprickor som är mottagliga för cementinjektering cementinjekteras inom och närmast runt omkring lagret. Dock bör ett injekteringsmedel som ger så litet utfällningar i värmeväxlare som möjligt användas.

## 1. PROBLEMIORIENTERING

### 1.1 Borrhålsvärmelagers funktion

Borrhålsvärmelager i berg består av ett stort antal borrhål som perforerar en bergmassa i vilken värme lagras. Uttag och laddning av värme sker genom att en vätska, vanligen vatten, cirkuleras genom borrhålen. Borrhålsvärmelagers tekniska utformning och funktion beskrivs närmare i t ex referens /1/.

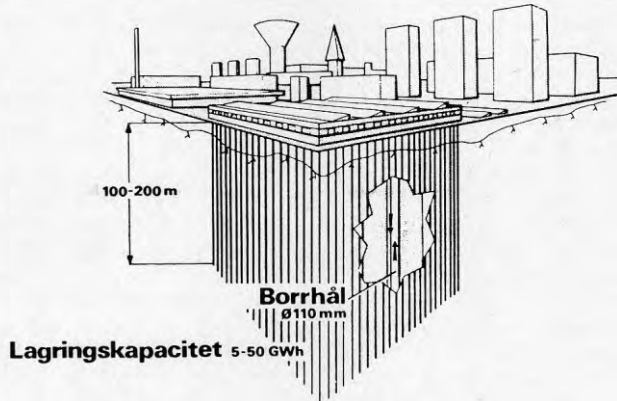


Fig 1.1 Skiss av ett borrhålsvärmelager

Värmeförlusterna från ett borrhålsvärmelager orsakas av värmeledning genom berget och bortförsel av värme genom passerande grundvatten. Förhållandet mellan dessa olika former av värmeförluster beror främst på bergets vattengenomsläpplighet. Vid berg som har liten vattengenomsläpplighet blir värmeförlusterna via grundvattnet små. Däremot kan en större genomgående spricka eller ett spricksystem transportera så stora vattenmängder att lagrets ekonomi äventyras.

Bergmassan är i mer eller mindre grad uppsprucken och sprickorna är under grundvattenytan vattenfyllda. Vattnet i sprickorna är alltid i rörelse och dess hastighet beror av sprickornas tjocklek och grundvattnets hydrauliska gradient. Då grundvattnet passerar genom borrhålsvärmelagret uppvärms grundvattnet och värmen transporteras till lagrets omgivning.

Vid öppet cirkulationssystem (se nedan under 1.2) kan eventuellt ytterligare en värmeförlust uppkomma genom att varmt vatten strömmar från borrhålen och ut i omgivande berg.

Borrhålsvärmelager utförs utan någon form av värmeisolerings vid lagrets sidor och botten. Värmeförlusterna som orsakas av värmeledning genom berget bestäms sålunda enbart av lagrets storlek, form och temperaturnivå samt av bergets värmeegenskaper /4/. Eventuellt kan lagrets överyta förses med värmeisolerings som minskar värmeförlusterna uppåt.

## 1.2 Borrhålsvärmelagers tekniska utformning

Borrhålsvärmelager kan utformas med ett öppet system där vatten cirkulerar genom borrhålen i direktkontakt med berget eller med ett slutet system där en vätska (vanligen vatten) passerar genom ett slutet rörsystem i borrhålen, fig 1.2. I det senare fallet är borrhålet mellan rörsystemet och berget fyllt med praktiskt taget stillastående vatten som har samma tryck som det omgivande grundvattnet.

I ett borrhålsvärmelager med öppet system avviker vattentrycket i borrhålen från det omgivande grundvattnets tryck vid laddning och uttag av värme. Detta innebär ökat vattenutbyte med omgivande berg och därmed eventuellt både en vatten- och värmeförlust från lagret. Genom en korrekt utformad driftstrategi med avseende på tryckförhållanden inom lagret kan de värmeförluster som orsakas av vattenströmning från lagret reduceras avsevärt. Mellan olika borrhål uppkommer också skillnader i vattentryck. Detta orsakar en ökad vattenströmning i spricksystemen inom lagret.

Borrhålsvärmelager med öppet system kan arbeta med en högre eller lägre trycknivå i borrhålen än den trycknivå som förekommer naturligt hos grundvattnet i omgivande berggrund. Högre trycknivå i lagret än i omgivande berg orsakar en utströmning av varmt vatten, varför nytt vatten måste tillföras lagret. Lägre trycknivå i borrhålen innebär en indragning av vatten och eventuellt en infångning av tidigare bortförd värme. Det till lagret indragna vattnet måste avledas.

Trycknivån i lagrets olika borrhål varierar vid olika driftsfall. Laddning av lagret sker lämpligast med början i lagrets centrala del och fortsätter ut mot lagrets periferi. Detta innebär högst trycknivå i de centralt belägna borrhålen. Vid uttag är förhållandet det motsatta, fig 1.3.

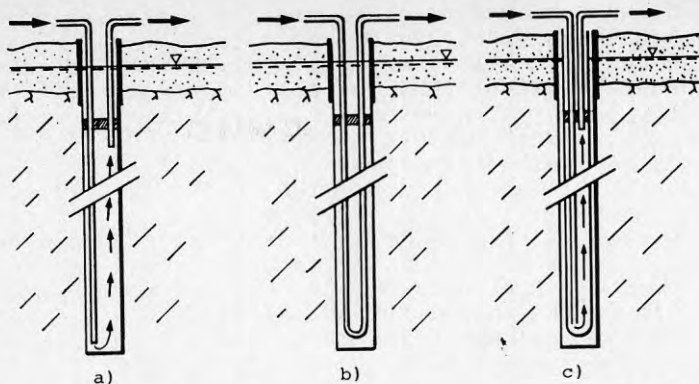


Fig 1.2 Cirkulationssystem  
 a) öppet system  
 b) och c) slutna system

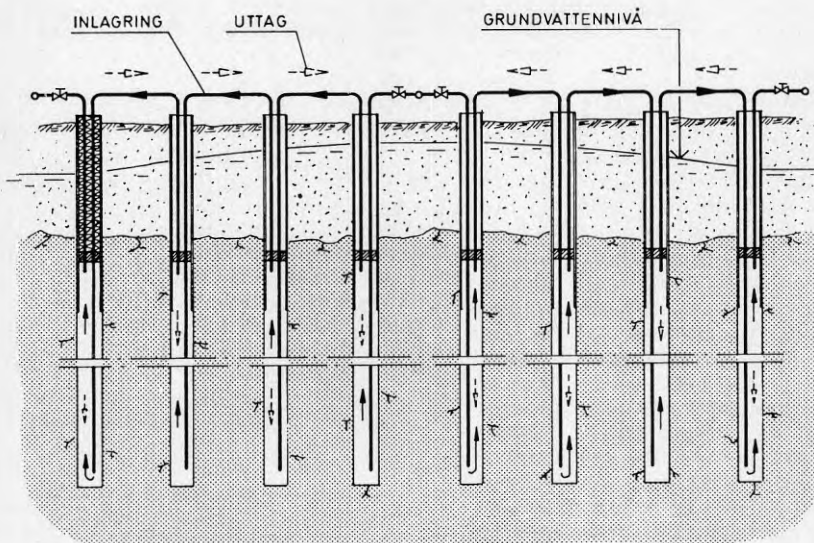


Fig 1.3 Trycksatt öppet system för vätsketransport inom lagret

### 1.3 Utredningens syfte

Syftet med den utredning som redovisas i föreliggande rapport har varit att utarbeta teoretiska beräkningsmodeller med vilkas hjälp man kan studera sambandet mellan trycknivå i borrhålsvärmelagrets olika

borrhål och det vattenutbyte som vid öppet cirkulationssystem sker mellan borrhålen och det omgivande berget samt att därefter med några beräkningsexempel belysa vattenutbytets storlek under olika förhållanden. För att minska beräkningsarbetet har utredningen begränsats till värmelager med cirkulär planform men beräkningsprinciperna kan användas även för lager med annan planform. Såväl två- som tredimensionell strömning i jämsprickigt berg har behandlats (Kapitel 3 resp 4). Med jämsprickigt berg menas här att relativt tätt liggande sprickor med ungefär samma tjocklek och inbördes avstånd förekommer i flera riktningar i berget. Berget kan då ur vattenströmningssynpunkt betraktas som ett homogent och isotropt poröst medium. De tvådimensionella beräkningarna utfördes som ett inledande förenklat studium. Såväl beräkningsmetoden som beräkningsresultaten är av underordnat intresse sedan de tredimensionella beräkningarna genomförts. Trots detta redovisas de tvådimensionella beräkningarna i rapporten. Motivet är bl a att en jämförelse mellan de två- och tredimensionella beräkningsresultaten visar på betydelsen av att man använder tredimensionell beräkningsmetodik vid studier av vattenutbytet mellan ett borrhålsvärmelager och det omgivande jämsprickiga berget.

Avslutningsvis (Kapitel 5) behandlas vattenförlusten från ett borrhålsvärmelager genom en enstaka grov bergspricka, sprick- eller krosszon som med godtycklig lutning skär tvärs igenom borrhålsvärmelagret. Berget antages i övrigt vara vattentätt.

Utredningens omfattning har inte medgivit någon fullständig parameterstudie som visar hur vattenutbytet mellan ett borrhålsvärmelager och det omgivande berget beror av lagrets storlek och form, borrhålens diameter och inbördes avstånd, fördelningen av vattentryck och temperatur inom lagret och andra faktorer. De beräkningsmetoder som redovisas utgör dock en utgångspunkt för sådana studier liksom också för genomräkning av konkreta projekt.

Utredningen kan ses som en fortsättning på den del av en tidigare utredning /1/ som behandlar bergets vattengenomsläpplighet och, fragmentariskt, vattenförluster från borrhålen.

## 2. BERÄKNING AV GRUNDVATTENFLÖDE I BERG

### 2.1 Bergets vattengenomsläpplighet

Bergets vattengenomsläpplighet har tidigare utförligt behandlats i /1/. Här skall endast delar av den där givna framställningen upprepas.

En bergmassas vattengenomsläpplighet beror av de sprickor och porer som finns i berget. I kristallina bergarter, såsom t ex granit och gnejs, finns dels mikrosprickor mellan bergartskristallerna, dels makrosprickor mellan bergblocken i bergmassan.

I vissa sedimentära bergarter, såsom t ex sandsten, finns dels fina porer mellan kornen, dels oftast makrosprickor mellan lager och block.

I kristallina bergarter är vanligen vattengenomsläppligheten hos en bergmassa helt beroende av de makrosprickor som i olika riktningar genomkorsar bergmassan. Mikrosprickorna bjuder så stort motstånd mot vattenströmning att bergblocken mellan makrosprickorna i här aktuellt sammanhang kan betraktas som vattentäta.

I hydrauliska beräkningar betraktas berget ofta som ett poröst medium. Bergets vattengenomsläpplighet kan då vid laminära strömningsförhållanden beskrivas med hjälp av begreppet hydraulisk konduktivitet,  $K$ , (flöde per areaenhet,  $m^3/s, m^2$ ) eller permeabilitet,  $k$ , ( $m^2$ ). Hydrauliska konduktiviteten,  $K$ , definieras genom Darcys ekvation

$$q = K \cdot I \quad (2.1)$$

där

$$q = \text{vattenflödet per ytenhet, } m^3/s, m^2$$

$$I = \text{hydrauliska gradienten, } m/m$$

Permeabiliteten beror endast av bergets egenskaper medan den hydrauliska konduktiviteten även beror av den strömmande vätskans viskositet och densitet. Sambandet mellan dessa storheter kan tecknas

$$K = k \cdot \frac{\rho g}{\mu} \quad (2.2)$$

där

$$\rho = \text{vätskans densitet, } kg/m^3$$

$$g = \text{tyngdacceleration, } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = \text{vätskans dynamiska viskositet, } kg/ms$$

Vattnets viskositet minskar med ökande temperatur, tabell 2:1. Om bergmassans permeabilitet är oförändrad ökar därigenom grundvattenflödet genom ett värme- lager vid ökande temperatur. Bergets värmeutvidgning

kan dock medföra en minskning av spricktjocklekarna och därigenom en minskning av bergmassans permeabilitet och grundvattenflödet genom värmelagret.

För vatten är  $\rho/\mu$  av storleksordningen  $10^7$  och därför hydrauliska konduktiviteten  $K$  av storleksordningen  $10^7$  gånger permeabiliteten  $k$ , dvs  $K \approx k \cdot 10^7$ .

Tabell 2:1 Vattens densitet,  $\rho$ , och viskositet,  $\mu$ , vid olika temperaturer, T

T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu \cdot 10^6$ (kg/ms)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu \cdot 10^6$ (kg/ms)
0	999,8	1787	50	988,2	547
5	1000,0	1519	55	985,7	504
10	999,8	1307	60	983,2	467
15	999,2	1139	65	980,5	434
20	998,3	1002	70	977,7	404
25	997,1	890	75	974,8	378
30	995,7	798	80	971,6	355
35	994,0	719	85	968,4	334
40	992,3	653	90	965,2	315
45	990,2	596	95	961,6	298

Den hydrauliska konduktiviteten för normalsprickigt kristallint berg ligger mellan  $10^{-5}$  och  $10^{-9}$  m<sup>3</sup>/s, m<sup>2</sup>. Enskilda tjocka sprickor eller större krosszoner i berget har stor betydelse för bergets genomsläpplighet.

Om bergmassan genomskäres av en serie parallella, jämntjocka och släta sprickor gäller enligt /1/ att bergmassans permeabilitet i sprickriktningen är

$$k_1 = \frac{t^3}{12d} \quad (2.3)$$

där

$t$  = spricktjocklek, m

$d$  = genomsnittligt sprickavstånd i berget, m

Ekvation (2.3) gäller endast om strömningen i sprickorna är laminär.

Ofta innehåller bergmassan spricksystem i tre nästan vinkelräta riktningar. Vid godtycklig strömningsriktning rör sig då vattnet i varierande grad i alla tre spricksystemen. Ett genomsnittligt värde på bergmas-



sans permeabilitet kan uppskattas med hjälp av en modell som innehåller tre mot varandra vinkelräta system av jämntjocka sprickor. Vattnet antas ha en strömningsriktning som är parallell med två av spricksystemen. I det tredje spricksystemet är vattnet då stillastående. Bergmassans permeabilitet blir

$$k_2 = 2 k_1 = \frac{t^3}{6d} \quad (2.4)$$

Om sprickväggarna inte är släta utan skrovliga kan, på basis av undersökningar av Louis /5/, den ovan beräknade permeabiliteten minskas med en faktor 1/3 à 1/4, dvs

$$k = \frac{1}{3 \text{ à } 4} \cdot \frac{t^3}{6d} \approx \frac{t^3}{20d} \quad (2.5)$$

Ekv (2.3)-(2.5) och tabell 2:2 visar hur starkt sprickvidden påverkar permeabiliteten och därmed vattenflödet. Permeabiliteten är proportionell mot spricktjockleken i tredje potens. Sprickavståndet,  $d$ , och skrovligheten hos sprickorna har mindre betydelse. Som synes kan permeabiliteten variera avsevärt. Det är därför av vikt att den bestäms så noggrant som möjligt genom olika typer av pumptester och vatteninpressningsförsök.

Tabell 2:2 Permeabilitet,  $k$ , enligt ekv (2.4) och hydraulisk konduktivitet,  $K$ , vid  $T=10^\circ\text{C}$  för varierande sprickvidder,  $t$ , sprickavståndet  $d = 1 \text{ m}$  och släta sprickväggar

$t$ (mm)	$k$ ( $\text{m}^2$ )	$K$ ( $\text{m}^3/\text{s}, \text{m}^2$ )
0,01	$5,0 \cdot 10^{-17}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$
0,02	$4,0 \cdot 10^{-16}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$
0,05	$6,3 \cdot 10^{-15}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$
0,1	$5,0 \cdot 10^{-14}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
0,2	$4,0 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
0,5	$6,3 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
1,0	$5,0 \cdot 10^{-11}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Vid stor spricktjocklek och hög vattenhastighet blir strömningen i sprickorna turbulent. Ekv (2.3)-(2.5)

gäller inte då. Huruvida strömningen är laminär eller turbulent bestäms av värdet på Reynolds tal  $/1/$ .

Vid de hydrauliska gradienter som vanligen förekommer i naturlig grundvattenrörelse är strömningen laminär, åtminstone i alla sprickor som har mindre spricktjocklek än ca 1 mm.

Närmast ett borrhål som har vattenutbyte med omgivande berg kan den hydrauliska gradienten och vattenhastigheten i sprickorna blir stor. Eftersom de ekvationer som ligger till grund för beräkningar av vattenutbytets storlek vanligen förutsätter att strömningen i sprickorna är laminär bör man med hjälp av Reynolds tal kontrollera att så är fallet.

För en spricka med tjockleken  $t$  beräknas Reynolds tal med hjälp av ekvationen

$$Re = \frac{\rho}{\mu} \cdot v_n \cdot 2t \quad (2.6)$$

där

$v_n$  är vattnets medelhastighet i spricktvärsnittet.

Om berget innehåller en serie jämntjocka sprickor som ligger på ett genomsnittligt inbördes avstånd  $d$  är vattnets medelhastighet  $v_n = q \cdot d/t$ , där  $q$  är flödet per ytenhet av berget och  $t \ll d$ .

Vi får då

$$Re = 2 \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot q \cdot d \quad (2.7)$$

och om, enligt ekv (2.1),  $q = K \cdot I$

$$Re = 2 \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot K \cdot I \cdot d \quad (2.8)$$

Om sprickväggarna är släta är vattenströmningen laminär om  $Re < 2300$  och turbulent om  $Re > 2300$ . Om sprickväggarna är skrovliga sjunker gränsen för laminär strömning. Vid mycket skrovliga sprickväggar kan den ligga så lågt som  $Re = 500 /5/$ .

## 2.2 Naturligt grundvattenflöde

Det naturliga grundvattenflödet genom en bergvolym bestäms av grundvattenytans gradient och bergets vattengenomsläpplighet. Grundvattenytans gradient är vanligen mellan 0.01 och 0.001 eller mindre.

Frågan om storleken av det naturliga grundvattenflöde som under olika förhållanden passerar genom ett borrhålsvärmelager och den borttransport av värme från

lagret som denna grundvattenström kan medföra behandlas i /1/. Följande slutsatser anges där.

Om bergets hydrauliska konduktivitet är t ex  $K = 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}^2$  och hydrauliska gradienten  $I = 0.01$  skulle grundvattenströmmen på ett år förflytta värmen i ett värmelager 6.3 m i sidled. Samma förflyttning skulle fås om bergets hydrauliska konduktivitet är  $K = 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}^2$  och hydrauliska gradienten  $I = 0.001$ . Dessa siffror visar att för berg med tätt liggande sprickor bör den hydrauliska konduktiviteten ej överstiga de nämnda värdena om värmets förflyttning på grund av en grundvattenström skall hållas inom rimliga gränser. Svenska kristallina bergarter har nästan utan undantag värden på hydrauliska konduktiviteten som är lika med eller understiger  $K = 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}^2$ . En eventuell naturlig grundvattenström genom värmelagret kan då inte förflytta värmen i en utsträckning som medför några påtagliga problem. Detta gäller åtminstone då värmelagret inte genomkorsas av grövre sprickor eller krosszoner.

Grundvattenströmmen genom en enstaka grov spricka som har spricktjockleken lika med eller större än 0.5 mm medför en betydande värmeförlust. Lokaliseringen av ett borrhålsvärmelager bör därför ske så att genomgående sprickor av denna dimension undviks. Sprickor med stor utbredning och med en spricktjocklek av 0.5 mm eller mer är dock relativt sällsynta. I de fall sådana sprickor påträffas inom lagret kan de relativt lätt tätas genom cementinjektering. Alternativt kan den över lagret verkande hydrauliska gradienten minskas genom t ex pumpning.

### 3. VATTENFÖRLUSTER FRÅN BORRHÅLEN TVÅDIMENSIONELL BERÄKNING

#### 3.1 Inledning

I ett öppet system enligt fig 1.2a har cirkulationsvattnet i borrhålen direktkontakt med berget runt borrhålen. Om trycknivån i borrhålen då avviker från grundvattnets trycknivå i berget som omger värmelagret uppkommer grundvattenströmmar till eller från borrhålen. När trycknivån i borrhålen ligger högre än den naturliga grundvattenytan sker strömningen bort från borrhålen, dvs en vattenförlust från dessa uppkommer. Vattenförlusten medför en icke önskad vatten- och energiförlust från lagret. Kostnader uppkommer för att tillföra anläggningen vatten och energi som ersättning för förlusten till berget. Vattenförlusten kan också eventuellt skapa problem genom en förhöjning av grundvattenytan i värmelagrets omgivning. Ur flera synpunkter är det sålunda intressant att utreda storleken av vattenförlusten från borrhålen.

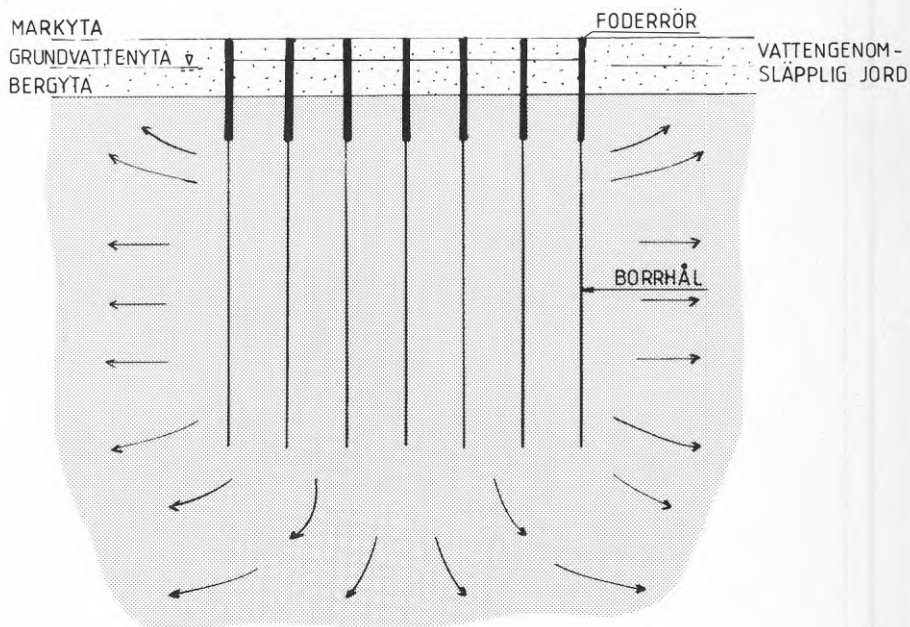


Fig 3.1 Tredimensionell vattenströmning från ett borrhålsvärmelager

I allmänhet är vattnets strömning från eller till borrhålen tredimensionell, fig 3.1. Vatten kan strömma upp eller ner genom bergytan och det finns

också ett vattenutbyte med berget som ligger under värmelagret. Strömningsförluster i rörledningar och borrhål liksom densitetsskillnader mellan varmt och kallt vatten medför att skillnaden i tryck mellan vattnet i borrhålen och det omgivande naturliga grundvattnet blir olika för olika borrhål och även olika på olika nivåer längs varje borrhål.

Teoretiska beräkningar av tredimensionell grundvattenströmning är relativt arbetskrävande. För enkelhets skull genomfördes därför först en serie beräkningar där strömningsbilden som en approximation förenklades till att vara tvådimensionell (avsnitt 3.2 - 3.5). Berget under värmelagret antogs då vara vattentätt. Grundvattenytan antogs ligga nere i berget och vara i det närmaste horisontal, fig 3.5. Tryckskillnaden mellan vattnet i borrhålen och det naturliga grundvattnet antogs vara konstant längs borrhålen.

Senare utarbetades en tredimensionell beräkningsmodell med vilkens hjälp man kan ta hänsyn till alla de ovan nämnda faktorer som ger upphov till den verkliga tredimensionella grundvattenströmningen (Kapitel 4). Liksom i den tvådimensionella beräkningsmodellen antogs för enkelhets skull att berget var småsprickigt, homogent och isotropt och att det därför kunde betraktas som ett poröst medium med i alla punkter och riktningar konstant, och av vattentemperaturen oberoende, hydraulisk konduktivitet. (För behandling av eventuella anisotropa fall gäller sedvanlig teknik med skalförändring etc /3/.)

I såväl den tvådimensionella som den tredimensionella beräkningsmodellen har antagits att borrhålen är placerade längs koncentriska cirklar, fig 3.5, och att både vattentryck och vattenföring är lika stora för alla borrhål som ligger på en och samma cirkel. Detta innebär cirkulär symmetri och förenklar därigenom beräkningsarbetet.

I ett tredje steg utarbetades en beräkningsmodell för tvådimensionell strömning i en enstaka grov spricka, en sprickzon eller en krosszon, som i lutning skär genom värmelagret (Kapitel 5). Berget antogs då i övrigt vara vattentätt.

### 3.2 Tvådimensionell beräkningsmodell

Trycknivåns läge vid pumpning ur en enstaka brunn i en s k bunden akvifer ges av ekvationen

$$z = h_0 - \frac{Q}{2\pi KD} \ln \frac{R}{r} \quad (3.1)$$

där beteckningarna framgår av fig 3.2. K är akviferens hydrauliska konduktivitet. Q är vattenföringen

som pumpas ur brunnen. I ekv (3.1), och även i ekv (3.2)-(3.3) nedan, är teckenregeln sådan att  $Q$  i sig själv är en negativ storhet när vatten pumpas ur brunnen (vatten bortföres från akviferen, exfiltration). Om vatten tillföres akviferen från brunnen (infiltration) är  $Q$  en positiv storhet.

