

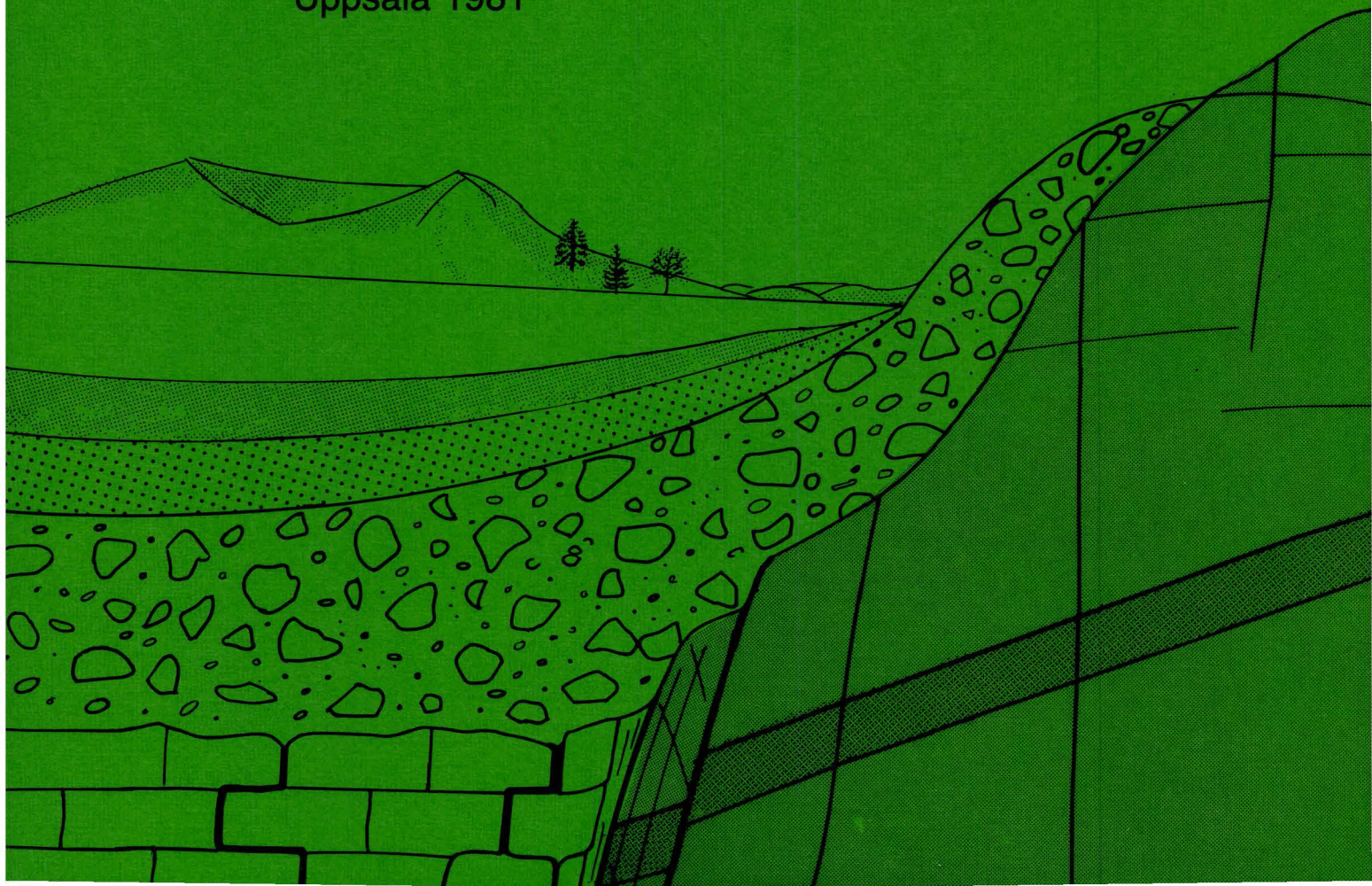


SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING
Rapporter och meddelanden nr 23

Anders Lilja

Störning av berg- grundens temperatur- förhållanden vid hammarborrning

Uppsala 1981



SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING

Anders Lilja

Störning av berggrundens temperaturförhållande
vid hammarborrning.

Undersökningen har genomförts som C-uppsats i ämnet
hydrogeologi vid Geologiska institutionen, Uppsala
Universitet.

Uppsala 1981

Inledning

Temperaturloggningar av borrhål utföres i olika sammanhang och med skiftande krav på noggrannhet. Det görs t.ex. som komplement till andra geofysiska undersökningsmetoder eller för att korrigera dessa. Ett växande tillämpningsområde för temperaturmätningar ligger på det energigeologiska planet. Den primära målsättningen med föreliggande undersökning har varit att belysa borrhålets temperaturstörande effekt, samt störningen som potentiell felkälla vid temperaturloggningar. Störningen av temperaturförhållandet omkring ett nyborrat hål har således studerats avseende process, storlek och uthållighet, och ett förfaringssätt vid korrektion av den naturliga temperaturvariationen har utarbetats.

Förslaget till arbetet har väckts av Torbjörn Fagerlind, Sveriges geologiska undersökning (SGU) som tillsammans med Jacob Johnson, SGU, bistått med goda råd. Fältarbetet vilket utfördes under april-maj 1980 har kunnat genomföras tack vare Sven Anderssons Brunnsborrningar AB, Uppsala som välvilligt ställt nyborrade brunnar till förfogande.

Geologiska institutionen vid Chalmers tekniska högskola (CTH) har upplåtit en av sina termistorer för mätningarna.

Uppsala 1981

Anders Lilja

Sammanfattning

Tre bergborrade brunnar omkring 50 m djupa har undersökts med avseende på den temperaturstörning som genereras vid borrhingsprocessen. Vid användning av tryckluftdriven sänkborrhustrustning orsakas störningen till största del av luftomsättningen och till negligerbar del av utbildad friktionsvärme vid borrhålskronan. Den i berggrunden naturligt positiva temperaturgradienten omkastas härvid och blir negativ. Återhämtningen kan ses som en moturs rotation av gradienten runt en punkt på borrhålsaxeln, vilken befinner sig cirka halvvägs ner i bergformationen under förutsättning att hålet borrhats vid ytterlufttemperaturer omkring 0°C. Ytterligare en punkt längs borrhålsaxeln kan sägas vara utan störning, nämligen borrhålsbotten.

Storleken av temperaturstörningen beror huvudsakligen på borrhålsmetod och utrustning, tidsåtgång vid borrhålsningen, ytterlufttemperatur, vattenomsättning i och omkring borrhålet samt bergets termiska egenskaper. De två sistnämnda parametrarna styr även temperaturstörningens återhämtningsförlopp.

I undersökta brunnar har störningen efter 1-2 veckor varit ca 0,1°C samt efter 5 månader motsvarande storleksordningen 0,01°C. Det senare värdet har beräknats, liksom den radiella distributionen av störningen runt borrhålscentrum vilken blir maximalt omkring 4 meter.

Observeras bör att undersökta brunnar har borrhats under förutsättningar som medför en relativt ringa temperaturstörning. Vid temperaturloggningar med stora noggrannhetskrav är det nödvändigt att klarlägga störningens omfattning. Behandlingen av problemställningen, som här redovisas, kan därvid vara till hjälp.

Beteckningar

Beteckning	Storhet	Sort
A	värmeenerering	W/m ³
G	temperaturgradient	°C/m
P	periodlängd	s
T	temperatur	°C
U	temperaturamplitud	°C
c	värmekapacitivitet (specifika värmnet)	J/kg °C
k	värmeledning	W/m °C
q	värmetillförsel	W/m
r	radie	m
u	integrationsvariabel	dim.lös
z	djup under markytan	m
γ	Eulers konstant, 0.5772..	dim.lös
κ	värmediffusivitet	m ² /s
ρ	densitet	kg/m ³
τ	tid	s
φ	fasförskjutning	radianer
ω	vinkelhastighet hos sinusvågen	rad/s

Övriga använda beteckningar förklaras i anslutning till dess behandling. Har sorterna ovan frångåtts framgår det i texten.

Innehållsförteckning

- 1.1 Temperaturgradientens utseende under naturliga förhållanden och efter störning.
- 1.2 Störningens fysikaliska bakgrund.
- 1.3 Faktorer som styr storleken och uthålligheten av störningen.

- 2.1 Teoretisk behandling av temperaturstörningen.
- 2.2 Korrektion för den naturliga temperaturvariationen (sinusvågen).

- 3.1 Undersökta brunnar.
- 3.2 Borrmetod och utrustning.
- 3.3 Temperaturloggning - utrustning och utförande.

- 4 Beräkningar och resultat.

- 5.1 Kommentarer.
- 5.2 Förslag och rekommendationer.

- 6 Referenser.

1.1 Temperaturgradientens utseende under naturliga förhållanden och efter störning

Något förenklat kan temperaturförhållandena, på djup som berörs vid borrhning efter vatten, sägas bestå av en övre transient del och en nedre stationär del.

Ner till ett djup av 20-50 meter varierar temperaturen periodiskt som svar på årstidsfluktationen vid markytan. Temperaturamplituden minskar och fasförskjutningen ökar med ökat djup, i förhållande till temperaturen vid markytan, medan frekvensen förblir konstant. Denna dämpade sinusvåg behandlas vidare i anslutning till temperaturkorrektioner som framgår av sektion 2.2.

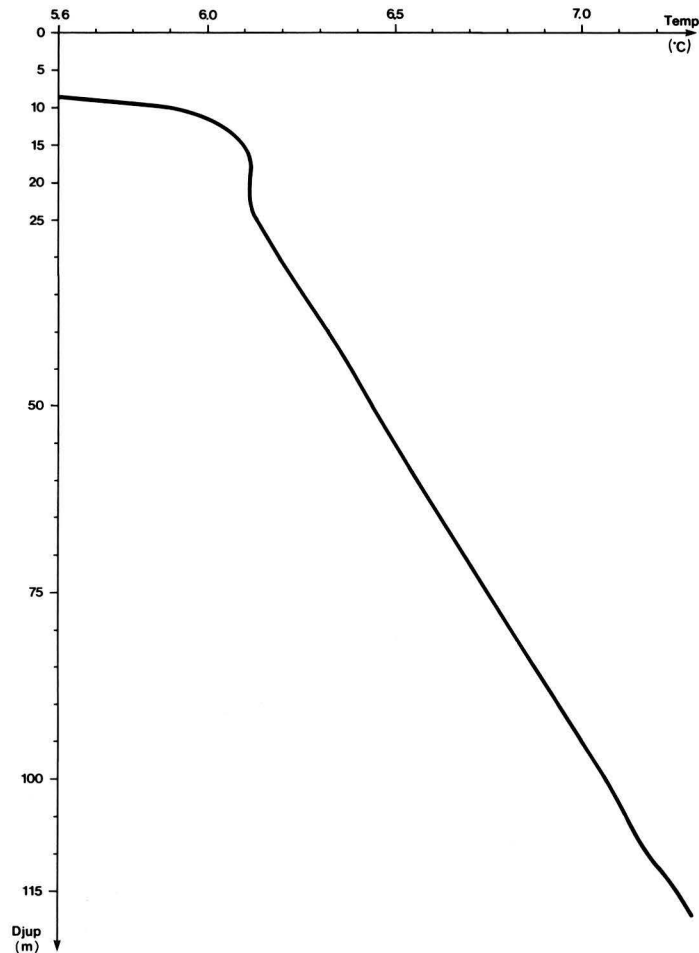


Fig.1 Borrhål nr.1, Vänge.

