

**Temperaturberäkningar för slutförvar
för använt bränsle**

Taivo Tarandi

Vattenbyggnadsbyrån Stockholm 1978

TEMPERATURBERÄKNINGAR FÖR SLUTFÖRVAR FÖR ANVÄNT
BRÄNSLE

Taivo Tarandi
VBB Vattenbyggnadsbyrån
Stockholm juni 1978

Denna rapport utgör redovisning av ett
arbete som utförts på uppdrag av KBS. Slut-
satser och värderingar i rapporten är för-
fattarens och behöver inte nödvändigtvis
sammanfalla med uppdragsgivarens.

I slutet av rapporten har bifogats en för-
teckning över av KBS hittills publicerade
tekniska rapporter i denna serie.

TEMPERATURBERÄKNINGAR FÖR SLUTFÖRVAR FÖR ANVÄNT
BRÄNSLE

Taivo Tarandi

Summary

Temperature distribution in and around the final storage has been calculated for BWR-fuel.

The results are applicable also for PWR-fuel if the amount of fuel is reduced so that the effect per canister is the same.

The calculations are made with the conservative assumption of the coefficient of thermal conduction of $0,75 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ in the bentonite.

The amount of BWR fuel is 1.4 ton per canister. The canister is deposited 40 years after withdrawal from the reactor.

The maximum temperature of 76°C at the surface of the canister is reached 10 - 20 years after the time of deposition. The highest temperature in the rock, 60°C , occurs about 60 years after the deposition.

At the same time as the temperature continues to sink, there is a levelling out of the local temperature differences in the storage. These differences are negligible after about 1 000 years.

After 100 000 years the temperature in the storage is only a few centigrades above the initial rock temperature.

The heat from the storage reaches the ground surface about 200 years after the deposition. The maximum heat flow, 0.15 W/m^2 , occurs about 2 000 years after deposition and is considered insignificant compared for example with solar energy flow of about 100 W/m^2 .

Sammanfattning

Föreliggande rapport redogör för beräkning av temperaturfördelning i och omkring slutförvaret. Beräkningarna har utförts för BWR-bränsle.

Resultaten är emellertid tillämpbara även för PWR-bränsle, under förutsättning att mängden bränsle begränsas i erforderlig utsträckning.

Beräkningen är gjord för en bränslemängd av 1,4 ton (BWR) per kapsel, varvid deponeringen sker 40 år efter uttag ur reaktorn.

Maximitemperaturen 76° C på kapslingsytan uppnås 10 - 20 år efter deponeringens början. Maximitemperaturen 60° C i berget inträffar ca 60 år efter deponeringstidpunkten.

Samtidigt som temperaturen fortsätter att sjunka sker även en utjämning av temperaturerna inom förvaret. Efter ca 1 000 år är dessa differenser inuti anläggningen försumbara.

Efter ca 100 000 år är temperaturen i berget endast några få grader över sitt ursprungsvärde.

Värmen från förvaringsanläggningen når markytan ca 200 år efter deponeringstillfället. Det maximala värme-flödet, $0,15 \text{ W/m}^2$, inträffar ca 2 000 år efter deponering och är försumbart jämfört exempelvis med solvärmnen, ca 100 w/m^2 .

1. Inledning

Sedan utredning om förvaring av aktivt avfall startades har ett antal olika utföranden studerats. Härvid har även temperaturberäkning utförts för några olika alternativ.

I det följande redogörs för de utförda temperaturberäkningarna.

2. Temperaturberäkningar

2.1 Inledning

Beräkning av temperaturfördelning utförs för en förvaringsanläggning enligt Figur 1.

Beräkningen utförs med ett på VBB befintligt datorprogram för beräkning av rotationssymmetriska temperaturfält.

Eftersom anläggningens geometri icke är rotationssymmetrisk sker beräkningen stegvis med successiva närmanden från en makromodell för hela anläggningen i stort till den enskilda bränslekapseln via en eller flera mikromodeller.

Härvid används beräkningsresultat från den föregående modellen som utgångsvärden för nästa modell i mindre skala.

2.2 Beräkningsförutsättningar

Beräkningen utförs för BWR-bränsle.

Begynnelseeffekten per kapsel motsvarar effekten per ton uran vid deponeringstidpunkten 40 år efter uttag ur reaktorn enligt [1] tabell 6, se Bilaga 1. Eftersom bränslemängden per kapsel motsvarar 1,4 ton uran

multiplieras dessa effektvärden med faktor 1,4. För tiden 10 000 - 100 000 år har effektvärden erhållits separat från författarna till [1].

Genom linjär interpolering erhålls begynnelseeffekten vid deponeringstillfället till 772 W/kapsel. Effektutvecklingen i tiden följer samma tabell [1] med linjär interpolering mellan angivna tidpunkter, vilket är konservativt.

Under förutsättning att effekten per kapsel begränsas till här använda värden kan föreliggande beräkning anses vara tillämpbar även för PWR-bränsle. Enligt [1] tabell 4 varierar förhållandet mellan effekterna i PWR- respektive BWR-bränslet från 1,35 vid deponeringstillfället till 1,41 vid 30 år efter deponeringen. Eftersom maximitemperaturen på kapseln uppnås 10 - 20 år efter deponeringen, torde därför 1 ton PWR-bränsle per kapsel vara ekvivalent till 1,4 ton BWR-bränsle.

Värmeledningsförmågan i berget, inklusive inuti tunnel-systemet sätts lika med $3 \text{ W/m}^{\circ} \text{ C}$. Specifika värmeför berget antogs vara $2,0 \text{ MJ/m}^3 \text{ }^{\circ} \text{ C}$.

2.3 Beräkningens utförande

2.3.1 Makroberäkning

Förvaringsanläggningen, se Figur 2, har stor utsträckning i horisontell riktning jämfört med den vertikala utsträckningen. Temperaturen vid den vertikala centrumlinjen kan därför anses vara konstant i horisontell riktning. Beräkning av makrotemperaturfördelningen vid centrum av anläggningen kan därför i princip utföras med en endimensionell modell, se Figur 3. För att passa datorprogrammet, har beräkningsmodellen formen av vertikal cylinder med ytterdiametern 150 m.

För att kunna bestämma isotermer vid förvaringsanläggningen har det ansetts vara motiverat att utföra en tvådimensionell beräkning med en beräkningsmodell enligt Figur 4. Beräkningstiden har dock begränsats till 1 000 år.

Beräkningsvolymen per kapsel är

$$V = abc$$

där

$$a = \text{kapselns höjd} = 4,7 \text{ m}$$

$$b = \text{avståndet mellan tunnlar} = 25 \text{ m}$$

$$c = \text{avståndet mellan kapslar} = 6 \text{ m}$$

Med begynnelseeffekten $E_0 = 772 \text{ W/kapsel}$ erhålles effekttätheten vid deponeringstillfället

$$E_V = \frac{E_0}{V} = \frac{772}{4,7 \cdot 25 \cdot 6} = 1,095 \text{ W/m}^3$$

Refererad till horisontell projekterad yta erhålls yteffekttäthet:

$$E_Y = 4,7 \cdot E_V = 5,147 \text{ W/m}^2$$

Beräkningsmodellen för endimensionell beräkning framgår av Figur 3. Siffrorna inuti de cirkelformiga beräkningselementen betecknar olika material och media. Berget är uppdelat på ett antal olika materialnummer för att möjliggöra olika starttemperaturer på olika djup motsvarande geotermisk jämviktstemperatur med gradienten $2,5^\circ/100 \text{ m}$. Motsvarande starttemperaturer framgår även av Figur 3.

Enligt en senare utförd utredning av U Lindblom, se Bilaga 2, är de i svenskt urberg förekommande temperaturgradienterna lägre än den vid föreliggande beräkning använda gradienten. Enligt Lindblom är den högsta förekommande temperaturen i orörd berg på 500 meters djup 16°C , vilket skall jämföras med $19,2^{\circ}\text{C}$ enligt Figur 3.

Föreliggande beräkning är således konservativ. Eftersom superponeringsprincipen gäller kan korrektion för ev differens i ursprungstemperatur lätt utföras vid behov.

För bestämning av värmeflödet vid markytan har det visat sig nödvändigt att utföra även en beräkning utan geotermisk gradient.

Randtemperaturen vid markytan, materialnummer 1 i Figur 3, sätts $6,6^{\circ}\text{C}$, motsvarande årsmedeltemperaturen vid Stockholms breddgrad och hålls konstant. Randtemperaturen vid beräkningsmodellens nedre gräns, materialnummer 2, hålls konstant, motsvarande den geotermiska temperaturen $84,5^{\circ}\text{C}$ på detta djup (3 110 m).

Siffrorna i rutgränserna betecknar olika värmeövergångstal α , varvid

- 1: isolerad yta $\alpha = 0$, exempelvis vid modellens cylindriska ytteryta
- 2: ledande yta $\alpha = \infty$, exempelvis de horisontella gränserna mellan beräkningselementen
- 3: värmeövergångstal mellan luft och berg vid markytan $\alpha = 10\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Beräkningen utförs för tiden 0 - 10 000 år som för en transient. För tiden 10 000 - 100 000 år utförs beräkningen, med hänsyn till datorkostnader, som beräkning

av stationär temperaturfördelning för vid tidpunkterna 10 000, 30 000 och 100 000 år rådande effektutveckling.

Enligt författarna till [1] är effektutvecklingen vid dessa tidpunkter enligt följande tabell:

Tidpunkt år	Effekt per kapsel W
10 000	15
30 000	6,3
100 000	1,2

Den tvådimensionella beräkningsmodellen, Figur 4, innebär i princip att den endimensionella modellen har byggts ut i radiell led med ett antal ringformiga element.

Förvaringsområdets ekvivalenta ytterradie R beräknas ur

$$R = \sqrt{\frac{N \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

där

N = antalet kapslar = 9 000

a = avståndet mellan tunnlar = 25 m

b = avståndet mellan kapslar = 6 m

Senare har antalet kapslar minskats till 7 000. Med samma tunnel- och kapselavstånd har detta ingen inverkan på temperaturförhållandena vid centrum av anläggningen.

Efter insättning erhålles

$$R = 655,5 \text{ m}$$

Härmed blir effekttätheten samma som vid den endimensionella modellen. i verkligheten finns i förvaringsområdet en del transporttunnlar och andra icke utnytt-

jade områden, varför den verkliga effekttätheten är lägre än den vid beräkning använda.

Beräkningsmodellens ytterradie är 7 000 m. Randtemperaturerna vid ytterytan hålls konstanta vid 0° C. Även bergets utgångstemperatur sätts 0° C, vilket innebär således att endast inverkan av värmeutvecklingen i förvaringsutrymmet studeras.

2.3.2 Mikroberäkning

Beräkningsmodellen för mikroberäkning vid en tunnel med bränslekapsel framgår av Figur 5. Tunneln simuleras med en ring med stor radie.