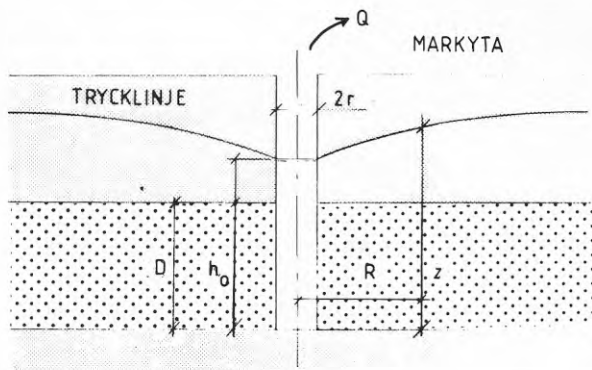


Fig 3.2 Grundvattenström mot enstaka brunn i en bunden akvifer (dvs en akvifer som nedåt och uppåt begränsas av täta skikt)

Vid pumpning ur en enstaka brunn i en öppen akvifer med fri grundvattenyta, fig 3.3, ges grundvattenytan av ekvationen

$$z^2 = h_0^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (3.2)$$

Ekv (3.2) kan skrivas

$$z = h_0 - \frac{Q}{\pi K(z+h_0)} \ln \frac{R}{r} \quad (3.3)$$

Om grundvattenströmmen har mycket stort djup i förhållande till variationen av  $z$  kan man approximativt sätta  $z = h_0$  varvid ekvation (3.3) övergår i

$$z = h_0 - \frac{Q}{2\pi K h_0} \ln \frac{R}{r} \quad (3.4)$$

Ekv (3.1) och (3.4) är till formen identiska eftersom  $h_0$  i ekv (3.4) och  $D$  i ekv (3.1) båda betecknar grundvattenströmmens djup.

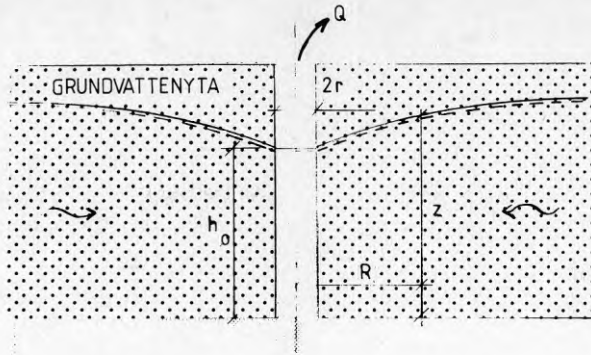


Fig 3.3 Grundvattenström mot enstaka brunn i en öppen akvifer (dvs en akvifer med fri grundvattenyta)

Vid beräkning av läget av trycknivån eller den fria grundvattenytan vid samtidig pumpning eller infiltration genom ett system av flera brunnar i en akvifer kan man använda den s k superpositionsprincipen /3/ och /5/. Med hjälp av denna princip har följande ekvationssystem (i matrisform) härletts för ett borrhålssystem som består av koncentriska ringar med borrhål i antingen en bunden akvifer eller en öppen akvifer där grundvattenytans nivåskillnader är små i jämförelse med borrhålslängden och akviferens djup, fig 3.5.

$$(A) \cdot (x) = (B) \quad (3.5)$$

Termerna i matriserna ges av följande ekvationer:

$$a_{ij} = 6j \cdot \ln \frac{R_0}{j \cdot a} \quad \{i < j\} \quad (3.6)$$

$$a_{ij} = 6j \cdot \ln \frac{R_0}{j \cdot a} + \ln \frac{j \cdot a}{r_w} - \sum_{n=1}^{6j-1} \ln \left( 2 \cdot \sin \frac{n\pi}{6j} \right) \quad \{i = j\} \quad (3.7)$$

$$a_{ij} = 6j \cdot \ln \frac{R_0}{i \cdot a} \quad \{i > j\} \quad (3.8)$$

$$x_i = \frac{Q_i}{2\pi KD} \quad (3.9)$$

$$b_i = h_{oi} - H_0 \quad (3.10)$$

I ekv (3.6) - (3.10) är

$Q_i$  = vattenföringen i vart och ett av borrhålen i den  $i$ -te borrhålsringen ( $Q_i$  positiv om vatten infiltreras i berget från borrhålet.  $Q_i$  negativ om vatten exfiltreras från berget till borrhålet).

$K$  = bergets hydrauliska konduktivitet

$D$  = akviferens tjocklek

$h_{oi}$  = trycknivån i borrhålen i den  $i$ -te borrhålsringen

$H_0$  = trycknivån hos grundvattnet på ett avstånd  $R_0$  från värmelagrets centrum.  $R_0$  skall väljas många gånger större än radien till den yttersta borrhålsringen.

$a$  = skillnaden mellan radierna hos två avgränsande borrhålsringar. Radien hos den  $i$ -te borrhålsringen är således  $r = i \cdot a$ .

$r_w$  = borrhålens radie

Ekvationerna förutsätter att både  $a$  och  $r_w$  är konstanter för alla borrhålsringar respektive borrhål samt att bergets hydrauliska konduktivitet,  $K$ , är konstant. Det sistnämnda innebär att olikheter i vattnets viskositet och densitet vid olika temperatur i olika delar av borrhålslagret och dess omgivning försummas. Likaså försummas temperaturens inverkan på bergets spricktjocklekar och permeabilitet.

I varje borrhålsring,  $i$ , finns  $6 \cdot i$  borrhål. Ringen har radien  $i \cdot a$  och omkretsen  $2\pi \cdot i \cdot a$ . Avståndet mellan borrhålen i ringen blir då  $2\pi i a / 6i = 2\pi a / 6 = 1,047 a \approx a$ .

Ekv (3.6) bygger på förhållandet att innanför en cirkulär ring av brunnar är trycknivån mycket nära konstant inom ett område som har radien  $r - a$ , där  $r$  är borrhålsringens radie och  $a$  avståndet mellan borrhålen i ringen, se fig 3.4. Inom hela området är således trycknivån i det närmaste lika som trycknivån i cirkelns centrum.  $6j$  borrhål ligger då på avståndet  $j \cdot a$  från cirkelns centrum.

Ekv (3.8) bygger på förhållandet att trycknivån på större avstånd än  $r + a$  från borrhålsringens centrum varierar mycket nära logaritmiskt med avståndet från detta centrum.





tionssystemet därigenom lösas med hjälp av t ex en miniräknare typ Texas TI 59, som klarar ekvations-system med upp till 8 obekanta. Följande lösningar,  $x_i$ , erhöles med ett ekvationssystem som beaktade de sju yttersta borrhålsringarna.

$$x_6 = 7,08 \cdot 10^{-7}$$

$$x_7 = 2,50 \cdot 10^{-6}$$

$$x_8 = 1,05 \cdot 10^{-5}$$

$$x_9 = 4,48 \cdot 10^{-5}$$

$$x_{10} = 1,92 \cdot 10^{-4}$$

$$x_{11} = 8,28 \cdot 10^{-4}$$

$$x_{12} = 3,58 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{där } x_i = \frac{Q_i}{2\pi KD}$$

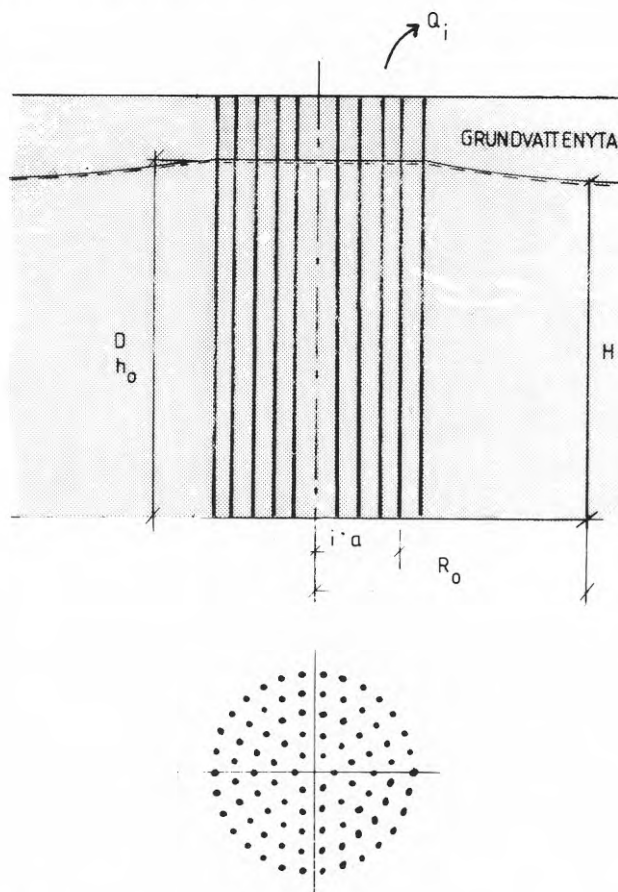


Fig 3.5 Koncentriska ringar med borrhål. Den  $i$ -te ringen från centrum räknat innehåller  $6i$  borrhål.  $D \approx h_{0i} \approx H_0$ . (Grundvattenytans lokala förhöjning vid varje borrhål visas ej i figuren.)

Totala vattenföringen från borrhålen blir

$$\frac{Q_{\text{total}}}{2\pi KD} = \sum_{i=6}^{12} (6i \cdot x_i) = 0,327$$

Man ser att den huvudsakliga vattenförlusten sker från de tre yttersta borrhålsringarna som bidrar med 79 %, 17 % resp 3 % av den totala vattenföringen från borrhålen. Borrhålsringarna innanför dessa tre ringar bidrar tillsammans med endast 1 % av den totala vattenföringen.

Med borrhåls längden  $D = 100$  m blir

$$Q_{\text{total}} = 0,327 \cdot 2\pi \cdot K \cdot 100 = 206 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$$

Vid olika värden på bergets hydrauliska konduktivitet,  $K$ , får vi då följande värden på totala vattenförlusten från värmelagrets borrhål.

Tabell 3:1 Total vattenförlust från borrhålen när trycknivån i borrhålen ligger 1,0 m över grundvattenytans nivå

$K$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$\text{m}^3/\text{s}, \text{m}^2$
$Q_{\text{total}}$	$\begin{cases} 0,02 \\ 20 \\ 54000 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,002 \\ 2 \\ 5400 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,0002 \\ 0,2 \\ 540 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,02 \\ 0,02 \\ 54 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,002 \\ 0,002 \\ 5,4 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,0002 \\ 0,0002 \\ 0,54 \end{cases}$	$\begin{cases} \text{m}^3/\text{s} \\ \text{l/s} \\ \text{m}^3/\text{mån} \end{cases}$

Om skillnaden  $h_{oi} - H_0$  mellan trycknivån i borrhålen och grundvattenytans nivå har något annat värde än 1,0 m ändras vattenföringarna i tabell 3:1 i direkt proportion till värdet på  $h_{oi} - H_0$ .

Vattenförlusten,  $Q_{\text{total}}$ , från borrhålen ger vid värmelagrets periferi upphov till en grundvattenström i berget som är riktad i radiell riktning ut från värmelagrets centrum. Denna grundvattenström medför att temperaturfronten vid värmelagrets periferi successivt flyttas utåt.

Om värmelagret uppfattas som en cirkulär cylinder med radien  $R = 50$  m och höjden  $D = 100$  m blir dess mantelyta  $2\pi \cdot 50 \cdot 100 = 31\,400 \text{ m}^2$ . Vattenföringen  $Q_{\text{total}}$  ger då upphov till ett grundvattenflöde genom mantelytan som är

$$q = \frac{Q_{\text{total}}}{31\,400} \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}^2$$

Som tidigare visats i /1/ förflyttar sig temperaturfronten med ungefär hastigheten  $v_T = 2q$ . Vid berg

med olika hydraulisk konduktivitet får vi då följande förskjutningar  $\Delta R$  av värmefronten på ett år.

Tabell 3:2 Temperaturfrontens radiella förflyttning,  $\Delta R$ , orsakad av vattenförlusten från borrhålen, jfr Tabell 3:1

K =	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$m^3/s, m^2$
$\Delta R =$	(41)	4,1	0,41	0,041	m/år

Värdena på  $\Delta R$  i tabell 3:2 gäller när trycknivån i borrhålen ligger 1,0 m över grundvattenytan långt från värmelagret och de inkluderar inte den av värmeledning i berget förorsakade förflyttningen av temperaturfronten.

Värdet  $\Delta R = 41$  har i tabell 3:2 satts inom parentes eftersom det förenklade beräkningssätt som använts inte gäller vid stora värden på  $\Delta R/R$ .

Om  $\Delta R$  är liten torde man vid uttag av värme från värmelagrets yttre del genom värmeledning kunna få tillbaka en del av den värme som förflyttats vid temperaturfrontens rörelse utåt. När värmelagret användes flera år i följd kommer dock en del värmeenergi att trots detta gå förlorad med grundvattenströmmen som går från borrhålen ut till omgivningen runt värmelagret. Detta är en förlust som adderar sig till den energiförlust till omgivningen som beror av ren värmeledning i berget.

För att vattenförlusten och temperaturfrontens förflyttning skall kunna hållas inom acceptabla gränser bör enligt tabellerna 3:1 och 3:2 bergets hydrauliska konduktivitet inte överstiga ca  $K = 3 \cdot 10^{-6} m^3/s \cdot m^2$ . Denna rekommendation skall uppfattas som preliminär. Den kan dock i de flesta fallen uppfyllas av kristallin berggrund i Sverige under förutsättning att berggrunden saknar enstaka grova sprickor eller sprick- och krosszoner som skär igenom borrhålsvärmelagret.

Slutligen skall vi kontrollera att strömningen vid borrhålen är laminär. Vattenflödet är störst från borrhålet i ring 12, där enligt ovan  $Q_{12}/2\pi KD = 3,58 \cdot 10^{-3}$ . Detta motsvarar vid borrhålsväggen ett flöde,  $q$ , per ytenhet av berget

$$q = \frac{Q_{12}}{2\pi r_w D} = \frac{Q_{12}}{2\pi KD} \cdot \frac{K}{r_w} = 3,58 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{K}{0,075} = 0,0477K$$

Enligt ekv (2.7) får vi om vi antar att det genomsnittliga sprickavståndet är  $d = 0,5$  m samt  $\rho = 965,2$  kg/m<sup>3</sup> och  $\mu = 315 \cdot 10^{-6}$  kg/ms ( $T = 90$  °C)

$$Re = 2 \cdot \frac{965,2}{315 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,0477K \cdot 0,5 = 1,46 \cdot 10^5 \cdot K$$

Om vi som villkor för laminär strömning antar t ex  $Re < 500$  blir villkoret  $K < 500/1,46 \cdot 10^5$ , dvs  $K < 3,42 \cdot 10^{-3}$ . Detta är ett avsevärt högre värde än det högsta värde  $K = 3 \cdot 10^{-6}$  som enligt ovan ger acceptabel vattenförlust och förskjutning av temperaturfronten.  $K < 3 \cdot 10^{-6}$  ligger således mycket klart inom gränsen för laminär strömning och de vid vattenföringsberäkningen använda ekvationernas giltighet. (Detta visar också att de närmast följande två beräkningsexemplen klart uppfyller villkoret för laminär strömning.)

### 3.4 Beräkningsexempel 2

En metod att förhindra stor spridning av värmen genom grundvattenströmmen från borrhålen till omgivningen runt värmelagret skulle kunna vara att man runt det område som försetts med borrhål för inlagring och utlagring av värme anordnar en extra ring med borrhål som enbart används för att pumpa upp grundvatten som härstammar från inlagrings-utlagringsborrhålen, fig 3.6. Det är också möjligt att anpassa trycknivån i denna extra borrhålsring på sådant sätt att teoretiskt inget vatten från inlagrings-utlagringsborrhålen kan försvinna ut i omgivningen utan allt vatten som förlorats från in- och utlagringsborrhålen tas om hand i den extra borrhålsringen. Bortsett från ett område som sträcker sig några meter utanför den extra borrhålsringen kommer man då inte att ändra det naturliga grundvattentrycket i berget och därmed inte heller den naturliga grundvattenytans läge. Fig 3.7 visar en skiss över strömningsförhållandena.

Vi antar att man runt värmelagret som beskrivs i exempel 1 lägger en extra borrhålsring med radien  $R_{14} = 56$  m, fig 3.6. Genom dessa borrhål, som liksom de övriga borrhålen har radien  $r_w = 0,075$  m och längden  $D = 100$  m, skall exakt den vattenföring pumpas upp som förlorats från borrhålsringarna (1)-(12). Borrhålen i ring (14) ligger liksom de övriga borrhålen på ett inbördes avstånd av  $1,047 a = 4,19$  m.

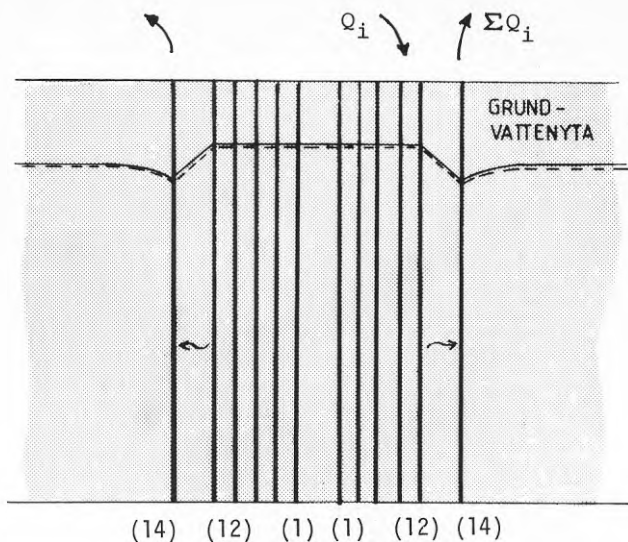


Fig 3.6 Borrhålslager med avskärande borrhålsring (14) som samlar upp vattenförlusten från in- och utlagringshålen

Genom att göra vissa modifieringar i ekvationssystemet (3.5) kan man beräkna följande värden:

$$x_7 = 5,09 \cdot 10^{-5}$$

$$x_8 = 1,82 \cdot 10^{-4}$$

$$x_9 = 7,70 \cdot 10^{-4}$$

$$x_{10} = 3,29 \cdot 10^{-3}$$

$$x_{11} = 1,42 \cdot 10^{-2}$$

$$x_{12} = 6,15 \cdot 10^{-2}$$

$$x_{14} = -6,68 \cdot 10^{-2}$$

$$h_{o14} - H_o = -1,46 \cdot 10^{-1}$$

$$\text{där } x_i = \frac{Q_i}{2\pi KD}$$

Totala vattenförlusten från borrhålsringarna (7)-(12) blir

$$\frac{Q_{\text{total}}}{2\pi KD} = \sum_{i=7}^{12} (6i \cdot x_i) = 5,614$$

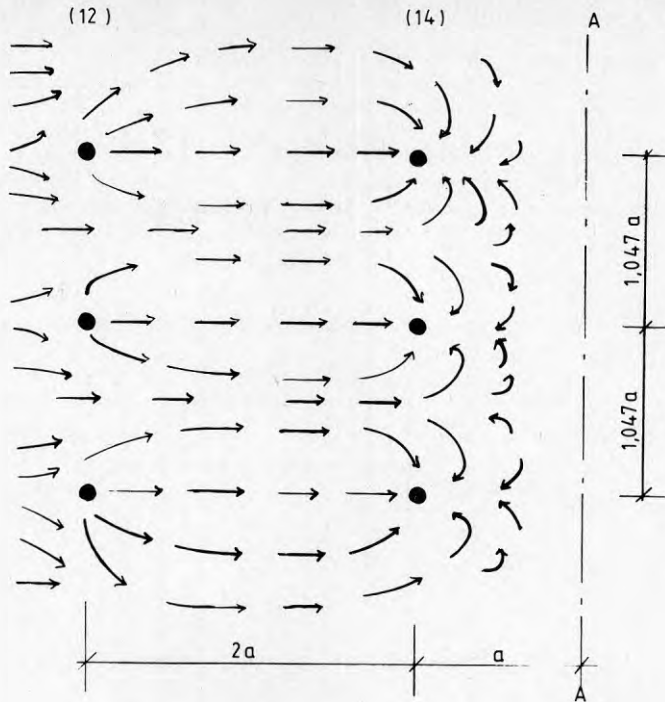


Fig 3.7 Schematisk skiss av grundvattnets strömningsriktningar vid sista borrhålsringen för in- och utlagring (12) och den extra borrhålsringen (14) som samlar ihop vattenförlusten från samtliga in- och utlagringsborrhål. Till höger om linjen A-A är grundvattenytan i det närmaste horisontal och grundvattenströmningen försumbar.

Detta är samma flöde som pumpas ur borrhålsringen (14), dvs

$$\frac{Q_{14}}{2\pi KD} = 6 \cdot 14 \cdot x_{14} = -5,614$$

Trycknivån i borrhålsringen (14) skall ligga på

$$h_{014} - H_0 = -0,146$$

dvs 0,146 m under nivån hos grundvattenytan 1000 m från värmelagrets centrum.

Vattenförlusten från borrhålsringarna (1)-(12) har ökat med faktorn  $5,614/0,327 = 17,2$  i jämförelse med vattenförlusten i exempel 1. Vattenförlusten är  $Q_{1-12} = 5,614 \cdot 2\pi \cdot K \cdot 100 = 3,53 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$ . Om  $K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  blir  $Q_{1-12} = 0,0106 \text{ m}^3/\text{s} = 10,6 \text{ l/s}$ .

## 3.5 Beräkningsexempel 3

Vi antar fortfarande att trycknivån i borrhålen ligger lägre än bergets överyta. Den extra borrhålsringen (14) kan då också användas för att genom infiltration av vanligt kallt grundvatten bilda så att säga en mur runt värmelagret, fig 3.8. Muren förhindrar allt vattenläckage från borrhålen (1)-(12) som används för in- och utlagring av varmt vatten. Fig 3.9 visar en skiss av strömningsförhållandena.

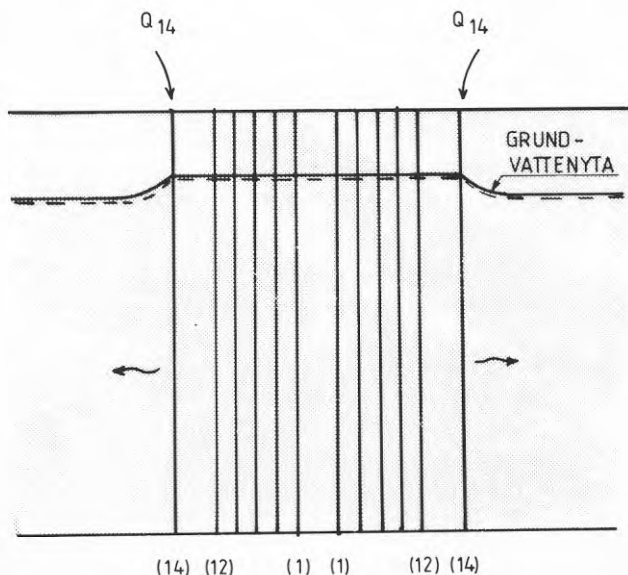


Fig 3.8 Borrhålslager med extra ring av borrhål (14) för injektering av kallt vatten som utgör grundvattenströmmen ut från borrhålslaget. Ingen vattenförlust från in- och utlagringshålen (1)-(12) uppstår.



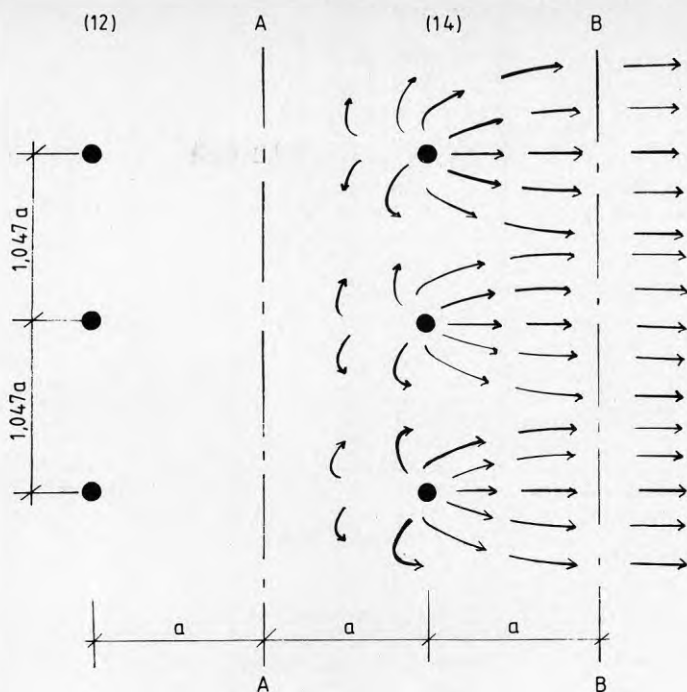


Fig 3.9 Schematisk bild av grundvattnets strömningsriktningar vid den extra borrhålsringen (14) genom vilken kallt vatten infiltreras för att försörja grundvattenströmmen ut från värmelagret. Till vänster om A-A är det varma grundvattnet i det närmaste stillastående. Till höger om B-B råder radiell strömning i det kalla grundvattnet.

Vi skall nu beräkna erforderlig trycknivå och vattenföring i borrhålsringen (14) för att trycknivån i in- och utmatningshålen (1)-(12) skall kunna hållas  $h_{0i} - H_0 = 1,0$  m över den naturliga grundvattensytans nivå 1000 m från värmelagrets centrum. I övrigt gäller i tillämpliga delar samma data som i exemplen 1 och 2.

För lösningen behöver vi två ekvationer som vi får ur ekv (3.5)-(3.10) genom att sätta  $i = 1, j = 14$  och  $b_i = b_1 = 1,0$  resp  $i = j = 14$  och  $b_i = b_{14} = h_{014} - H_0$

$$6 \cdot 14 \cdot \ln\left(\frac{1000}{14 \cdot 4}\right) \cdot \frac{Q_{14}}{2\pi K \cdot 100} = 1,0$$

$$6 \cdot 14 \cdot \ln\left(\frac{1000}{14 \cdot 4}\right) + \ln\left(\frac{14 \cdot 4}{0,075}\right) - \sum_{n=1}^{6 \cdot 14 - 1} \ln\left(2 \cdot \sin \frac{n\pi}{6 \cdot 14}\right) \cdot \frac{Q_{14}}{2\pi K \cdot 100} = h_{o14} - H_o$$

Ur detta ekvationssystem får vi

$$\frac{Q_{14}}{2\pi K \cdot 100} = 0,00413 \quad h_{o14} - H_o = 1,009$$

$$\text{dvs } Q_{\text{total}} = 6 \cdot 14 \cdot Q_{14} = 218,0 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$$

Vid olika värden på bergets hydrauliska konduktivitet,  $K$ , krävs således följande totala vattenföring,  $Q_{\text{total}}$ , till borrhålsringen (14).