Temperaturförhållandet som funktion av djupet.

Under 50 meters nivå ökar temperaturen normalt med 1-2.5 °C/100 m i svensk kristallin berggrund, ref. 14. För en fullständigare beskrivning av de faktorer som påverkar temperaturgradienten såsom graden av värmegenerering p.g.a. radioaktivt sönderfall, långtidsförändringar i klimat, topografi, sedimentation, byggnader etc. hänvisas till ref. 9, 11, 12, samt 14.

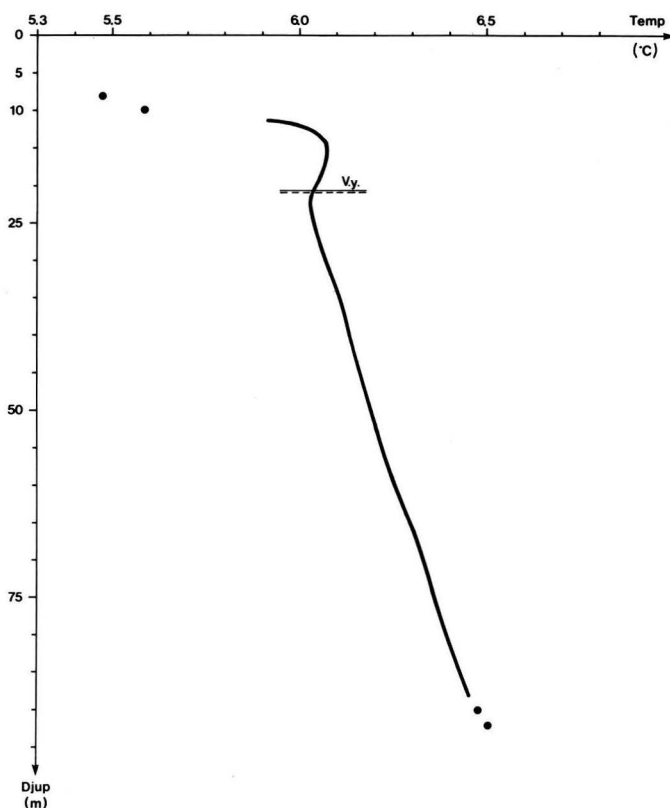


Fig.2 Borrhål nr. 2, Ytternäs
Temperaturförhållandet som funktion av djupet.

I figurerna 1-2 ovan visas exempel på temperaturloggningar av borrhål som i huvudsak återhämtat sig efter borrhånsoperationen. Ytterligare borrhålsdata återfinnes i bilaga 1-2.

Temperaturförhållandena vid borrhål nr. 1 Finnsta, Vänge kan ses som helt normala. Borrhål nr. 2 från Ytternäs, Uppsala uppvisar däremot en temperaturgradient vilken är onormalt brant. Denna temperaturutjämnning

har troligen sin förklaring i en kraftig vattenomsättning omkring eller i borrhålet. Brunnens kapacitet är uppskattad till 6 000 liter/timme. Ref. 9 presenterar exempel på temperaturgradientens förändring vid påtvingad konvektion (sid 201).

Vid borrning i berg sker en temperaturförändring omkring hålet. I dess nedre del uppstår en temperatursänkning och i den övre delen en förhöjning av bergets naturliga ursprungstemperaturer. Förhållandet mellan hur stor del som avkyls och hur stor del som uppvärms styrs i största utsträckning av ytterluftens temperatur.

Efter borrhingsoperationen återtar berget sin ursprungstemperatur asymptiskt. Detta har kunnat konstaterats efter upprepade temperaturloggningar i tre nyborrade brunnar i Uppsalatrakten. Figur 3, visar en av dess. Borrhål nr 3 är belägen i Risby norr om Uppsala. Ytterligare data återfinnes i bilaga 1-2.

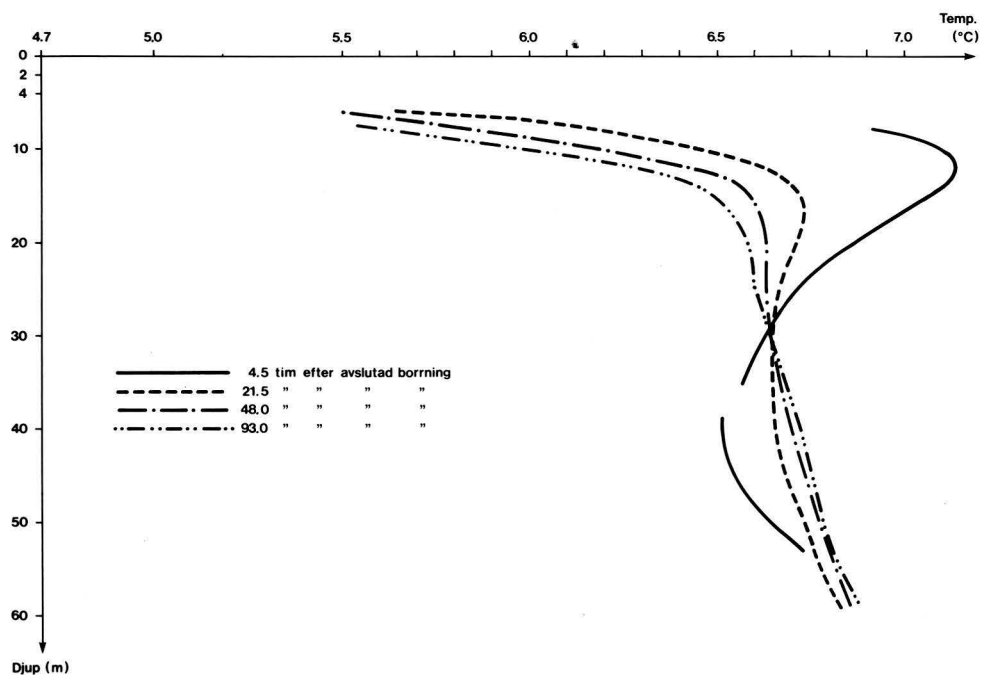


Fig. 3 Borrhål nr. 3, Risby.

Temperaturförhållandet som funktion av djupet vid fyra tillfällen efter avslutad borrning.

1.2 Störningens fysikaliska bakgrund

Temperaturstörningen som uppkommer vid rotationsborrning med vattenspolning har tidigare behandlats av Bullard, Lachenbruch m.fl., ref. 3 och 10. Störningen beror i dessa fall till större delen på cirkulationen av borrhätsvätska och i mindre utsträckning på friktionsvärmets som utbildas vid borrhäkronan samt vid deformation av borrhätsstänger. P.g.a. den temperaturutjämnande effekt som vätskecirkulationen har kan härvid temperaturgradienten halveras, ref. 13 men ej bli så stor att den omkastas.

Uppkommen temperaturstörning vid diamantborrning har behandlats av Jaeger, ref. 8. Störningen blir här ringa jämfört med motsvarande för rotationsborrning beroende på en mindre omfattande vätskecirkulation.

Vid användning av tryckluftdriven sänkborrhätsutrustning (se vidare sektion 3.2), blir orsakssammanhanget till störningen mer komplicerad och som framgår av figur 3 kan gradienten även omkastas.

Tryckluften håller då den lämnar en skruvkompressor en temperatur som ligger omkring 50 å 60 °C över ytterluftens temperatur (muntlig uppgift från U.Enström, Atlas Copco). När tryckluften passerar hammaren och strömmar ut i borrhålet sänks lufttemperaturen kraftigt p.g.a. tryckfallet och en nedkylning av omgivande berg sker. Luften som pressas uppåt med borrhätskaxet uppvärms åter av de varma borrhätsrören och avger värme till ovanförliggande berg.

Om en punkt längs borrhätsaxeln betraktas med avseende på temperaturen börjar således en nedkylning när sänkborrhäts hammaren når punkten i fråga. En tid efter att hammaren passerat punkten nås ett temperaturminimum som följs av en återhämtning. Pågår borrhätsningen tillräckligt länge passeras härvid ursprungstemperaturen och en uppvärmning sker.

Utvecklad friktionsvärme är som för de tidigare nämnda borrhätsmetoderna av underordnad betydelse för temperaturstörningen.

Tryckluftshandboken, ref. 1 sid. 18-32, behandlar temperaturfallet vid adiabatisk expansion. Om hålet i borrhätskronan där luften strömmar ut kan anses vara ett icke korrekt utförd expansionsmunstycke gäller att temperaturfallet $\Delta T = 0.167 \cdot T_1$, där T_1 är tryckluftens temperatur i grader Kelvin.

Luftens sluttemperatur efter expansionen, T_2 K, kan på motsvarande sätt tecknas som $T_2 = 0.833 \cdot T_1$.

Nedanstående tabell, som visar tryckluften samt luftens temperatur efter expansion vid borrhönan som funktion av ytterluftens temperatur, baserar sig på sambanden ovan samt förutsättningen att tryckluftens temperatur $T_1 = T_y + 50$ °C. Där T_y betecknar ytterluftens temperatur.

Ytterluftens temperatur T_y	Tryckluftens temperatur T_1	Luftens slut- temperatur efter expansion	°C
- 20	30	- 21	
- 15	35	- 16	
- 10	40	- 12	
- 5	45	- 8	
0	50	- 4	
5	55	0	
10	60	4	
15	65	9	
20	70	13	
25	75	17	

Tabell 1 Sambandet mellan ytterluftens, tryckluftens samt den expanderade luftens sluttemperatur vid borrhönan i °C.

Som framgår av sluttemperaturerna i tabellen kan eventuellt en uppvärmning av hela borrhålsomgivningen ske om borrhönan utföres sommartid.

Redovisade sluttemperaturer bör dock vara något lägre då en kylning av tryckluften sker längs tillförselledningarna och under dess passage i borrhönan.

1.3 Faktorer som styr storleken och uthålligheten av störningen

De faktorer som styr temperaturstörningens storlek och uthållighet samt samspelet mellan dem är mycket komplext. Följande behandling gör därför inte anspråk på att vara fullständig men bör ge en presentation av de mer betydande parametrarna.

Orsaker som bestämmer störningens storlek kan inledas i fyra huvudpunkter varav de två sistnämnda även styr störningens uthållighet.

- Initialförhållanden
- Tekniska
- Geologiska
- Geohydrologiska

Med initialförhållanden menas bergets ursprungliga temperatur samt gradientens utseende före borrhningen. Av större vikt är dock som tidigare nämnts ytterluftens temperatur och fuktighet under borrhningen vilka också kan inbegripas under denna punkt.

Av de tekniska orsakerna spelar operationstidens längd, d.v.s. förbrukad tid för borrhning samt blåsning, en avgörande roll för temperaturstörningens storlek. Detta framgår med all tydlighet i den teoretiska behandlingen under sektion 2.1.

Av betydelse är även borrhålsdimensionen. Vid utförande av grövre borrhål ökar således kontaktytan mellan den uppåtgående luftströmmen och borrhålsväggen samtidigt som luftförbrukningen ökar. Detta leder till att störningen blir kraftigare vid utförande av grova än små borrhålsdimensioner. Vad gäller luftförbrukningen kan sägas att den fördubblas vid utförande av borrhål med 6 tums diameter jämfört med motsvarande av 4.5 tum.

Förutom ytterlufttemperaturen är som tidigare nämnts, avståndet mellan kompressor och borrhaggat av betydelse för tryckluftens temperatur i borrhör samt dess sluttemperatur efter utträdet ur borrhkronan.