Bränslet simuleras med en ring med höjden 4,7 och tjockleken 0,75 m. Effektutvecklingen vid deponeringstidpunkten i denna ring erhålls:

$$E_V = \frac{E_t}{a \cdot b \cdot c}$$

där

E_t = effekt per kapsel vid tidpunkten t

a = kapselns höjd = 4,7 m

b = bredden av den ring där värmeutveckling antas ske = $2 \cdot 0,75$ m = 1,5 m

c = avståndet mellan kapslarna = 6 m

Exempelvis erhålls vid deponeringstillfället med

$$E_t = 772 \text{ W/kapsel}$$

$$E_V = 18,25 \text{ W/m}^3$$

Modellens utsträckning väljs 20 m uppåt och nedåt från ändarna av bränslekapseln. Som randtemperaturer används de vid makroberäkning erhållna temperaturerna. På grund av den långsamma ändringen (minskningen) av effektutvecklingen kan beräkningen utföras för stationär temperaturfördelning med konstant effektutveckling

vid respektive tidpunkt. Utförs för tidpunkterna 0, 10, 60 och 160 år.

De vid denna mikroberäkning erhållna temperaturerna används som randtemperaturer för en ytterligare mikroberäkning av temperaturerna närmast bränslekapseln, se Figur 6. Härvid beräknas temperaturerna analytiskt för cirkulära cylindrar enligt

$$\Delta T = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_y}{d_i}}{1 \cdot 2\pi \cdot \lambda} \quad (2.1)$$

där

- Q = effektutveckling per kapsel
- l = kapselns längd
- d_y = cylinderns ytterdiameter
- d_i = cylinderns innertemperatur
- λ = värmeledningsförmåga
 - = 0,75 W/m⁰ C för bentonit [2]
 - = 3,0 W/m⁰ C för berg

2.4 ----- Resultat

2.4.1 Makroberäkning

Temperaturfördelningen vid centrum av förvaringsanläggningen vid några olika tidpunkter framgår av Figur 7.

Figur 8 - 9 visar isotermer vid 100 respektive 960 år efter deponering. Dessa isotermer avser övertemperatur relativt bergets ursprungstemperatur. Temperaturfördelningen på ett visst djup är konstant över stor del av anläggningen. Detta bekräftar således antagandet ovan att inget värme flöde sker i radiell riktning vid centrum och att den endimensionella modellen är korrekt vad avser temperaturfördelningen vid centrum.

Den maximala medeltemperaturen i anläggningen uppnås ca 100 år efter deponeringens början. Medeltemperatu-

rens variation med tiden framgår av Figur 10. Den maximala medeltemperaturen i berget blir 52° C. Detta är ett ganska flackt maximivärde. Temperaturen är tämligen konstant i ca 400 år.

Efter ca 2 000 år har medeltemperaturen minskat till 45° C.

Temperaturen i berget har praktiskt taget återgått till sitt ursprungsvärde efter ca 100 000 år.

På grund av den i berget magasinerade värmemängden ger dock den stationära beräkningen något för låg temperatur vid tider längre än 10 000 år. Vid 10 000 år ger den transienta beräkningen 2° C högre temperatur än den stationära beräkningen. Inverkan av denna eftersläpning antages vara ca 2° C även för längre tider än 10 000 år och är inkluderad i Figur 10.

2.4.2 Mikroberäkning

Temperaturfördelningen vid en tunnel i centrum av förvaret vid några olika tidpunkter framgår av Figur 11. Av denna figur framgår att den erhållna temperaturfördelningen är konservativt beräknad, eftersom de erhållna medeltemperaturerna är högre än de som randtemperaturer insatta temperaturerna. Vid tiden 10 år är de erhållna temperaturerna ca 3° C för höga, vid 50 år ca 1° C för höga.

Dessa kurvor representerar en lokal medeltemperaturfördelning vid tunnlar. Även här blir den lokala temperaturfördelningen lägre mitt emellan kapslarna, varför en ytterligare konservatism erhålls om dessa temperaturer används som randtemperatur vid beräkning av kapslings-temperaturen enligt beräkningsmodell, Figur 6.

Den lokala temperaturhöjningen intill kapslarna beräknas enligt (2.1) ovan och framgår av nedanstående tabell med beteckningar enligt Figur 6. Ekv (2.1) gäller för långa rör, varför även dessa tabellvärden är konservativa.

Inverkan av dessa konservativa förutsättningar kan uppskattas till minst 3° C vid tiden 10 år. Denna och andra justeringar är icke inkluderade i nedanstående tabell.

Lokal temperaturförhöjning

Tidpunkt år	Effekt W	Δt_{berg} $^{\circ}$ C	Δt_{bent} $^{\circ}$ C	T_{medel}	T_{berg} $^{\circ}$ C	T_{kapsel} $^{\circ}$ C
0	772	6,4	25,5	39	45	71
10	643	5,2	20,8	50	55	76
60	330	2,7	10,6	57	60	70
160	175	1,4	5,7	55	56	62
460	102	0,8	3,3	53	54	57
960	60	0,5	1,9	50	51	52
1 960	33	0,3	1,1	46	46	47
4 960	21	0,2	0,7	39	39	40
9 960	15	0,1	0,5	35	35	36
30 000	6,3	0,1	0,2	27	27	27
100 000	1,2	-	-	22	22	22

Kapseltemperaturen är införd i Figur 10. Maximitemperaturen, 76° C, inträffar 10 - 20 år efter deponeringstidpunkten.

Maximitemperaturen i berget, 60° C, uppnås enligt tabellen ovan ca 60 år efter deponeringens början.

2.4.3 Inverkan av spalter

Vid beräkningen ovan har ej hänsyn tagits till spalter mellan bränslekapsel och bentonitblock samt mellan bentonitblock och berget. Dessa spalter fylls med bentonitpulver som kan ha en lägre värmeledningsförmåga än bentonitblocken. Konservativt antags att värmeledningsförmågan i spalten kan vara $0,3 \text{ W/m}^{\circ} \text{ C}$ vid lägsta tänkbara fukthalt.

Ändring av temperaturen över spalten erhålls

$$T_S = \frac{Q \cdot S}{l\pi \cdot d} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{spalt}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{ber}}} \right)$$

där

Q = effekten i W

S = spaltens tjocklek i m

l = bränslekapselns längd = 4,7 m

d = diameter vid spalten i m

λ_{spalt} = värmeledningsförmåga i spalten = $0,3 \text{ W/m}^{\circ} \text{ C}$

λ_{ber} = vid beräkningen använd värmeledningsförmåga =
= $0,75 \text{ W/m}^{\circ} \text{ C}$

Vid 10 år efter deponering erhålls med $Q = 644 \text{ W}$

vid bränslekapsel

med S = 30 mm

och d = 750 mm

$$\Delta T_S = 3,6^{\circ} \text{ C}$$

vid berget

med S = 50 mm

och d = 1 500 mm

$$\Delta T_S = 3,0^{\circ} \text{ C}$$

Den sammanlagda inverkan av spalterna uppgår således maximalt till $6,0^{\circ} \text{ C}$ och torde vara av samma storleksordning som konservativismen i föreliggande beräkning.

2.4.4 Värmeavgivning vid markytan

Värmeavgivning vid markytan vid centrum av anläggningen framgår av Figur 12. Värmeflödet från förvaret når markytan ca 200 år efter deponeringstillfället. Värme-flödet uppnår sitt maximivärde, ca $0,15 \text{ W/m}^2$, ca 2 000 år efter deponeringen.

Som en jämförelse kan nämnas att årsmedelvärdet av sol-strålningen vid markytan är av storleksordningen 100 W/m^2 vid Stockholms breddgrad [3].

Inverkan av värmeavgivningen från förvaringsanläggningen på klimatet etc torde därför vara försumbar.

LITTERATUR

1. K Ekberg, N Kjellbert, G Olsson, Resteffektstudier för KBS del 1, Litteraturgenomgång del 2, Beräkningar KBS Teknisk Rapport 07.
2. S Knutsson, Värmeledningsförsök på buffertsubstans av kompakterad bentonit. KBS Teknisk Rapport 72.
3. E Kaner, The potential of solar energy, Atomkernenergie (ATKE) Bd. 25 (1975) Lfg. 3, p. 162.