Tabell 3:3 Total vattenföring som skall tillföras borrhålsringen (14) när trycknivån i in- och utlagringsborrhålen ligger 1,0 m över grundvattenytans nivå

$K$	=	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$\text{m}^3/\text{s}, \text{m}^2$
$Q_{\text{total}}$	=	$\begin{cases} 0,02 \\ 22 \\ 57200 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,002 \\ 2,2 \\ 5720 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,0002 \\ 0,2 \\ 572 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,02 \\ 0,02 \\ 57 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,002 \\ 0,002 \\ 5,7 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,0002 \\ 0,0002 \\ 0,57 \end{cases}$	$\begin{cases} \text{m}^3/\text{s} \\ \text{l/s} \\ \text{m}^3/\text{mån} \end{cases}$

Dessa vattenföringar skiljer sig obetydligt från de vattenförluster från in- och utlagringsborrhålen som vi fick i exempel 1. Om trycknivån i dessa borrhål är större än  $h_{oi} - H_o = 1,0$  m över grundvattenytans nivå 1 000 m från värmelagret ökar  $Q_{\text{total}}$  i direkt proportion till  $h_{oi} - H_o$ . Man ser då av tabell 3:3 att vattenföringen  $Q_{\text{total}}$  blir opraktiskt stor om bergets hydrauliska konduktivitet är större än ca  $K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

### 3.6 Inverkan av valet av influensradie

Den i beräkningsexemplen 1-3 använda influensradien  $R_o = 1000$  m kan i vissa fall vara för stor. Berget runt omkring värmelagret kan t ex på kortare avstånd än 1000 m från värmelagret innehålla sprick- och krosszoner som har så stor vattengenomsläpplighet att grundvattenytan i sprick- och krosszonerna inte nämnvärt påverkas av vattenströmmen från värmelagret. Man kan då med hjälp av ekv (3.1) eller (3.4) lätt justera de tidigare beräknade vattenförlusterna från

värmelagret till att gälla för andra influensradier än  $R_0 = 1000$  m.

Om vi tillämpar t ex ekv (3.4) på två radier  $R = R_1$  och  $R = R_2$  och sedan drar  $R_2$ -ekvationen från  $R_1$ -ekvationen får vi

$$z_1 - z_2 = \frac{Q}{2\pi Kh_0} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (3.11)$$

där  $z_1$  och  $z_2$  är grundvattenytans nivå på avstånden  $R_1$  resp  $R_2$  från värmelagrets centrum.

För exempelvis  $Q = 206 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$  och  $h_0 = 100$  m (jfr beräkningsexempel 1) får vi för  $R_1 = 500$  m och  $R_2 = 1000$  m att  $z_1 - z_2 = 0,23$  m. Grundvattenytan i beräkningsexempel 1 sjunker således med  $1,00 - 0,23 = 0,77$  m från värmelagret till  $R_1 = 500$  m och därefter med  $0,23$  m mellan  $R_1 = 500$  m och  $R_2 = 1000$  m.

Om influensradien i beräkningsexempel 1 skulle ha varit  $R_0 = 500$  m i stället för  $R_0 = 1000$  m skulle vattenförlusten från värmelagret följaktligen ha ökat i proportionen  $1,00/0,77 = 1,30$ , dvs från  $Q = 206 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$  till  $Q = 268 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.7 Inverkan av skillnad i densitet hos kallt och varmt vatten

I räkneexemplen ovan har ingen hänsyn tagits till skillnaden i densitet mellan kallt och varmt vatten. Denna skillnad medför att trycknivån längs borrhålen som innehåller varmt vatten varierar i förhållande till trycknivån för det kalla grundvatten som omger värmelagret. Om vi för enkelhetens skull och som ett extremfall antar att lagret är fulladdat och att därför det varma vattnet t ex har temperaturen  $90^\circ\text{C}$  längs hela borrhålen och det kalla grundvattnet temperaturen  $10^\circ\text{C}$  blir skillnaden i trycknivå vid topp och botten av  $100$  m långa borrhål (jfr densitetsvärdena i tabell 2:1).

$$\frac{999,8 - 965,2}{999,8} \cdot 100 = 3,46 \text{ m}$$

Vattenförlusterna från borrhålen blir därför mycket ojämnt fördelade längs borrhålen. Om trycknivån hos det varma vattnet i borrhålen väljs så att den t ex balanserar grundvattentrycket vid borrhålens botten kommer det varma vattnets trycknivå vid borrhålens övre ände att ligga  $3,46$  m högre än grundvattnets trycknivå. Resultatet blir att vattenförlusten från borrhålen blir noll vid borrhålens botten men att den successivt ökar på högre nivåer i borrhålen. Detta medför i princip en snedställning av temperaturfronten runt värmelagret, fig 3.10.

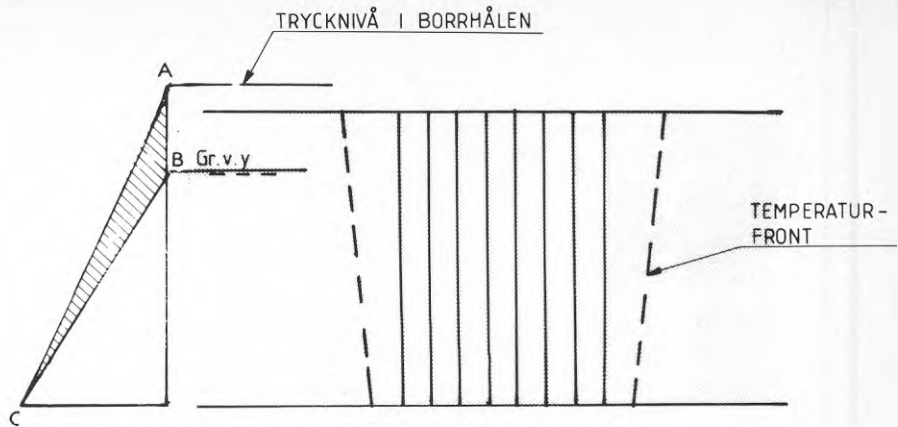


Fig 3.10 På grund av densitetsskillnaden mellan varmt och kallt vatten blir vattenförlusten större vid borrhålens övre del än vid deras nedre del. Detta medför en snedställning hos temperaturfronten i berget. Den streckade delen av diagrammet längst till vänster visar skillnaden i hydrostatiskt tryck i borrhålens varma vatten (AC) och det kalla grundvattnet (BC). Trycken har antagits vara lika vid borrhålens botten.

Snedställningen av temperaturfronten kan eventuellt komma att förstärkas genom konvektionsströmmar i berget. Ett för konvektionsströmningen karakteristiskt flöde,  $q_{wb}$ , kan enligt /4/ skrivas

$$q_{wb} = \frac{g \cdot (\varrho_0 - \varrho_1) k}{\mu_0 + \mu_1} \quad (3.12)$$

där

$$\begin{aligned} \varrho_0 &= \text{kalla vattnets densitet} \\ \varrho_1 &= \text{varma vattnets densitet} \\ \mu_0 &= \text{kalla vattnets viskositet} \\ \mu_1 &= \text{varma vattnets viskositet} \\ k &= \text{bergets permeabilitet} \\ g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Motsvarande termiska hastighet hos en temperaturfront är den karakteristiska termiska egenkonvektionshastigheten  $v_{Tb}$  som definieras

$$v_{Tb} = \frac{C_w}{C} \cdot q_{wb} \quad (3.13)$$

där

$$\begin{aligned} C_w &= \text{vattnets volymetriska värmekapacitet} \\ C &= \text{bergets volymetriska värmekapacitet} \end{aligned}$$

Kvoten mellan vattnets och bergets värmekapaciteter är  $C_w/C \approx 2$ .

Om vi för in bergets hydrauliska konduktivitet

$$K = \frac{\rho_0 g}{\mu_0} \cdot k \quad (3.14)$$

kan vi skriva ekv (3.13)

$$v_{Tb} = 2 \cdot \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu_1} \cdot K \quad (3.15)$$

För temperaturerna  $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  och  $T_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  får vi enligt tabell 2:1

$$v_{Tb} = 2 \cdot \frac{999,8 - 965,2}{999,8} \cdot \frac{1307 \cdot 10^{-6}}{(1307 + 315) \cdot 10^{-6}} \cdot K = 0,0558 \cdot K$$

För kantringen hos en från början vertikal temperaturfront kan en karakteristisk tidskonstant,  $t_b$ , skrivas

$$t_b = \frac{H}{3 \lambda \cdot v_{Tb}} \quad (3.16)$$

där

$H$  = temperaturfrontens höjd

$\lambda = \sqrt{k'/k}$ , där  $k'$  och  $k$  är permeabilitetsvärdena i vertikal resp horisontell riktning

För  $H = 100 \text{ m}$  och  $\lambda = 1$  samt  $v_{Tb} = 0,0558 \cdot K$  får vi

$$t_b = \frac{597}{K} \approx \frac{600}{K} \quad (3.17)$$

Risken för kantring kan bedömas liten om  $t_b$  är avsevärt större än längden hos en lagringscykel för värme,  $t$  ex avsevärt större än ett år. För olika hydrauliska konduktiviteter,  $K$ , hos berget ger ekv (3.17) följande karakteristiska tidskonstanter,  $t_b$ .

Tabell 3:4 Karakteristisk kantringstid,  $t_b$ , för temperaturfronten vid ett borrhålslager med  $H=100 \text{ m}$ ,  $\lambda = 1,0$ ,  $T_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  och  $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

$K$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$
$t_b$	$\begin{cases} 6 \cdot 10^6 \\ 0,19 \end{cases}$	$\begin{cases} 6 \cdot 10^7 \\ 1,9 \end{cases}$	$\begin{cases} 6 \cdot 10^8 \\ 19 \end{cases}$	$\begin{cases} 6 \cdot 10^9 \\ 190 \end{cases}$	$\begin{cases} 6 \cdot 10^{10} \\ 1900 \end{cases}$	$\begin{cases} 6 \cdot 10^{11} \\ 19000 \end{cases}$	s år

Av tabellen framgår att temperaturfronten ej torde få besvärande kantring om bergets hydrauliska konduktivitet är mindre än ca  $K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

### 3.8 Inverkan av vertikal vattenströmning från borrhålen

Värmelagret har en diameter av 100 m och en bergtäckning av storleksordningen 5 - 10 m räknat från de tätningmanschetter som sätts in i borrhålen, fig 3.11. Om trycknivån i borrhålen ligger högre än bergytan kommer vattenströmmen från borrhålens övre del inte att vara riktad i horisontal led så som antagits i de tidigare beräkningarna. Speciellt i värmelagrets centrala delar kommer vattenströmmen att i stället vara riktad upp mot bergets överyta där varmt vatten kommer att sippra fram i dagen eller ledas bort genom de jordlager som eventuellt finns ovanpå bergytan.

För att uppskatta storleken av vattenflödet från borrhålen till bergytan användes en befintlig datormodell som beskriver potentialströmning inom ett område som visas i fig 3.12 (personlig kommunikation med Johan Claesson, LTH). Linjen AB symboliserar övre delen av ett borrhål som har radien  $r_w$ . Borrhålet har i modellen längden  $a$  och det slutar på avståndet  $b$  under bergets överyta. Borrhålet är ett av många ekvidistanta borrhål. Av symmetriskäl sker därför inget grundvattenflöde tvärs över ytor som ligger på lika avstånd från två angränsande borrhål. Detta simuleras i modellen av att modellens cirkulärcylindriska vägg är vattentät. Väggen har radien  $R$ . Även modellens botten är vattentät eftersom grundvattenströmmen på denna nivå med god noggrannhet kan anses vara horisontell.

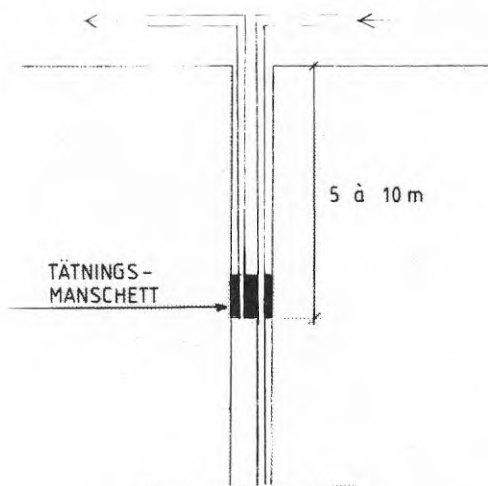


Fig 3.11 Övre delen av borrhål med tätningmanschett

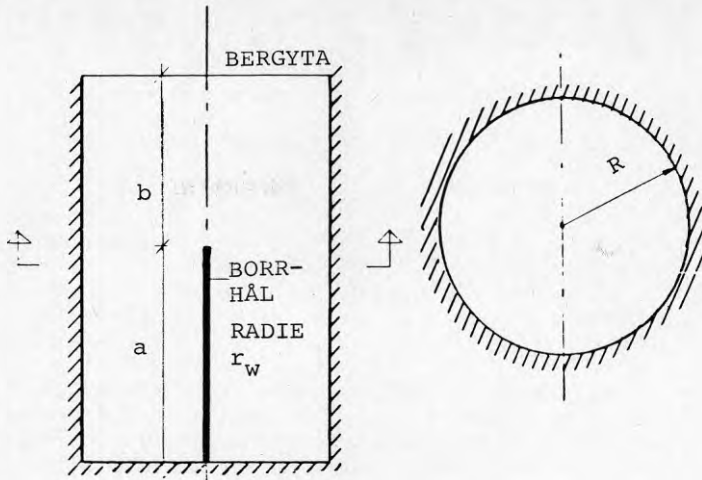


Fig 3.12 Modell för beräkning av vattenflöde från övre delen av ett borrhål och upp till bergets överyta

I datorberäkningen antogs följande värden

$$a = b = 10 \text{ m} \quad R = 2,0 \text{ m} \quad r_w = 0,075 \text{ m}$$

Beräkningen visade att vattenflödet blev mycket jämnt fördelat över bergets överyta och att hydrauliska gradienten där blev  $I = 0,083$  när trycknivån i borrhålet låg 1,0 m högre än bergytans nivå. Detta svarar mot ett vattenflöde

$$q = K \cdot I = 0,083 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}^2$$

Om detta flöde approximativt antages vara representativt för hela värmelagrets överyta fås den totala vattenföringen upp genom bergytan

$$Q_{\text{total}} = q \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 100^2 = 652 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$$

Detta är ca 3 gånger de vattenförluster från borrhålen som tidigare beräknats under antagande av enbart horisontal strömningsriktning och med en trycknivå i borrhålen som antagits ligga 1,0 m högre än nivån hos grundvattenytan långt från värmelagret. Här har alltså visats att vattenströmningen upp till bergets överyta är väl så betydelsefull som vattenströmningen i horisontal riktning ut mot värmelagrets omgivning.

Vattenflödet mot bergytan svarar mot en hastighet hos en temperaturfront, jfr ekv (3.13)

$$v_T = 2q = 2 \cdot 0,083 \cdot K = 0,166 \cdot K \text{ m/s}$$

På ett år hinner temperaturfronten förflytta sig

$$v_T \cdot 3,15 \cdot 10^7 = 5,23 \cdot 10^6 \cdot K \text{ m}$$

Om  $t \text{ ex } K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$  blir temperaturfrontens förflyttning 15,7 m/år. Temperaturfronten hinner alltså upp till bergytan på mindre än ett år och detta så mycket mer som även värmeledning i berget bidrar till temperaturfrontens förflyttning.

Även vattenströmningen som från borrhålens nedre del är riktad nedåt i berget samt ojämna tryckfördelning i värmelagrets borrhål bör beaktas vid noggrannare beräkningar. Den ojämna tryckfördelningen förorsakas av dels strömningsförluster i de slangar och rörledningar som finns i och mellan borrhålen, dels densitetsskillnader mellan kallt och varmt vatten, jfr avsnitt 3.6 och kapitel 4.

Det ovan sagda visar på önskvärldheten av att utarbeta en tredimensionell beräkningsmodell.

Sammanfattningsvis skulle man dock på basis av de hittills redovisade beräkningarna kunna säga att den totala vattenförlusten från ett värmelager med diametern 100 m och höjden 100 m approximativt kan sättas till

$$Q = 10^3 \cdot K \cdot \Delta h \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.18)$$

där

$$K = \text{bergets hydrauliska konduktivitet, m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$$

$$\Delta h = \text{skillnaden mellan trycknivån i borrhålen och det naturliga grundvattnets trycknivå.}$$

Enligt de tredimensionella beräkningar som redovisas i kapitel 4 kan vattenförlusten från värmelagret vid jämn tryckfördelning i borrhålen variera mellan ca 200 % och ca 50 % av den i ekv (3.18) angivna vattenförlusten. Variationen beror av randvillkoret vid bergytan (vattengenomsläpplig resp vattentät bergyta), jfr beräkningsexemplen 4 och 5 i tabell 4.1. Vid ojämna tryckfördelning i borrhålen kan trycket balanseras så att vattenförlusten blir noll eller nära noll, jfr beräkningsexemplen 12 och 13 i kapitel 4. I annat fall tyder de hittills redovisade beräkningarna på att vattenförlusterna från värmelagret blir stora om bergets hydrauliska konduktivitet överstiger ca  $K = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ . Om  $\Delta h = 1 \text{ m}$  blir då enligt ekv (3.18)  $Q = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 1 \text{ l/s}$ .



#### 4. VATTENFÖRLUSTER FRÅN BORRHÅLEN TREDIMENSIONELL BERÄKNING

##### 4.1 Beräkningsmodell för jämsprickigt homogent berg

För ett borrhålsvärmelager som innehåller ett stort antal långa borrhål kan man med hjälp av differensräkning genomföra en beräkning av tredimensionell vattenströmning från eller till borrhålen. Därvid betraktas berget för enkelhets skull, som ett homogent och isotropt, poröst medium med hydrauliska konduktiviteten  $K$ . (Beräkningsmetoden kan vidareutvecklas till att gälla även för ett anisotropt medium, dvs när berget har olika hydraulisk konduktivitet i olika riktningar.) Antagandet om konstant hydraulisk konduktivitet innebär bl a att skillnader i vattnets viskositet och densitet vid olika temperatur i olika delar av berget inom borrhålsvärmelagret och dess omgivning försummas.

Varje borrhål kan för beräkningen tänkas uppdelat i små element med längden  $\Delta l$ , fig 4.1. Vattenflödet,  $Q$ , i berget från eller till ett sådant element är positivt när vattnet rinner i riktning från borrhålet och ut i berget och negativt när vattnet rinner från berget och in i borrhålet.

Varje borrhålselement  $\Delta l$  kan för vattenströmmen i berget betraktas som en linjekälla eller linjesänka med begränsad längd  $\Delta l$ . Den totala vattenströmning som i berget förorsakas av alla värmelagrets borrhål tillsammans kan sedan beräknas genom att man för samtliga borrhålselement  $\Delta l$  tillämpar superpositionsprincipen /3/. Detta resulterar i ett ekvationssystem där flödena  $Q$  från eller till de olika borrhålselementen ingår tillsammans med vattnets trycknivå  $h$  i varje borrhålselement. Om samtliga trycknivåer  $h$  är givna kan samtliga flöden  $Q$  lösas ur ekvationssystemet och därigenom det totala flödet  $Q_{\text{total}} = \sum Q$  beräknas. Antalet borrhålselement blir stort och därigenom även ekvationssystemet. Det måste därför lösas med hjälp av en dator.

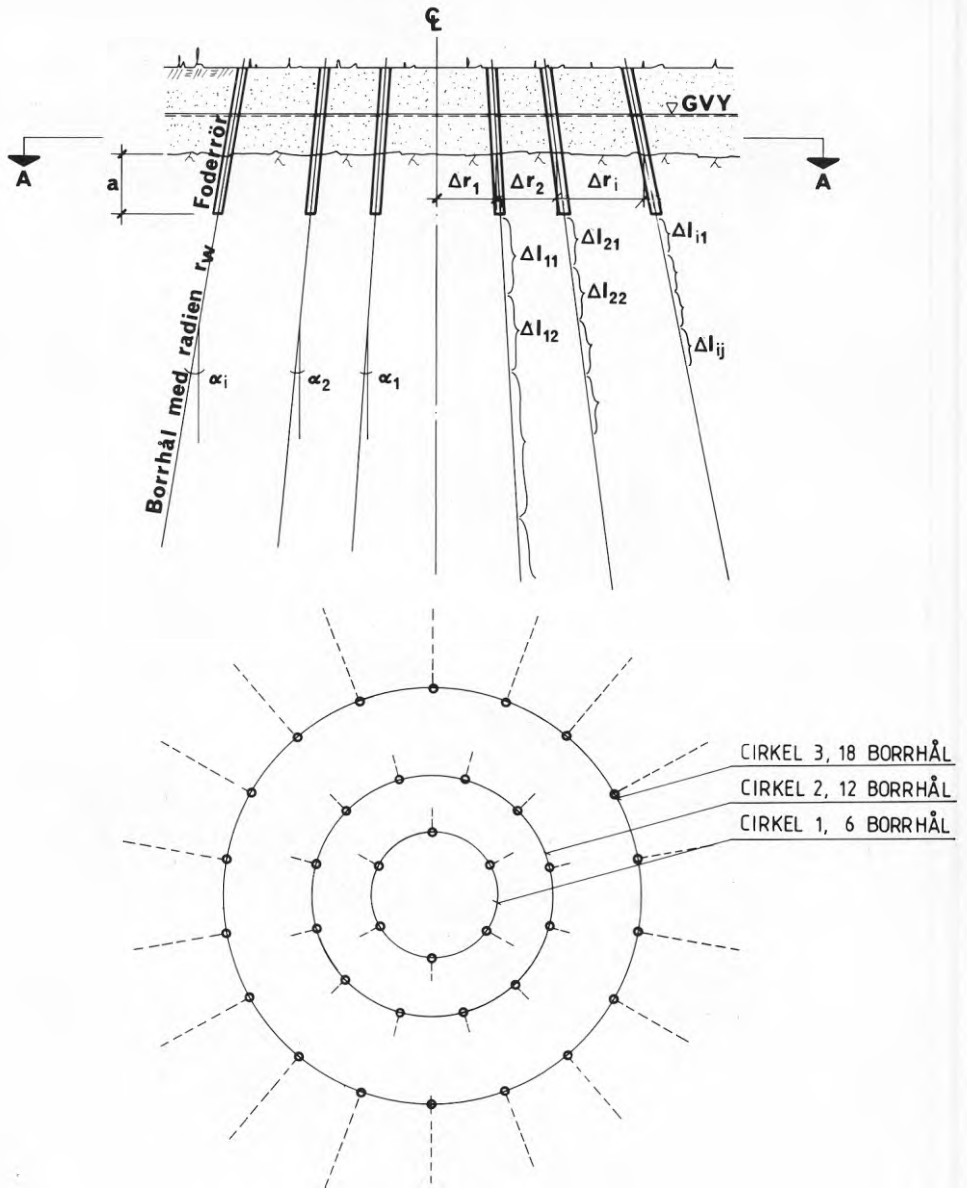


Fig 4.1 Borrhålsvärmelager med godtyckligt lutande borrhål. Borrhålen har antagits vara placerade på lika inbördes avstånd längs koncentriska cirklar. Därigenom uppnås cirkulär symmetri, vilket förenklar beräkningsarbetet.

Som utgångspunkt för beräkningen betraktar vi en linjekälla eller linjesänka som har längden  $2L$  och som befinner sig i ett poröst medium med oändlig utsträckning i alla riktningar, jfr fig 4.2.

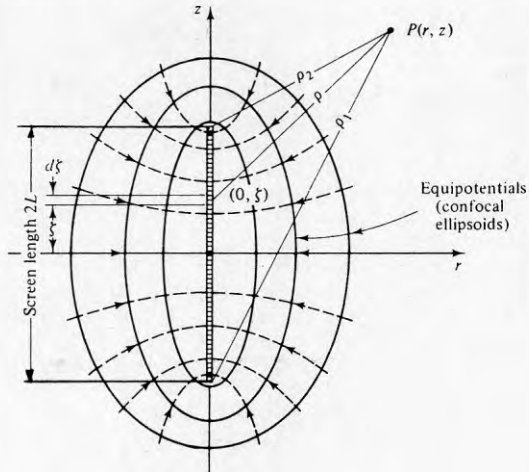


Fig 4.2 Linjesänka i ett poröst medium som har oändlig utsträckning i alla riktningar. För linjekälla gäller motsatt strömningsriktning.

Vattenströmningen från eller till linjekällan eller linjesänkan är rotationssymmetrisk med avseende på z-axeln. Vattnets trycknivå,  $h$ , i en punkt,  $P$ , med koordinaterna  $(r, z)$  ges approximativt av ekvationen, jfr /3/.

$$h = H_{\infty} + \frac{Q}{8\pi KL} \cdot \ln \frac{c_1 + c_2 + 2L}{c_1 + c_2 - 2L} \quad (4.1)$$

där

$H_{\infty}$  = vattnets trycknivå på oändligt avstånd från linjekällan eller linjesänkan

$Q$  = flödet från linjekällan ( $Q$  positivt) eller till linjesänkan ( $Q$  negativt)

$K$  = hydraulisk konduktivitet

$L$  = linjekällans eller linjesänkans halva längd

$c_1$  och  $c_2$  = avstånden mellan linjekällans eller linjesänkans ändpunkter och punkten  $P$ , jfr fig 4.2 där beteckningarna  $\xi_1$  och  $\xi_2$  svarar mot här använda  $c_1$  och  $c_2$ .

$$c_1 = \sqrt{(z+L)^2 + r^2}, \quad c_2 = \sqrt{(z-L)^2 + r^2}$$

Vid härledningen av ekv (4.1) har antagits att flödet  $Q$  är jämnt fördelat längs linjekällan eller linjesänkan. Detta är endast approximativt riktigt. Om vattnets trycknivå är konstant i hela linjekällan eller linjesänkan blir i verkligheten flödet per längdenhet större vid linjekällans eller linjesänkans ändar än vid dess mitt. Detta framgår i fig 4.2 av att strömlinjerna ligger tätare vid linjesänkans ändar än vid dess mitt.