Av de tre borrhmetoderna ger hammarborrningen den relativt sett kraftigaste störningen följt av rotationsborrning samt kärnborrning i nämnd ordning.

Jämförelsen mellan de två sistnämnda metoderna har gjorts av Jaeger, ref.8.

De geologiska faktorerna styr inte bara storleken utan även uthålligheten av störningen. De parametrar som är avgörande för berggrundens termiska egenskaper är

- värmekonduktiviteten, k ($\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- diffusiviteten-temperaturledningsförmågan, κ (m^2/s)
- värmekapacitiviteten, c ($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

Dessa parametrar beror i sin tur på flera faktorer hos berget såsom mineralinnehåll, texter, struktur, densitet, vattenhalt, tryck och temperatur. Mineral och bergarters termiska egenskaper finns behandlade i många arbeten bl.a. ref. 2,6,9 och 16.

Värmekonduktiviteten är ett mått på ett materials värmeledande förmåga. För berg varierar den relativt värmekapacitiviteten och i viss mån även diffusiviteten inom vida gränser, se nedan.

Magmatiska och metamorfa bergarter ryms i stort inom intervallet 2.5 - 4 $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ medan motsvarande intervall för sedimentära bergarter är 1 - 7 $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$. De största variationerna finns hos kvartsit, dolomit, sandsten och konglomerat, ref. 9.

Några exempel på minerals värmekonduktivitet i runda tal ges i nedanstående tabell (hämtade ur ref.9) efter Beck 1965.

● fältspat, muskovit	2.3	$\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$
● biotit, klorit, epidot	2.5	"
● magnetit, kalцит	3.6	"
● hornblende, pyroxen	4.2	"
● kvarts	7.1	"

Värmekonduktiviteten kan variera betydligt beroende på planstrukturer som förskiffring och lagring. Ett mått på variationen ger den så kallade anisotropifaktorn A_f som definieras enligt

$$A_f = \frac{k_{\parallel}}{k_{\perp}}$$

k_{\parallel} och k_{\perp} är konduktiviteterna parallellt respektive vinkelrätt mot planen.

Nedanstående tabell ger några exempel på anisotropifaktorn A_f hämtade ur ref. 9.

● granit, gnejs	< 1.5
● marmor	1.03
● kvarts-sandsten	1.04
● lerskiffer	< 2.5
● sandsten	< 1.3

Vad gäller värmekonduktivitets beroende av densitet och vattenhalt kan generellt sägas att ökad densitet ger ökad konduktivitet och torrt berg leder värme sämre än motsvarande vattenmättat. För ytterligare information hänvisas till ref. 2, 6, 9 och 16.

Diffusiviteten eller temperaturledningsförmågan är ett mått på hur snabbt och djupt en temperaturfluktation kan tränga in i ett medium. Den definieras enligt sambandet

$$\kappa = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

där k , ρ och c är värmekonduktiviteten, densiteten respektive värmekapacitiveteten för materialet i fråga.

Värmekapacitiveteten är jämförd med de övriga parametrarna relativt konstant för olika bergarter och av storleksordningen $0.85 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Några exempel på intervall för temperaturledningsförmågan hos vissa material ges i nedanstående tabell, från ref. 9.

● granit	(1.4 - 2.1) 10^{-6} m^2/s
● sandsten	(1.1 - 2.3) " "
● skiffer	(0.8 - 1.6) " "
● torr sand	(1.1 - 1.3) " "
● våt sand	0.9 " "

Inverkan av de geohydrologiska faktorerna på temperaturstörningen är mer svårbedömda. Vid borrning med tryckluft bör dock generellt en vatteninträngning under borrhingsoperationen ha en dämpande effekt på temperaturstörningen. Detta kan förklaras med figur 4.

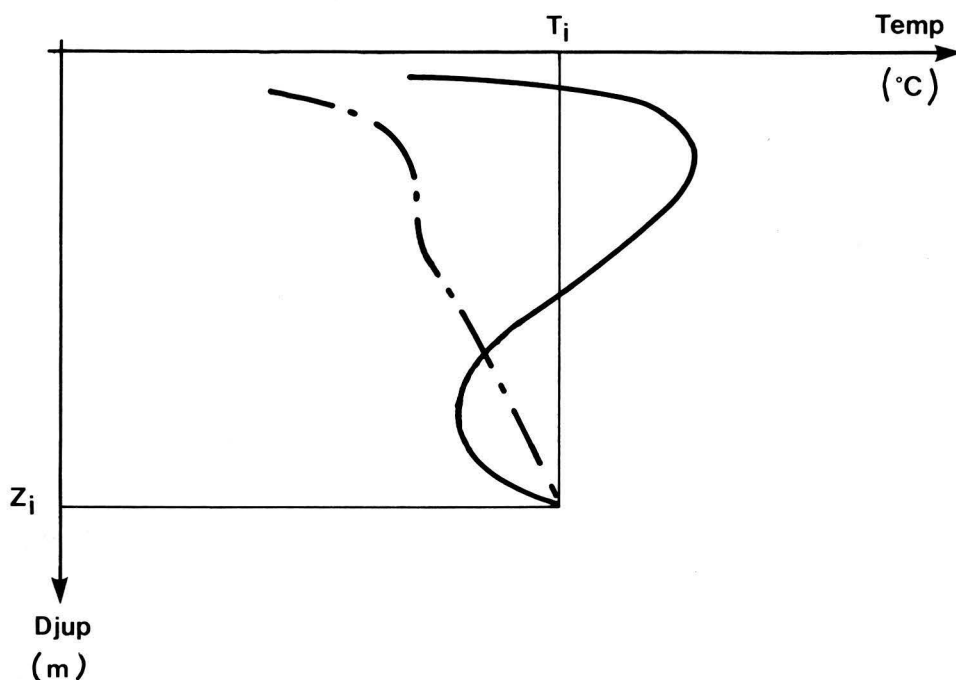


Fig. 4 ——— Temperaturförhållandet omkring borrhålet
strax före vatteninträngning.
- - - - - Ostörda temperaturförhållanden.

Om vatten av temperaturen T_i , se figur 4, tränger in på djupet z_i och förs upp genom borrhålet av luftströmmen samt eget tryck inses att temperaturstörningen, representerad av den heldragna linjen, dämpas. Graden av dämpning avgörs av borrtid efter vatteninträngning, erhållen vattenkvantitet samt det inträngande vattnets temperatur.

Under vinter och vår är temperaturgradienten kraftigt positiv i markens och berggrundens övre delar. Vid en viss kritisk gradient blir vattnet i borrhålet termiskt instabilt och egen konvektion inträder.

Den kritiska gradienten är en funktion av borrhålets diameter samt borrhålsvätskans viskositet, temperaturledningsförmåga, värmekapacitivitet densitet, volymutvidgningskoefficient och absoluta temperatur.

Denna egenkonvektion torde försena temperaturåterhämtningen i konvektionscellens övre delar och påskynda den i dess nedre del. Någon kvantitativ analys av denna värmeomsättning har inte gjorts här.

Påtvingad konvektion genom vattenomsättning mellan två eller flera vattenförande sprickor kommer även att påverka takten av temperaturåterhämtningen. Observeras bör att sluttemperaturerna i dessa fall inte kommer att representera den naturliga temperaturfördelningen i berget. Jfr sektion 1.1.

2.1 Teoretisk behandling av temperaturstörningen

Inledande allmän teori

Utgående från Fouriers värmeekvation kan differentialekvationen för temperaturfältet i tredimensionellt rum tecknas (ref. 4,7 m.fl.)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c} \left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{A}{\rho c} \quad (1)$$

Om isotropa förhållanden råder dvs $k_x = k_y = k_z$ och värmegenereringen under tidsintervallet är försumbart förenklas ekvationen till:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Sker ingen nämnvärd transport i vertikalled kan ekvationen (2) överföras till följande form med cylindriska koordinater.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

Lösningen till differentialekvation (3) är

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi k} E_1(x) \quad (4)$$

där $x = \frac{r^2}{4\kappa\tau}$ och u integrationsvariabeln.

ΔT är temperaturdifferansen i en punkt på x - y -planet efter tiden τ och på avståndet r från en kontinuerlig värmekälla q (W/m), som verkar längs z -axeln med början vid tiden $\tau = 0$.

Exponentialintegralen $E_1(x)$ kan inte integreras direkt men dess närmevärde kan fås genom den oändliga serien

$$- \gamma - \ln x - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^n}{n \cdot n!} \quad (5)$$

som finns tabellerad av bland andra Uhde, 1964.

$\gamma =$ Eulers konstant = 0.5772 ...

För små värden på x kan exponentialintegralen förenklas enligt $E_1(x) \approx -0.5772 - \ln x$ och ekvation (4) kan skrivas som

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{2 \cdot 25 \kappa\tau}{r^2} \quad (6)$$

$x \lesssim 0.01$, Lohmann, 1974

Allmän teori applicerad på temperaturstörningen kring ett borrhål

Bullard, ref. 3, antog temperaturstörningen kring ett borrhål orsakad av en kontinuerlig linjär värmekälla, q , utlöst vid den tidpunkt då borren nådde mätnivån i fråga, dvs. $\tau = 0$.

För $0 < \tau \lesssim \tau_{op}$ gäller då ekvation (4). $\tau = \tau_{op}$ vid operationstidens slut. För beskrivande av störningen efter borrhålets slut införs en imaginär värmesänka $-q$ som adderas till ekvation 4 (enligt superpositionsprincipen) från tiden $\tau = \tau_{op}$ och störningen kan tecknas

$$T - T_u = \Delta T = \frac{q}{4\pi k} E_1(x_1) - E_1(x_2) \quad (7)$$

där T_u betecknar ursprungstemperaturen

$$x_1 = \frac{r^2}{4\kappa\tau} \quad \text{och} \quad x_2 = \frac{r^2}{4\kappa(\tau - \tau_{op})}$$

För små x kan approximationen (6) användas och

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{\tau}{\tau - \tau_{op}} \quad (8)$$

En ungefärlig gräns för giltigheten av ekvation 8 kan fås med följande antaganden $r = 5.75$ cm (dimension hos undersökta brunnar)

$\kappa = 0.017$ cm²/s (medel för granit)

$$\frac{r^2}{4\kappa(\tau - \tau_{op})} \lesssim 0.01 \quad \tau \gtrsim 13 \text{ tim.} + \text{operationstid.}$$

Den maximala störningen ΔT_{\max} uppnås vid tiden $\tau = \tau_{op}$ och \bar{r} = borrhålsradien

$$\Delta T_{\max} = \frac{q}{4\pi k} E_1(x_3) \quad (9)$$

$$\text{där } x_3 = \frac{\bar{r}^2}{4\kappa\tau_{op}}$$

Om q i ekvation (7) substitueras med q i ekvation (9) fås

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = \frac{E_1(x_1) - E_1(x_2)}{E_1(x_3)} \cdot 100 \quad \% \quad (10)$$

Observera att värmekällan q ej är konstant. Den varierar både med djupet och tiden. Värmekällans avtagande i styrka med djupet medför ej något fel i beräkningarna då en viss nivå behandlas separat. Värmekällans variation i styrka med tiden på ett visst djup torde principiellt se ut som framgår av figur 5 (jfr resonemanget i sektion 1.2).