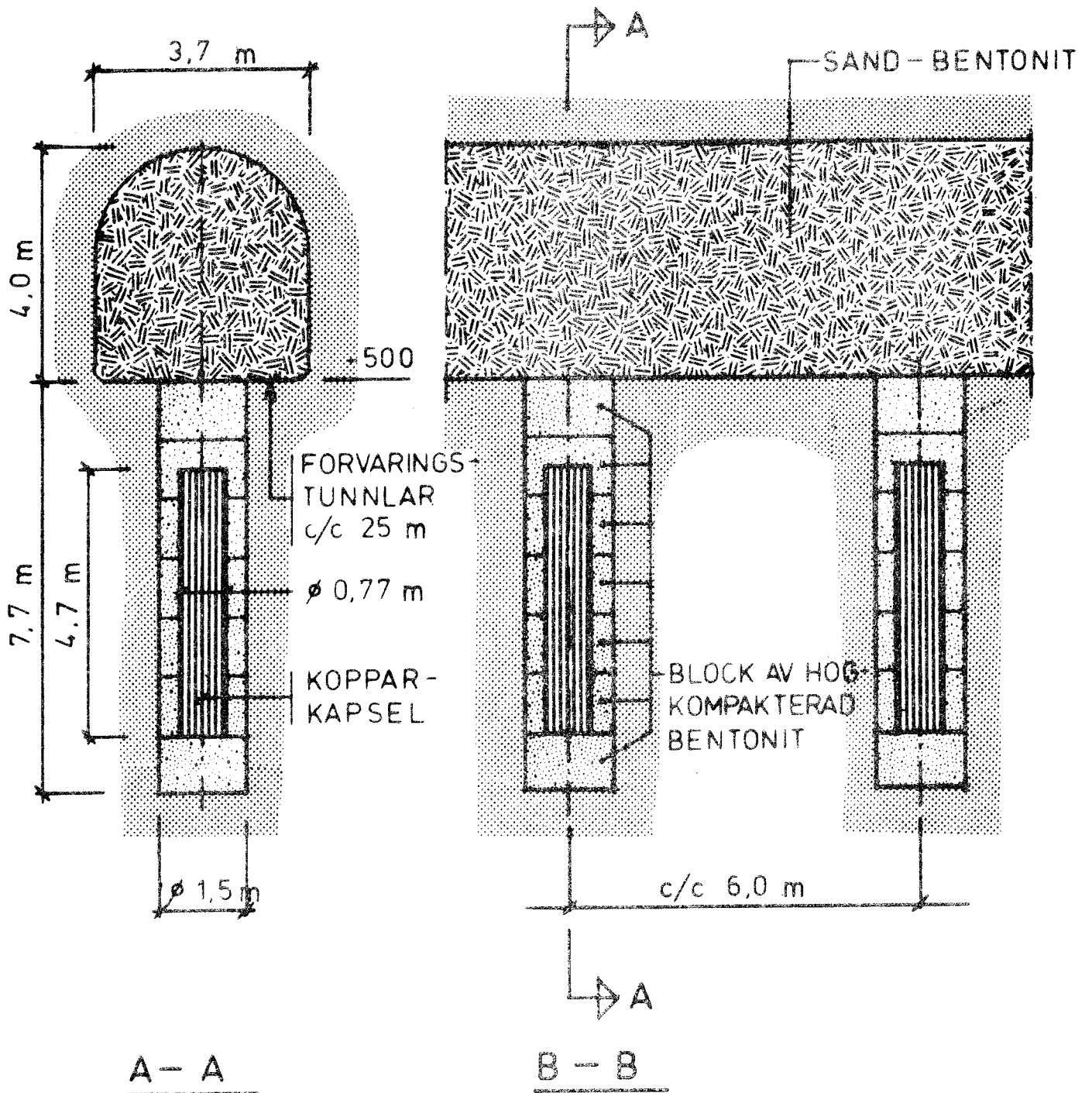


FIG 1. SLUTFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE

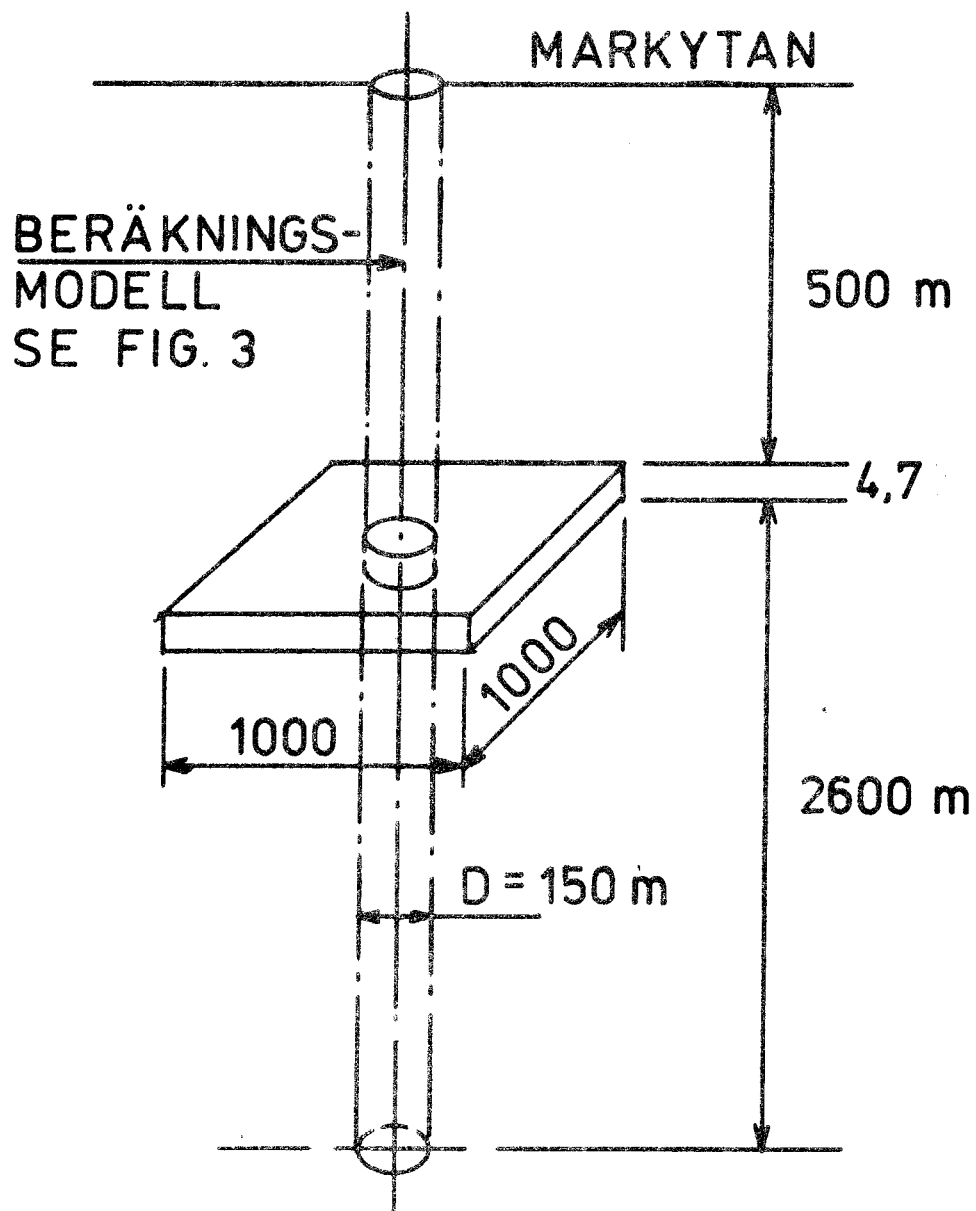


FIG. 2 SITUATIONSPLAN

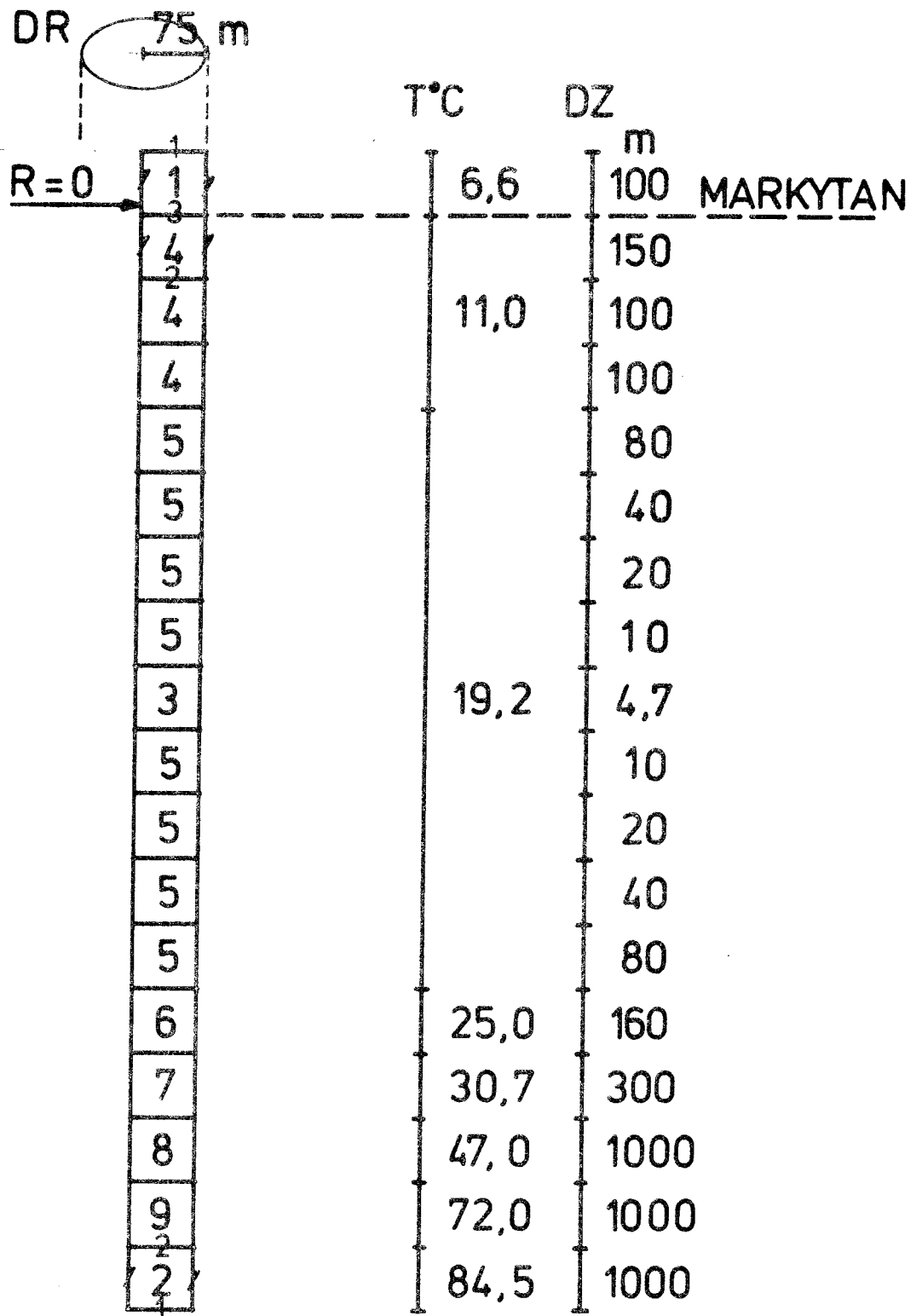


FIG. 3 ENDIMENSIONELL
BERÄKNINGSMODELL FÖR
MAKROTEMPERATUR

DR = 75 75 75 75 75 75 75 130,5 144,5 200 500 500 500 1000 1000 1000 1000 m

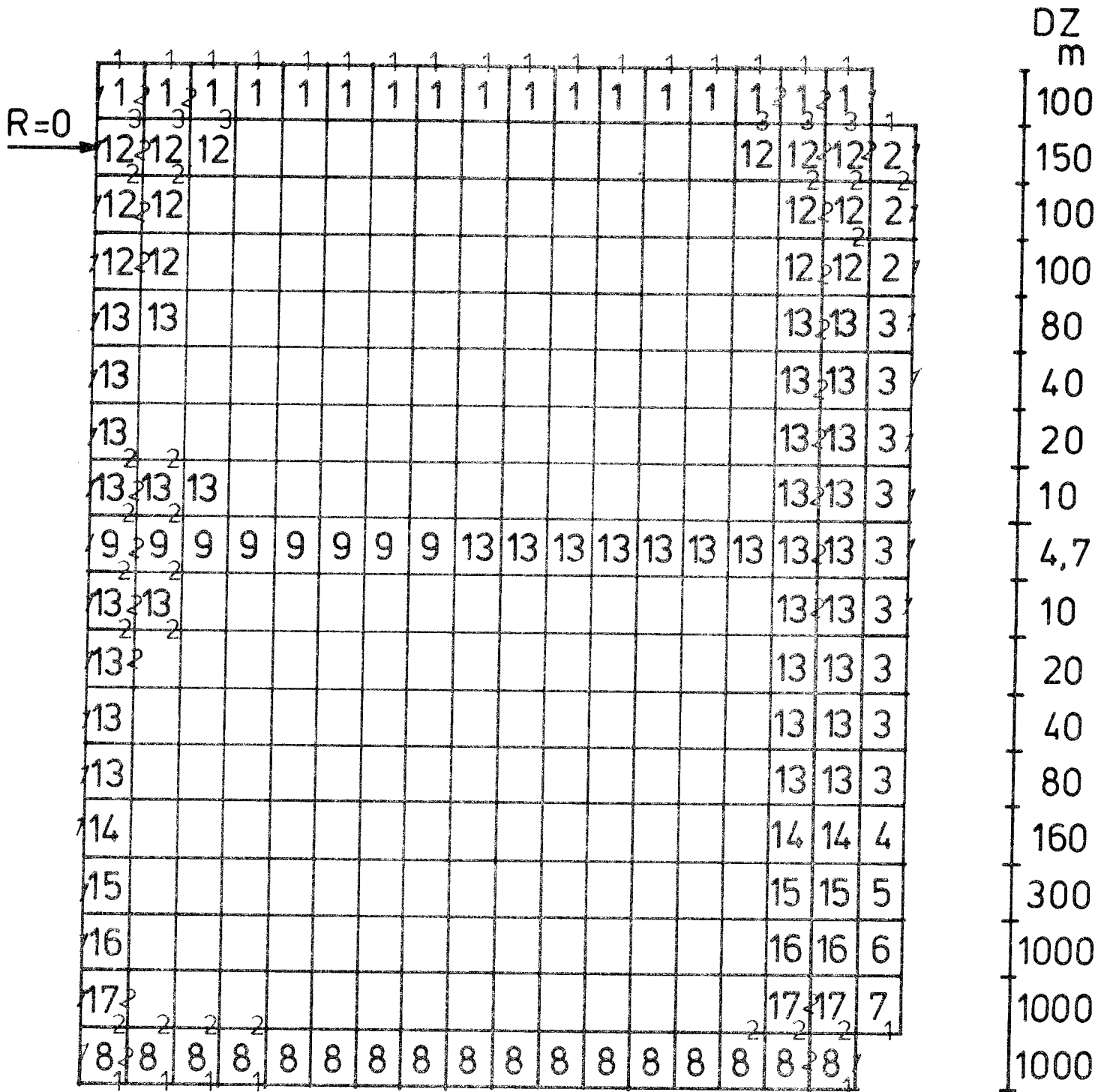


FIG. 4 TVÅDIMENSIONELL
BERÄKNINGSMODELL FÖR
MAKROTEMPERATUR

$$DR = \overbrace{0,75 \ 1,1 \ 1 \ 1,65 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2}^{\text{m}}$$