En linjekälla eller linjesänka är oändligt smal. Vattnets trycknivå i linjekällan blir då  $+\infty$  och i linjesänkan  $-\infty$ .

I det porösa mediet runt omkring linjekällan eller linjesänkan är vattnets trycknivå konstant längs ytor som utgöres av rotationsellipsoider, fig 4.2. En sådan rotationsellipsoid kan approximativt avbilda väggen av ett borrhåselement i berg. Om borrhåselementets längd,  $\Delta l$ , är mycket stor i förhållande till borrhålsradien,  $r_w$ , kan man visa att den rotationsellipsoid som har samma volym som borrhåselementet har lillaxeln  $b = 1,225 r_w$ . Om man i stället sätter ellipsoidens yta lika stor som ytan av borrhåselementets vägg fås  $b = 1,273 r_w$ . Som ett medelvärde väljer vi  $b = 1,25 r_w$ .

I fortsättningen antar vi därför att vattnets trycknivå vid borrhåselementets vägg kan sättas lika med trycknivån i en punkt  $P$  som i fig 4.2 har koordinaterna  $r = 1,25 r_w$  och  $z = 0$ .

Om som i fig 4.1 vatten samtidigt rinner från eller till flera borrhåselement fås enligt superpositionsprincipen den resulterande trycknivån,  $H$ , i en punkt  $P$ .

$$H = H_{\infty} + \sum_N (h - H_{\infty}) \quad (4.2)$$

där

$N$  = antalet borrhåselement från eller till vilka vattnet rinner

$h$  ges av ekv (4.1) och vi får således med  $2L = \Delta l$

$$H = H_{\infty} + \sum_N \left( \frac{Q}{4\pi K \Delta l} \cdot \ln \frac{c_1 + c_2 + \Delta l}{c_1 + c_2 - \Delta l} \right) \quad (4.3)$$

$H_{\infty}$  är lika med den naturliga grundvattenytans nivå på stort avstånd från värmelagret.  $H_{\infty}$  är således konstant för alla borrhåselementen.

För vart och ett av de  $N$  borrhåselementen skall aktuella värden på  $\Delta l$ ,  $c_1$ , och  $c_2$  sättas in. Flödena  $Q$  från eller till borrhåselementen är okända men de kan beräknas genom att man tillämpar ekv (4.3) på  $N$  olika punkter  $P$  med kända trycknivåer  $H$ . Därigenom fås ett ekvationssystem med  $N$  ekvationer ur vilket de  $N$  obekanta flödena  $Q$  kan lösas.

De  $N$  punkterna  $P$  väljs mitt på vart och ett av de  $N$  borrhåselement från eller till vilka vattnet rinner. Noga räknat ligger punkterna  $P$  på ett avstånd  $1,25 r_w$  från resp borrhåselements axel, dvs i en punkt som enligt ovan valts att svara mot borrhålsväggen. Trycknivåerna  $H$  sätts lika med de trycknivåer som förut-satts gälla för vattnet i resp borrhåselement.

Potentialfördelningen runt en linjekälla eller linjesänka (fig 4.2) är sådan att man kan ifrågasätta i vilken grad som valet av punkten  $P$  mitt på ett borrhåselement ger ett värde på trycknivån  $H$  som är representativt för medeltrycknivån längs borrhåselementet. Denna fråga undersöktes genom att medeltrycknivån  $H_{medel}$  beräknades genom integration av ekvation (4.1) längs en tänkt rät linje mellan två punkter  $(r, z-L)$  och  $(r, z+L)$ .  $H_{medel}$  jämfördes sedan med trycknivån  $H_{mitt}$  vid linjens mittpunkt  $(r, z)$ . Beräkningen visade att kvoten  $H_{medel}/H_{mitt}$  avtar snabbt med ökande  $r$  och  $z$ . Exempelvis är kvoten 1,262 för  $r=0, z=2L$  men endast 1,024 för  $r=0, z=4L$ . För ett helt borrhålslager gjordes jämförande beräkningar, dels med, dels utan integration av trycknivån  $H$  längs borrhåselementen. Skillnaden mellan de beräknade totalflödena från borrhålslagret blev 1 %. Eftersom integrationen förlängde datamaskintiden avsevärt slopades den i de fortsatta beräkningarna.

Olika randvillkor kan simuleras genom spegling, se /3/.

Två aktuella fall visas i fig 4.3. I fall a) är berget helt vattenmättat och vid dess yta finns en sjö, ett grundvattenförande sandlager e dyl som möjliggör obegränsat vattenutbyte med bergets sprickor längs hela bergytan. Detta randvillkor simuleras med hjälp av en "negativ" spegelbild av det verkliga borrhåls-lagret. Mot varje verkligt borrhåselement svarar en spegelbild med lika stor vattenföring  $Q$  som den som gäller för det verkliga borrhåselementet men med omvänt tecken för  $Q$ .

I fall b) finns en fri grundvattenyta som ligger ett stycke under bergets yta. Infiltrationen av nederbördsvatten till berget är liten. Om grundvattenytans avsänkning eller förhöjning lokalt över borrhåls-lagret är liten och grundvattenytan därför i sin helhet är i det närmaste horisontal, kan strömningsförhållandena simuleras med hjälp av en "positiv" spegelbild av det verkliga borrhåls-lagret. Vattenföringarna  $Q$  har då samma tecken för såväl de verkliga borrhåselementen som deras spegelbilder. Fall b) gäller även när ett vattentätt lerlager ligger direkt ovanpå vattenmättat berg.

I båda fallen a) och b) skall summeringen i ekvation (4.3) göras över såväl de  $N$  verkliga borrhåselementen som de  $N$  spegelbilderna. Antalet obekanta,  $Q$ , ökar inte i ekvationssystemet men däremot antalet termer i varje ekvation.

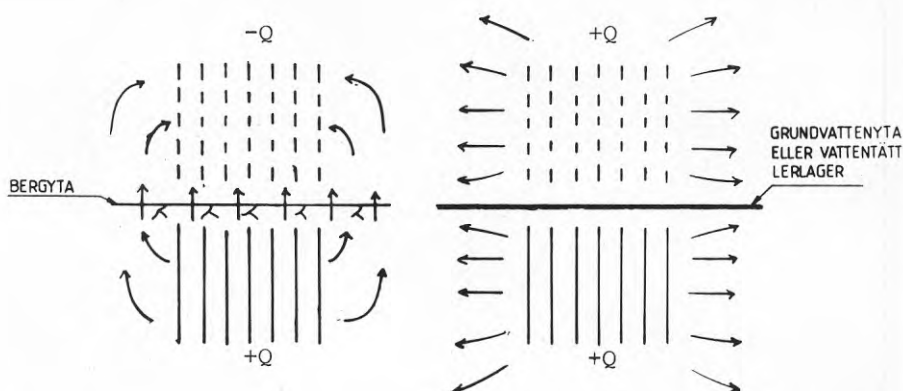


Fig 4.3 Simulering av randvillkor genom spegling.

- a) Obegränsad till- eller bortförsl av vatten vid bergets yta
- b) Fri grundvattenyta ett stycke ner i berget och försumbar infiltration av vatten vid bergytan eller vattentätt lerlager direkt ovanpå vattenmättat berg.

Pilarna illustrerar strömningsriktningar när vattentrycket i de verkliga borrhålen är större än det naturliga grundvattentrycket. I motsatt fall byter pilarna riktning och framför vattenföring  $Q$  byts  $+$  mot  $-$  och tvärtom.

Ett datorprogram baserat på ovanstående har utarbetats. Indata i programmet är följande (jfr fig 4.1).

- antal cirklar,  $i$
- antal borrhål på resp cirkel,  $k$
- avstånd mellan cirklarna,  $\Delta r$
- elementlängder,  $\Delta l$
- vattnets trycknivå i resp borrhålselement,  $H$
- bergtäckning,  $a$
- borrhålsradie,  $r_w$
- borrhålets vinkel mot vertikalen,  $\alpha$
- bergets hydraulisk konduktivitet,  $K$
- randvillkor enligt fig 4.3a resp 4.3b

$\Delta r$  avser avståndet mellan cirklarna mätt vid bergytan.

#### 4.2 Kontroll av datorprogrammet

För kontroll av att inga fel förekom i datorprogrammet utarbetades helt oberoende även ett program för en fickräknare TI 59. På grund av fickräknarens begränsade program- och minneskapacitet kunde detta program endast behandla borrhålsvärmelager med ett litet antal borrhålselement. Ett antal identiskt lika beräkningsexempel löstes med både stordatorprogrammet och fickräknarprogrammet. I båda fallen erhöles samma beräkningsresultat. När stordatorprogrammet användes på större borrhålsvärmelager gjordes också kontroller där datorn fick mata ut delresultat, t ex avståndet mellan olika borrhålselement, som sedan jämfördes med handräknade värden.

Beräkningsnoggrannheten påverkas av indelningen i borrhålselement  $\Delta l$ . Många och korta borrhålselement ger större beräkningsnoggrannhet än få och långa borrhålselement. Samtidigt ökar dock beräkningstiden eftersom både antalet ekvationer i det tidigare nämnda ekvationssystemet och antalet termer i var och en av ekvationerna ökar.

Fig 4.4 visar hur indelningen i borrhålselement påverkar den (med stordatorprogrammet) beräknade vattenförlusten från ett borrhålsvärmelager som har volymen ca  $100\ 000\ m^3$ . Antalet borrhål är 120 st fördelade på 6 cirklar med ett inbördes avstånd  $\Delta r = 4\ m$ . Borrhålen är vertikala. Borrhålslängden under bergytan är 65 m varav de översta 5 m försetts med foderrör. Borrhålsdiametern är 150 mm. Bergets hydrauliska konduktivitet är  $K = 2 \cdot 10^{-7}\ m^3/s, m^2$ . Vattnets trycknivå är överallt i borrhålen  $H - H_\infty = 1,0\ m$  högre än grundvattnets naturliga trycknivå. Bergytan är vattengenomsläpplig, jfr fig 3.1 och 4.3 a.

Av fig 4.4 framgår att vattenförlusten asymptotiskt närmar sig ett slutvärde när borrhåselémentens längd  $\Delta l$  minskar, dvs kvoten  $\Delta r/\Delta l$  ökar. Redan för  $\Delta r/\Delta l = 1$ , dvs  $\Delta l = 4\ m$ , uppnås 98 % av slutvärdet. Antalet borrhålselement är då  $6 \cdot (65-5)/4 = 90$ .

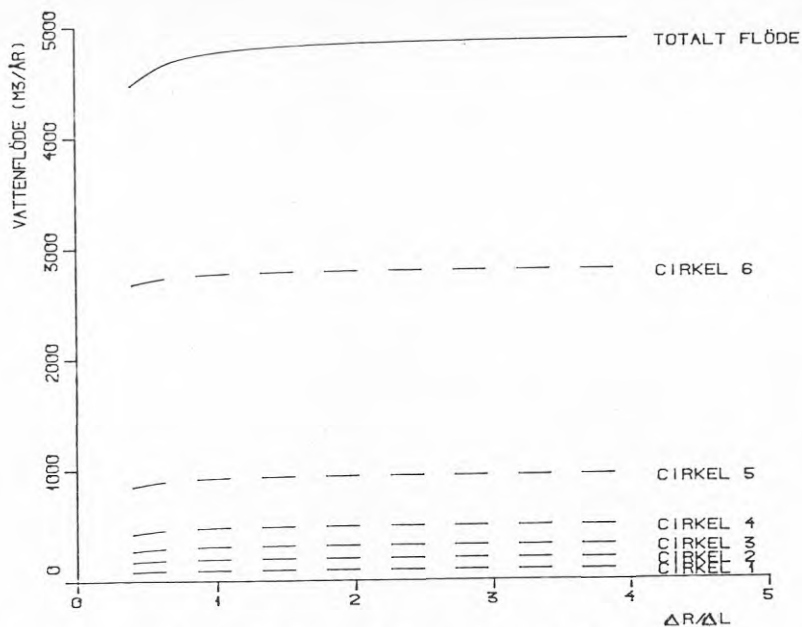


Fig 4.4 Vattenförlust från ett borrhålsvärmelager vid ett övertryck av 1,0 m vp och varierande  $\Delta r/\Delta l$

### 4.3 Superposition

Som tidigare nämnts kan skillnaden mellan trycknivån hos vattnet i borrhålen och grundvattnets trycknivå utanför värmelagret vara olika för olika borrhål och även på olika nivåer längs borrhålen. Orsaken är strömningsförluster i rörledningarna som förbinder seriekopplade borrhål och densitetsskillnaden mellan kallt grundvatten och varmt vatten i borrhålen.

Datorprogrammet konstruerades så att man som indata kan mata in individuella trycknivåer för varje borrhåselement. För att förenkla beräkningsarbetet valde vi dock att i stället dela upp trycknivåfördelningen i borrhålsvärmelagret i fyra grundkomponenter som åskådliggöres i fig 4.5. Genom att superpositionsprincipen gäller kan man sedan med olika kombinationer av dessa grundkomponenter mycket nära avbilda komplicerade tryckfördelningar som kan vara aktuella inom borrhålsvärmelagret och då, på sätt som kommer att framgå av senare beräkningsexempel, också lätt få fram storleken av vattenutbytet mellan värmelagret och omgivande berg.  $h_a$ ,  $h_b$ ,  $h_c$  och  $h_d$  kan ha såväl positiva som negativa värden.

Fig 4.5 a visar en trycknivåskillnad mellan vattnet i borrhålen och grundvattnet som är konstant i hela värmelagret.



Fig 4.5 b visar en trycknivåskillnad som avtar linjärt från värmelagrets centrum till noll vid de yttersta borrhålen. Längs varje borrhål är trycket konstant på alla nivåer. Denna komponent användes när borrhålen är seriekopplade i radiell riktning och värmelagret laddas med varmt vatten som i rörsystemet mellan borrhålen har en strömningsriktning från lagrets centrum och ut mot dess periferi. Genom att fördelningen i fig 4.5 b dras från fördelningen i fig 4.5 a erhålles en från lagrets periferi och in mot dess centrum linjärt minskande trycknivåskillnad som användes när värmelagret urladdas med en strömningsriktning i rörsystemet från periferin och in mot centrum, jfr fig 1.3.

Fig 4.5 c visar en trycknivåskillnad som är konstant längs lagrets överyta och som minskar linjärt med djupet under överytan. Komponenten avbildar tillsammans med komponenten i fig 4.5 d effekten av densitetsskillnad mellan kallt grundvatten och varmt vatten i borrhålen, fig 3.10. Fördelningen enligt fig 4.5 c användes också om man behöver ta hänsyn till vattnets strömningsförlust i själva borrhålen.

Fig 4.5 d visar en trycknivåskillnad som vid lagrets överyta minskar linjärt från värmelagrets centrum till noll vid de yttersta borrhålen. I vertikal led minskar sedan trycknivåskillnaden i varje borrhål linjärt till noll vid lagrets underyta.

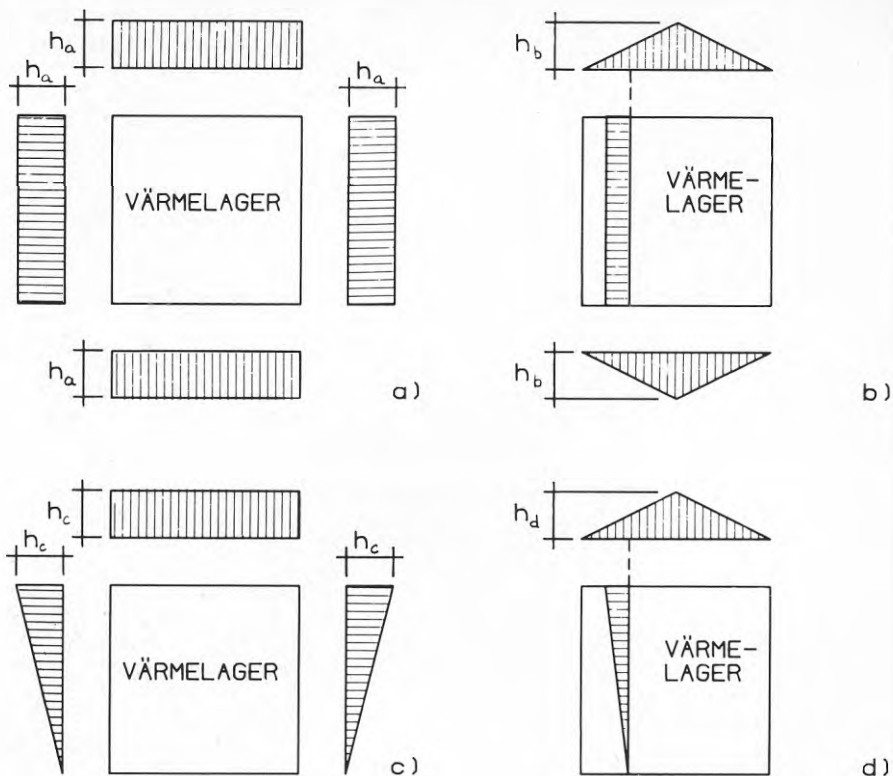


Fig 4.5 Grundkomponenter i fördelningen av borrhålens trycknivå

#### 4.4 Beräkningsexempel

Längre fram visar beräkningsexemplen 12 och 13 hur man genom att kombinera de fyra i avsnitt 4.3 beskrivna grundkomponenterna kan beräkna vattenförlusten från ett borrhålsvärmelager med komplicerad tryckfördelning i borrhålen. Först skall vi dock i beräkningsexemplen 4 - 11 undersöka vilka vattenförluster som var och en av grundkomponenterna ger upphov till. Beräkningarna avser då samma borrhålslager som tidigare behandlats i beräkningsexempel 1, dock med skillnaden att beräkningarna nu avser tredimensionell vattenströmning i vattengenomsläppligt berg som har oändlig utsträckning under värmelagret, fig 3.1 och 4.6. Ovanför värmelagret finns 5 m bergtäckning. Borrhålen är försedda med foderrör på dessa 5 m. Både fallet med vattengenomsläpplig bergyta och vattentät bergyta (t ex täckt av lera) behandlas. I övrigt har värmelagret samma data som i beräkningsexempel 1.

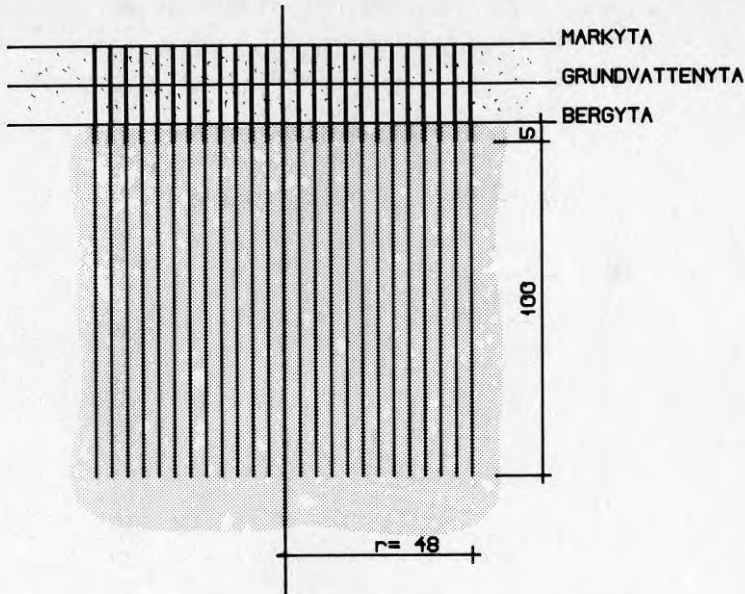


Fig 4.6 Borrhålslager som behandlas i beräknings-exemplen 4 - 13. Övriga data som i beräkningsexempel 1 (avsnitt 3.3)

Borrhålselementens längd har överallt valts till  $\Delta l = 4$  m. Eftersom borrhålen är 100 m långa blir antalet borrhålselement per borrhål lika med 25. Totala antalet borrhål i värmelagret är 468 st fördelade på 12 borrhålsringar. Detta medför dock inte att ekvationssystemet behöver innehålla  $25 \cdot 468 = 11\,700$  obekanta vattenföringar. Genom att cirkulär symmetri förutsatts blir i stället antalet obekanta  $12 \cdot 25 = 300$ .

#### 4.4.1 Beräkningsexempel 4 - 11

För dessa åtta beräkningsexempel sammanfattas typ av trycknivåfördelning, randvillkor vid bergytan (A = vattengenomsläpplig bergyta, B = vattentät bergyta) och beräknad total vattenförlust från borrhålsvärmelagret i nedanstående tabell 4.1. Vid trycknivåfördelning enligt fig 4.5 a är i hela värmelagret trycknivån i borrhålen  $h_a = H - H_\infty = 1,0$  m vp högre än trycknivån i grundvattnet på stort avstånd från värmelagret. Vid trycknivåfördelningar enligt fig 4.5 b, c och d gäller att trycknivåskillnaden mellan borrhålen och grundvattnet är  $h_b = h_c = h_d = H - H_\infty = 1,0$  m vp vid värmelagrets centrum eller längs dess ovansida och sedan minskar till 0 vid lagrets periferi och/eller undersida. K är bergets hydrauliska konduktivitet ( $m^3/s, m^2$ ).

Tabell 4.1 Beräkningsförutsättningar och beräknad total vattenförlust från borrhålsvärmelagret

K = bergets hydrauliska konduktivitet  
( $m^3/s \cdot m^2$ )

A = vattengenomsläpplig bergyta

B = vattentät bergyta

$h_a = h_b = h_c = h_d = 1,0 \text{ m vp}$

Beräknings- exempel	Trycknivå- fördelning enl fig 4.5	Randvill- kor vid bergytan	Beräknad total vatten- förlust	
			$m^3/s$	$m^3/år$
4	a	A	2050·K	$6,46 \cdot 10^{10} \cdot K$
5	a	B	480·K	$1,52 \cdot 10^{10} \cdot K$
6	b	A	360·K	$1,13 \cdot 10^{10} \cdot K$
7	b	B	36·K	$0,11 \cdot 10^{10} \cdot K$
8	c	A	1500·K	$4,74 \cdot 10^{10} \cdot K$
9	c	B	180·K	$0,57 \cdot 10^{10} \cdot K$
10	d	A	307·K	$0,97 \cdot 10^{10} \cdot K$
11	d	B	5,2·K	$0,016 \cdot 10^{10} \cdot K$

Vattenförlustens fördelning på de olika borrhålselen-  
menten framgår av bilagorna 1.1 - 1.8. Bergets hyd-  
rauliska konduktivitet har i bilagorna antagits vara  
 $K = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/s \cdot \text{m}^2$ .

Tabell 4.1 visar att randvillkoret vid bergytan har  
mycket stort inflytande på storleken av vattenförlus-  
ten från värmelagret. Vid vattengenomsläpplig bergyta  
är vattenförlusten mellan ca 4 och 60 gånger så stor  
som vid vattentät bergyta. Randvillkoret vid bergytan  
har störst inflytande när vattentrycket är högre i  
värmelagrets övre del än i dess undre del. Av bila-  
gorna 1.1 - 1.8 framgår också att vattenförlusterna  
från de borrhålselen-  
ment som ligger nära värmelagrets  
överyta är avsevärt större när bergytan är vatten-  
genomsläpplig än när den är vattentät.

Av bilagorna 1.1 och 1.2 framgår att vid konstant  
vattentryck i hela värmelagret är vattenförlusterna  
från borrhålselen-  
ment som ligger i värmelagrets inre  
del mycket små. För flera av dessa borrhålselen-  
ment har gränsen för beräkningsnoggrannhet t o m förorsak-  
at små negativa värden på vattenförlusten. Vatten-  
förlusten från värmelagret kommer praktiskt taget  
helt från de två à tre borrhålselen-  
ment som ligger  
närmast värmelagrets mantelyta, underyta och, för  
fallet med vattengenomsläpplig bergyta, värmelagrets  
överyta. Vattentrycket i dessa borrhålselen-  
ment bildar  
liksom ett skal runt värmelagret som motverkar vat-  
tenförlusterna från värmelagrets inre del.

Av bilagorna 1.3, 1.4, 1.7 och 1.8 framgår att detta skal inte finns när vattentrycket är litet i borrhålen vid värmelagrets mantelyta. Vid vattengenomsläpplig bergyta är vattenförlusterna störst vid värmelagrets överyta men i övrigt är vattenförlusten tämligen jämnt fördelad över borrhålselementen. Ett viktigt undantag utgör dock de två yttersta borrhåls-cirkelarna 11 och 12 som inte förlorar vatten utan i stället på grund av sitt låga vattentryck samlar in en del av det vatten som förlorats från borrhåls-cirkelarna 1 - 10. Insamlingen av vatten visas av minustecknen framför vattenföringarna.

På samma sätt framgår av bilagorna 1.5, 1.6 och 1.8 att litet vattentryck vid värmelagrets underyta medför att borrhålselementen som ligger nära underytan samlar in en del av vattenförlusten från de övriga borrhålselementen.

#### 4.4.2 Beräkningsexempel 12 - 14

Dessa beräkningsexempel syftar inte till en fullständig utredning om vattenförlustens storlek under olika delar av en värmelagringscykel och den därmed sammanhängande frågan om lämplig trycknivå hos vattnet i borrhålen under dessa olika delar. Syftet är i stället att för ett enda driftfall belysa hur man med utnyttjande av resultaten från beräkningsexemplen 4 - 11 på ett enkelt sätt kan beräkna både vattenförlusten och lämplig trycknivå för att minimera vattenförlusten.