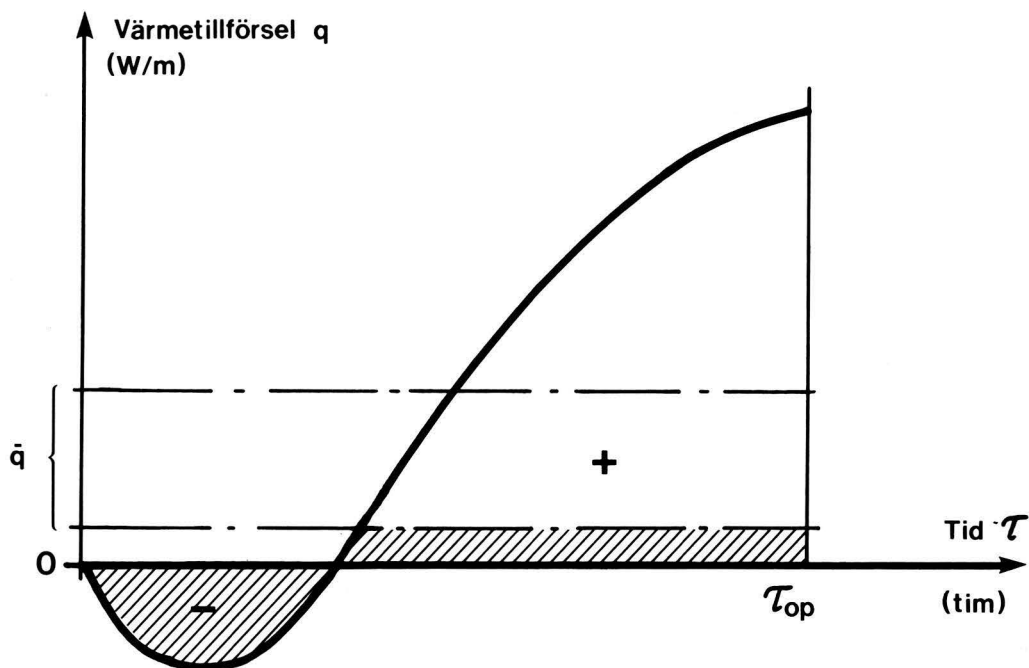


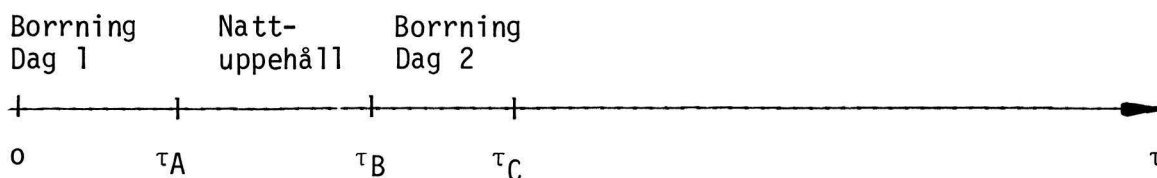
Fig. 5 Variation av värmekällans styrka med tiden på en viss nivå längs borrhålsaxeln.

$\tau = 0$ motsvarande tidpunkten då borrkronan når betraktad nivå.

$\tau = \tau_{op}$ motsvarar tidpunkten då borrningen avslutas.

Den värmekälla som härvid används vid den matematiska behandlingen skall ses som ett medelvärde (\bar{q}) över tiden τ_{op} .

Ekvationerna (7) - (10) som presenterade av Bullard gäller under antagandet att borrningen sker kontinuerligt från $\tau = 0$ till $\tau = \tau_{op}$. Denna approximation blir grov med de tider som gällt vid borrning av undersökta brunnar. Följande tidsaxel ger en ungefärlig bild av tidsåtgången vid borrningen.



$\tau = 0$ motsvarar tiden då borren når mätnivån i fråga

$\tau = \tau_A$, borrning avslutas efter första dagen

$\tau = \tau_B$, -"- påbörjas dag 2

$\tau = \tau_C$ -"- avslutas

$\tau = \tau$, tidpunkt för temperaturmätning

För att med ovanstående tider få en bättre matematisk överensstämmelse med temperaturåterhämtningsförloppet införs ytterligare två värmekällor, en positiv reell verkande från $\tau = \tau_B$ samt en negativ imaginär som startar vid $\tau = \tau_C$. Utgående från ekvationerna (7) och (8) kan temperaturdifferensen tecknas.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} (E_1(x_1) - E_1(x_2) + E_1(x_3) - E_1(x_4)) \quad (11)$$

$$x_1 = \frac{r^2}{4\kappa\tau}; x_2 = \frac{r^2}{4\kappa(\tau - \tau_A)}; x_3 = \frac{r^2}{4\kappa(\tau - \tau_B)}; x_4 = \frac{r^2}{4\kappa(\tau - \tau_C)}$$

För små x fås i analogi med ekvation (8)

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi k} \ln \frac{\tau(\tau - \tau_B)}{(\tau - \tau_A)(\tau - \tau_C)} \quad (12)$$

Avsätts temperaturen T i en mätserie mot \ln -uttrycket i ekvation (12) erhålles ursprungstemperaturen T_u som ordinatan i origo samt $q/4\pi k$ som lutningen. Se figur 6.

Ekvationerna (11) och (12) borde mer strikt tecknas som respektive

$$\Delta T = \frac{q_1}{4\pi k} (E_1(x_1) - E_1(x_2)) + \frac{q_2}{4\pi k} (E_1(x_3) - E_1(x_4)) \quad (13)$$

$$\Delta T = \frac{q_1}{4\pi k} \ln \left(\frac{\tau}{\tau - \tau_A} \right) + \frac{q_2}{4\pi k} \ln \left(\frac{\tau - \tau_B}{\tau - \tau_C} \right) \quad (14)$$

då q_2 har högre initialeffekt än q_1 .

För att kunna behandla problemet görs dock approximationen att $q_1 = q_2$.

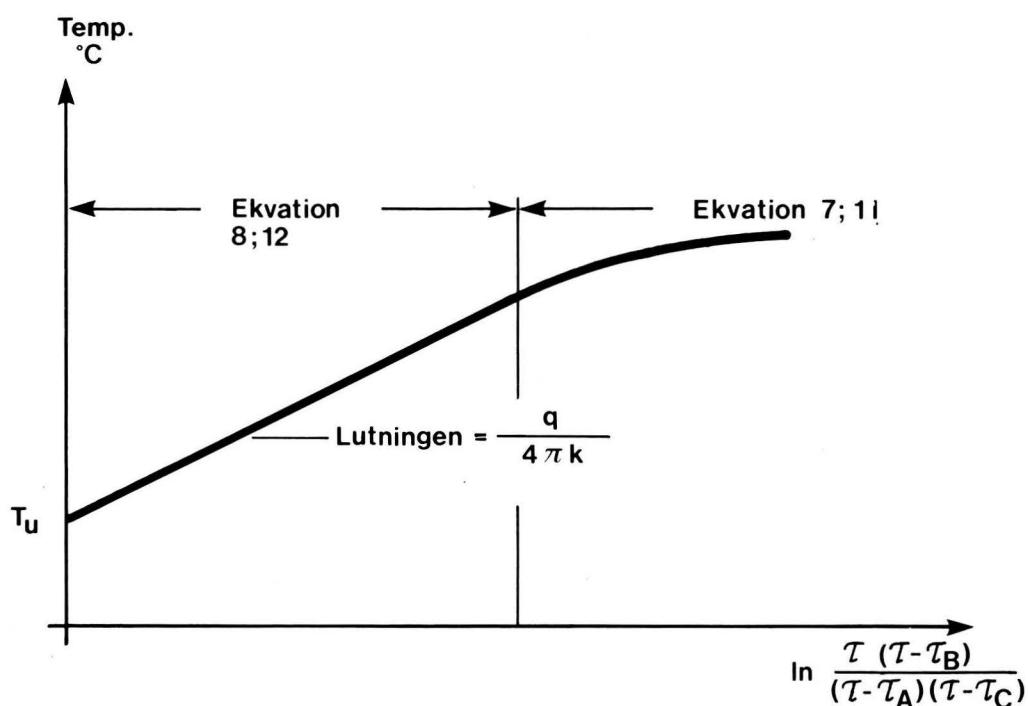


Fig. 6 Temperaturen T som funktion av $\ln \frac{\tau (\tau - \tau_B)}{(\tau - \tau_A)(\tau - \tau_C)}$

För att belysa ekvation (10) samt för att få en uppskattning av den radially distributionen av temperaturstörningen har ett teoretiskt fall behandlats med följande ingångsvärden.

Borrhålsdimensionen $\bar{r} = 5.75$ cm

Temperaturledningsförmågan $\kappa = 60$ cm²/h

Kontinuerlig borrning under tiden $\tau_{op} = 12$ timmar

Figur 7 visar temperaturstörningen $\Delta T / \Delta T_{max}$ (%) vid borrhålsväggen som funktion av tiden upp till en vecka efter avslutad borrning. Figur 8, som ger en uppfattning om hur långt temperaturstörningen fortplantar sig ut från borrhålet, visar temperaturstörningen i % som funktion av radien vid tre återhämtningstillfällen. Som synes är störningen i stort sätt utplånad 4 meter utanför borrhålscentrum vid vilken återhämtningstidpunkt som helst. τ_r betecknar återhämtningstiden efter avslutad borrning.

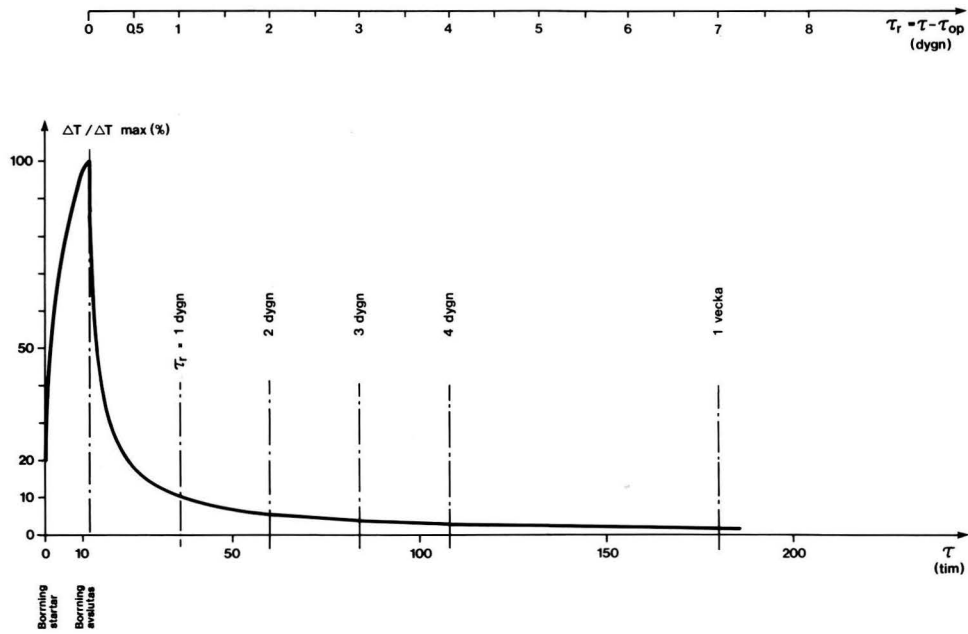


Fig. 7 Temperaturstörningen $\Delta T/\Delta T_{max}$ (%) som funktion av tiden.