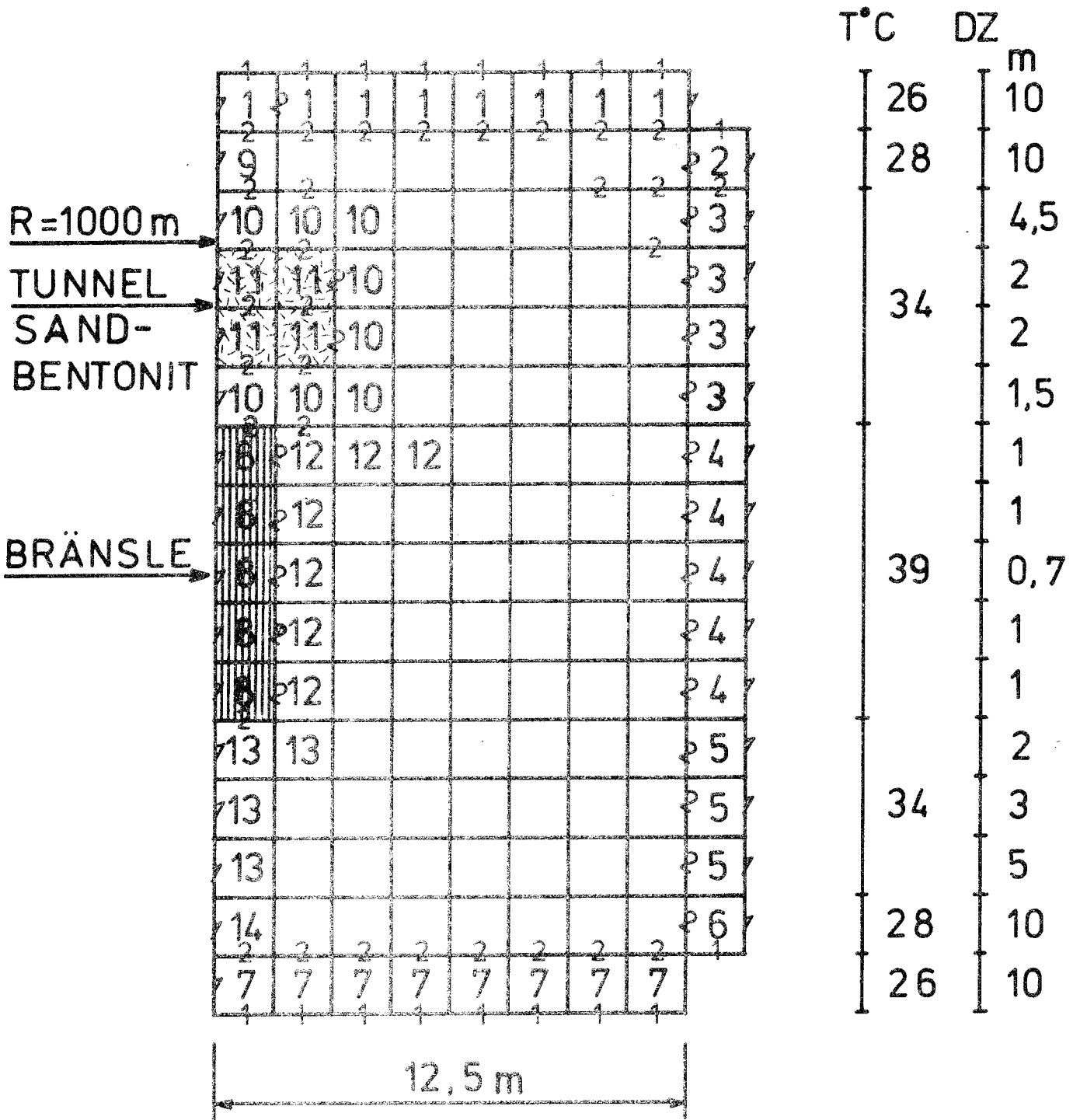


FIG. 5 BERÄKNINGSMODELL FÖR MIKROTEMPERATUR 1

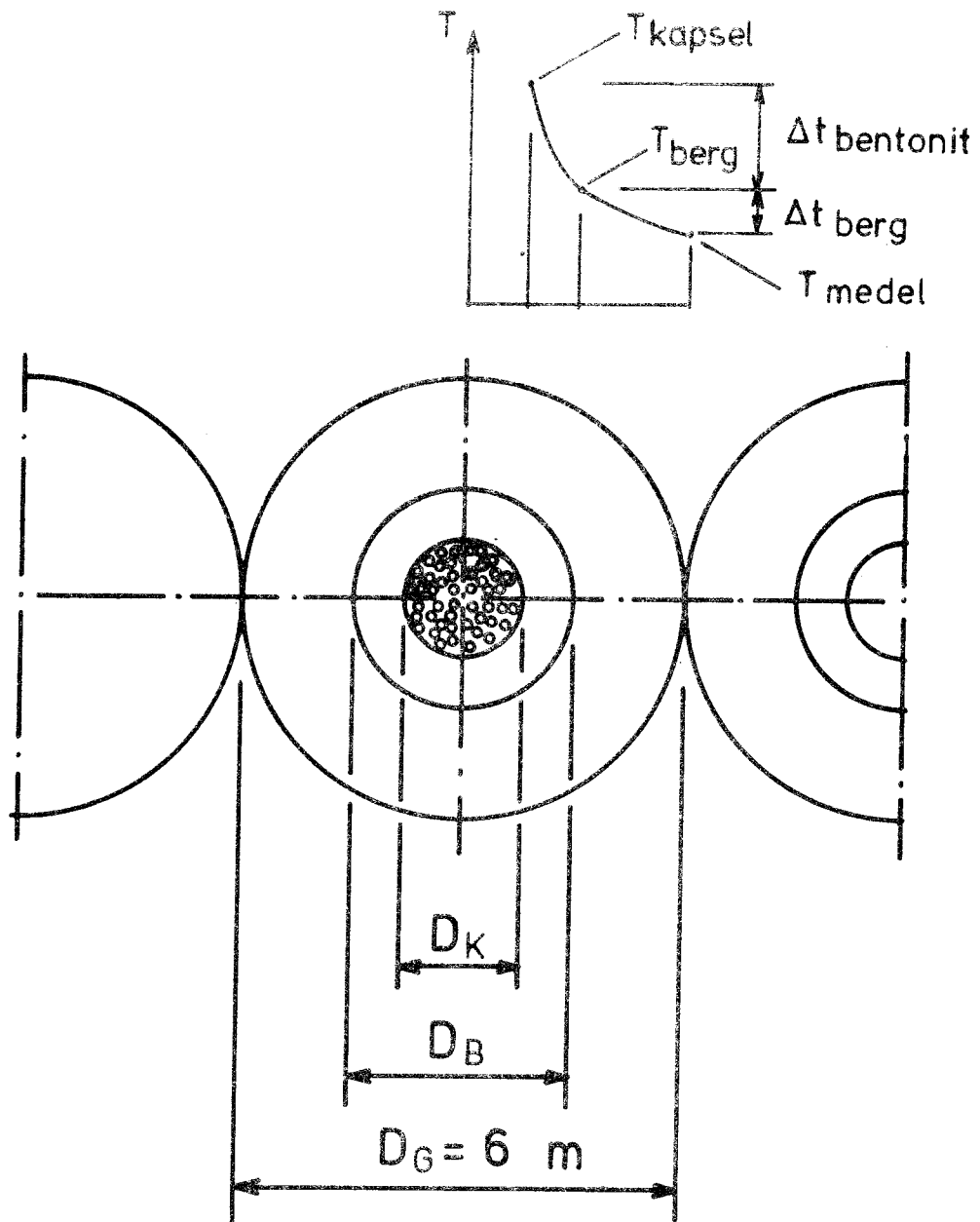


FIG. 6 BERÄKNINGSMODELL FÖR
MIKROTEMPERATUR 2

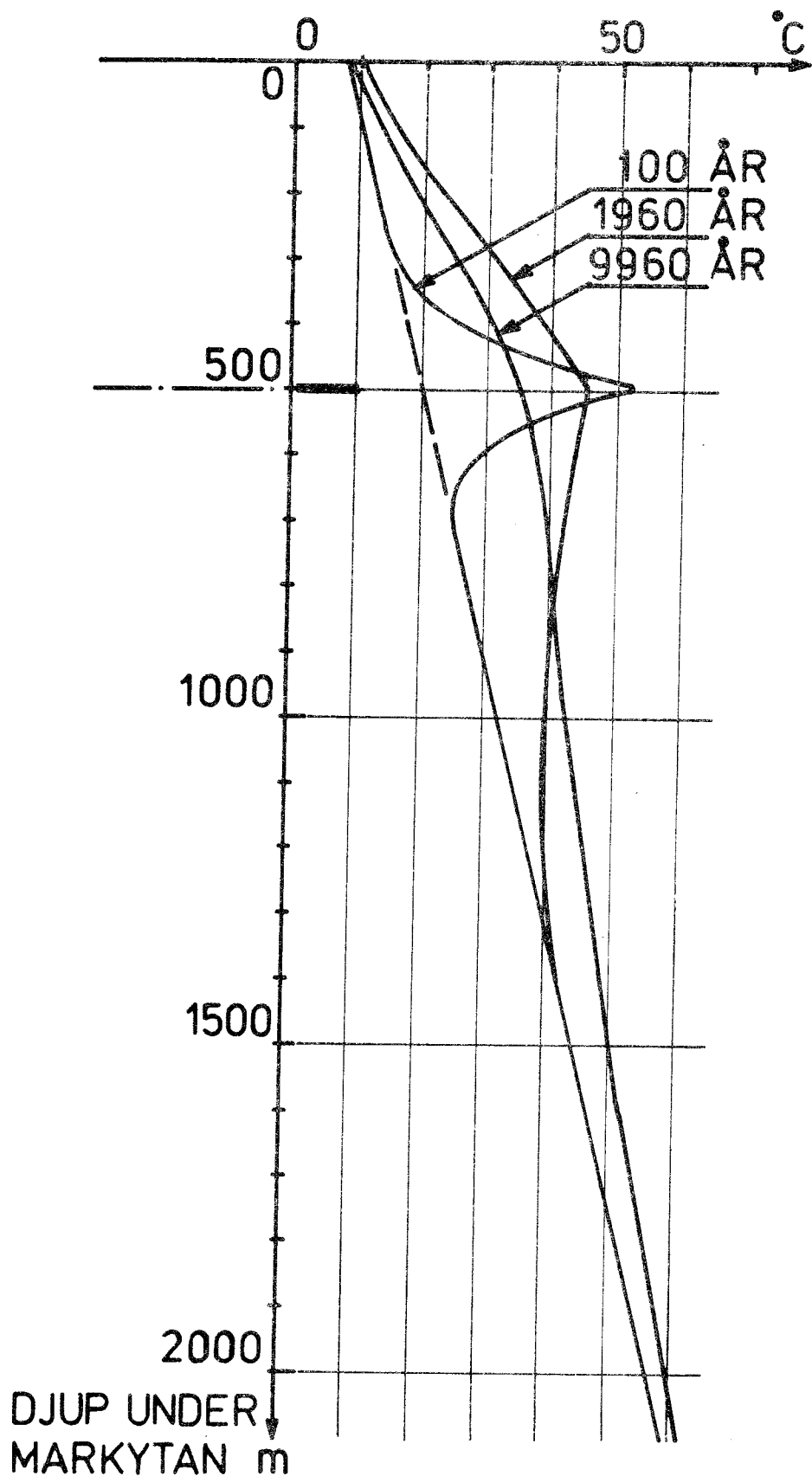


FIG. 7 MAKROTEMPERATURFÖRDELNING
VID CENTRUM

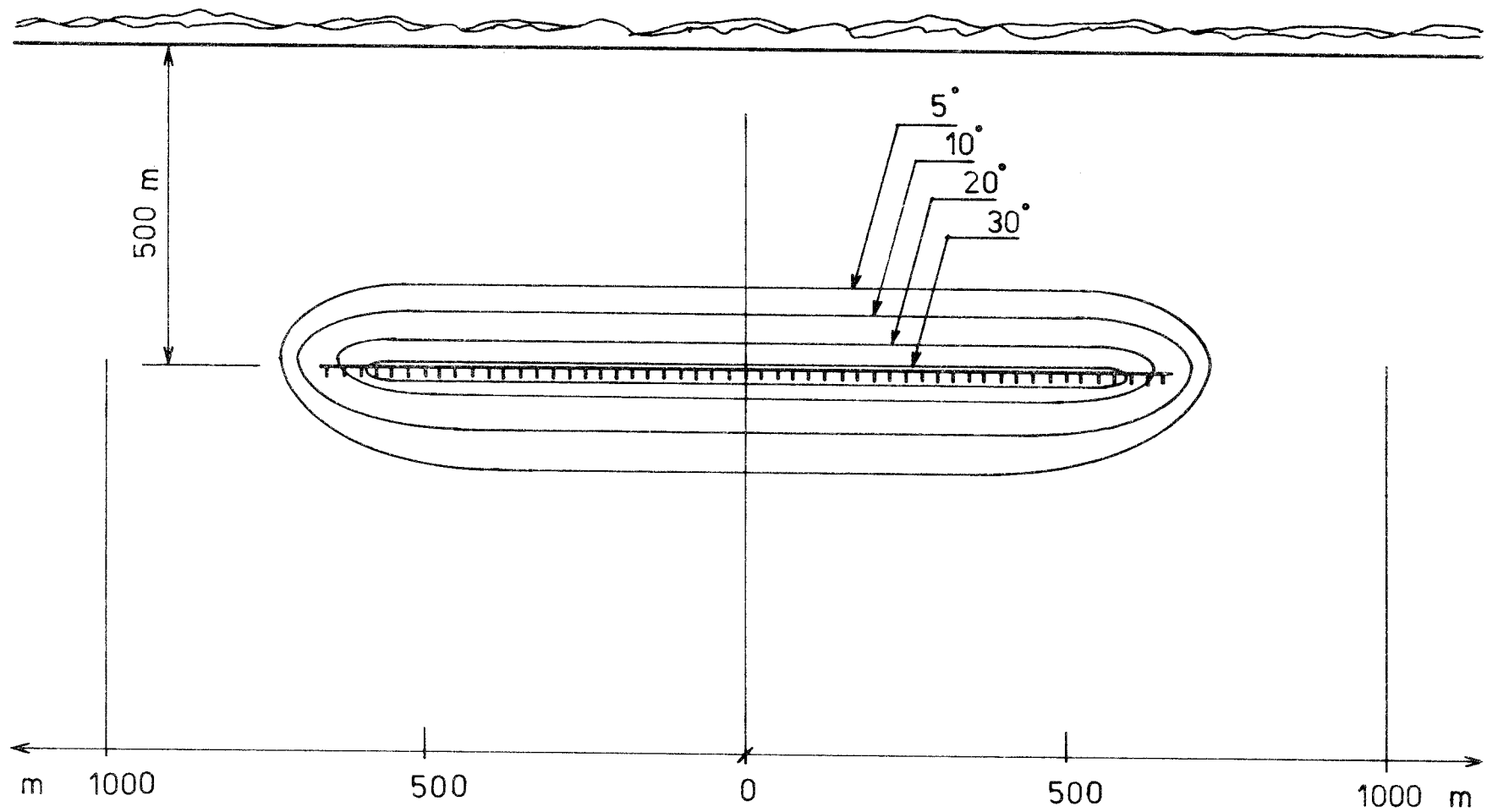


FIG. 8 TEMPERATURFÖRHÖJNINGEN I BERGFORMATIONEN
KRING SLUTFÖRVARET 100 ÅR EFTER DEPONERING.