Vi betraktar ett skede i lagrets uppladdning med värme och antar en temperaturfördelning i lagret som schematiskt visas i fig 4.7. Temperaturen hos grundvattnet utanför värmelagret antas vara 5 °C.

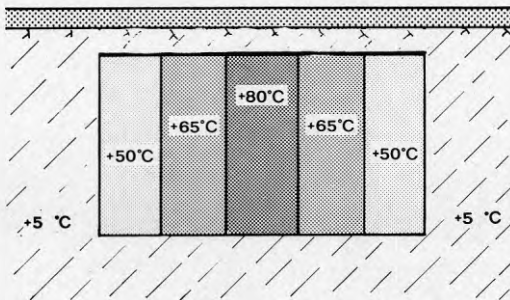


Fig 4.7 Temperaturzoner i cirkulär cylindriskt borrhålslager. Beräkningsexempel 12 och 13.

I beräkningsexempel 12 antas bergytan vara vattengenomsläpplig och i beräkningsexempel 13 vattentät.

Skillnaden i trycknivå mellan borrhålen och grundvattnet utanför värmelagret innehåller komponenter av alla de fyra typer som visas i fig 4.5. Vi skall här behandla komponenterna i ordningen c, d, b och a.

Komponenterna c och d har sin orsak i densitetsskillnaden mellan det varma vattnet i borrhålen och det kalla grundvattnet. Om vi för ett ögonblick antar att både vattnet i ett borrhål och grundvattnet har samma trycknivå vid värmelagrets underyta kommer trycknivåskillnaden vid värmelagrets överyta att vara (räknat i m grundvattenpelare)

$$h = \frac{\rho_g - \rho_v}{\rho_g} \cdot a \quad (4.4)$$

där

- $\rho_g$  = grundvattnets densitet
- $\rho_v$  = borrhålsvattnets densitet
- a = nivåskillnaden mellan värmelagrets överyta och underyta

Ekv (4.4) förutsätter att vattentemperaturerna är konstanta i vertikalled, jfr fig 4.7.

Om värmelagret har höjden a = 100 m, borrhålsvattnet temperaturen 80 °C och grundvattnet temperaturen 5 °C blir, med densiteter enligt tabell 2:1, trycknivåskillnaden  $h_{80} = 2,8$  m. Om borrhålsvattnet har temperaturen 50 °C blir  $h_{50} = 1,2$  m. Vid den temperaturfördelning i värmelagret som visas i fig 4.7 har h således olika värden vid värmelagrets centrum och vid dess periferi. Om vi fortfarande antar att vattnet i borrhålen och grundvattnet har samma trycknivå vid värmelagrets underyta kan trycknivåskillnaden i andra delar av värmelagret med god approximation beskrivas genom superposition av grundkomponenterna c och d i fig 4.5. Vi väljer då först grundkomponent c med  $h_c = h_{50} = 1,2$  m vid värmelagrets överyta och sedan grundkomponent d med  $h_d = h_{80} - h_{50} = 2,8 - 1,2 = 1,6$  m vid överytans mitt.

Vattnets strömningsförlust i borrhålet ger också upphov till en längs borrhålet linjärt varierande trycknivå. Om vi t ex antar att borrhålsdiametern är 150 mm, att ytterdiametern hos den slang som finns nedstoppad i borrhålet är 60 mm och att vattenflödet mellan slangen och borrhålsväggen är 1 l/s blir strömningsförlusten i borrhålet dock liten och vi försummar den därför.

Grundkomponenten b i fig 4.5 motiveras av att trycknivån är olika i seriekopplade borrhål som är belägna på olika avstånd från värmelagrets centrum.

Utan att här gå närmare in på frågan om lämplig rör-dragning mellan borrhålen antar vi att t ex 6 å 7 borrhål är seriekopplade. Om slangar och rör har inre diametern 50 mm blir strömningsförlusten per borrhål (ca 120 m slang och rör) 1 m eller något därunder. Vid laddning av värmelagret skulle trycknivån vid lagrets centrum då vara ca 6 m högre än trycknivån vid lagrets periferi. För grundkomponenten b får vi då  $h_b = 6$  m.

Genom att från fig 4.5 ta med även en grundkomponent a kan vi balansera trycknivån i värmelagret så att den totala vattenförlusten från värmelagret blir noll eller nära noll.  $h_a$  väljes då negativ.

Vattenförlusterna i tabell 4.1 gäller för  $h = 1,0$  m. Vid vattengenomsläpplig bergyta blir då vattenförlusten från värmelagret noll om vi kombinerar grundkomponenterna a, b, c och d på sådant sätt att

$$(2050 h_a + 360 h_b + 1500 h_c + 307 h_d) \cdot K = 0 \quad (4.5)$$

dvs med värden på  $h_b$ ,  $h_c$  och  $h_d$  enligt ovan

$$2050 h_a + 360 \cdot 6 + 1500 \cdot 1,2 + 307 \cdot 1,6 = 0 \quad (4.6)$$

som ger  $h_a = -2,2$  m.

Vid vattentät bergyta får vi för vattenförlusten noll, jfr tabell 4.1

$$(480 h_a + 36 \cdot 6 + 180 \cdot 1,2 + 5,2 \cdot 1,6) \cdot K = 0 \quad (4.7)$$

som ger  $h_a = -0,9$  m.

De resulterande trycknivåskillnaderna mellan borrhålsvattnet i olika delar av värmelagret och grundvattnet visas i fig 4.8.

Trycknivåskillnaderna som visas i fig 4.8 uppkommer automatiskt om, bortsett från kommunikationen mellan borrhålen och det sprickiga berget, systemet som svarar för vattencirkulationen genom borrhålen är fullständigt vatten- och lufttätt samt systemets pumpar och rörledningar ligger på sådan nivå att vattnet inte släpper i dem p g a för lågt tryck. I ett sådant slutet cirkulationssystem blir vattenförlusten noll. Trots detta kommer som framgår nedan ett vattenutbyte att äga rum mellan värmelagrets borrhål och berget.

I fig 4.8 är avståndet mellan värmelagrets överyta och den vattengenomsläppliga bergytan endast 5 m. Med den fördelning av trycknivån i värmelagret som fig 4.8 a visar torde en viss mängd varmt vatten från värmelagrets övre centrala del strömma upp genom bergytan. Samtidigt torde samma volym kallt grundvatten strömma till borrhålen vid värmelagrets mantelyta eftersom vattnet i dessa borrhål har lägre trycknivå än grundvattnet. Förlusten av varmt vatten

vid bergytan och den samtidiga indragningen av kallt grundvatten till värmelagrets cirkulationssystem innebär en icke önskvärd energiförlust. Den kan troligen helt motverkas om man lyfter trycknivån i hela värmelagret något mer än 1 m vp så att hela överytan och en tillräckligt stor del av mantelytan närmast överytan får högre trycknivå än grundvattnet.

En exakt beräkning av hur mycket vi måste lyfta trycknivån kräver en utbyggnad av den matematiska modellen som är fullt möjlig, men som inte kunnat göras inom ramen för föreliggande utredning. Samma utbyggnad av modellen krävs för att man skall kunna beräkna hur stort utbytet av varmt vatten och kallt grundvatten blir vid den fördelning av trycknivån i värmelagret som fig 4.8 a visar.

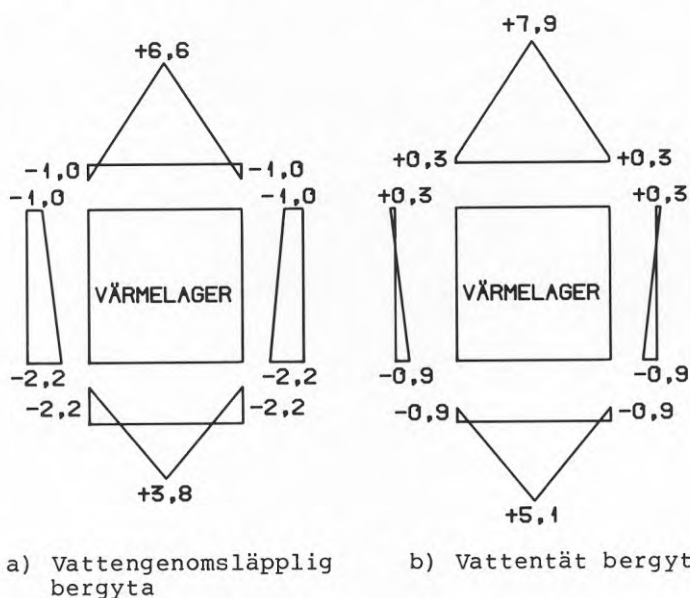


Fig 4.8 Trycknivåskillnad i m vp mellan värmelagrets borrhål och grundvattnet utanför värmelagret vid vattenförlusten noll. Beräkningsexempel 12 (a) och 13 (b)

Om vi t ex lyfter trycknivån i hela värmelagret med 1,2 m från de trycknivåer som fig 4.8 a visar blir  $h_a = -1,0$  m och den totala vattenförlusten från värmelagret (jfr beräkningsexempel 4 i tabell 4.1)  $1,2 \cdot 2050 \cdot K = 2460 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$ . Trycknivån är då fortfarande lägre än grundvattnets trycknivå i den undre delen av borrhålen som ligger nära värmelagrets mantelyta, fig 4.9, men detta medför troligen ingen nackdel eftersom dessa borrhålsdelar endast torde



dra åt sig varmt vatten som förlorats från andra delar av värmelagret. (I ett verkligt sprickigt berg kan kinematisk dispersion vid gränsen mellan det återcirkulerande varma vattnet och det omgivande kalla grundvattnet eventuellt medföra att en mindre mängd kallt grundvatten blandas in i det varma vatten som strömmar tillbaka till borrhålen.)

Trycknivån vid värmelagrets överyta får inte väljas så hög att man riskerar hydraulisk upplyftning av berget ovanför värmelagret. Om vi t ex antar att grundvattenytan ligger på samma nivå som bergytan, dvs 5 m ovanför värmelagrets överyta, och att det inte finns något jordlager ovanpå bergytan bör vattnets trycknivå vid värmelagrets överyta överstiga grundvattnets trycknivå med högst  $(2,65 - 1,00) \cdot 5 = 8,25$  m vp. Detta villkor uppfylles av trycknivåerna i fig 4.9.

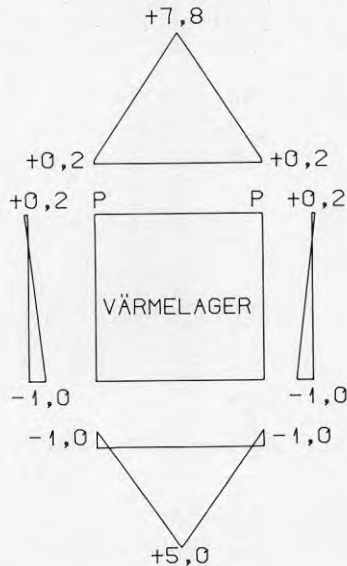


Fig 4.9 Trycknivåerna enligt fig 4.8 a ökade med 1,2 m vp. Vattenförlust =  $2460 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$   
Beräkningsexempel 14

Vattenförlusten  $2460 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$  är tämligen stor. Exempelvis är den 2,46 l/s om bergets hydrauliska konduktivitet är  $K = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ . Vattenförlusten minskar om man kan minska strömningsförlusten i slangarna och rörledningarna i och mellan borrhålen t ex genom att öka slang- och rördiametern eller seriekoppla färre borrhål i radiell led. Detta minskar värdet på  $h_p$  i ekv (4.5) och vi skall nu visa hur denna minskning inverkar på vattenförlusten från värmelagret.

Vi antar att vi i ytterkanten på värmelagrets överyta, dvs vid P i fig 4.9, vill ha en trycknivå som med  $h_p$  m överstiger grundvattnets trycknivå. I fig 4.9 är  $h_p = +0,2$  m. Av fig 4.5 a-d kan man dra slutsatsen att

$$h_p = h_a + h_c \quad (4.8)$$

dvs

$$h_a = h_p - h_c \quad (4.9)$$

Vattenförlusten Q från värmelagret är lika med vänstra ledet i ekv (4.5) som med  $h_a$  insatt enligt ekv (4.9) ger

$$Q = (2050 h_p + 360 h_b - 550 h_c + 307 h_d) \cdot K \quad (4.10)$$

Med hjälp av denna ekvation kan vi beräkna vattenförlusten Q från värmelagret för godtyckliga kombinationer av de fem parametrarna  $h_p$ ,  $h_b$ ,  $h_c$ ,  $h_d$  och K. Vattenförlusterna under värmelagrets olika driftskeden kan därigenom lätt beräknas.

Om vi t ex antar att  $h_p = 0,2$  m och liksom tidigare  $h_c = 1,2$  m och  $h_d = 1,6$  m får vi

$$Q = (241 + 360 h_b) \cdot K \quad (4.11)$$

Ekv (4.11) ger följande samhörande värden på  $h_b$  och Q/K

$h_b$	=	2	4	6	8	m
Q/K	=	961	1681	2401	3121	m <sup>2</sup>

För  $h_b = 6$  har vi tidigare fått  $Q = 2460 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$ . Skillnaden mot tabellens värde  $Q = 2401 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$  beror på att vi i de tidigare räkningarna och i fig 4.8 och 4.9 använt värden på  $h_a$  som avrundats till jämna 0,1 m.

Om man, utan risk för att kallt grundvatten dras in i borrhålen, skulle kunna minska  $h_p$  från  $h_p = 0,2$  m till t ex  $h_p = 0$  m visar ekv (4.10) att vattenförlusten från värmelagret minskar med  $2050 \cdot 0,2 \cdot K = 410 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$ , dvs med 0,41 l/s om  $K = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

Vid vattentät bergyta och vattenförlusten noll från värmelagret, fig 4.8.b, drar borrhålen inte till sig något kallt grundvatten och detta trots att borrhålen vid vissa delar av värmelagrets mantelyta och underyta har lägre trycknivå än grundvattnet. Allt varmt vatten som förloras från de delar av värmelagret som har högre trycknivå än grundvattnet strömmar förr eller senare tillbaka till de delar av värmelagret som har lägre trycknivå än grundvattnet. (I ett verkligt sprickigt berg kan kinematisk dispersion medföra en viss inblandning av kallt grundvatten.)

#### 4.4.3 Influensradie, grova sprickor, sprick- och krosszoner utanför värmelagret

Som tidigare nämnts bygger ovanstående tredimensionella beräkningar på antagandet att det sprickiga berget är homogent och isotropt ur vattenströmnings-synpunkt. I verkligheten kan berget utanför värmelagret vara genomdraget av enstaka grova sprickor, sprick- eller krosszoner som har mycket större vattengenomsläpplighet än det mellanliggande finsprickiga berg som utnyttjats för värmelagret. Dessa grova sprickor etc innebär liksom andra eventuella oregelbundenheter i bergmassan en avvikelse från det teoretiska antagandet om berget som ett homogent och isotropt medium. En fråga är då hur långt från värmelagret som sådana avvikelser måste ligga för att inte nämnvärt påverka vattnets strömningsförhållanden vid värmelagret och därmed vattenförlusten från detta. Man bör därför klarlägga hur långt ut från värmelagret som nämnvärda, av värmelagret förorsakade, vattenströmmar och trycknivåförändringar sträcker sig och hur ändrade randvillkor ute i berget kan påverka vattenströmmarna.

Ekv (4.3) som använts för den tredimensionella beräkningen innehåller ingen influensradie  $R_0$ . På stort avstånd från värmelagret, dvs för stora värden på  $c_1$  och  $c_2$ , närmar sig logaritmen asymptotiskt till noll och därmed trycknivån  $H$  asymptotiskt till grundvattnets trycknivå  $H_\infty$  på oändligt stort avstånd från värmelagret.

När  $c_1 + c_2 \gg \Delta l$  gäller med stor noggrannhet att

$$\ln \frac{c_1 + c_2 + \Delta l}{c_1 + c_2 - \Delta l} = 2 \cdot \frac{\Delta l}{c_1 + c_2} = \frac{\Delta l}{R} \quad (4.12)$$

där  $R$  är avståndet från, i genomsnitt, värmelagrets mittpunkt. Ekv (4.3) kan då skrivas

$$H = H_\infty + \frac{Q_t}{4\pi KR} \quad (4.13)$$

som är ekvationen för radiell (sfärisk) vattenströmning från en punktkälla eller till en punktsänka som befinner sig i ett poröst medium med oändlig utsträckning i alla riktningar.  $Q_t$  är den totala vattenföringen från eller till värmelagret. På stora avstånd  $R$  från värmelagret beskriver ekv (4.13) trycknivån i berget med god noggrannhet men på mindre avstånd endast approximativt.

Olika randvillkor vid bergytan kan avbildas genom spegling på samma sätt som visas i fig 4.3.

Vid vattengenomsläpplig bergyta har det verkliga värmelagret och det speglade värmelagret samma vattenföring men med omvänt tecken, fig 4.3 a. Vattnet strömmar kortast möjliga väg från det verkliga värmelagret till bergytan och det speglade värmelagret. Vattenströmningen i berget och därmed vattnets trycknivå i berget avtar därför snabbt när man avlägsnar sig från värmelagret. Detta illustreras av fig 4.10 a där trycknivåerna som en approximation beräknats med hjälp av ekv (4.13) och spegling med omvänt tecken för  $Q_t$ . Grundvattnets trycknivå har satts till  $H_\infty = 0$ .

Av fig 4.10 a förstår man att strömningsförhållandena i berget och därmed vattenförlusten från värmelagret påverkas endast obetydligt om det på större avstånd än 300 - 400 m från värmelagret skulle finnas någon grov bergspricka, sprick- eller krosszon som har hög transmissivitet för vatten och därigenom samma trycknivå,  $H_\infty = 0$ , som grundvattnet vid bergytan och i berget långt från värmelagret.

Vid vattentät bergyta, fig 4.10 b, avtar trycknivån inte riktigt lika snabbt i riktning från värmelagret som vid vattengenomsläpplig bergyta. Vattenflödet från värmelagret kan inte försvinna upp genom bergytan utan det måste sprida sig i radiell riktning genom berget under samtidig minskning av trycknivån.

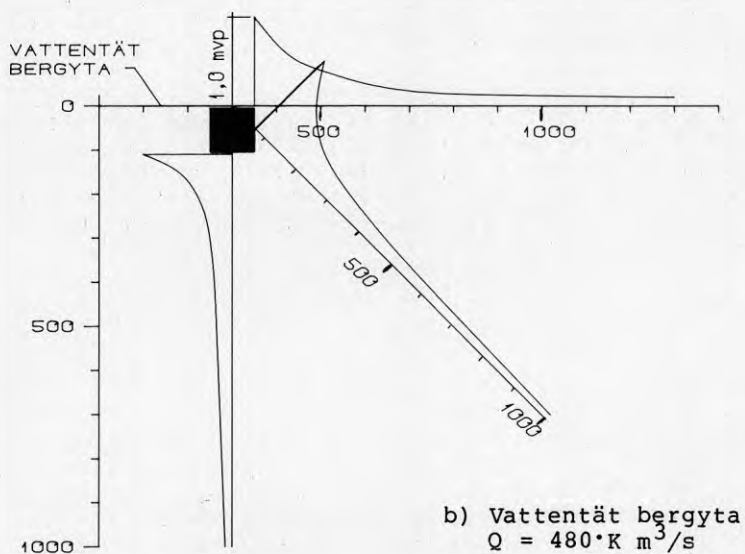
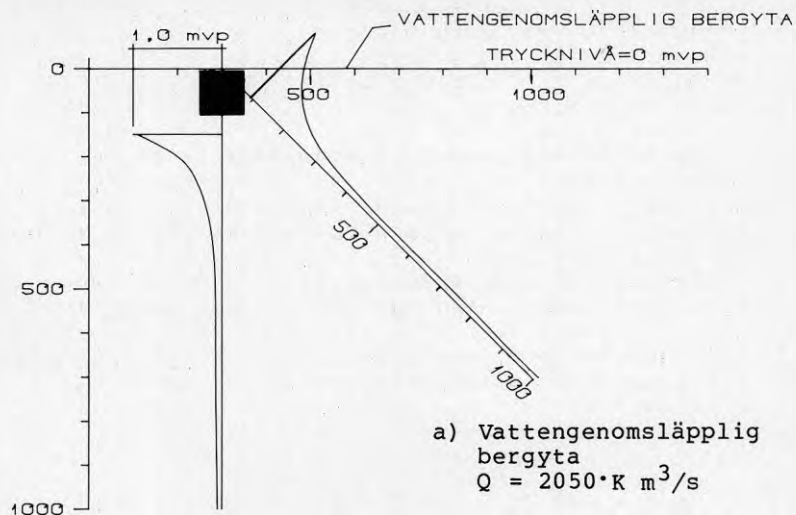


Fig 4.10 Trycknivåer i berget alstrade av en punktkälla som ligger i centrum av värmelagret. Grundvattnets trycknivå på stort avstånd från värmelagret har satts till noll. Vattenföringar enligt tabell 4.1, beräknings-exempel 4 och 5. Värmelagret markerat med svart fyrkant.

Genom att jämföra fig 4.10 a och b förstår man att grova sprickor, sprick- och krosszoner som ligger ett stycke från värmelagret får större inverkan på strömningsförhållandena i berget och vattenförlusten från värmelagret när bergytan är vattentät än när den är vattengenomsläpplig.

Vi antar nu att värmelagret i fig 4.10 b omges av grova sprickor, sprick- eller krosszoner som i berget approximativt bildar en halvsfär med exempelvis radien  $R_1 = 300$  m under värmelagret, fig 4.11. Vi kan då med hjälp av ekv (4.13) approximativt justera den vattenförlust från värmelagret,  $Q = 480 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$ , som beräknats under antagande av homogent berg.

Vid homogent berg är vattnets trycknivå längs halvsfären approximativt, jfr ekv (4.13) med  $Q_t = 2Q = 2 \cdot 480K \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$H_1 = H_\infty + \frac{2Q}{4\pi KR_1} = 0 + \frac{2 \cdot 480K}{4\pi K \cdot 300} = 0,25 \text{ m}$$

$Q_t$  har satts lika med  $2Q$  eftersom både det verkliga och det speglade värmelagret bidrager till den radiella strömningen i fig 4.11.

Vid värmelagret är vattnets trycknivå  $H_0 = 1,0$  m. Vid homogent berg minskar trycknivån med  $1,0 - 0,25 = 0,75$  m mellan värmelagret och halvsfären och med  $1,0$  m mellan värmelagret och oändligheten. Om sprickorna etc längs halvsfären har stor transmissivitet och därför trycknivån  $0$  ökar vattenförlusten från värmelagret från  $480 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$  till ca

$$\frac{1,0}{0,75} \cdot 480 \cdot K = 640 \cdot K \text{ m}^3/\text{s}$$

dvs med 33 %.

Andra fall med grova sprickor, sprick- och krosszoner i berget utanför värmelagret kan ofta behandlas genom mer omfattande spegling än den som fig 4.3 visar /3/. Som exempel visar fig 4.12 ett fall där en enstaka spricka etc skär bergytan i  $60^\circ$  vinkel.

Även fall med enstaka grova sprickor, sprick- och krosszoner som skär tvärs igenom värmelagret kan många gånger behandlas genom spegling. Man förutsätter då att den grova sprickan etc har tätats med cementinjektering just där den skär igenom värmelagret men att den p g a sin stora transmissivitet i övrigt dränerar det småsprickiga och vattengenomsläppliga berget på båda sidor om sprickan etc. Vattenförlust genom en grov spricka som står i direkt hydraulisk förbindelse med värmelagrets borrhål behandlas nedan i kapitel 5.

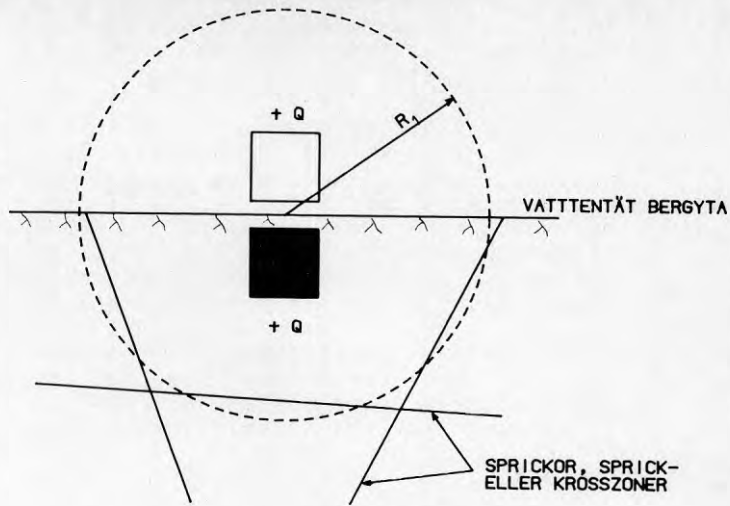


Fig 4.11 Sprickor, sprick- eller krosszoner utanför värmelager. Svart kvadrat = verkligt värmelager, vit kvadrat = speglat värmelager.

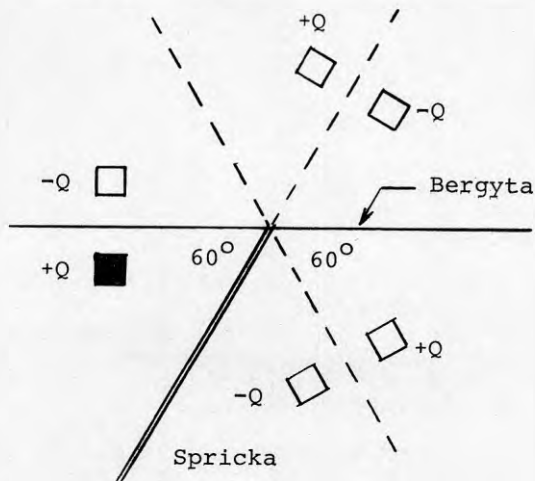


Fig 4.12 Spegling av borrhållsvärmelager när en enstaka spricka, sprick- eller krosszon med stor transmissivitet för vatten skär en vattengenomsläpplig bergyta i 60° vinkel. Svart kvadrat = verkligt värmelager, vita kvadrater = speglade värmelager.