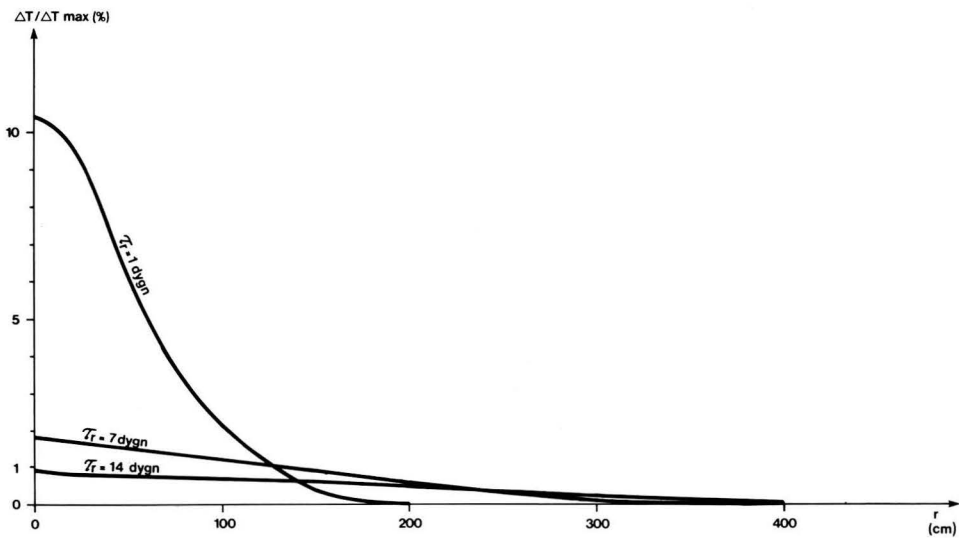


Fig: 8 Temperaturstörningen $\Delta T/\Delta T_{max}$ (%) som funktion av radien r (cm) omkring borrhålscentrum, 1, 7 respektive 14 dygn efter avslutad borring.

2.2 Korrektion för den naturliga temperaturvariationen (sinusvågen)

Temperatures årstidsfluktuation vid markytan kan med god överensstämmelse approximeras till en sinusfunktion av tiden. Svängningen sker runt årsmedeltemperaturen T_m med en amplitud av U_0 och vinkelhastigheten ω . Fluktuationen fortplantas ner i marken som tidigare nämnts, med konstant frekvens, $\omega/2\pi = 1/P$, där P betecknar periodlängden d.v.s 1 år. Temperaturfluktuationens amplitud minskar med ökat djup under markytan och en fasförskjutning \emptyset uppkommer som ökar med ökat djup. Se figur 9.

Den periodiska temperaturfluktuationen kommer att överlagras av temperaturstörningen från borrhprocessen. Då endast temperaturförändringen som resultat av borrhprocessen är av intresse måste den naturliga temperaturvariationen reduceras från avlästa temperaturer i tidsserien. Av figur 11 i sektion 4 framgår nödvändigheten av denna korrektion.

Sambanden 15-18 nedan finns beskrivna av ref. 7, 9, 15 m.fl. I figur 9 har ett försök att visualisera ekvationerna 15-20 gjorts.

Temperaturamplituden U_{z_1} på djupet z_1 under markytan kan tecknas enligt följande där κ_1 betecknar diffusiviteten för materialet till djupet z_1 .

$$U_{z_1} = U_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa_1}} \cdot z_1} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} z_1 & \text{ (m)} \\ \omega & \text{ (radianer/h)} \\ \kappa_1 & \text{ (m}^2\text{/h)} \end{aligned}$$

Fasförskjutningen \emptyset_{z_1} (rad) på djupet z_1 fås enligt

$$\emptyset_{z_1} = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa_1}} \cdot z_1 = \sqrt{\frac{\pi}{P \cdot \kappa_1}} \cdot z_1 \quad (16)$$

$$P \text{ (h)}$$

Temperaturen på djupet z_1 och vid tiden τ' beräknas enligt

$$T_{z_1, \tau'} = T_m + G_1 \cdot z_1 + U_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa_1}} \cdot z_1} \cdot \sin(\omega P' + \omega \tau' - \emptyset_{z_1}) \quad (17)$$

P' = förfluten tid mellan periodens start (omkring mitten av april) och tidpunkten då $\tau' = 0$, vilket i beräkningsläge motsvarar tidpunkten för avslutad borrning.

Termen $G_1 \cdot z_1$ motsvarar tillskottet till årsmedeltemperaturen T_m på djupet z_1 , där G_1 = temperaturgradienten.

På markytan och vid tiden τ' kan temperaturen tecknas enligt

$$T_{0,\tau'} = T_m + U_0 \cdot \sin(\omega P' + \omega \tau') \quad (18)$$

Ekvationerna 15-18 ovan gäller för homogena och isotropa förhållanden mellan markytan och djupet i fråga.

Om ett jordlager med mäktigheten z_1 och diffusiviteten κ_1 samt gradienten G_1 täcker en berggrund med diffusiviteten κ_2 och gradienten G_2 kan ekvation (17) utvecklas till

$$T_{z,\tau'} = T_m + G_1 \cdot z_1 + G_2 (z - z_1) + U_0 \cdot e^{-(\vartheta_1 + \vartheta_2)} \sin(\omega P' + \omega \tau' - (\vartheta_1 + \vartheta_2)) \quad (19)$$

där $\vartheta_1 = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa_1}} \cdot z_1$; $\vartheta_2 = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa_2}} \cdot (z - z_1)$ och z = djupet från

markytan till mätpunkten i berggrunden.

Temperaturdifferansen $\Delta T'$ mellan tidpunkterna τ' och $\tau' = 0$ fås med utgångspunkt från ekvation (19).

$$\Delta T' = U_0 \cdot e^{-(\vartheta_1 + \vartheta_2)} (\sin(\omega P' + \omega \tau' - (\vartheta_1 + \vartheta_2)) - \sin(\omega P' - (\vartheta_1 + \vartheta_2))) \quad (20)$$

De vid återhämtningsförloppet uppmätta temperaturerna T_{obs} har korrigerats till tidpunkten $\tau' = 0$, vilket motsvarar tiden för avslutad borrning, enligt

$$T_{korr} = T_{obs} - \Delta T' \quad (^\circ\text{C}) \quad (21)$$

Följande utgångsvärden har använts vid korrektionen:

$$U_0 = 9.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\omega = 2\pi/365 \cdot 24 \text{ (rad/h)}$$

Periodens start = 15 april

$\kappa_{\text{jord}} = 0.0017 \text{ (m}^2\text{/h)}$, vilket är medelvärde för jord enl. ref.4

κ_{berg} har varierats tills bästa räta linje för funktionen enligt ekvation 12 uppnåtts. Jfr figur 6.

För borrhål nr. 3 har således $\kappa_{\text{berg}} = 0.0061 \text{ (m}^2\text{/h)} = 0.017 \text{ (cm}^2\text{/s)}$ visat sig ge den bästa anpassningen till ekvation (12).

Motsvarande värden för borrhål nr.5 har varit 0.0079 respektive 0.022.

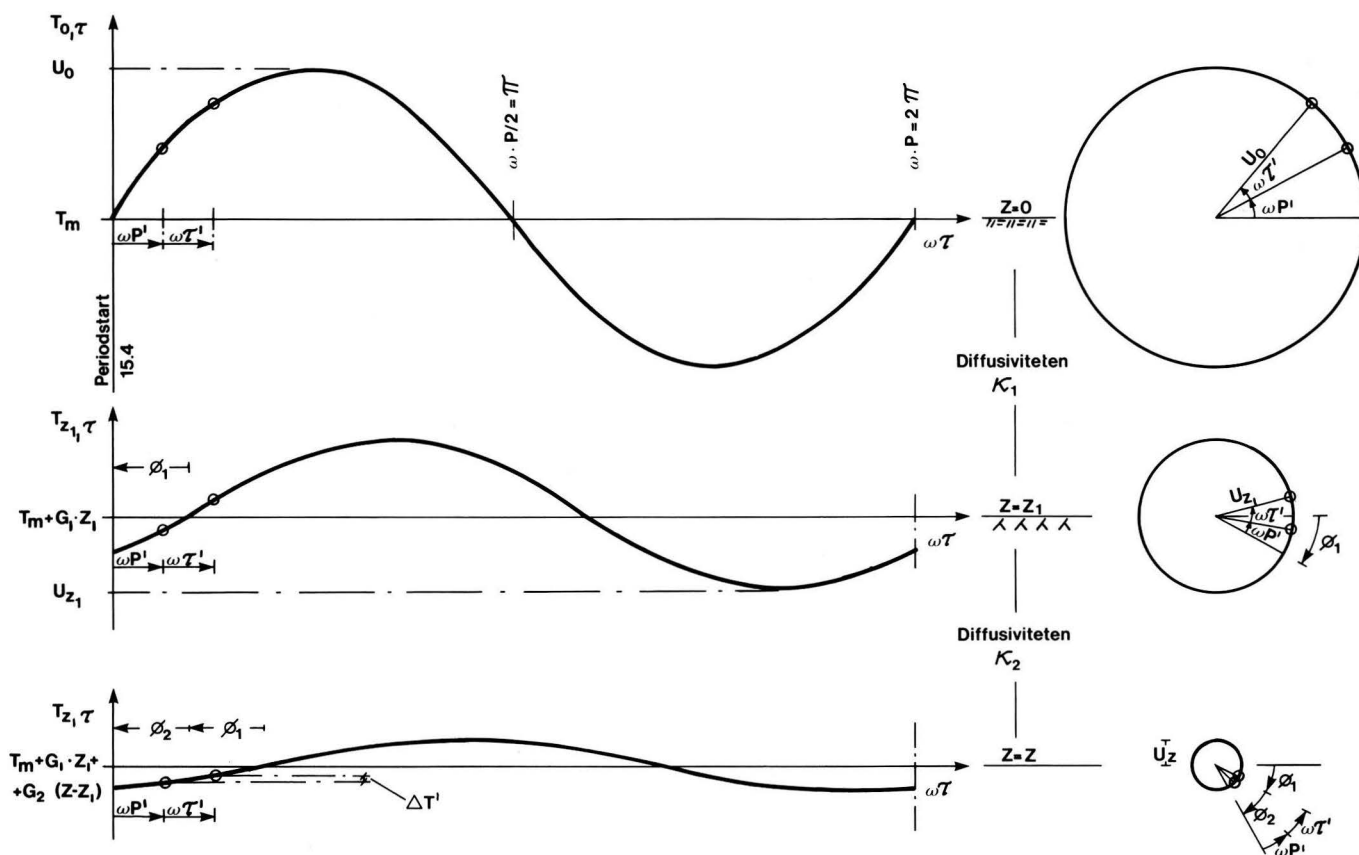


Fig. 9 Temperaturfluktuationen under ett år vid markytan samt dess förändrade utseende vid berggrundsytan och på djupet z i berget.
 P' = förfluten tid mellan periodstart och borrhållstopp.
 τ' = förfluten tid mellan borrhållstopp och loggningstillfälle.

3.1 Undersökta brunnar

Tre brunnar har undersökts med avseende på temperaturåterhämtningen, nämligen borrhål nr. 3 - 5.

Borrhål nr 1 - 2 presenteras som exempel på temperaturåterhämtade brunnar. Se figur 1 - 2 under sektion 1.1.

Brunnarnas läge och data återfinns i bilaga 1 respektive 2.

3.2 Borrmetod och utrustning

Sänkbormetoden som använts vid utförande av undersökta hål är den vanligaste vid anläggning av djupborrade vattenbrunnar i kristallin berggrund.

Hammarenheten befinner sig härvid nere i borrhålet och drivs med tryckluft som levereras via borrhör och tillförselledningar från en kompressor. En roterande rörelse är också pålagd. Luften som passerar kronan uppfordrar borkax och inträngande vatten.