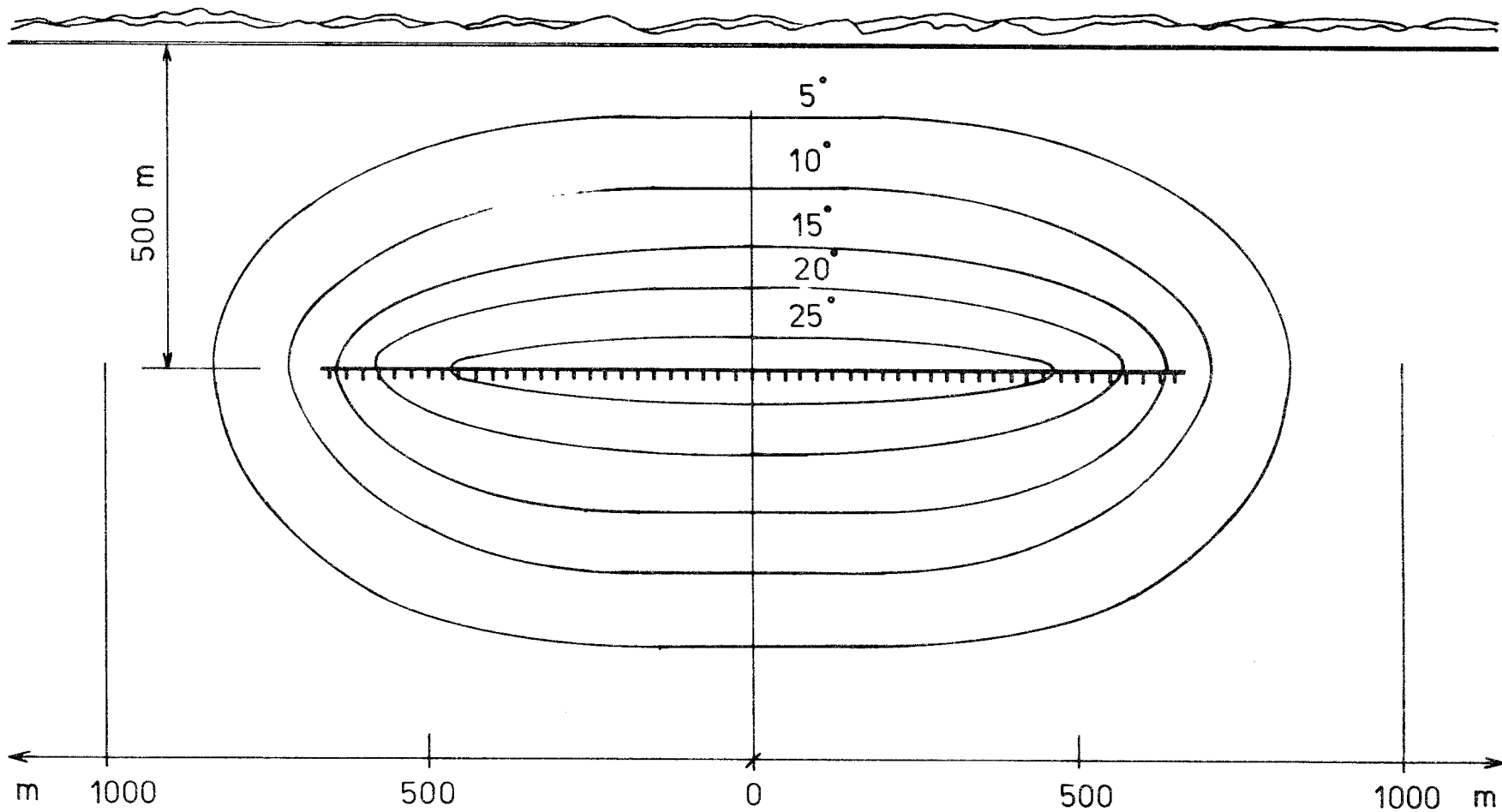


FIG. 9 TEMPERATURFÖRHÖJNINGEN I BERGFORMATIONEN
KRING SLUTFÖRVARET 960 ÅR EFTER DEPONERING

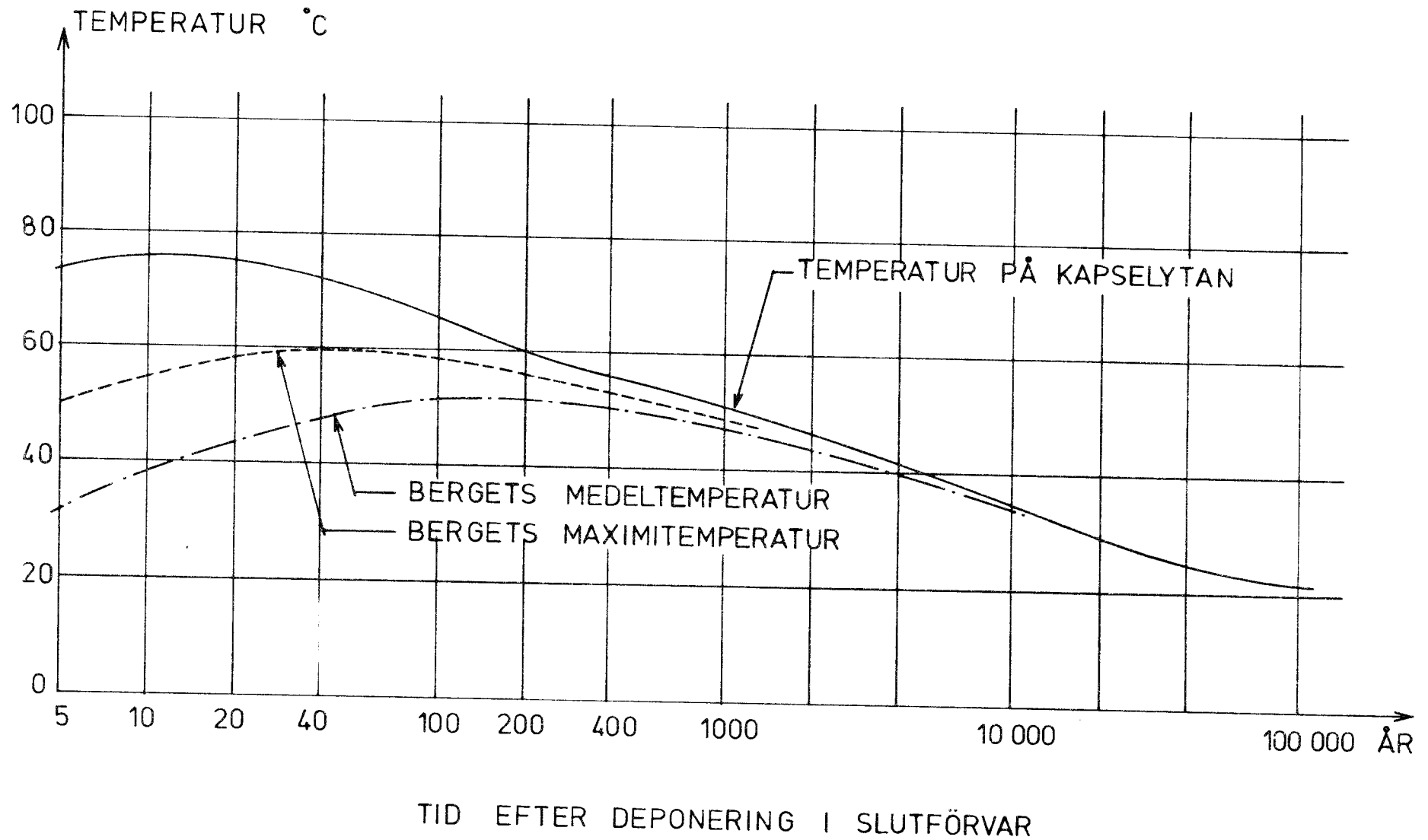