## 5. VATTENFÖRLUSTER FRÅN BORRHÅLEN GENOM EN ENSTAKA SPRICKA, SPRICK- ELLER KROSSZON

### 5.1 Inledning

I många fall förekommer i berget enstaka grova sprickor, sprick- eller krosszoner till vilka grundvattenströmningen koncentreras. Den vattenströmning som då sker i sprickorna etc är avsevärt större än den som sker i bergblocken mellan sprickorna etc. Vid beräkning av vattenflöden kan man därför inte anta att berget är homogent och småsprickigt, dvs de tidigare redovisade beräkningsmodellerna kan ej tillämpas.

I nedanstående beräkningsmodell betraktas berget i stället som vattentätt med undantag av en enstaka grov spricka, sprick- eller krosszon som skär tvärs genom borrhålsvärmelagret, fig 5.3.

### 5.2 Transmissivitet

En sprickas, sprick- eller krosszons vattenförande egenskaper kan beskrivas med dess transmissivitet,  $T$  ( $m^3/s, m$ ).

Allmänt gäller för ett helt vattenmättat, homogent skikt att transmissiviteten är lika med skiktets hydrauliska konduktivitet  $K$  multiplicerad med skiktets tjocklek. Exempelvis är i fig 3.2  $T = K \cdot D$ .

För en spricka som har konstant spricktjocklek  $t$ , släta sprickväggar och laminär strömning är transmissiviteten (beteckningar som i ekv (2.2)).

$$T = \frac{t^3}{12} \cdot \frac{\rho g}{\mu} \quad (5.1)$$

Om sprickväggarna är skrovliga kan transmissiviteten minska med en faktor 1/3 à 1/4, jfr vad som sagts omedelbart före ekv (2.5).

Transmissiviteten hos en enstaka spricka eller en sprick- eller krosszon kan mätas genom vatteninpressning från ett borrhål. Vatteninpressningen sker från en med gummimanschetter avgränsad del av borrhålet, fig 5.1. Mätningen utvärderas med hjälp av den mot ekv (3.1) svarande ekvationen.

$$T = \frac{Q}{2\pi h} \cdot \ln \frac{R_0}{r_w} \quad (5.2)$$

där  $h$  är skillnaden i  $m$   $vp$  mellan vattnets trycknivå i borrhålet och trycknivån hos grundvattnet i berget.  $Q$  är vattenföringen som tillförs borrhålet. Kvoten  $R_0/r_w$  mellan influensradien  $R_0$  och borrhålets radie  $r_w$  väljes till något lämpligt stort värde. Influensradien är det avstånd från borrhålet där vattnets



trycknivå uppskattas ha sjunkit så mycket att den praktiskt taget överensstämmer med grundvattnets trycknivå.

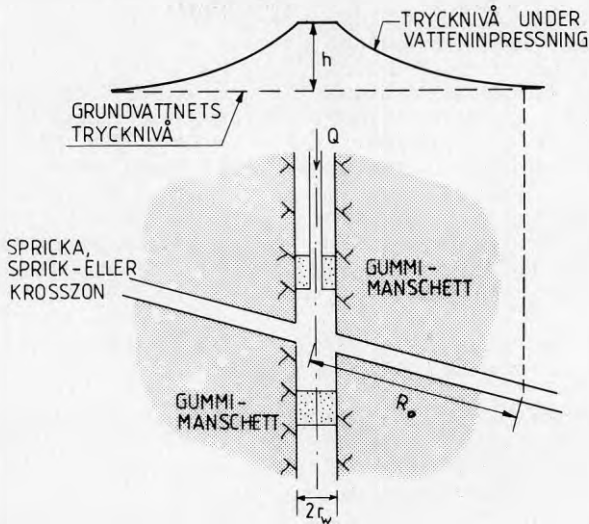


Fig 5.1 Bestämning av transmissiviteten hos spricka, sprick- eller krosszon genom vatteninpressning från borrhål

### 5.3 Beräkningsmodell

Vi betraktar ett enstaka borrhål som skär genom en spricka, sprick- eller krosszon på djupet  $d$  under bergytan, fig 5.2. Sprickan stupar vinkeln  $\alpha$ . Avståndet  $b$  från skärningspunkten mellan borrhålet och sprickan till sprickans mynning vid bergytan är

$$b = \frac{d}{\sin \alpha} \quad (5.3)$$

Berget på båda sidor om sprickan antas vara vattentätt. En vattenströmning i sprickan etc till eller från borrhålet blir då tvådimensionell och den kan beräknas genom spegling kring sprickans mynning vid bergytan.

Med hjälp av superpositionsprincipen kan man visa att vattnets trycknivå,  $z$ , i en punkt  $P$  i sprickan etc ges av endera av följande två ekvationer, nämligen om sprickmynningen är öppen

$$z = H_s + \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{S}{R} \quad (5.4)$$

och om sprickmyningen är tät

$$z = H_0 + \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R_0^2}{R \cdot S} \quad (5.5)$$

Här är, jfr fig 5.2

- Q = vattenföringen från (positiv) eller till (negativ) det verkliga borrhålet
- R = avståndet, mätt i sprickans plan, mellan punkten P och det verkliga borrhålet
- S = avståndet, mätt i sprickans plan, mellan punkten P och spegelbilden av det verkliga borrhålet
- H<sub>S</sub> = vattnets trycknivå vid sprickans mynning vid bergytan
- H<sub>0</sub> = vattnets trycknivå på stort avstånd, R<sub>0</sub>, från det verkliga borrhålet och dess spegelbild. R<sub>0</sub> mäts i sprickans plan och skall vara mycket större än R och S.
- T = sprickans etc transmissivitet

Vi övergår nu till att diskutera en spricka, sprick- eller krosszon som skär igenom ett helt borrhålsvärmelager. Vattnets trycknivå vid olika punkter i sprickan etc kan beräknas med hjälp av superpositionsprincipen och spegling kring sprickmyningen vid bergytan, fig 5.3.

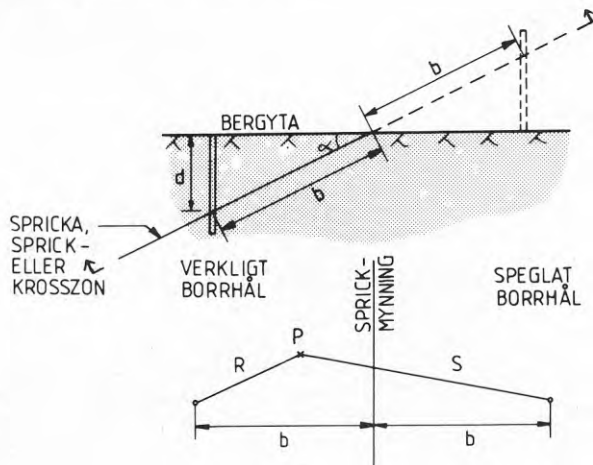


Fig 5.2 Spegling av spricka och borrhål

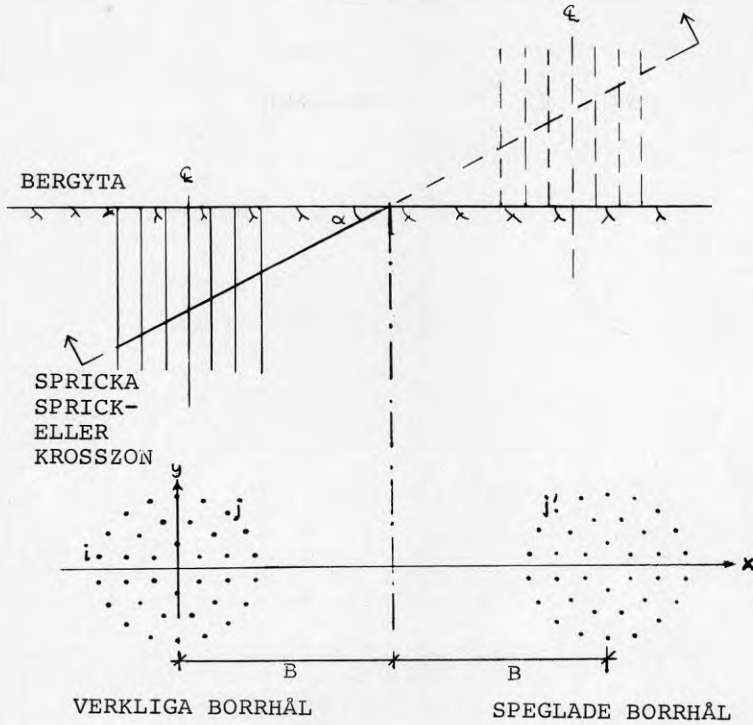


Fig 5.3 Spegling av spricka och borrhålsvärmelager

Borrhålen antas vara vertikala och, om de betraktas i ett horisontalsnitt, vara placerade längs koncentriska cirklar. Beträktade i sprickans plan ligger då borrhålen skärningspunkter med sprickan längs ellipser. Om sprickan ligger högre eller lägre än som visas i fig 5.3 kanske den skär endast en del av borrhålen. I så fall finns borrhål endast längs delar av ellipserna.

I fig 5.3 har lagts in ett koordinatsystem i sprickplanet. x-axeln sammanfaller med storaxeln i ellipserna. y-axeln sammanfaller med lillaxeln hos de verkliga borrhålen ellipser.

Borrhålen i fig 5.3 har lagts så att de ligger symmetriskt med avseende på x-axeln och så att x-axeln passerar mitt mellan två borrhål. Vi antar också att två borrhål som har samma x-koordinat och som ligger symmetriskt med avseende på x-axeln har samma trycknivå och därmed av symmetriskäl samma vattenföring.

Detta underlättar beräkningsarbetet eftersom det ekvationssystem som redovisas nedan kommer att innehålla endast hälften så många ekvationer som om symmetrin inte hade förutsatts.

Enligt superpositionsprincipen kan vi beräkna trycknivån  $h_{oi}$  i ett godtyckligt, verkligt borrhål genom att summära influenser från samtliga verkliga och speglade borrhål  $j$  resp  $j'$ . Om sprickmynningen är vattengenomsläpplig fås, jfr ekv (5.4)

$$h_{oi} - H_s = \sum_{j=1}^N (z-H_s) = \sum_{j=1}^N \left( \frac{Q_j}{2\pi T} \cdot \ln \frac{S_{ij}}{R_{ij}} \right) \quad (5.6)$$

Om sprickningen är vattentät fås, jfr ekv (5.5)

$$h_{oi} - H_o = \sum_{j=1}^N (z-H_o) = \sum_{j=1}^N \left( \frac{Q_j}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R_o^2}{R_{ij} S_{ij}} \right) \quad (5.7)$$

Här är, jfr fig 5.3,

$Q_j$  = vattenföringen från (positiv) eller till (negativ) det verkliga borrhålet  $j$

$R_{ij}$  = avståndet, mätt i sprickans plan, mellan det verkliga borrhålet  $i$  och det verkliga borrhålet  $j$

$S_{ij}$  = avståndet, mätt i sprickans plan, mellan det verkliga borrhålet  $i$  och spegelbilden  $j'$  av det verkliga borrhålet  $j$ .

Summationerna i ekv (5.6) och (5.7) skall omfatta samtliga  $N$  verkliga borrhål som korsas av sprickan.

Om de verkliga borrhålen  $i$  och  $j$  har koordinaterna  $(x_i, y_i)$  resp  $(x_j, y_j)$  blir

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} & \{i \neq j\} \\ R_{ij} &= r_{we} & \{i = j\} \end{aligned} \quad (5.8)$$

och

$$S_{ij} = \sqrt{(2B - x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5.9)$$

där  $B$  är avståndet, mätt i sprickans plan, mellan ellipsernas lillaxel och sprickmynningen vid bergytan, fig 5.3.

$r_{we}$  är en ekvivalent borrhålsradie som är något större än den verkliga borrhålsradien  $r_w$ .

$$r_{we} = \frac{r_w}{2} \left( \frac{1}{\cos \alpha} + 1 \right) \quad (5.10)$$

Skillnaden mellan  $r_{we}$  och  $r_w$  beror av att borrhåls-  
väggen bildar en ellips i sprickans plan. Ellipsens  
halvaxlar är  $a_w = r_w / \cos \alpha$  och  $b_w = r_w$ . Liksom tidigare  
är  $\alpha$  sprickans stupningvinkel.

Ekv (5.10) har härletts med utgångspunkt från poten-  
tialfördelningen vid tvådimensionell strömning från  
en linjekälla eller till en linjesänka /6/. Ekvi-  
potentiallinjerna utgöres då av ellipser runt linje-  
källan/linjesänkan.

Vanligen är vattnets trycknivå i borrhålen känd och  
man önskar beräkna vilka vattenföringar som rinner  
till eller från borrhålen. I ekv (5.6) och (5.7)  
känner vi således värdet på  $h_{oi} - H_s$  resp  $h_{oi} - H_o$  för  
samtliga verkliga borrhål i men vi känner inte borrhå-  
lens vattenföringar  $Q_j$ .

Detta betyder att vi med utgångspunkt från ekv (5.6)  
eller (5.7) och de tidigare beskrivna antagandena om  
symmetri kan teckna ett ekvationssystem som innehåller  
 $N/2$  av varandra oberoende ekvationer och  $N/2$  obe-  
kanta  $Q_j / 2\pi T$ . Ur detta ekvationssystem kan vi lösa  
samtliga obekanta, dvs samtliga vattenföringar  $Q_j$ .

På basis av ovanstående har ett datorprogram utarbe-  
tats och använts i några beräkningsexempel.

#### 5.4 Beräkningsexempel 15 - 22

Vi skall nu beräkna vattenförlusten från ett borrhåls-  
värmelager vilket genomskäres av en enstaka  
spricka, sprick- eller krosszon som har transmissi-  
viteten  $T$  ( $m^3/s, m$ ). Berget antas i övrigt vara vat-  
tentätt. Värmelagret är detsamma som tidigare be-  
handlats i beräkningsexemplen 4 - 14, jfr fig 4.6.  
Sprickan antas skära värmelagrets centrumlinje på  
djupet 55 m under bergytan, fig 5.4. Sprickans etc  
stupningsvinkel är  $\alpha = 15, 25, 35$ , eller  $45^\circ$ . Sprick-  
an skär då samtliga borrhål i värmelagret. Även  
sprickor etc som har sådan vinkel eller sådant läge  
att de skär endast en del av borrhålen kan behandlas  
men detta visas inte här. Såväl vattengenomsläpplig  
(A) som vattentät (B) sprickmynning behandlas. För  
samtliga borrhål antas att vattnets trycknivå vid  
skärningspunkten med sprickan etc ligger, i fall A,  
 $h_{oi} - H_s = 1,0$  m vp högre än vattnets trycknivå vid  
sprickmynningen och, i fall B,  $h_{oi} - H_o = 1,0$  m vp högre  
än grundvattnets trycknivå  $R_o = 1000$  m från borrhåls-  
värmelagret. Vattnets temperatur antas vara konstant  
i hela sprickan.

Sprickan skär  $N=468$  borrhål. Enligt avsnitt 5.3 inne-  
håller ekvationssystemet då  $N/2=234$  ekvationer och  
lika många obekanta  $Q_j / 2\pi T$ .

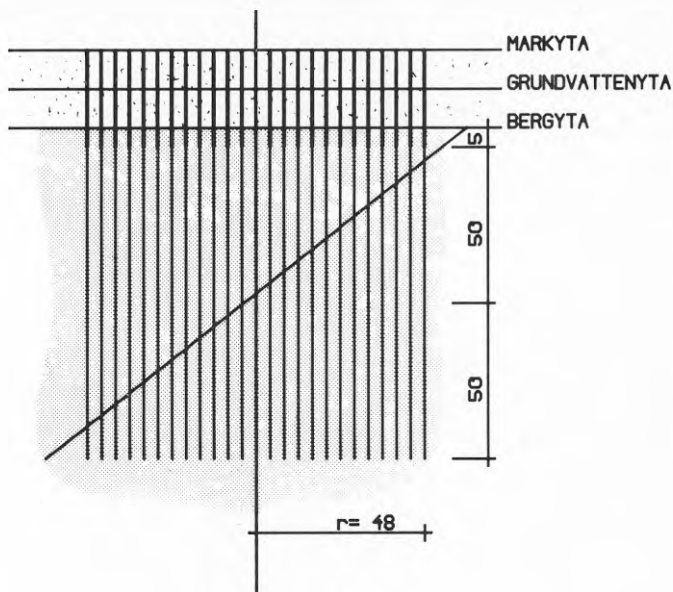


Fig 5.4 Spricka, sprick- eller krosszon som skär genom ett borrhålsvärmelager

Tabell 5.1 Beräkningsförutsättningar och beräknad total vattenförlust från borrhålsvärmelagret genom en enstaka spricka, sprick- eller krosszon  
 T = sprickans etc transmissivitet ( $\text{m}^3/\text{s}, \text{m}$ )  
 A = vattengenomsläpplig sprickmyrning  
 B = vattentät sprickmyrning  
 Vattnets övertryck i borrhålen = 1,0 m vp

Beräknings- exempel	Sprickans stupnings- vinkel, $\alpha$ °	Randvill- kor vid myrningen	Beräknad total vatten- förlust	
			$\text{m}^3/\text{s}$	$\text{m}^3/\text{år}$
15	15	A	$2,89 \cdot T$	$0,91 \cdot 10^8 \cdot T$
16	15	B	$1,62 \cdot T$	$0,51 \cdot 10^8 \cdot T$
17	25	A	$3,88 \cdot T$	$1,22 \cdot 10^8 \cdot T$
18	25	B	$1,45 \cdot T$	$0,46 \cdot 10^8 \cdot T$
19	35	A	$5,28 \cdot T$	$1,66 \cdot 10^8 \cdot T$
20	35	B	$1,38 \cdot T$	$0,44 \cdot 10^8 \cdot T$
21	45	A	$9,09 \cdot T$	$2,86 \cdot 10^8 \cdot T$
22	45	B	$1,36 \cdot T$	$0,43 \cdot 10^8 \cdot T$

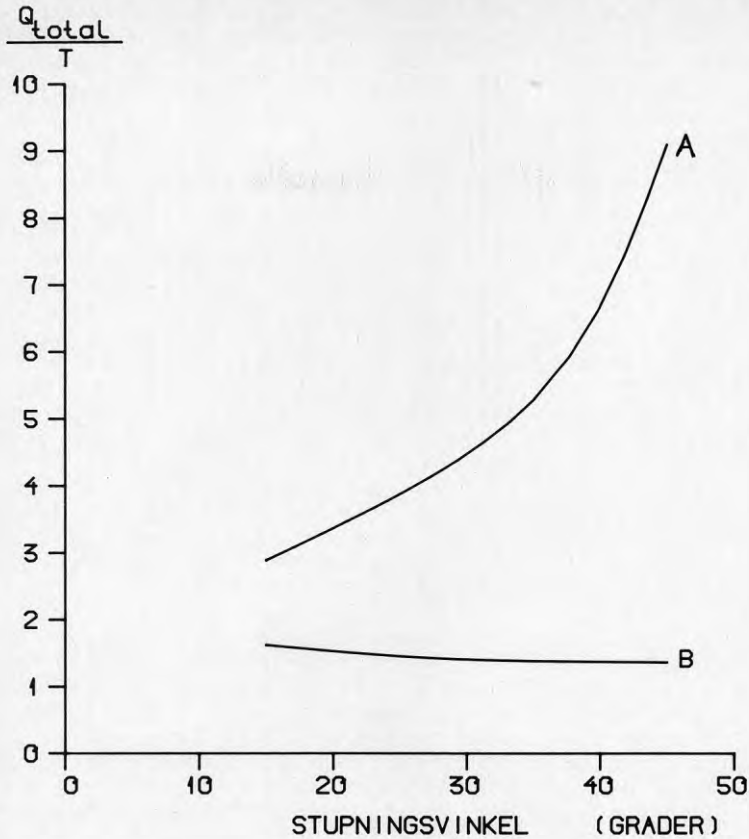


Fig 5.5 Total vattenförlust  $Q_{total}$  ( $m^3/s$ ) från borrhålsvärmelagret genom en enstaka spricka, sprick- eller krosszon som har transmissiviteten  $T$  ( $m^3/s, m$ )  
 A = vattengenomsläpplig sprickmynning  
 B = vattentät sprickmynning

Av fig 5.5. framgår att vattenförlusten från borrhålsvärmelagret är avsevärt större när sprickmynningen är vattengenomsläpplig än när den är vattentät. Vid vattengenomsläpplig sprickmynning ökar vattenförlusten kraftigt med ökande stupningsvinkel hos sprickan eftersom avståndet mellan borrhålen och sprickmynningen då minskar. Vid vattentät sprickmynning minskar vattenförlusten något när sprickans stupningsvinkel ökar. Det hinder för vattenströmmen från borrhålen som den täta sprickmynningen utgör kommer då närmare borrhålen.

Den, speciellt vid stora stupningsvinklar, avsevärda skillnaden i vattenförlust från borrhålen vid vattengenomsläpplig resp vattentät sprickmynning, visar att

man kan minska vattenförlusten genom att cementinjektera brant stupande sprickor, sprick- och krosszoner som skär igenom borrhålsvärmelagret. Injekteringen skall göras mellan borrhålen och sprickmynningen och den bör om möjligt även sträcka sig ett stycke vid sidan om värmelagret.

Datalistorna över vattenförlusterna från vart och ett av borrhålen innehåller för varje beräkningsexempel  $468/2 = 234$  värden. Listorna är svåröverskådliga och de har därför inte bifogats denna rapport. Allmänt kan dock sägas att liksom vid den tvådimensionella strömning som behandlats i kap 3 kommer praktiskt taget hela vattenförlusten från de två å tre ytterst belägna borrhålsellipserna. Vattenförlustens procentuella fördelning på de 12 ellipserna är nästan identiskt lika för alla de i tabell 5.1 visade beräkningsexemplen, nämligen 79 - 80 % för den yttersta ellipsen 12, 16 - 17 % för den innanför denna belägna ellipsen 11 och ca 3,5 % för nästa ellips 10. Ellipserna 1 - 9 bidrar med sammanlagt endast 1 % eller mindre. Därför kan man även i fallet med en spricka, sprick- eller krosszon som skär genom samtliga borrhål förenkla vattenförlustberäkningen genom att helt utesluta borrhålen i lagrets centrala del.

Vid vattengenomläpplig sprickmynning är vattenförlusten avsevärt större från de borrhål som ligger nära sprickmynningen än den är från de borrhål som ligger långt från sprickmynningen. Exempelvis är vid  $35^\circ$  stupningsvinkel vattenförlusten från ett av de i den yttersta borrhålsellipsen och närmast sprickmynningen belägna borrhålen  $0,114 \cdot T \text{ m}^3/\text{s}$ . För ett av de i samma ellips och längst bort från sprickmynningen belägna borrhålen är vattenförlusten  $0,032 \cdot T \text{ m}^3/\text{s}$ , dvs endast 28 % av vattenförlusten från det förstnämnda borrhålet.

Vid vattentät sprickmynning är förhållandet det omvända. För samma stupningsvinkel och borrhål som i förra stycket är vattenförlusterna då  $0,005 \cdot T \text{ m}^3/\text{s}$  resp  $0,022 \cdot T \text{ m}^3/\text{s}$ , dvs det längst bort från sprickmynningen belägna borrhålet har 4,4 gånger så stor vattenförlust som det närmast sprickmynningen belägna borrhålet.

Nedanstående tabell 5.2 visar den med ekv (5.1) beräknade transmissiviteten  $T$  för en spricka med konstant spricktjocklek  $t$ , släta sprickväggar och olika vattentemperaturer.



Tabell 5.2 Transmissiviteten  $T$  ( $\text{m}^3/\text{s}, \text{m}$ ) för en spricka med konstant spricktjocklek  $t$  (mm) och släta sprickväggar

Spricktjocklek (mm)	Vattentemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	20	40	60	80
0,3	$T=2,20 \cdot 10^{-5}$	$T=3,35 \cdot 10^{-5}$	$T=4,65 \cdot 10^{-5}$	$T=6,04 \cdot 10^{-5}$
0,4	$5,21 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$
0,5	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$2,80 \cdot 10^{-4}$
0,6	$8,14 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$

Om sprickväggarna är mycket skrovliga minskar transmissiviteten som tidigare nämnts med en faktor 1/3 å 1/4.

Vi betraktar nu beräkningsexempel 19 i tabell 5.1. Sprickans stupning är i detta exempel  $35^{\circ}$  och sprickmyningen är vattengenomsläpplig. Den totala vattenförlusten från borrhålsvärmelagret är  $Q_{\text{total}}=5,28 \cdot T \text{ m}^3/\text{s}$ . Vi antar att sprickans tjocklek är  $t=0,5 \text{ mm}$ , sprickväggarna är släta och den genomsnittliga vattentemperaturen under året  $40^{\circ}\text{C}$ . Då är enligt tabell 5.2  $T=1,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}$ . Vattenförlusten från borrhålsvärmelagret blir

$$Q_{\text{total}} = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 0,82 \text{ l/s} = 25 \ 800 \text{ m}^3/\text{år}$$

Denna vattenförlust gäller om trycknivån i alla borrhålens skärningspunkter med sprickan som ett genomsnitt under året ligger  $h_{0i}-H_S=1,0 \text{ m}$  vp högre än trycknivån vid sprickmyningen. För andra trycknivåskillnader är vattenförlusten direkt proportionell mot trycknivåskillnaden.