Vid arbetstryck omkring 10 bar är luftförbrukningen cirka 100 l/s vid borrarbning och upp till cirka 200 l/s vid blåsning.

Vid mäktigare jordtäckte penetreras detta lager med odexborrning vilket inte här närmare beskrivs.

Foderröret som är av stål eller PVC drivs ned en bit i berget för att tätas bort ytvatten. Vanliga dimensioner är för stål \emptyset 140 x 129 mm samt för PVC 125 x 115 mm.

Utrustningen har bestått av:

Kompressor - PRH 700. Max 10.5 bar och 350 l/s

Rig - Universal 44. (3-hjulig).

Sänkbormaskin - Ingersoll Rand DHD 24.

Stiftborkrona - Sandvik Coromant \emptyset 115 mm.

Odexkrona med rymmare - \emptyset 150 mm.

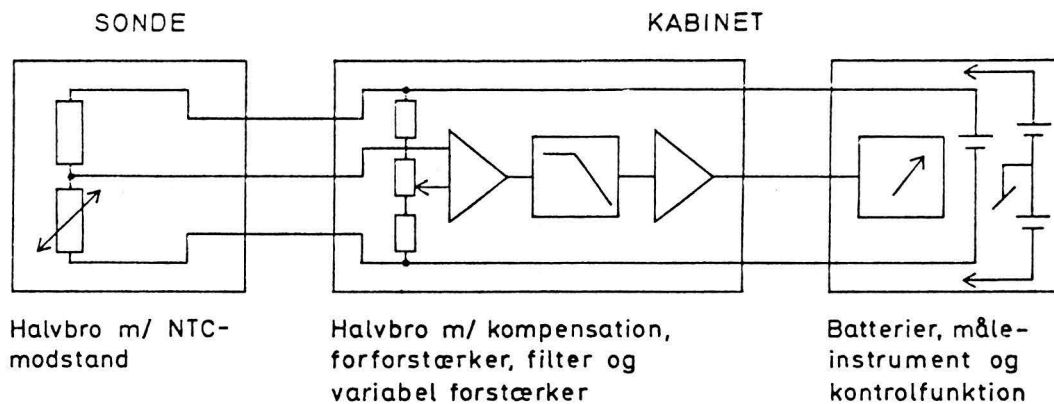
3.3 Temperaturloggning - utrustning och utförande

Vid mätningarna har använts en termistor, borrhålstermometer, typ TM 04 - LE utvecklad vid Aarhus universitet.

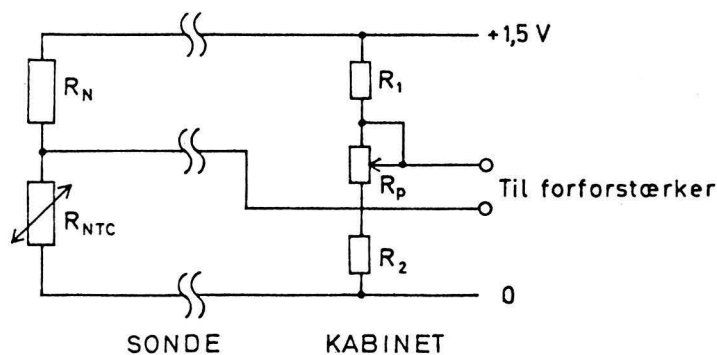
Kopplingsschemat nedan hämtat ur tillverkarens informationsmaterial visar i princip hur borrhålstermometern är uppbyggd.

Uppgiven relativ noggrannhet är ± 0.004 °C, och absolut noggrannhet ± 0.06 °C. Termometern har tre mätområden, 0 - 20, 15 - 35, samt 30 - 50 °C. Vid temperaturloggningar i fält krävs en väntetid av omkring 2 minuter innan instrumentet har uppnått sluttemperaturen.

Temperaturavläsningarna har gjorts på varannan meter i största utsträckning. Borrhål nr. 5 utgör härvidlag ett undantag där mätningarna endast utförts på två nivåer under 3.5 veckor.



Blokdiagram over TM-04



Skitse - Wheatstonebroen i TM-04

4 Beräkningar och resultat

Utförda beräkningar av temperaturåterhämtningen i nyborrade brunnar har baserats på ekvationerna (12) samt (8) i sektion 2.1. Vidare har observerade temperaturer korrigerats enligt ekvation (21) i sektion 2.2.

Genom att bestämma återhämtningsfunktionen, ekvation (23) nedan, med

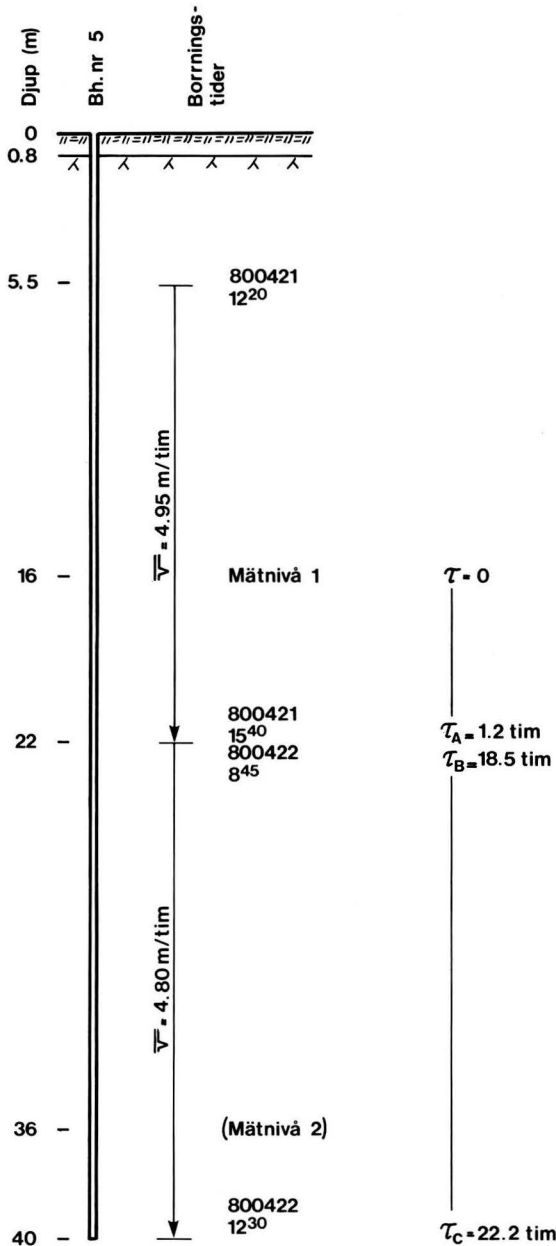


Fig. 10 Borrtingar med tillhörande djupangivelser, för borrhål nr. 5. \bar{v} = medelborringshastighet i (m/h).

användande av observerade borrhållstider och temperaturer kan temperaturstörningens storlek beräknas framåt i tiden och ett ungefärligt värde på sluttemperaturen erhållas.

Temperaturvärden uppmätta inom cirka ett halvt dygn efter avslutad borrhållning har p.g.a. begränsningarna hos ekvation (12) ej använts. Återhämtningen omkring 16 m nivån i borrhål nr.5 anförs här nedan som beräkningsexempel.

Borrhålet temperaturmättes vid 5 tillfällen på två nivåer, 16 respektive 36 m. Återhämtningen följdes under 3.5 veckor.

Ur figur 10 framgår nödvändiga borrhållstider.

I tabell 2 presenteras förfluten tid mellan temperaturavläsning och den tidpunkt då borren nådde mätnivån i fråga, vidare observerade samt korrigerade temperaturer.

Loggning nr	τ (h)	T_{obs} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{korr}}^{x)}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\ln \frac{\tau (\tau - \tau_B)}{(\tau - \tau_A)(\tau - \tau_C)}$
1	96.3	6.70 ₈	6.72 ₁	0.0621
2	149.0	6.66 ₁	6.68 ₃	0.0373
3	241.4	6.61 ₆	6.65 ₅	0.0220
4	355.5	6.58 ₀	6.64 ₀	0.0146
5	596.6	6.53 ₀	6.63 ₄	0.0085 ₄

x) för korrektion se sektion 2.2

Tabell 2 Temperaturer, avläsningstider samt beräknade
ln - uttryck för 16 m nivå i borrhål nr.5

Avsätts T_{korr} mot $\ln \frac{\tau (\tau - \tau_B)}{(\tau - \tau_A)(\tau - \tau_C)}$ erhålles

$$A = \frac{q}{4\pi k} = 1.66\text{g} \text{ samt } T_u = 6.61\text{g}$$

Funktionen framgår av figur 11 nedan, för okorrigerade såväl som för korrigerade temperaturer.

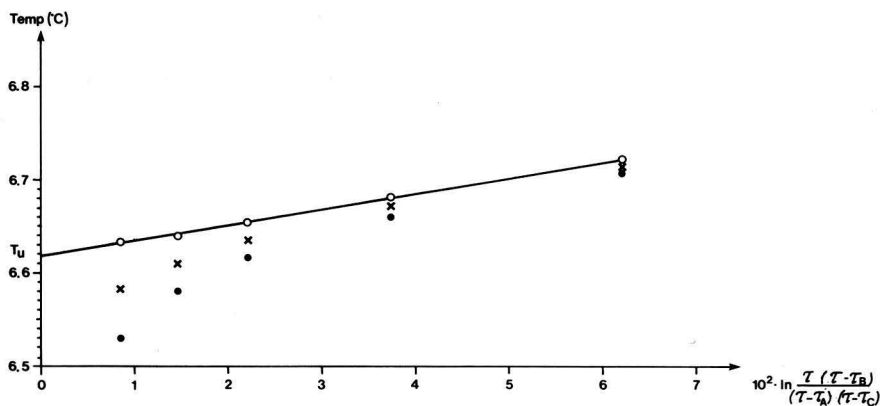


Fig. 11 Borrhål nr. 5. 16 m nivå.

Temperaturen som funktion av $\ln \frac{\tau (\tau - \tau_B)}{(\tau - \tau_A)(\tau - \tau_C)}$

- okorrigerade temperaturer
 - x temperaturer korrigerade med $\kappa_{\text{berg}} = 0.017 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
 - o temperaturer korrigerade med $\kappa_{\text{berg}} = 0.022 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
- Övriga korrektionsparametrar återfinns i sektion 2.2.

Återhämtningsfunktionen för 16 m nivån i borrhål nr 5 kan således tecknas

$$T - T_u = 1.67 \ln \frac{(\tau_r + 22.21)(\tau_r + 3.75)}{\tau_r (\tau_r + 21.00)} \quad \text{eller allmänt} \quad (22)$$

$$T - T_u = A \ln \frac{(\tau_r + \tau_c)(\tau_r + \tau_c - \tau_B)}{\tau_r (\tau_r + \tau_c - \tau_A)} \quad (23)$$

där τ_r = återhämtnings tiden efter sista borrhstoppet.

Figur 12, visar temperaturåterhämtningsförloppet beräknat enligt ekvation (22), samt som jämförelse återhämtningsförloppet enligt de observerade korrigerade temperaturerna.

Som synes är överensstämmelsen mycket god.