FIG. 10 VARIATION AV TEMPERATUR VID CENTRUM

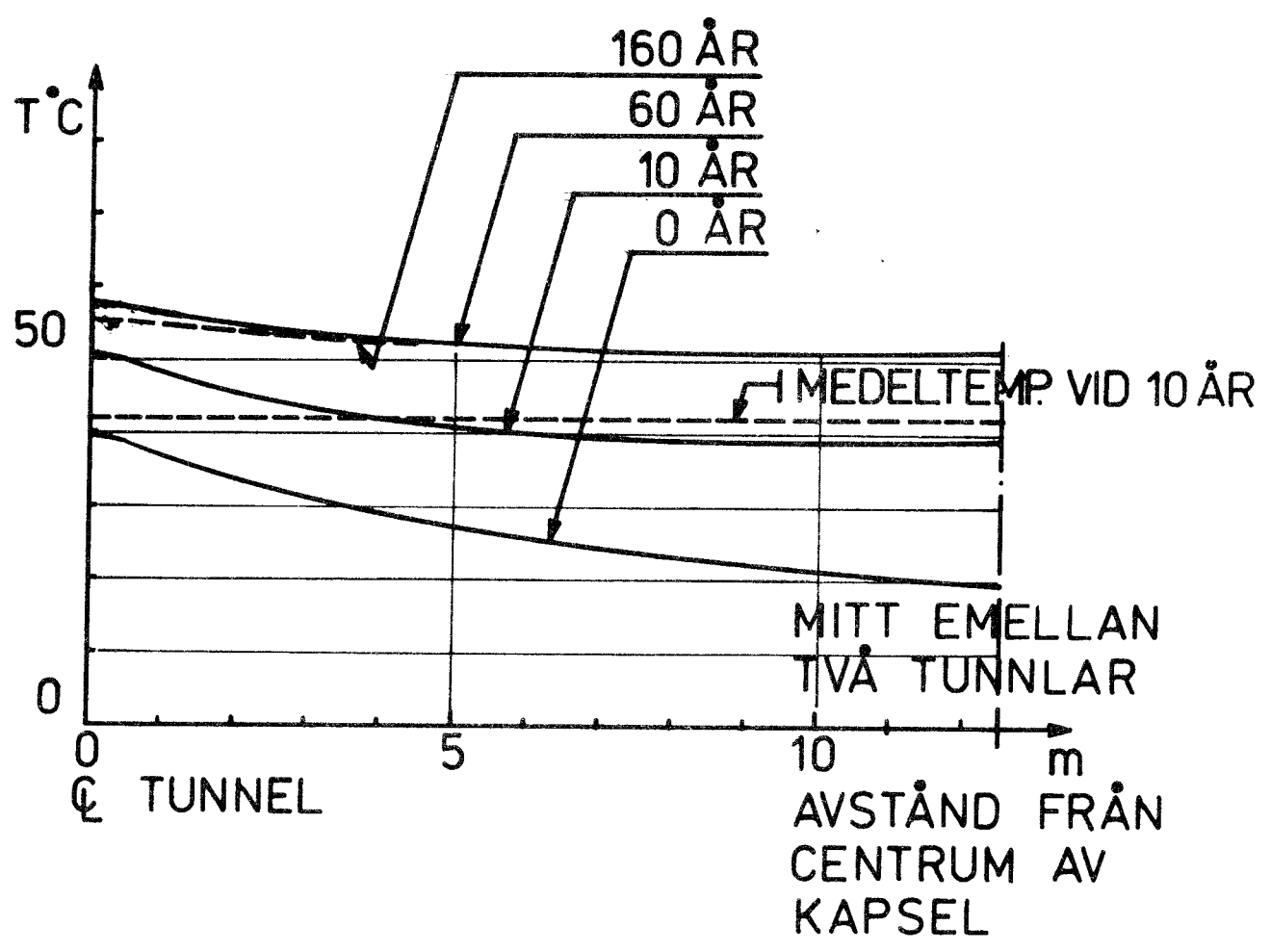
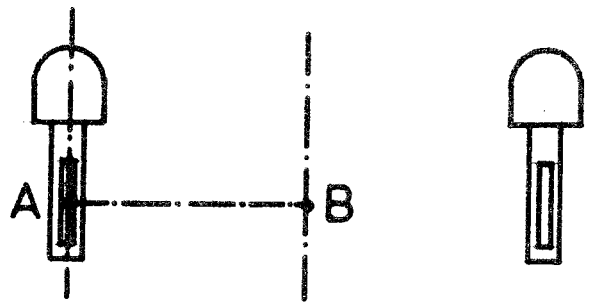
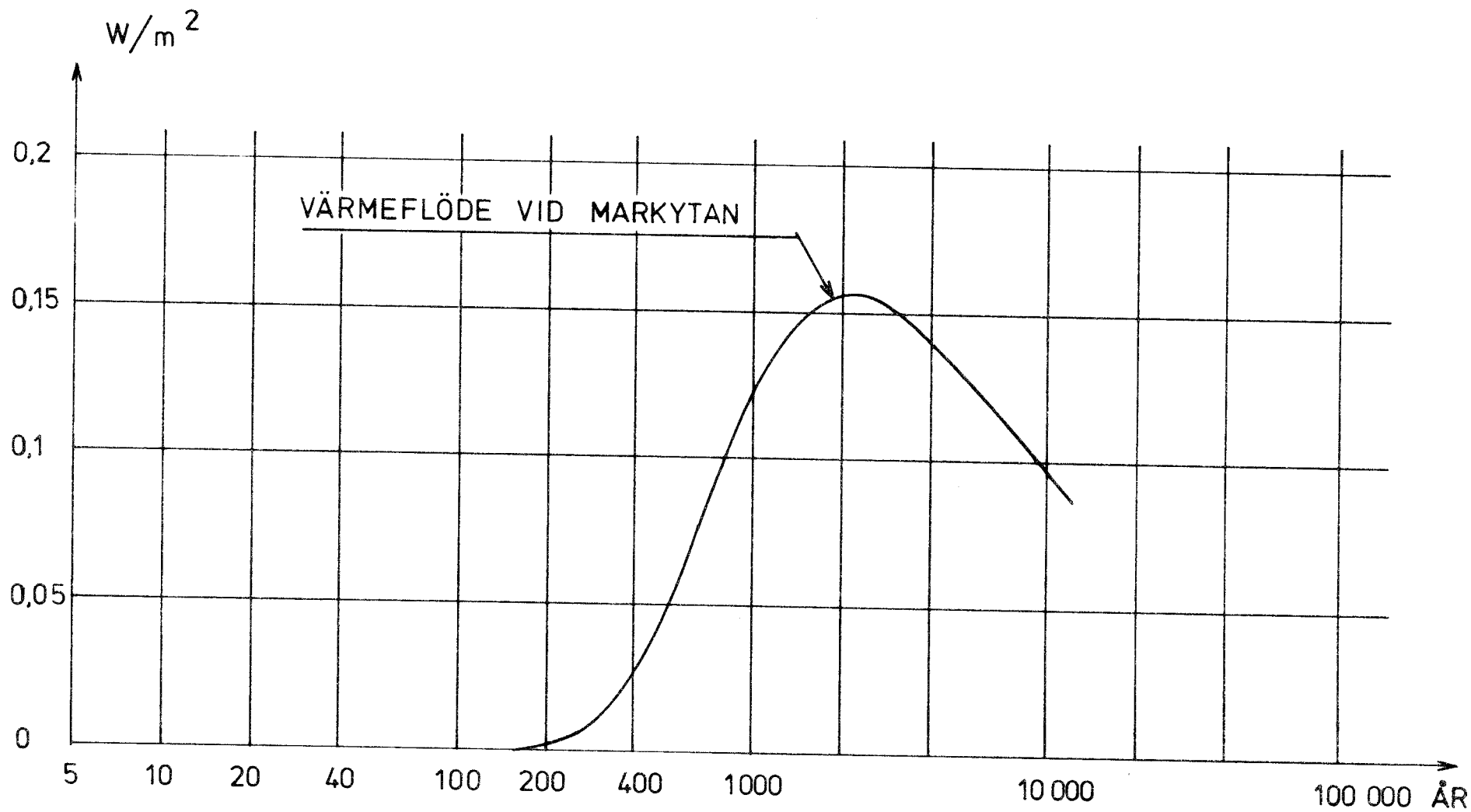