Om spricktjockleken är  $t=1,0 \text{ mm}$  blir vattenförlusten  $(1,0/0,5)^3 = 8$  gånger så stor som vid spricktjockleken  $t=0,5 \text{ mm}$ . Vattenförlusten blir då

$$Q_{\text{total}} = 6,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 6,55 \text{ l/s} = 206 \ 000 \text{ m}^3/\text{år}$$

Om sprickmyningen är vattentät minskar vattenförlusten enligt tabell 5.1, beräkningsexempel 16, till  $Q_{\text{total}} = 1,38 \cdot T \text{ m}^3/\text{s}$ , dvs för spricktjockleken  $t=0,5 \text{ mm}$

$$Q_{\text{total}} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 0,21 \text{ l/s} = 6 \ 740 \text{ m}^3/\text{år}$$

och för spricktjockleken  $t = 1,0 \text{ mm}$

$$Q_{\text{total}} = 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 1,71 \text{ l/s} = 53 \ 900 \text{ m}^3/\text{år}$$

Om sprickväggarna är skrovliga kan vattenförlusten minska till inemot  $1/3$  à  $1/4$  av de ovan angivna värdena  $Q_{total}$ .

I verkligheten är inte vattnets trycknivå konstant i samtliga punkter där borrhål skär den lutande sprickan, sprick- eller krosszonen. Såsom redovisats i beräkningsexemplen 12 och 13 visades skillnader i densitet mellan vatten av olika temperatur och strömningsförluster i slangar och rörledningar en mer komplicerad tryckfördelning i värmelagrets borrhål. I beräkningsexemplen 12 och 13 visades också att man genom lämpligt val av den allmänna trycknivån i värmelagret helt eller nästan helt kunde undvika vattenförluster. Huruvida detta är möjligt även i fallet enstaka spricka, sprick- eller krosszon har inte undersökts här. En sådan undersökning kan dock göras med hjälp av det utarbetade datorprogrammet.

I avsaknad av en noggrann undersökning kan man bara grovt bedöma vid vilken transmissivitet hos sprickan etc som gränsen går för acceptabla vattenförluster genom en spricka, sprick- eller krosszon som skär igenom borrhålsvärmelagret. Enligt tabell 5.2 är transmissiviteten hos en spricka med tjockleken  $t=0,4$  mm ungefär  $T=10^{-4}$   $m^3/s \cdot m$ . Vattenförlusten per år är då enligt tabell 5.1 ungefär  $10^8 \cdot T$ , dvs ungefär  $10\ 000$   $m^3/år$ . Vid spricktjockleken  $t=0,3$  mm är vattenförlusten ungefär  $4\ 000$   $m^3/år$ . Vattenförlusterna gäller vid en trycknivå som i samtliga borrhål vid skärningen med sprickan ligger  $1,0$  m vp över grundvattnets trycknivå. Även om den verkliga genomsnittliga trycknivåskillnaden mellan borrhålen och grundvattnet kanske kan hållas mindre än  $1,0$  m vp visar de beräknade vattenförlusterna att man inom värmelagret kan behöva cementinjektera alla genomgående sprickor, sprick- och krosszoner som är möjliga att cementinjektera, dvs alla sprickor som är tjockare än  $0,3 - 0,4$  mm. Frågan bör utredas närmare. Som nämnts sist i avsnitt 4.4.3 kan man i många fall beräkna vilken inverkan på vattenförlusten från värmelagret som de icke cementinjekterade delarna av sprickan etc har.

## 6. REFERENSER

- /1/ Andersson S et al  
Borrhållslager i berg för säsongslagring  
av värme;  
BFR R66:1981
- /2/ Andersson S et al  
Värmelagring i berg med borrhållssystem;  
BFR R15:1983
- /3/ Bear J  
Hydraulics of groundwater;  
Mc Graw-Hill Inc., New York 1979
- /4/ Claesson J m fl  
Markvärme. En handbok om termiska analyser;  
BFR T16-18:1985
- /5/ Louis C  
Strömningvorgänge in klüftigen Medie und  
ihre Wirkung auf die Standsicherheit von  
Bauwerken une Böschungen im Fels;  
Dissertation Universität (TH) Karlsruhe,  
Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmech. 30.  
Karlsruhe, 1967
- /6/ Muskat M  
The flow of homogenous fluids through porous  
media;  
J.W. Edwards Inc., Ann Arber Michigan 1946

BERÄKNINGSEXEMPEL 4.

VATTENGENOMSLÄPPLIG BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.a OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÅLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12	
5- 9	.18E-05	.17E-05	.17E-05	.17E-05	.17E-05	.17E-05	.17E-05	.17E-05	.17E-05	.18E-05	.19E-05	.26E-05	
9- 13	.35E-06	.32E-06	.32E-06	.32E-06	.32E-06	.32E-06	.32E-06	.32E-06	.32E-06	.35E-06	.50E-06	.12E-05	
13- 17	.72E-07	.63E-07	.62E-07	.61E-07	.61E-07	.61E-07	.61E-07	.63E-07	.68E-07	.95E-07	.22E-06	.78E-06	
17- 21	.15E-07	.13E-07	.12E-07	.12E-07	.12E-07	.12E-07	.12E-07	.13E-07	.18E-07	.41E-07	.14E-06	.61E-06	
21- 25	.30E-08	.25E-08	.23E-08	.23E-08	.23E-08	.23E-08	.23E-08	.25E-08	.35E-08	.77E-08	.27E-07	.11E-06	.52E-06
25- 29	.61E-09	.50E-09	.46E-09	.45E-09	.45E-09	.49E-09	.68E-09	.15E-08	.52E-08	.22E-07	.99E-07	.46E-06	
29- 33	.12E-09	.98E-10	.90E-10	.90E-10	.98E-10	.13E-09	.30E-09	.10E-08	.44E-08	.20E-07	.89E-07	.41E-06	
33- 37	.27E-10	.19E-10	.15E-10	.19E-10	.25E-10	.59E-10	.21E-09	.88E-09	.40E-08	.18E-07	.82E-07	.38E-06	
37- 41	.55E-11	.39E-11	.57E-11	.59E-11	.11E-10	.44E-10	.18E-09	.82E-09	.37E-08	.17E-07	.77E-07	.36E-06	
41- 45	.12E-12	-.11E-11	.23E-11	.34E-11	.79E-11	.43E-10	.17E-09	.76E-09	.35E-08	.16E-07	.73E-07	.34E-06	
45- 49	.32E-11	.30E-12	-.28E-11	.61E-11	.90E-11	.34E-10	.16E-09	.73E-09	.33E-08	.15E-07	.69E-07	.32E-06	
49- 53	-.13E-11	.38E-12	.16E-11	.14E-11	.64E-11	.35E-10	.15E-09	.70E-09	.32E-08	.14E-07	.67E-07	.31E-06	
53- 57	-.14E-11	-.54E-12	-.19E-11	.13E-11	.84E-11	.34E-10	.15E-09	.67E-09	.31E-08	.14E-07	.65E-07	.30E-06	
57- 61	.18E-11	.11E-11	.34E-11	.39E-11	.52E-11	.34E-10	.15E-09	.66E-09	.30E-08	.14E-07	.63E-07	.29E-06	
61- 65	.41E-12	-.78E-12	.18E-11	.13E-13	.10E-10	.30E-10	.14E-09	.65E-09	.29E-08	.13E-07	.62E-07	.29E-06	
65- 69	-.12E-11	-.48E-12	-.23E-12	.21E-11	.79E-11	.28E-10	.14E-09	.63E-09	.29E-08	.13E-07	.61E-07	.28E-06	
69- 73	.42E-12	-.11E-11	-.15E-11	.35E-11	.77E-11	.34E-10	.14E-09	.63E-09	.29E-08	.13E-07	.60E-07	.28E-06	
73- 77	.40E-11	.33E-11	.22E-11	.16E-11	.86E-11	.30E-10	.14E-09	.63E-09	.29E-08	.13E-07	.60E-07	.28E-06	
77- 81	.14E-10	.74E-11	.95E-11	.15E-10	.18E-10	.42E-10	.15E-09	.65E-09	.29E-08	.13E-07	.61E-07	.28E-06	
81- 85	.60E-10	.52E-10	.52E-10	.48E-10	.53E-10	.91E-10	.20E-09	.71E-09	.30E-08	.14E-07	.62E-07	.29E-06	
85- 89	.31E-09	.26E-09	.25E-09	.25E-09	.27E-09	.30E-09	.44E-09	.99E-09	.34E-08	.14E-07	.64E-07	.30E-06	
89- 93	.15E-08	.13E-08	.13E-08	.13E-08	.13E-08	.14E-08	.16E-08	.23E-08	.50E-08	.17E-07	.69E-07	.31E-06	
93- 97	.74E-08	.65E-08	.65E-08	.66E-08	.68E-08	.71E-08	.77E-08	.89E-08	.12E-07	.26E-07	.83E-07	.34E-06	
97-101	.36E-07	.33E-07	.33E-07	.34E-07	.35E-07	.36E-07	.39E-07	.42E-07	.49E-07	.68E-07	.13E-06	.42E-06	
101-105	.18E-06	.18E-06	.18E-06	.18E-06	.19E-06	.20E-06	.21E-06	.22E-06	.25E-06	.29E-06	.40E-06	.72E-06	

BERÄKNINGSEXEMPEL 5.

VATTENTÄT BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.a OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.89E-10	.13E-09	.22E-09	.40E-09	.78E-09	.16E-08	.32E-08	.65E-08	.14E-07	.30E-07	.72E-07	.20E-06
9- 13	.22E-10	.30E-10	.49E-10	.94E-10	.18E-09	.37E-09	.77E-09	.17E-08	.41E-08	.11E-07	.38E-07	.15E-06
13- 17	.54E-11	.59E-11	.12E-10	.23E-10	.47E-10	.97E-10	.23E-09	.63E-09	.20E-08	.76E-08	.32E-07	.14E-06
17- 21	.43E-12	.22E-11	.17E-11	.72E-11	.12E-10	.33E-10	.11E-09	.38E-09	.16E-08	.68E-08	.31E-07	.14E-06
21- 25	.63E-12	.12E-11	.44E-12	.32E-11	.45E-11	.21E-10	.79E-10	.33E-09	.15E-08	.66E-08	.30E-07	.14E-06
25- 29	-.21E-12	.22E-12	.16E-11	.15E-11	.59E-11	.15E-10	.69E-10	.32E-09	.14E-08	.66E-08	.30E-07	.14E-06
29- 33	.39E-12	-.63E-12	-.21E-11	.14E-11	.37E-11	.18E-10	.73E-10	.32E-09	.14E-08	.66E-08	.30E-07	.14E-06
33- 37	-.19E-12	.48E-12	.27E-11	.32E-12	.11E-11	.15E-10	.69E-10	.31E-09	.14E-08	.66E-08	.30E-07	.14E-06
37- 41	.40E-12	-.11E-11	-.68E-12	.20E-11	.45E-11	.15E-10	.72E-10	.32E-09	.14E-08	.66E-08	.31E-07	.14E-06
41- 45	-.35E-12	-.12E-11	.21E-12	.24E-12	.45E-11	.15E-10	.71E-10	.32E-09	.15E-08	.67E-08	.31E-07	.14E-06
45- 49	.68E-12	.95E-12	-.16E-13	.24E-11	.27E-11	.16E-10	.70E-10	.32E-09	.15E-08	.67E-08	.31E-07	.14E-06
49- 53	.96E-12	-.42E-12	-.50E-12	.15E-11	.34E-12	.17E-10	.74E-10	.33E-09	.15E-08	.68E-08	.31E-07	.15E-06
53- 57	.32E-12	-.31E-12	.24E-11	.21E-11	.29E-11	.17E-10	.72E-10	.34E-09	.15E-08	.69E-08	.32E-07	.15E-06
57- 61	.85E-12	-.12E-11	-.15E-11	-.10E-12	.30E-11	.19E-10	.71E-10	.34E-09	.15E-08	.70E-08	.32E-07	.15E-06
61- 65	.13E-11	-.19E-11	.25E-11	.14E-11	.56E-11	.17E-10	.75E-10	.34E-09	.16E-08	.71E-08	.33E-07	.15E-06
65- 69	-.36E-12	-.29E-12	-.95E-12	.23E-11	.97E-12	.16E-10	.79E-10	.35E-09	.16E-08	.73E-08	.33E-07	.16E-06
69- 73	-.16E-11	.94E-12	.40E-12	.10E-11	.52E-11	.19E-10	.80E-10	.36E-09	.16E-08	.75E-08	.34E-07	.16E-06
73- 77	.45E-11	.26E-12	-.17E-12	.59E-11	.69E-11	.17E-10	.85E-10	.37E-09	.17E-08	.77E-08	.35E-07	.16E-06
77- 81	.71E-11	.73E-11	.93E-11	.63E-11	.11E-10	.27E-10	.92E-10	.39E-09	.17E-08	.80E-08	.37E-07	.17E-06
81- 85	.46E-10	.39E-10	.36E-10	.38E-10	.41E-10	.60E-10	.13E-09	.45E-09	.19E-08	.84E-08	.38E-07	.18E-06
85- 89	.23E-09	.19E-09	.18E-09	.19E-09	.19E-09	.22E-09	.30E-09	.65E-09	.22E-08	.91E-08	.41E-07	.19E-06
89- 93	.11E-08	.96E-09	.94E-09	.95E-09	.98E-09	.10E-08	.12E-08	.16E-08	.33E-08	.11E-07	.45E-07	.20E-06
93- 97	.55E-08	.48E-08	.48E-08	.49E-08	.50E-08	.52E-08	.56E-08	.64E-08	.87E-08	.17E-07	.55E-07	.23E-06
97-101	.26E-07	.24E-07	.25E-07	.25E-07	.26E-07	.27E-07	.28E-07	.31E-07	.35E-07	.48E-07	.92E-07	.28E-06
101-105	.13E-06	.13E-06	.13E-06	.14E-06	.14E-06	.15E-06	.15E-06	.16E-06	.18E-06	.21E-06	.28E-06	.50E-06

## BERÄKNINGSEXEMPEL 6.

VATTENGENOMSLÄPPLIG BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.b OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÅLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.20E-05	.16E-05	.14E-05	.12E-05	.11E-05	.91E-06	.76E-06	.61E-06	.46E-06	.31E-06	.12E-06	-.20E-06
9- 13	.70E-06	.45E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.21E-06	.18E-06	.15E-06	.11E-06	.74E-07	.14E-08	-.23E-06
13- 17	.47E-06	.25E-06	.17E-06	.13E-06	.11E-06	.89E-07	.75E-07	.63E-07	.51E-07	.32E-07	-.22E-07	-.24E-06
17- 21	.42E-06	.21E-06	.13E-06	.98E-07	.78E-07	.65E-07	.55E-07	.47E-07	.39E-07	.24E-07	-.27E-07	-.25E-06
21- 25	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.92E-07	.73E-07	.60E-07	.51E-07	.44E-07	.37E-07	.22E-07	-.29E-07	-.25E-06
25- 29	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.29E-07	-.25E-06
29- 33	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.29E-07	-.26E-06
33- 37	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.30E-07	-.26E-06
37- 41	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.30E-07	-.26E-06
41- 45	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.30E-07	-.26E-06
45- 49	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.30E-07	-.26E-06
49- 53	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.30E-07	-.26E-06
53- 57	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.30E-07	-.26E-06
57- 61	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.31E-07	-.26E-06
61- 65	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.22E-07	-.31E-07	-.26E-06
65- 69	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.31E-07	-.26E-06
69- 73	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.31E-07	-.26E-06
73- 77	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.31E-07	-.26E-06
77- 81	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
81- 85	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
85- 89	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.91E-07	.72E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.33E-07	-.27E-06
89- 93	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.93E-07	.73E-07	.60E-07	.51E-07	.44E-07	.36E-07	.21E-07	-.34E-07	-.28E-06
93- 97	.43E-06	.21E-06	.14E-06	.10E-06	.81E-07	.67E-07	.56E-07	.47E-07	.38E-07	.20E-07	-.38E-07	-.29E-06
97-101	.51E-06	.29E-06	.20E-06	.15E-06	.12E-06	.10E-06	.82E-07	.65E-07	.47E-07	.20E-07	-.49E-07	-.31E-06
101-105	.99E-06	.69E-06	.54E-06	.44E-06	.36E-06	.29E-06	.23E-06	.17E-06	.10E-06	.22E-07	-.11E-06	-.42E-06

## BERÄKNINGSEXEMPEL 7.

VATTENTÄT BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.b OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÅLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.64E-06	.38E-06	.26E-06	.19E-06	.15E-06	.12E-06	.97E-07	.76E-07	.50E-07	.50E-08	-.92E-07	-.37E-06
9- 13	.45E-06	.23E-06	.15E-06	.11E-06	.85E-07	.70E-07	.59E-07	.49E-07	.38E-07	.17E-07	-.44E-07	-.29E-06
13- 17	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.94E-07	.74E-07	.61E-07	.52E-07	.44E-07	.36E-07	.20E-07	-.35E-07	-.28E-06
17- 21	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.91E-07	.72E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.33E-07	-.27E-06
21- 25	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
25- 29	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
29- 33	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
33- 37	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
37- 41	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
41- 45	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
45- 49	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
49- 53	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
53- 57	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
57- 61	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
61- 65	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
65- 69	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
69- 73	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.32E-07	-.27E-06
73- 77	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.90E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.33E-07	-.27E-06
77- 81	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.33E-07	-.27E-06
81- 85	.41E-06	.20E-06	.12E-06	.91E-07	.71E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.34E-07	-.27E-06
85- 89	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.91E-07	.72E-07	.59E-07	.50E-07	.43E-07	.36E-07	.21E-07	-.34E-07	-.28E-06
89- 93	.41E-06	.20E-06	.13E-06	.93E-07	.73E-07	.60E-07	.51E-07	.44E-07	.36E-07	.20E-07	-.36E-07	-.28E-06
93- 97	.43E-06	.21E-06	.14E-06	.10E-06	.81E-07	.67E-07	.56E-07	.47E-07	.38E-07	.20E-07	-.39E-07	-.29E-06
97-101	.51E-06	.28E-06	.20E-06	.15E-06	.12E-06	.10E-06	.82E-07	.65E-07	.46E-07	.19E-07	-.51E-07	-.32E-06
101-105	.98E-06	.69E-06	.54E-06	.44E-06	.36E-06	.29E-06	.23E-06	.16E-06	.99E-07	.18E-07	-.11E-06	-.43E-06

## BERÄKNINGSEXEMPEL 8.

VATTENGENOMSLÄPPLIG BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.c OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12	
5- 9	.19E-05	.18E-05	.18E-05	.18E-05	.18E-05	.18E-05	.18E-05	.18E-05	.18E-05	.19E-05	.20E-05	.27E-05	
9- 13	.37E-06	.34E-06	.33E-06	.33E-06	.33E-06	.33E-06	.33E-06	.33E-06	.34E-06	.37E-06	.52E-06	.12E-05	
13- 17	.76E-07	.66E-07	.65E-07	.64E-07	.64E-07	.64E-07	.64E-07	.66E-07	.71E-07	.98E-07	.22E-06	.79E-06	
17- 21	.16E-07	.13E-07	.13E-07	.12E-07	.12E-07	.12E-07	.12E-07	.13E-07	.14E-07	.19E-07	.40E-07	.14E-06	.60E-06
21- 25	.32E-08	.26E-08	.25E-08	.24E-08	.24E-08	.24E-08	.26E-08	.35E-08	.75E-08	.26E-07	.11E-06	.49E-06	
25- 29	.64E-09	.52E-09	.48E-09	.47E-09	.47E-09	.51E-09	.68E-09	.14E-08	.48E-08	.20E-07	.90E-07	.41E-06	
29- 33	.13E-09	.10E-09	.96E-10	.96E-10	.10E-09	.13E-09	.28E-09	.92E-09	.38E-08	.17E-07	.77E-07	.36E-06	
33- 37	.26E-10	.19E-10	.15E-10	.20E-10	.27E-10	.53E-10	.17E-09	.74E-09	.33E-08	.15E-07	.68E-07	.31E-06	
37- 41	.61E-11	.51E-11	.66E-11	.64E-11	.10E-10	.38E-10	.14E-09	.64E-09	.29E-08	.13E-07	.60E-07	.28E-06	
41- 45	.23E-11	-.29E-11	.27E-11	.22E-11	.87E-11	.31E-10	.12E-09	.55E-09	.25E-08	.12E-07	.53E-07	.24E-06	
45- 49	.11E-11	-.37E-12	-.11E-11	-.48E-13	.41E-11	.21E-10	.11E-09	.49E-09	.22E-08	.10E-07	.47E-07	.22E-06	
49- 53	-.14E-11	.90E-12	-.12E-11	.25E-11	.33E-11	.22E-10	.96E-10	.44E-09	.20E-08	.90E-08	.41E-07	.19E-06	
53- 57	.16E-12	.19E-12	.29E-12	-.52E-12	.50E-11	.20E-10	.86E-10	.38E-09	.17E-08	.79E-08	.37E-07	.17E-06	
57- 61	-.18E-12	.24E-11	.22E-11	.31E-11	.36E-11	.17E-10	.76E-10	.33E-09	.15E-08	.70E-08	.32E-07	.15E-06	
61- 65	-.16E-11	.29E-12	-.17E-11	.88E-12	.45E-11	.13E-10	.64E-10	.29E-09	.13E-08	.60E-08	.28E-07	.13E-06	
65- 69	.72E-12	-.56E-12	.16E-11	-.12E-11	.40E-11	.10E-10	.55E-10	.25E-09	.11E-08	.51E-08	.23E-07	.11E-06	
69- 73	.46E-13	-.16E-11	-.15E-11	-.87E-12	.30E-11	.86E-11	.44E-10	.20E-09	.91E-09	.42E-08	.19E-07	.90E-07	
73- 77	-.19E-11	-.16E-11	.17E-12	-.22E-11	.15E-11	.58E-11	.33E-10	.16E-09	.72E-09	.33E-08	.15E-07	.71E-07	
77- 81	-.10E-10	-.98E-11	-.76E-11	-.66E-11	-.67E-11	-.52E-12	.18E-10	.11E-09	.51E-09	.24E-08	.11E-07	.52E-07	
81- 85	-.53E-10	-.42E-10	-.38E-10	-.39E-10	-.37E-10	-.34E-10	-.25E-10	.25E-10	.27E-09	.14E-08	.67E-08	.32E-07	
85- 89	-.25E-09	-.21E-09	-.20E-09	-.20E-09	-.20E-09	-.20E-09	-.20E-09	-.19E-09	-.13E-09	.18E-09	.18E-08	.98E-08	
89- 93	-.13E-08	-.11E-08	-.10E-08	-.10E-08	-.10E-08	-.10E-08	-.11E-08	-.11E-08	-.13E-08	-.19E-08	-.45E-08	-.16E-07	
93- 97	-.61E-08	-.54E-08	-.52E-08	-.52E-08	-.53E-08	-.53E-08	-.54E-08	-.56E-08	-.61E-08	-.79E-08	-.15E-07	-.49E-07	
97-101	-.30E-07	-.27E-07	-.27E-07	-.27E-07	-.27E-07	-.27E-07	-.28E-07	-.28E-07	-.30E-07	-.33E-07	-.47E-07	-.11E-06	
101-105	-.15E-06	-.15E-06	-.15E-06	-.15E-06	-.15E-06	-.15E-06	-.15E-06	-.15E-06	-.16E-06	-.17E-06	-.19E-06	-.27E-06	



BERÄKNINGSEXEMPEL 9.