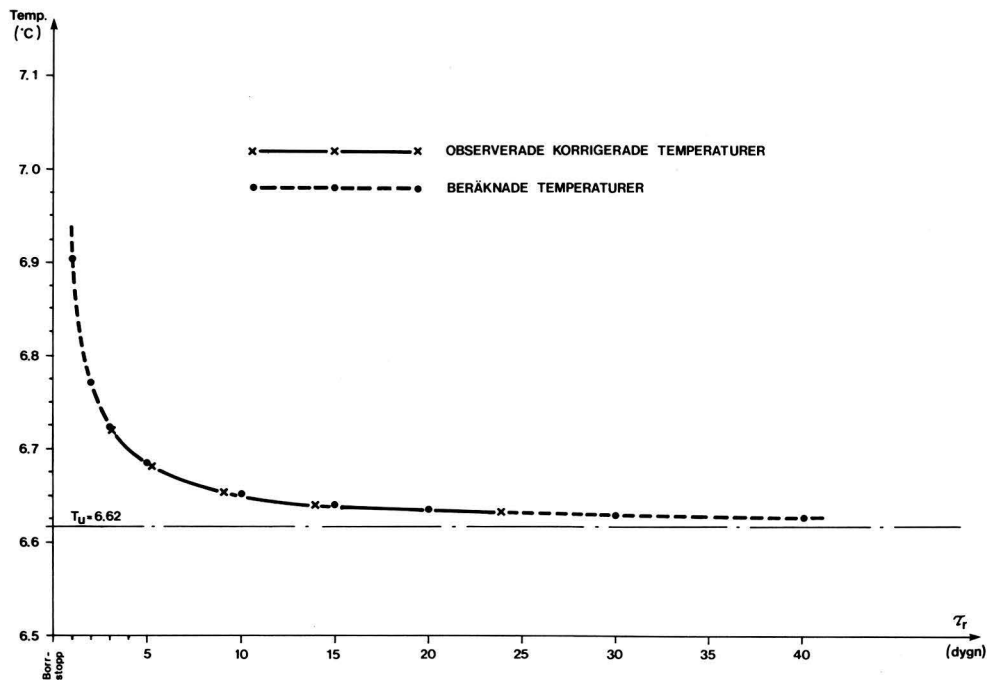


Fig. 12 Temperaturåterhämtningen, beräknad och observerad som funktion av tiden efter borrhstopp, vid 16 m nivån i borrhål nr. 5.

Samma beräkningsgång som ovan har använts för borrhål nr 3 med undantag för beräkningar på 40 m nivån där ekvation (8) i sektion 2.1 har tillämpats.

I beräkningarna har endast tre mätserier använts då den femte genomgående visat för låga värden. Den första har uteslutits av tidigare nämnd anledning. Återhämtningsförloppet visas på figur 13 för nivåerna 8, 12, 16, 24 samt 40 m. Tidsaxeln kan här approximativt sägas motsvara 30 m nivån samt borrhålsbotten där störningen är obetydlig. Jfr figur 3 i sektion 1.1.

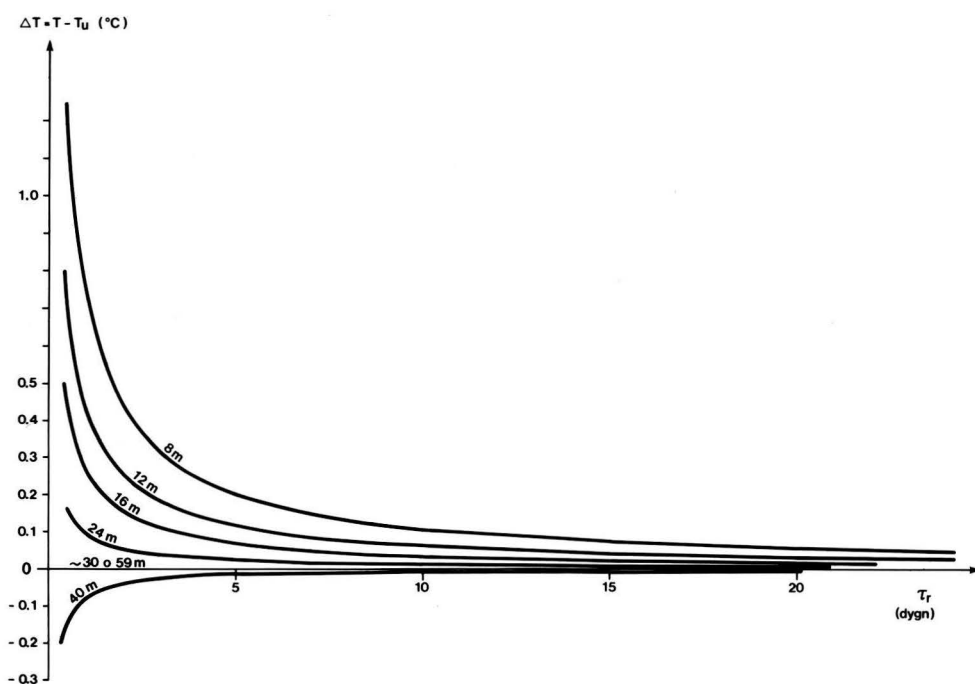


Fig. 13 Temperaturåterhämtningen på olika nivåer som funktion av tiden efter borrhålstopp.
Borrhål nr. 3.

5.1 Kommentarer

Som framgår av temperaturobservationerna på figur 3 och beräkningsresultaten på figur nr 13 blir den positiva temperaturstörningen störst i borrhålets övre del. På ca halva djupet av penetrerat berg sker ingen nämnvärd störning medan den maximala negativa temperaturdifferensen inträffar på 2/3 å 3/4 av detta djup.

Temperaturåterhämtningen går snabbt de första veckorna (se figur 12 och 13) för att sedan bli mer långsam. Efter en å två veckor är störningen nere i storleksordningen 0.1°C . För att komma ner till fel av storleksordningen 0.01°C krävs en återhämtningsperiod på närmare 1/2 år.

Dessa värden skall ses med beaktande av de förutsättningar som gäller för behandlade borrhål (se bilaga 2 och sektion 1.3).

Om borrhålen i stället för som på våren utförts en varm sommardag hade störningen i hålets övre del blivit betydligt större. Avkylningen i borrhålets nedre del skulle helt eller delvis ha ersatts av en uppvärmning.

Borrning under vinterförhållanden skulle ha gett en motsatt förändring av störningsmönstret. Vidare kan sägas att störningen skulle ha blivit större om hålet borrats till större djup.

Från temperaturloggningen gjord ≈ 4.5 tim efter att borrhål nr 3 (figur 3) avslutats märks ett tydligt språng mellan nivåerna 35 och 40 m. Språnget förklaras av uppehållet i borrningen mellan första och andra dagen (borrning skedde till 39 m djup under första dagen).

Om jämförelse görs mellan återhämtningen på 16 m nivå i borrhål nr 3 och borrhål nr 5 (figur 12-13), är dessa i det närmaste identiska. Detta kan tyckas besynnerligt då operationstiden är kortare och värmediffusiviteten högre i borrhål nr 5 än i borrhål nr 3. Förklaringen ligger i den relativt större dämpning som skett av störningen i borrhål nr 3 p.g.a. dess högre kapacitet jämfört med borrhål nr 5 (se resonemang i sektion 1.3). Vidare borrades hål nr 3 under en lägre ytterluftstemperatur jämfört med borrhål nr 5. (jfr diskussion i sektion 1.2).

Figur 11 visar nödvändigheten av att korrigera för den naturliga temperaturvariationen då funktionen i figuren skall vara linjär för de angivna punkterna. Förfarandet ger även ett ungefärligt värde på värmediffusiviteten för penetrerat berg.

Behandling av temperaturåterhämtningen i borrhål nr 4 har ej kunnat utföras då uppmätta värden visat sig för ojämna. En trolig anledning till detta kan vara vatteninträngningen som skett på två nivåer. På 17 m erhöles 240 l/h i ett initialskede, vilket reducerades efter hand. Vid nivå 21 m fanns den andra vattenförande sprickan. Slutliga kapaciteten för de båda slagen blev 90 l/h.

Principiellt visar dock störning och återhämtning i borrhål nr 4 samma mönster som i borrhål nr 3 och nr 5. Vad gäller den radiella distributionen av temperaturstörningen framgår av figur 8 att på ett avstånd av ca 4 m från borrhålscentrum blir den negligerbar.

Detta är visserligen ett fingerat exempel men det bör gälla approximativt även för de undersökta brunnarnas övre delar.

Utgångsvärdena avseende temperaturamplitud och periodstart vid temperaturkorrektin som framgår av sektion 2.2 har vid en senare kontroll visat sig något felaktigt antagna. Amplituden U_0 torde således vara ca 2 °C högre, och periodstarten drygt en vecka senare än de antagna värdena. Detta leder till justeringar av de ansatta diffusivitetsvärdena, medan slutresultatet förblir oförändrat.

κ -värdet för berget runt borrhål nr 5 bör således vara 0.020 cm²/s i stället för 0.022 cm²/s.

Justeringar av diffusiviteten för berget vid borrhål nr 3 behöver ej göras då tidsserien är relativt kort och osäkerheten i jordtäckets antagna diffusivitet spelar större roll.

5.2 Förslag och rekommendationer

Teoretiskt skulle återhämtningsprocessen kunna användas till beräkning av värmediffusiviteten, genom en kombination av ekvation (11) och (12) alternativt ekvation (7) och (8) (jfr figur 6 i sektion 2.1). I praktiken finns dock så stora osäkerhetsfaktorer att metoden bör undvikas.

Approximationen att värmekällan $q = \bar{q}$ under operationstiden på en viss nivå medför att observerade och beräknade temperaturer för små återhämtningsstider ej överensstämmer. Vidare är temperaturloggningar strax efter ett borrhåll osäkra av två anledningar.

- Temperaturåterhämtningen går mycket snabbt den första tiden, vilket ger stora förändringar av temperaturen vid små förändringar i tiden.
- Vattenpelaren i borrhålet är oftast i detta initialskede fortfarande stigande och uppmätta temperaturer kan då avvika från omgivningens.

En säkrare metod för diffusivitetsberäkningar är då det differensförfarande som använts vid temperaturkorrektionerna, se ekvation (20) sektion 2.2. Metoden kan användas vare sig temperaturåterhämtning efter borrhåll skett eller inte.

En annan fördel med nyss nämnda metod jämfört med en in situ metod presenterad av Parasnis (ref. nr 15) är att två osäkerhetsparametrar färre behöver användas, nämligen luftens årsmedeltemperatur T_m , samt temperaturtillskottet med ökat djup p.g.a. den geotermiska gradienten $G \cdot z$. Se ekvation (17) i sektion 2.2. Å andra sidan krävs en temperaturserie.

Avslutningsvis kan följande rekommendationer ges vad gäller hänsynstagande av störningen vid temperaturmätningar.

- Om en enpunktsmätning av temperaturen önskas i anslutning till avslutad borrhåll som skett under vår eller höst erhålls det mest representativa värdet ungefär halvvägs ner i den bergborrhåll sektionen. Denna punkt förskjuts nedåt om borrhålet utförts under sommaren. På motsvarande sätt sker en förskjutning uppåt om hålet borrhålls vintertid.
- I borrhåll av ca 50 m djup bör man undvika temperaturloggningar inom 1 å 2 veckor efter avslutad borrhåll om fel >0.1 °C inte kan accepteras.

Motsvarande väntetid för undvikande av fel > 0.01 °C rör sig om 4-6 månader.

- Vid temperaturmätningar i djupa hål eller vid mätningar med stora noggrannhetskrav förespråkas att uppmärksamhet alltid ges till temperaturstörningen. Detta gäller i synnerhet brunnar med låg kapacitet, borrade under sommaren men även de som borrats under kalla vintrar. Teorier givna i sektion 2.1 samt 2.2 ovan kan härvid vara till nytta.