FIG. 11 TEMPERATURFÖRDELNING
I PLAN A-B



TID EFTER DEPONERING I SLUTFÖRVAR

FIG. 12 VÄRMEAVGIVNING VID MARKYTAN

KBS 19.06 - Resteffekt

Tabell 6: BWR. 27600 MWd/tU, not reprocessed

W/tU

Decay time Years	1	2	3	4	1+3	2+4	2+3	
	FP	FP	HM	HM	FP+HM	FP+HM	ORI, FP	
	BEGAFIP	ORIGEN	BEGAFIP	ORIGEN	BEGAFIP	ORIGEN	+BEG. HM	
1	6559	7250	400	301	6959	7551	7650	
2	3524	3920	194	155	3718	4075	4114	
5	1269	1390	147	121	1416	1511	1537	
10	785	836	157	126	942	962	993	
15	655	693	164	130	819	823	857	
20	572	605	168	133	740	738	773	
30	446	472	172	135	618	607	644	
50	273	290	169	133	442	423	459	
70	168	179	161	127	329	306	340	
100	81.8	87.7	148	118	230	206	236	
200	7.53	8.40	117	93.6	124	102	125	
500	0.016	0.059	73.0	59.5	73.0	59.6	73.1	
1000	0.0096	0.0185	43.2	36.7	43.2	36.7	43.2	
2000	0.0045	0.0183	23.6	-	23.6	-	23.6	
5000	0.0044	0.0181	15.3	-	15.3	-	15.3	
10000	0.0042	0.0177	10.9	-	10.9	-	10.9	
							↑	
								Recommended values

Illustrated in fig. 3

TEMPERATUR- OCH VÄRMEBILDNINGSFÖRHÅLLANDEN I SVENSKT URBERG

Doc Ulf Lindblom, Hagconsult AB

Allmänt

Från gruvor och djupa borrhål vet man att temperaturen i jordskorpan stiger mot djupet, normalt med mellan 8°C och 40°C pr km.

Temperaturen på anläggningsnivån hör till de förutsättningar som påverkar de bergmekaniska och hydrologiska beräkningarna för slutförvaret, jfr KBS Teknisk rapport 54, liksom ventilationsbehov m.m.

Temperaturen i berggrund av urbergstyp är till största delen orsakad av värmebildning genom radioaktivt sönderfall i själva bergmaterialet. Endast till en mindre del har de förhöjda temperaturerna samband med värmeflöde från djupare belägna delar i jordklotet.

Värmeflödet i berggrunden

Som en följd av den nedåt stigande temperaturen måste värme strömma uppåt mot markytan. Om värmeledningstalet är k W/m, °C (se KBS Teknisk rapport 54:1 sid 28), värmekapaciteten c J/g, °C, densiteten ρ g/cm³ och värmebildningen α W/g får ekvationen för värmeledning utseendet

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c} \left(k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \alpha \rho \right)$$

där T = temperaturen, t = tiden och z = djupet från markytan.

Om vi antar att temperaturjämvikt uppnåtts, dvs $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, blir

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{\alpha \rho}{k}$$

Integrering ger den stationära temperaturfördelningen i berggrunden

$$T = T_0 + \frac{q_0}{k} z - \frac{1}{2} \frac{\alpha \rho}{k} z^2$$

där T_0 och q_0 är temperatur respektive värme flöde vid markytan.

I själva verket befinner sig övre delen av den svenska berggrunden inte i temperaturjämvikt. Detta beror på, att den sista nedisningen för ca 14 000 år sedan kylde ner bergytan till omkring 0 °C. Från den teoretiska temperaturfördelningen pågår för närvarande en temperaturökning på djup mindre än ca 1 000 m.

Temperatursprånget från 0 till ca 8 °C skedde för uppskattningsvis 8 000 år sedan, då isen avsmälte. Sedan dess har temperaturen stigit ca 3 °C på 500 m djup i förhållande till den teoretiska temperaturfördelningen vid 0 °C marktemperatur, jämför figur 1.

Temperaturen på 500 m djup kan med värmeledningstalet $k = 3,5 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$ uppskattas till

$$T_{500} = 0,14q_0 - 0,09\alpha + 3 \quad ^\circ\text{C}$$

Här är q_0 uttryckt i mW/m^2 och α i $\text{pW/g} = 10^{-12} \text{ W/g}$

Det råder ett definierat samband mellan värmebildning och värme flöde i prekambrisk bergområden, (Landström et al, 1978). I ett stort antal borrhål i granitområden har Roy et al (1968) funnit, jämför figur 2

$$q_0 \text{ (mW/m}^2\text{)} = 33 + 18\alpha \text{ (pW/g)}$$

Insätts detta samband ovan får man

$$T_{500} = 7,6 + 2,4\alpha \quad (^\circ\text{C})$$

om värmebildningen α uttrycks i pW/g

Värmebildning

I berggrunden förekommer radioaktiva isotoper av kalium, uran och torium. Dessa sänder ut α -partiklar, γ -partiklar och elektroner med mycket hög hastighet. Dessa partiklar bromsas vid kollisioner med omgivande atomer. Rörelseenergin frigörs då i form av värme. Exempel: 1 g U-238, som utgör 99,28 % av beståndsdelarna i naturligt uran, avger $9,4 \cdot 10^{-8}$ W. 1 g K - 40 som utgör 0,012 % av naturligt kalium avger $2,8 \cdot 10^{-8}$ W. 1 g Th-232 avger $2,7 \cdot 10^{-8}$ W.

Är halten av radioaktivt material i bergmassan känd kan således värmebildningskoefficienten α bestämmas. För en bergart som innehåller u ppm (miljondelar) uran, k % kalium och t ppm torium blir (Werner et al, 1978)

$$\alpha = 0,095 u + 0,035 k + 0,026 t \quad \text{pW/g}(10^{-12}\text{W/g})$$

I granitiska bergarter i allmänhet ligger halterna av ifrågakvarande ämnen på omkring 3,9 ppm uran, 3,6 % kalium och 16 ppm torium. Detta ger en värmebildningshastighet av ca 0,9 pW/g.

Unga granitmassiv uppvisar ofta betydligt högre halter av uran och torium. Enligt spektrometermätningar och neutronaktiveringsanalyser är exempelvis de aktuella halterna 13,5 ppm, 4,8 % respektive 50,3 ppm för Bohusgranit. Värmeproduktionen blir därför ca 2,8 pW/g.

Det finns förhållandevis unga granitintrusiv med hög värmegenerering på många håll i den svenska berggrunden, som figur 3 anger. Således är Karlshamn - Spinkamålagraniten i Blekinge ca 50 % mer värmegenererande än graniten i allmänhet medan Halen-graniten, öster om Olofström med $\alpha \approx 3,5$ pW/g har 4 gånger högre värmegenerering än normalt, vilket får betraktas som ett extremfall. I Oskarshamnstrakten finns exempel på ett mycket begränsat granitparti med hög värmegenerering.

Temperaturen på 500 m djup kan då enligt det tidigare resonemanget bedömas variera i intervallet +9,0 till +15⁰ C beroende på bergartstypen.

Resultat från några temperaturmätningar

Mätningar av temperaturen på stora djup i kristallin berggrund är ytterst sällsynta. Nedan ges några data från litteraturen (Hasselström, 1972):

Håldjup m	Bergart	Temp. °C	Gruva
516	Leptit	13,7	Grängesberg
500	Leptit	12,7	Stråssa
500	Granit	11,5	Intrånget
520	Granit	13,1	Zinkgruvan

Bedömning av temperaturen vid slutförvarsnivån vid undersökningsområdena

De tre undersökningsområdena för förläggning av slutförvaret är Finnsjöområdet nära Forsmark i Uppland, Kråkemålaområdet vid Simpevarp i Småland och Karlshamnsområdet i Blekinge.

Finnsjöområdet representerar en vanlig berggrundstyp i Sveriges urberg. Anomal värmegenerering kan inte förväntas och den sannolika temperaturen på 500 m djup är +9–11°C.

Kråkemålaområdet är beläget i götemarggraniten, en yngre urbersgranit med hög värmegenerering ca 3 pW/g. Den troliga temperaturen på 500 m nivå kan här beräknas vara +14–16°C.

Undersökningsområdet i Karlshamn hamnar utanför Karlshamn - Spinkemåla och Halengraniterna, och är beläget i Blekinge kustgnejs. Denna bergart har troligen samma eller något lägre värmegenerering än genomsnittet, varför den sannolika temperaturen på 500 m djup kan sättas till +8–10°C.

Referenser

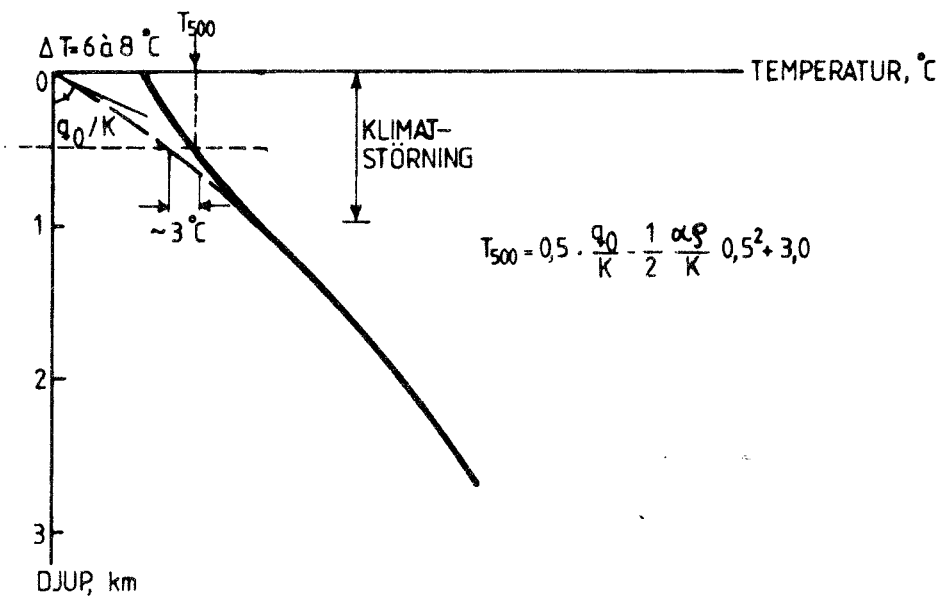
Hasselström, 1972, Temperaturmätningar inom svenska gruvfält och i samband därmed bestämningar av värmeledningsförmåga hos malmer och sidobergarter från samma gruvfält. KTH, inst. för geologi.