VATTENTÄT BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.c OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÅLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.14E-06	.14E-06	.14E-06	.14E-06	.14E-06	.14E-06	.14E-06	.15E-06	.17E-06	.21E-06	.30E-06	.60E-06
9- 13	.28E-07	.25E-07	.25E-07	.25E-07	.25E-07	.26E-07	.27E-07	.29E-07	.34E-07	.50E-07	.11E-06	.36E-06
13- 17	.57E-08	.50E-08	.49E-08	.49E-08	.49E-08	.51E-08	.53E-08	.62E-08	.89E-08	.20E-07	.67E-07	.28E-06
17- 21	.12E-08	.10E-08	.96E-09	.95E-09	.96E-09	.10E-08	.11E-08	.16E-08	.37E-08	.13E-07	.54E-07	.24E-06
21- 25	.24E-09	.20E-09	.19E-09	.19E-09	.19E-09	.22E-09	.31E-09	.70E-09	.25E-08	.10E-07	.47E-07	.22E-06
25- 29	.49E-10	.37E-10	.37E-10	.37E-10	.39E-10	.61E-10	.14E-09	.48E-09	.20E-08	.91E-08	.42E-07	.19E-06
29- 33	.11E-10	.88E-11	.79E-11	.70E-11	.12E-10	.27E-10	.98E-10	.40E-09	.18E-08	.82E-08	.37E-07	.17E-06
33- 37	.73E-12	.22E-11	.15E-11	.18E-11	.43E-11	.19E-10	.80E-10	.35E-09	.16E-08	.73E-08	.34E-07	.16E-06
37- 41	.16E-11	.21E-11	.39E-12	.35E-11	.43E-11	.18E-10	.72E-10	.31E-09	.14E-08	.65E-08	.30E-07	.14E-06
41- 45	-.11E-11	-.78E-12	-.25E-12	-.77E-12	.30E-11	.13E-10	.61E-10	.28E-09	.13E-08	.58E-08	.27E-07	.12E-06
45- 49	.33E-12	.18E-12	.35E-12	-.96E-13	.26E-11	.13E-10	.54E-10	.24E-09	.11E-08	.51E-08	.23E-07	.11E-06
49- 53	.47E-12	-.12E-11	.11E-11	-.99E-12	.28E-11	.11E-10	.47E-10	.21E-09	.96E-09	.44E-08	.20E-07	.94E-07
53- 57	-.32E-12	.13E-13	.57E-12	.83E-12	.22E-11	.93E-11	.40E-10	.18E-09	.82E-09	.37E-08	.17E-07	.80E-07
57- 61	.40E-12	.46E-12	.29E-12	.41E-12	.15E-11	.70E-11	.32E-10	.15E-09	.67E-09	.31E-08	.14E-07	.66E-07
61- 65	.91E-13	-.10E-11	.75E-12	.74E-12	.15E-12	.63E-11	.26E-10	.11E-09	.53E-09	.24E-08	.11E-07	.52E-07
65- 69	-.20E-12	-.13E-12	-.96E-12	.77E-12	.11E-11	.36E-11	.18E-10	.83E-10	.38E-09	.17E-08	.81E-08	.38E-07
69- 73	-.22E-12	.66E-13	-.24E-12	.23E-12	-.39E-12	.27E-11	.11E-10	.49E-10	.23E-09	.11E-08	.49E-08	.23E-07
73- 77	-.30E-11	-.23E-11	-.13E-11	-.27E-11	-.15E-11	-.64E-12	.17E-12	.13E-10	.66E-10	.32E-09	.16E-08	.76E-08
77- 81	-.12E-10	-.99E-11	-.87E-11	-.89E-11	-.85E-11	-.10E-10	-.15E-10	-.33E-10	-.11E-09	-.47E-09	-.20E-08	-.88E-08
81- 85	-.59E-10	-.49E-10	-.46E-10	-.44E-10	-.45E-10	-.48E-10	-.61E-10	-.11E-09	-.35E-09	-.14E-08	-.60E-08	-.27E-07
85- 89	-.29E-09	-.24E-09	-.23E-09	-.23E-09	-.23E-09	-.24E-09	-.27E-09	-.36E-09	-.77E-09	-.26E-08	-.11E-07	-.48E-07
89- 93	-.14E-08	-.12E-08	-.12E-08	-.12E-08	-.12E-08	-.12E-08	-.13E-08	-.14E-08	-.21E-08	-.48E-08	-.17E-07	-.73E-07
93- 97	-.70E-08	-.62E-08	-.60E-08	-.60E-08	-.61E-08	-.62E-08	-.64E-08	-.68E-08	-.79E-08	-.12E-07	-.29E-07	-.11E-06
97-101	-.34E-07	-.31E-07	-.31E-07	-.31E-07	-.31E-07	-.32E-07	-.33E-07	-.34E-07	-.36E-07	-.43E-07	-.68E-07	-.18E-06
101-105	-.17E-06	-.17E-06	-.17E-06	-.17E-06	-.17E-06	-.17E-06	-.18E-06	-.18E-06	-.19E-06	-.21E-06	-.25E-06	-.38E-06

## BERÄKNINGSEXEMPEL 10.

VATTENGENOMSLÄPPLIG BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.d OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.20E-05	.17E-05	.15E-05	.13E-05	.11E-05	.95E-06	.80E-06	.64E-06	.48E-06	.32E-06	.13E-06	-.19E-06
9- 13	.69E-06	.45E-06	.36E-06	.30E-06	.26E-06	.22E-06	.18E-06	.15E-06	.11E-06	.75E-07	.50E-08	-.21E-06
13- 17	.43E-06	.23E-06	.16E-06	.12E-06	.10E-06	.84E-07	.71E-07	.60E-07	.48E-07	.31E-07	-.18E-07	-.22E-06
17- 21	.36E-06	.18E-06	.12E-06	.86E-07	.68E-07	.57E-07	.48E-07	.41E-07	.34E-07	.21E-07	-.23E-07	-.21E-06
21- 25	.34E-06	.16E-06	.10E-06	.76E-07	.60E-07	.49E-07	.42E-07	.36E-07	.30E-07	.18E-07	-.23E-07	-.20E-06
25- 29	.32E-06	.15E-06	.97E-07	.71E-07	.56E-07	.46E-07	.39E-07	.34E-07	.28E-07	.17E-07	-.22E-07	-.20E-06
29- 33	.30E-06	.15E-06	.92E-07	.67E-07	.53E-07	.44E-07	.37E-07	.32E-07	.27E-07	.16E-07	-.21E-07	-.19E-06
33- 37	.28E-06	.14E-06	.87E-07	.63E-07	.50E-07	.41E-07	.35E-07	.30E-07	.25E-07	.15E-07	-.20E-07	-.18E-06
37- 41	.27E-06	.13E-06	.82E-07	.60E-07	.47E-07	.39E-07	.33E-07	.29E-07	.24E-07	.14E-07	-.19E-07	-.17E-06
41- 45	.25E-06	.12E-06	.77E-07	.56E-07	.44E-07	.37E-07	.31E-07	.27E-07	.22E-07	.14E-07	-.18E-07	-.16E-06
45- 49	.24E-06	.11E-06	.72E-07	.52E-07	.41E-07	.34E-07	.29E-07	.25E-07	.21E-07	.13E-07	-.17E-07	-.15E-06
49- 53	.22E-06	.11E-06	.67E-07	.49E-07	.38E-07	.32E-07	.27E-07	.23E-07	.19E-07	.12E-07	-.16E-07	-.14E-06
53- 57	.20E-06	.99E-07	.62E-07	.45E-07	.36E-07	.29E-07	.25E-07	.22E-07	.18E-07	.11E-07	-.15E-07	-.13E-06
57- 61	.19E-06	.91E-07	.57E-07	.42E-07	.33E-07	.27E-07	.23E-07	.20E-07	.17E-07	.10E-07	-.14E-07	-.12E-06
61- 65	.17E-06	.83E-07	.52E-07	.38E-07	.30E-07	.25E-07	.21E-07	.18E-07	.15E-07	.91E-08	-.12E-07	-.11E-06
65- 69	.15E-06	.75E-07	.47E-07	.34E-07	.27E-07	.22E-07	.19E-07	.16E-07	.14E-07	.83E-08	-.11E-07	-.98E-07
69- 73	.14E-06	.67E-07	.42E-07	.31E-07	.24E-07	.20E-07	.17E-07	.15E-07	.12E-07	.74E-08	-.10E-07	-.87E-07
73- 77	.12E-06	.59E-07	.37E-07	.27E-07	.21E-07	.18E-07	.15E-07	.13E-07	.11E-07	.65E-08	-.90E-08	-.77E-07
77- 81	.11E-06	.51E-07	.32E-07	.24E-07	.19E-07	.15E-07	.13E-07	.11E-07	.94E-08	.56E-08	-.79E-08	-.67E-07
81- 85	.89E-07	.43E-07	.27E-07	.20E-07	.16E-07	.13E-07	.11E-07	.95E-08	.79E-08	.47E-08	-.67E-08	-.57E-07
85- 89	.73E-07	.35E-07	.22E-07	.16E-07	.13E-07	.11E-07	.90E-08	.77E-08	.64E-08	.38E-08	-.56E-08	-.47E-07
89- 93	.56E-07	.27E-07	.17E-07	.12E-07	.95E-08	.78E-08	.67E-08	.58E-08	.48E-08	.28E-08	-.46E-08	-.38E-07
93- 97	.37E-07	.16E-07	.94E-08	.63E-08	.47E-08	.38E-08	.32E-08	.29E-08	.25E-08	.12E-08	-.40E-08	-.28E-07
97-101	.44E-08	-.56E-08	-.84E-08	-.89E-08	-.84E-08	-.74E-08	-.62E-08	-.49E-08	-.37E-08	-.31E-08	-.53E-08	-.20E-07
101-105	-.96E-07	-.92E-07	-.85E-07	-.77E-07	-.69E-07	-.59E-07	-.50E-07	-.41E-07	-.31E-07	-.23E-07	-.16E-07	-.18E-07

## BERÄKNINGSEXEMPEL 11.

VATTENTÄT BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.5.d OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.75E-06	.48E-06	.35E-06	.27E-06	.22E-06	.18E-06	.15E-06	.12E-06	.83E-07	.29E-07	-.73E-07	-.35E-06
9- 13	.45E-06	.24E-06	.16E-06	.12E-06	.95E-07	.78E-07	.65E-07	.54E-07	.42E-07	.21E-07	-.37E-07	-.27E-06
13- 17	.38E-06	.19E-06	.12E-06	.88E-07	.70E-07	.57E-07	.49E-07	.41E-07	.34E-07	.19E-07	-.30E-07	-.24E-06
17- 21	.35E-06	.17E-06	.11E-06	.79E-07	.62E-07	.52E-07	.44E-07	.38E-07	.31E-07	.18E-07	-.27E-07	-.23E-06
21- 25	.33E-06	.16E-06	.10E-06	.74E-07	.59E-07	.48E-07	.41E-07	.36E-07	.30E-07	.18E-07	-.25E-07	-.22E-06
25- 29	.32E-06	.15E-06	.97E-07	.71E-07	.56E-07	.46E-07	.39E-07	.34E-07	.28E-07	.17E-07	-.24E-07	-.20E-06
29- 33	.30E-06	.15E-06	.92E-07	.67E-07	.53E-07	.44E-07	.37E-07	.32E-07	.27E-07	.16E-07	-.23E-07	-.19E-06
33- 37	.28E-06	.14E-06	.87E-07	.63E-07	.50E-07	.41E-07	.35E-07	.30E-07	.25E-07	.15E-07	-.21E-07	-.18E-06
37- 41	.27E-06	.13E-06	.82E-07	.60E-07	.47E-07	.39E-07	.33E-07	.29E-07	.24E-07	.14E-07	-.20E-07	-.17E-06
41- 45	.25E-06	.12E-06	.77E-07	.56E-07	.44E-07	.37E-07	.31E-07	.27E-07	.22E-07	.13E-07	-.19E-07	-.16E-06
45- 49	.24E-06	.11E-06	.72E-07	.52E-07	.41E-07	.34E-07	.29E-07	.25E-07	.21E-07	.12E-07	-.18E-07	-.15E-06
49- 53	.22E-06	.11E-06	.67E-07	.49E-07	.38E-07	.32E-07	.27E-07	.23E-07	.19E-07	.12E-07	-.16E-07	-.14E-06
53- 57	.20E-06	.99E-07	.62E-07	.45E-07	.36E-07	.29E-07	.25E-07	.22E-07	.18E-07	.11E-07	-.15E-07	-.13E-06
57- 61	.19E-06	.91E-07	.57E-07	.42E-07	.33E-07	.27E-07	.23E-07	.20E-07	.17E-07	.99E-08	-.14E-07	-.12E-06
61- 65	.17E-06	.83E-07	.52E-07	.38E-07	.30E-07	.25E-07	.21E-07	.18E-07	.15E-07	.90E-08	-.13E-07	-.11E-06
65- 69	.15E-06	.75E-07	.47E-07	.34E-07	.27E-07	.22E-07	.19E-07	.16E-07	.14E-07	.82E-08	-.12E-07	-.10E-06
69- 73	.14E-06	.67E-07	.42E-07	.31E-07	.24E-07	.20E-07	.17E-07	.15E-07	.12E-07	.73E-08	-.11E-07	-.89E-07
73- 77	.12E-06	.59E-07	.37E-07	.27E-07	.21E-07	.18E-07	.15E-07	.13E-07	.11E-07	.64E-08	-.94E-08	-.79E-07
77- 81	.11E-06	.51E-07	.32E-07	.24E-07	.19E-07	.15E-07	.13E-07	.11E-07	.94E-08	.55E-08	-.82E-08	-.69E-07
81- 85	.89E-07	.43E-07	.27E-07	.20E-07	.16E-07	.13E-07	.11E-07	.95E-08	.79E-08	.46E-08	-.71E-08	-.59E-07
85- 89	.73E-07	.35E-07	.22E-07	.16E-07	.13E-07	.11E-07	.90E-08	.77E-08	.64E-08	.37E-08	-.60E-08	-.49E-07
89- 93	.56E-07	.27E-07	.17E-07	.12E-07	.95E-08	.78E-08	.67E-08	.58E-08	.48E-08	.27E-08	-.50E-08	-.39E-07
93- 97	.37E-07	.16E-07	.94E-08	.63E-08	.47E-08	.38E-08	.32E-08	.28E-08	.24E-08	.11E-08	-.45E-08	-.30E-07
97-101	.43E-08	-.57E-08	-.85E-08	-.90E-08	-.85E-08	-.76E-08	-.64E-08	-.51E-08	-.39E-08	-.34E-08	-.59E-08	-.22E-07
101-105	-.97E-07	-.92E-07	-.86E-07	-.78E-07	-.69E-07	-.60E-07	-.51E-07	-.41E-07	-.32E-07	-.24E-07	-.18E-07	-.21E-07

## BERÄKNINGSEXEMPEL 12.

VATTENGENOMSLÄPPLIG BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.8.a OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.13E-04	.11E-04	.91E-05	.78E-05	.66E-05	.54E-05	.42E-05	.31E-05	.19E-05	.68E-06	-.89E-06	-.40E-05
9- 13	.50E-05	.31E-05	.24E-05	.20E-05	.16E-05	.13E-05	.11E-05	.82E-06	.56E-06	.23E-06	-.46E-06	-.29E-05
13- 17	.34E-05	.18E-05	.12E-05	.92E-06	.74E-06	.61E-06	.51E-06	.41E-06	.32E-06	.15E-06	-.37E-06	-.26E-05
17- 21	.31E-05	.15E-05	.97E-06	.71E-06	.57E-06	.47E-06	.40E-06	.34E-06	.27E-06	.14E-06	-.34E-06	-.25E-05
21- 25	.30E-05	.15E-05	.92E-06	.67E-06	.53E-06	.44E-06	.37E-06	.32E-06	.26E-06	.13E-06	-.33E-06	-.24E-05
25- 29	.29E-05	.14E-05	.90E-06	.66E-06	.52E-06	.43E-06	.36E-06	.31E-06	.26E-06	.13E-06	-.32E-06	-.23E-05
29- 33	.29E-05	.14E-05	.89E-06	.65E-06	.51E-06	.42E-06	.36E-06	.31E-06	.25E-06	.13E-06	-.31E-06	-.23E-05
33- 37	.29E-05	.14E-05	.89E-06	.64E-06	.51E-06	.42E-06	.36E-06	.31E-06	.25E-06	.13E-06	-.31E-06	-.23E-05
37- 41	.29E-05	.14E-05	.88E-06	.64E-06	.50E-06	.42E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.13E-06	-.31E-06	-.23E-05
41- 45	.28E-05	.14E-05	.87E-06	.63E-06	.50E-06	.41E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.13E-06	-.30E-06	-.22E-05
45- 49	.28E-05	.14E-05	.86E-06	.63E-06	.49E-06	.41E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.13E-06	-.30E-06	-.22E-05
49- 53	.28E-05	.14E-05	.85E-06	.62E-06	.49E-06	.40E-06	.34E-06	.30E-06	.24E-06	.13E-06	-.30E-06	-.22E-05
53- 57	.28E-05	.13E-05	.85E-06	.62E-06	.48E-06	.40E-06	.34E-06	.29E-06	.24E-06	.13E-06	-.30E-06	-.22E-05
57- 61	.27E-05	.13E-05	.84E-06	.61E-06	.48E-06	.40E-06	.34E-06	.29E-06	.24E-06	.12E-06	-.30E-06	-.22E-05
61- 65	.27E-05	.13E-05	.83E-06	.60E-06	.48E-06	.39E-06	.33E-06	.29E-06	.24E-06	.12E-06	-.31E-06	-.22E-05
65- 69	.27E-05	.13E-05	.82E-06	.60E-06	.47E-06	.39E-06	.33E-06	.28E-06	.23E-06	.12E-06	-.31E-06	-.22E-05
69- 73	.27E-05	.13E-05	.81E-06	.59E-06	.47E-06	.39E-06	.33E-06	.28E-06	.23E-06	.12E-06	-.31E-06	-.22E-05
73- 77	.26E-05	.13E-05	.81E-06	.59E-06	.46E-06	.38E-06	.32E-06	.28E-06	.23E-06	.11E-06	-.32E-06	-.22E-05
77- 81	.26E-05	.13E-05	.80E-06	.58E-06	.46E-06	.38E-06	.32E-06	.28E-06	.23E-06	.11E-06	-.32E-06	-.23E-05
81- 85	.26E-05	.13E-05	.79E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.22E-06	.11E-06	-.33E-06	-.23E-05
85- 89	.26E-05	.12E-05	.78E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.22E-06	.10E-06	-.35E-06	-.23E-05
89- 93	.25E-05	.12E-05	.79E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.31E-06	.27E-06	.21E-06	.90E-07	-.37E-06	-.24E-05
93- 97	.26E-05	.13E-05	.83E-06	.60E-06	.47E-06	.39E-06	.32E-06	.26E-06	.20E-06	.59E-07	-.43E-06	-.26E-05
97-101	.30E-05	.16E-05	.11E-05	.80E-06	.62E-06	.48E-06	.36E-06	.26E-06	.13E-06	-.74E-07	-.65E-06	-.30E-05
101-105	.52E-05	.34E-05	.25E-05	.19E-05	.15E-05	.10E-05	.65E-06	.26E-06	-.18E-06	-.75E-06	-.18E-05	-.44E-05

## BERÄKNINGSEXEMPEL 13.

VATTENTÄT BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.8.b OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.52E-05	.32E-05	.23E-05	.17E-05	.14E-05	.12E-05	.10E-05	.82E-06	.62E-06	.30E-06	-.37E-06	-.22E-05
9- 13	.34E-05	.18E-05	.12E-05	.87E-06	.69E-06	.58E-06	.49E-06	.41E-06	.33E-06	.19E-06	-.23E-06	-.19E-05
13- 17	.31E-05	.15E-05	.97E-06	.71E-06	.56E-06	.46E-06	.39E-06	.34E-06	.28E-06	.17E-06	-.21E-06	-.18E-05
17- 21	.30E-05	.15E-05	.93E-06	.67E-06	.53E-06	.44E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.16E-06	-.20E-06	-.18E-05
21- 25	.30E-05	.14E-05	.91E-06	.66E-06	.52E-06	.43E-06	.37E-06	.32E-06	.26E-06	.16E-06	-.21E-06	-.18E-05
25- 29	.29E-05	.14E-05	.90E-06	.66E-06	.52E-06	.43E-06	.36E-06	.31E-06	.26E-06	.16E-06	-.21E-06	-.18E-05
29- 33	.29E-05	.14E-05	.89E-06	.65E-06	.51E-06	.42E-06	.36E-06	.31E-06	.26E-06	.16E-06	-.21E-06	-.18E-05
33- 37	.29E-05	.14E-05	.89E-06	.64E-06	.51E-06	.42E-06	.36E-06	.31E-06	.26E-06	.15E-06	-.21E-06	-.18E-05
37- 41	.29E-05	.14E-05	.88E-06	.64E-06	.50E-06	.42E-06	.35E-06	.31E-06	.25E-06	.15E-06	-.21E-06	-.18E-05
41- 45	.28E-05	.14E-05	.87E-06	.63E-06	.50E-06	.41E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.15E-06	-.22E-06	-.18E-05
45- 49	.28E-05	.14E-05	.86E-06	.63E-06	.49E-06	.41E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.15E-06	-.22E-06	-.18E-05
49- 53	.28E-05	.14E-05	.85E-06	.62E-06	.49E-06	.40E-06	.34E-06	.30E-06	.25E-06	.15E-06	-.22E-06	-.18E-05
53- 57	.28E-05	.13E-05	.85E-06	.62E-06	.48E-06	.40E-06	.34E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.22E-06	-.18E-05
57- 61	.27E-05	.13E-05	.84E-06	.61E-06	.48E-06	.40E-06	.34E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.23E-06	-.18E-05
61- 65	.27E-05	.13E-05	.83E-06	.60E-06	.48E-06	.39E-06	.33E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.23E-06	-.19E-05
65- 69	.27E-05	.13E-05	.82E-06	.60E-06	.47E-06	.39E-06	.33E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.23E-06	-.19E-05
69- 73	.27E-05	.13E-05	.81E-06	.59E-06	.47E-06	.39E-06	.33E-06	.28E-06	.23E-06	.13E-06	-.24E-06	-.19E-05
73- 77	.26E-05	.13E-05	.81E-06	.59E-06	.46E-06	.38E-06	.33E-06	.28E-06	.23E-06	.13E-06	-.24E-06	-.19E-05
77- 81	.26E-05	.13E-05	.80E-06	.58E-06	.46E-06	.38E-06	.32E-06	.28E-06	.23E-06	.13E-06	-.25E-06	-.19E-05
81- 85	.26E-05	.13E-05	.79E-06	.58E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.23E-06	.12E-06	-.25E-06	-.19E-05
85- 89	.26E-05	.12E-05	.79E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.22E-06	.12E-06	-.26E-06	-.20E-05
89- 93	.26E-05	.12E-05	.79E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.22E-06	.11E-06	-.28E-06	-.20E-05
93- 97	.26E-05	.13E-05	.84E-06	.61E-06	.48E-06	.39E-06	.33E-06	.27E-06	.21E-06	.91E-07	-.33E-06	-.21E-05
97-101	.30E-05	.16E-05	.11E-05	.84E-06	.66E-06	.53E-06	.41E-06	.31E-06	.20E-06	.13E-07	-.48E-06	-.24E-05
101-105	.54E-05	.37E-05	.28E-05	.22E-05	.17E-05	.13E-05	.92E-06	.55E-06	.15E-06	-.37E-06	-.13E-05	-.35E-05

BERÄKNINGSEXEMPEL 14.

VATTENGENOMSLÄPPLIG BERGYTA. TRYCKFÖRDELNING ENLIGT FIG 4.9 OCH  $K=1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

SAMMANSTÄLLNING AV BERÄKNADE FLÖDEN I OLIKA BORRHÄLSELEMENT ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

DJUP (m)	CIRKEL 1	CIRKEL 2	CIRKEL 3	CIRKEL 4	CIRKEL 5	CIRKEL 6	CIRKEL 7	CIRKEL 8	CIRKEL 9	CIRKEL 10	CIRKEL 11	CIRKEL 12
5- 9	.16E-04	.13E-04	.11E-04	.99E-05	.86E-05	.75E-05	.63E-05	.51E-05	.40E-05	.28E-05	.14E-05	-.82E-06
9- 13	.54E-05	.35E-05	.28E-05	.23E-05	.20E-05	.17E-05	.14E-05	.12E-05	.95E-06	.65E-06	.14E-06	-.15E-05
13- 17	.35E-05	.19E-05	.13E-05	.99E-06	.81E-06	.68E-06	.58E-06	.49E-06	.40E-06	.26E-06	-.11E-06	-.17E-05
17- 21	.31E-05	.15E-05	.99E-06	.73E-06	.58E-06	.48E-06	.41E-06	.35E-06	.29E-06	.19E-06	-.17E-06	-.17E-05
21- 25	.30E-05	.15E-05	.92E-06	.67E-06	.53E-06	.44E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.17E-06	-.19E-06	-.18E-05
25- 29	.29E-05	.14E-05	.90E-06	.66E-06	.52E-06	.43E-06	.37E-06	.32E-06	.26E-06	.16E-06	-.20E-06	-.18E-05
29- 33	.29E-05	.14E-05	.89E-06	.65E-06	.51E-06	.42E-06	.36E-06	.31E-06	.26E-06	.16E-06	-.21E-06	-.18E-05
33- 37	.29E-05	.14E-05	.89E-06	.64E-06	.51E-06	.42E-06	.36E-06	.31E-06	.26E-06	.15E-06	-.21E-06	-.18E-05
37- 41	.29E-05	.14E-05	.88E-06	.64E-06	.50E-06	.42E-06	.35E-06	.31E-06	.25E-06	.15E-06	-.21E-06	-.18E-05
41- 45	.28E-05	.14E-05	.87E-06	.63E-06	.50E-06	.41E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.15E-06	-.22E-06	-.18E-05
45- 49	.28E-05	.14E-05	.86E-06	.63E-06	.49E-06	.41E-06	.35E-06	.30E-06	.25E-06	.15E-06	-.22E-06	-.18E-05
49- 53	.28E-05	.14E-05	.85E-06	.62E-06	.49E-06	.40E-06	.34E-06	.30E-06	.25E-06	.14E-06	-.22E-06	-.19E-05
53- 57	.28E-05	.13E-05	.85E-06	.62E-06	.48E-06	.40E-06	.34E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.23E-06	-.19E-05
57- 61	.27E-05	.13E-05	.84E-06	.61E-06	.48E-06	.40E-06	.34E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.23E-06	-.19E-05
61- 65	.27E-05	.13E-05	.83E-06	.60E-06	.48E-06	.39E-06	.33E-06	.29E-06	.24E-06	.14E-06	-.23E-06	-.19E-05
65- 69	.27E-05	.13E-05	.82E-06	.60E-06	.47E-06	.39E-06	.33E-06	.29E-06	.24E-06	.13E-06	-.24E-06	-.19E-05
69- 73	.27E-05	.13E-05	.81E-06	.59E-06	.47E-06	.39E-06	.33E-06	.28E-06	.23E-06	.13E-06	-.24E-06	-.19E-05
73- 77	.26E-05	.13E-05	.81E-06	.59E-06	.46E-06	.38E-06	.33E-06	.28E-06	.23E-06	.13E-06	-.24E-06	-.19E-05
77- 81	.26E-05	.13E-05	.80E-06	.58E-06	.46E-06	.38E-06	.32E-06	.28E-06	.23E-06	.13E-06	-.25E-06	-.19E-05
81- 85	.26E-05	.13E-05	.79E-06	.58E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.23E-06	.12E-06	-.26E-06	-.20E-05
85- 89	.26E-05	.12E-05	.79E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.22E-06	.12E-06	-.27E-06	-.20E-05
89- 93	.26E-05	.12E-05	.79E-06	.57E-06	.45E-06	.37E-06	.32E-06	.27E-06	.22E-06	.11E-06	-.29E-06	-.21E-05
93- 97	.26E-05	.13E-05	.84E-06	.61E-06	.48E-06	.39E-06	.33E-06	.27E-06	.21E-06	.89E-07	-.33E-06	-.22E-05
97-101	.30E-05	.16E-05	.11E-05	.84E-06	.66E-06	.52E-06	.41E-06	.31E-06	.19E-06	.70E-08	-.49E-06	-.25E-05
101-105	.54E-05	.36E-05	.28E-05	.22E-05	.17E-05	.13E-05	.90E-06	.53E-06	.12E-06	-.40E-06	-.13E-05	-.36E-05











Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830631-5  
från Statens råd för byggnadsforskning till AIB,  
Anläggningsteknik AB, Solna.

R6: 1988

ISBN 91-540-4829-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6708006

Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang

Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm

Cirkapris: 42 kr exkl moms