6. Referenser

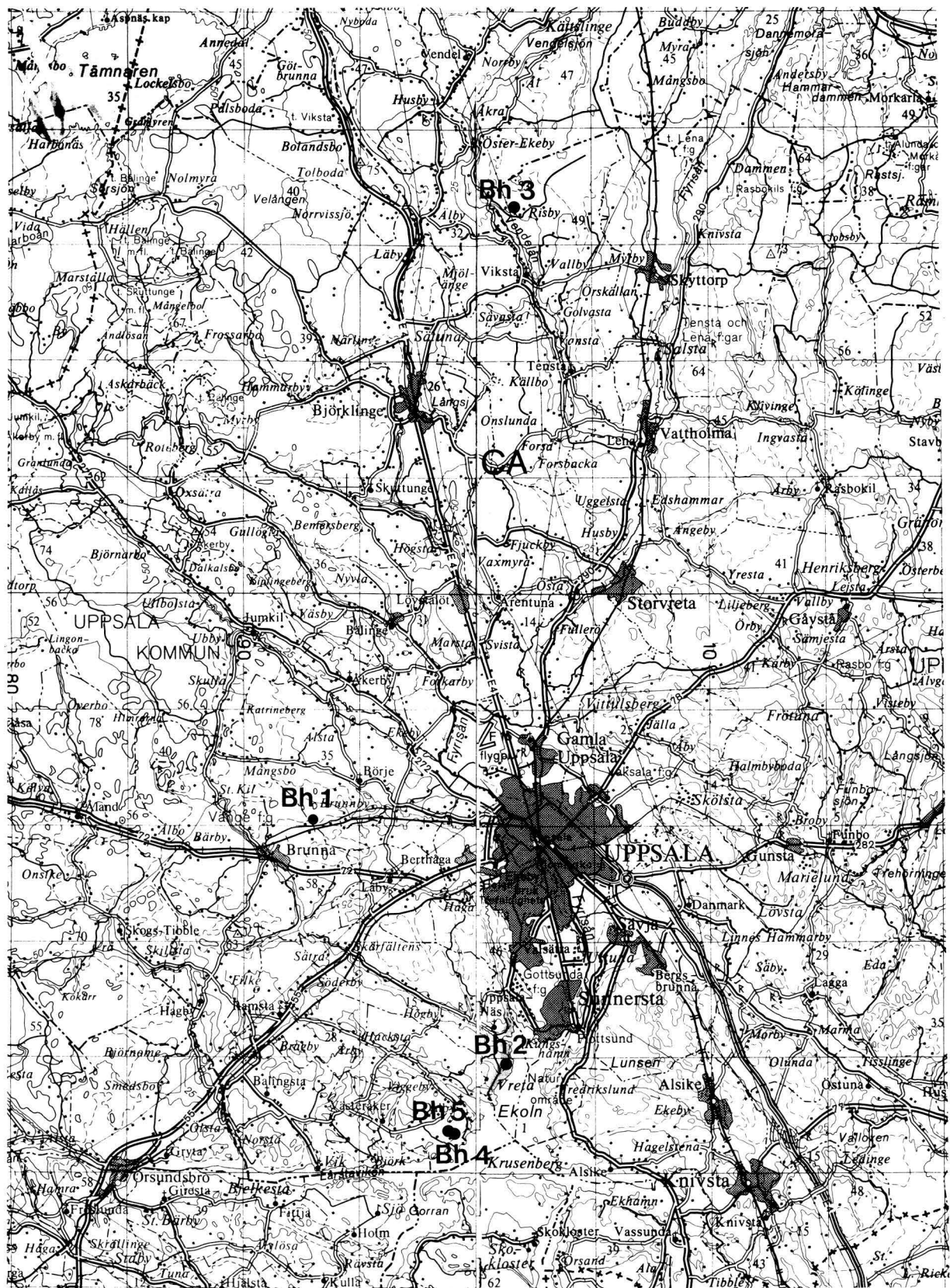
Ref.nr

1. Atlas Copco
Trycklufthandboken
5:e utgåvan. Stockholm 1976.
2. Birch, F., & Clark, H.,
The thermal conductivity of rocks and its dependence
upon temperature and composition.
American Journal of Science
Vol. 238, No 8. 1940, pp. 529-558.
3. Bullard, E.C.
The time necessary for a bore hole to attain temperature
equilibrium.
Monthly Notices Roy. Astron. Soc.
Geophysical Suppl. 5, 1947, pp. 127-130.
4. Carslaw & Jaeger
Conduction of heat in solids.
Clarendon Press, Oxford 1947.
5. Diment & Robertson
Temperature, thermal conductivity and heat flow in a
drilled hole near Oak Ridge, Tennessee.
Journal of Geophysical Research.
Vol. 68, No 17, 1963, pp. 5035-5047.
6. Horai
Thermal conductivity of rock forming minerals.
Journal of Geophysical Research.
Vol. 76, No 5. 1971, pp. 1278-1308.
7. Jacob, Max
Heat transfer Vol. I, II
John Wiley & sons 1949/57.
8. Jaeger J.C.
The effect of the drilling fluid on temperatures
measured in bore holes.
Journal of Geophysical Research.
Vol. 66, No 2. 1961, pp 563-569.
9. Kappelmeyer & Haenel
Geothermics with special reference to application.
Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart 1974.
10. Lachenbruch & Brewer
Dissipation of the temperature effect of drilling
a well in Arctic Alaska.
U.S.G.S. Bulletin 1083-C, 1959, pp. 73-109.

11. Landström, Larson, Lind & Malmqvist
Lokalisering och bedömning av geotermiska energimagasin
i kristallin berggrund.
CTH/GU Geol.inst. Publ. B 104. 1978.
12. Landström, Larson, Lind & Malmqvist
Värmefföde i berg.
CTH/GU Geol.inst. Publ. B 137. 1979.
13. Leonardon, E.G.
The economic utility of thermometric measurements
in drill holes in connection with drilling and cementing
problems.
Geophysics Vol. 1, 1936, pp. 115-126.
14. Lindblom, U.
Jordvärmeboken
Ingenjöröförlaget 1978.
15. Parasnis, D.S.
Estimates of in situ thermal diffusivity of ... using
the annual temperature wave.
Journal of Geophysics, 40, 1974, pp. 83-95.
16. Walsh, J.B.
Effect of pressure and saturating fluid on the thermal
conductivity of compact rock.
Journal of Geophysical Research.
Vol. 71. No 12. 1966, pp. 3053-3061.

Bilaga 1 Översiktskarta, skala 1:250 000, över
undersökta brunnar.

Ytterligare data återfinns på bilaga 2.



Bilaga 2

BRUNNSDATA

Borrhål Nr	1	2	3	4	5
Läge x	664002	662973	666625	662650	662649
y	159279	160121	160170	159882	159877
z	33	23	25	20	20
Ort	Vänge Brunna	Ytternäs Uppsala	Risby Viksta	Gunggräna Dalby	Gunggräna Dalby
Fastig- het	Finnsta 4:30	Ytternäs 1:46	Risby 1:2, 2:3	Gunggräna 1:14	Gunggräna 1:15
Kapacitet (l/h)	30	6000	1800	90	120
Total djup (m)	114	92	59	40-41	40
Jord- djup (m)	1	1.2	3		0.8
Vatten- yta u. mark (m)	3.7	20.4	3.5	4.2	4.1
Jord- art	Fylln. av sprängsten	Morän	0-2 lera 2-3 morän	Lera Morän	Lera Morän
Bergart	Vänge- granit	Granodiorit Uppsala granit	Urgranit enligt Aa 43 Salsta	Granitisk samman- sättning. Glimmerrik. Skarn (enl. karta grå gnejs)	Se nr.44
Vatten- förande sprickor eller krosszoner	(27 m) 57 m 108 m - - 30 l/h	69-80 100 l/h 87m 6000 l/h	51 m 1800 l/h	17 m 21 m 90l/h	31 m 120 l/h
Foderrör	Plast 7.5 m Ø 125 mm	Plast 7.5 m Ø 125 mm	Stål 5 m	Plast 4.5 m Ø 125 mm	Plast 4.5 m Ø 125 mm
Borrhål diam. (mm)	113 - 109.2	115.2 - 113.4	116 - 111.7		113.5 - 112.4
Datum för borrn. resp. loggning	800403	800401 800506	800401-02 800402 03 04 06 800408	800416-17 800417 18 2x 19 21 23	800421-22 800425 800427 800501 800506 800516
Temp.grad. °C/100 m	1.25	0.7	Slutlig gradient ej uppnådd	Se nr. 3	Se nr. 3

I SGU:s serie Rapporter och meddelanden har tidigare utgivits:

- * 1. Utredning rörande det svenska jordbrukets kalkförsörjning 1–2. 1931.
- * 2. **Sahlström, K.E.** Sveriges lodade sjöar. 1945.
- * 3. **Ödman, O.H.** Rapport över manganmalmsletningen i Jokkmokks socken 1940–48.
4. **Stålhös, G.** Bidrag till kännedom om den radioaktiva strålningens fördelning inom den svenska berggrunden. 1959.
5. **Johansson, H.G., och Ericsson, B.** Grusutredning -74. Översiktlig inventering av sand- och grusförekomster – Försöksverksamhet. 1976.
6. **Knutsson, G., m fl.** Grustillgångarna i Östersundsområdet. Del 1 inventering. 1976.
7. **Ericsson, B.** Svallgrustillgångar längs Kilsbergen, Örebro län. 1977.
8. **Gustafsson, O., och De Geer, J.** Skånes större grundvattentillgångar. 1977.
9. **Knutsson, G., och Fagerlind, T.** Grundvattentillgångar i Sverige. 1977.
10. **Modig, S., Knutsson, G., Nordberg, L., och Persson, G.** Särtryck ur Ymer 1978 – Bebyggelsen och vattnet. 1978.
11. **Guy-Ohlsen, D.** Jurassic biostratigraphy of three borings in NW Scania. (A Brief palynological report) 1978.
12. **Gustafsson, O., Andersson, J.E., och De Geer, J.** Sammanställning av hydrogeologiska data från Kristianstadsslätten. 1979.
13. **Hörnsten, Å.** Sand och övriga jordarter i Öresund. Kommentarer till SGU:s maringeologiska karta över Öresund. (Under tryckning).
14. Hydrogeologi vid SGU. Särutgåva av Vannet i Norden. 1979.
15. **Knutsson, G., Lindén, A., och Rudmark, L.** Grus- och moräntillgångar i Nyboregionen. 1979.
16. **Wilson, M.R., och Sundin, N.O.** Isotopic age determinations on rocks and minerals from Sweden. 1960–1978.
17. **Karlqvist, L., och Qvarfort, U.** Gruvhanteringens inverkan på Bersboområdet, Åtvidabergs kommun. 1980.
19. **Wilson, M.R., och Åkerblom, G.** Uranium enriched granites in Sweden. 1980.
20. **Cato, I., och Engdahl, M.** Beskrivning till temakartor utvisande var särskild uppmärksamhet av stabilitetsförhållanden erfordras inom vissa bebyggda eller detaljplanerade områden med lerjord. (Under tryckning.)
21. **Olsson, T.** Ground-water-level fluctuations as a measure of the effective porosity and ground-water recharge. 1980.
22. **Bergström, J., och Shaikh, N.A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Kristianstads län. Projekt i länsplanering 1980. 1980.

* Utgången

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING
Biblioteket
Box 670, 751 28 UPPSALA
Telefon 018–15 52 80

Cirka pris 30 kr inkl moms