KBS Teknisk rapport 54, 1977, Groundwater movements around a repository. Hagconsult ab.

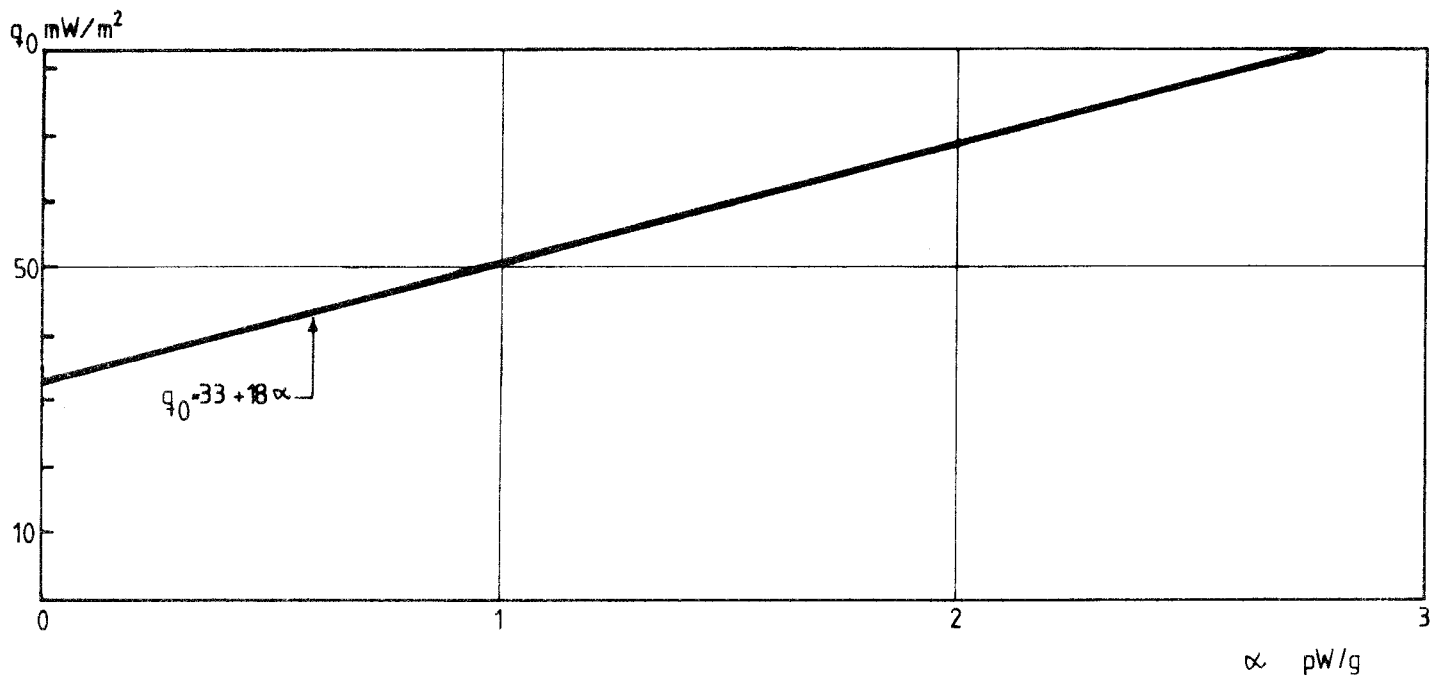
Landström, Lind, Larson & Malmqvist, 1978, Lokalisering och bedömning av geotermiska energimagasin i kristallin berggrund. CTH. inst för geologi.

Roy, Blackwell & Birch, 1968, Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. Earth and Planetary Science Letters 5:1-12.

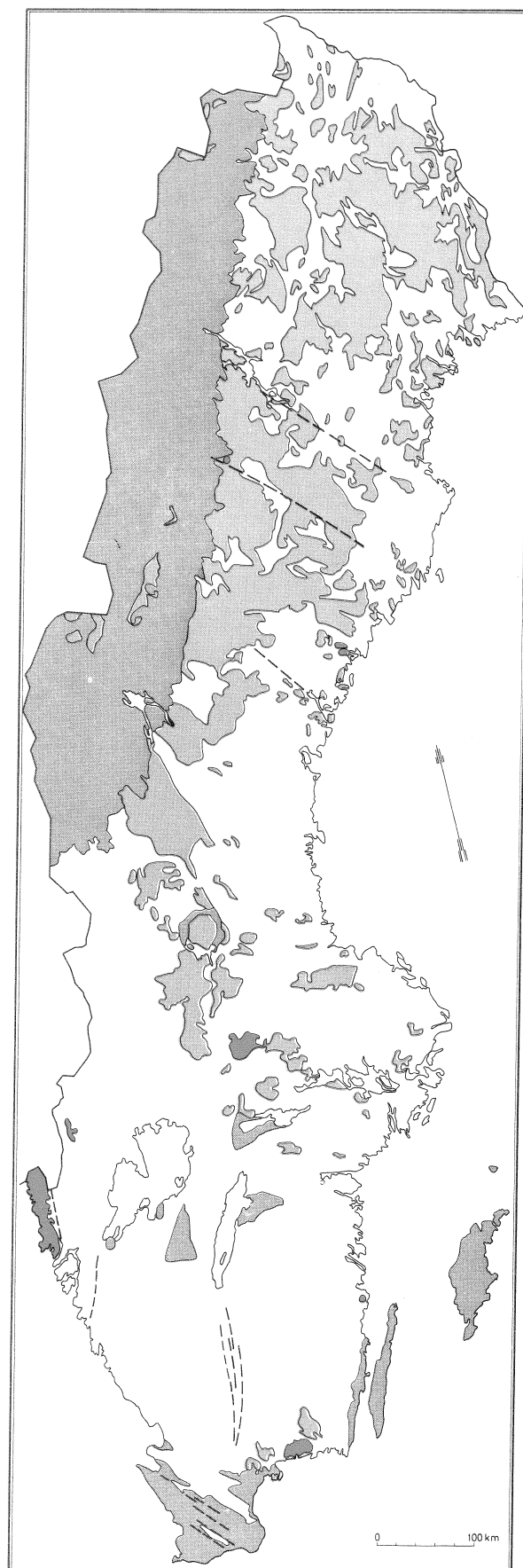
Werner, Lindén & Mellander, 1978, Kristallina områden för geotermisk energiutvinning. SGU, Stockholm.






Figur 1. Temperaturfördelning i värmebildande berggrund som utsatts för glaciation



Figur 2. Samband mellan värmefflöde och värmegenerering inom prekambriiska sköldområden med graniter (Roy et al, 1968)



Figur 3.

- | | | | |
|---|--|---|-----------------------------------|
|  | Äldre kristallin berggrund |  | Yngre kristallin berggrund |
|  | Paleozoiska och mesozoiska sedimentområden |  | Kända områden med höga värmeleden |
|  | Exempel på större korszon | | |

FÖRTECKNING ÖVER KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 01 Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN
Nils Kjellbert
AB Atomenergi 77-04-05
- 02 PM angående värmeledningstal hos jordmaterial
Sven Knutsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-04-15
- 03 Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-05-27
- 04 Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-01
- 05 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall, Rapport 1
Roland Blomqvist
AB Atomenergi 77-03-17
- 06 Groundwater movements around a repository, Phase 1, State of the art and detailed study plan
Ulf Lindblom
Hagconsult AB 77-02-28
- 07 Resteffekt studier för KBS
Del 1 Litteraturgenomgång
Del 2 Beräkningar
Kim Ekberg
Nils Kjellbert
Göran Olsson
AB Atomenergi 77-04-19
- 08 Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 77-05-20

- 09 Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium
Hans Häggblom
AB Atomenergi 77-03-24
- 10 Translation and development of the BNWL-Geosphere Model
Bertil Grundfelt
Kemakta Konsult AB 77-02-05
- 11 Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall
Sture Henriksson
AB Atomenergi 77-04-18
- 12 Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg
Sven G Bergström
Göran Fagerlund
Lars Rombén
Cement- och Betonginstitutet 77-06-22
- 13 Urlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering
Ragnar Gelin
AB Atomenergi 77-06-08
- 14 Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-20
- 15 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
Rapport 2
Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-05-17
- 16 Översikt av utländska riskanalyser samt planer och projekt rörande slutförvaring
Åke Hultgren
AB Atomenergi augusti 1977
- 17 The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements
Arne Bjerhammar
Stockholm augusti 1977
- 18 Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden
Nils-Axel Mörner
Stockholms Universitet augusti 1977
- 19 Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, flygbildsgenomgång och geofysisk tolkning av recenta förkastningar
Robert Lagerbäck
Herbert Henkel
Sveriges Geologiska Undersökning september 1977

- 20 Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne
Kennert Röshoff
Erik Lagerlund
Lunds Universitet och Högskolan Luleå september 1977
- 21 Earthquakes of Sweden 1891 - 1957, 1963 - 1972
Ota Kulhánek
Rutger Wahlström
Uppsala Universitet september 1977
- 22 The influence of rock movement on the stress/strain
situation in tunnels or bore holes with radioactive con-
sistors embedded in a bentonite/quartz buffer mass
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 23 Water uptake in a bentonite buffer mass
A model study
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 24 Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och akti-
nider från en cylinder av fränkt glas
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 1977-07-27
- 25 Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi
Ingemar Larsson KTH
Tom Lundgren SGI
Ulf Wiklander SGU
Stockholm, augusti 1977
- 26 Bedömning av risken för fördröjt brott i titan
Kjell Pettersson
AB Atomenergi 1977-08-25
- 27 A short review of the formation, stability and cementing
properties of natural zeolites
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå 1977-10-03
- 28 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-09-20
- 29 Deformationer i sprickigt berg
Ove Stephansson
Högskolan i Luleå 1977-09-28
- 30 Retardation of escaping nuclides from a final depository
Ivars Neretnieks
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14
- 31 Bedömning av korrosionsbeständigheten hos material avsedda
för kapsling av kärnbränsleavfall. Lägesrapport 1977-09-27
samt kompletterande yttranden.
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

- 32 Egenskaper hos bentonitbaserat buffertmaterial
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-06-10
- 33 Required physical and mechanical properties of buffer masses
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-10-19
- 34 Tillverkning av bly-titan kapsel
Folke Sandelin AB
VBB
ASEA-Kabel
Institutet för metallforskning
Stockholm november 1977
- 35 Project for the handling and storage of vitrified high-level waste
Saint Gobain Techniques Nouvelles October, 1977
- 36 Sammansättning av grundvatten på större djup i granitisk berggrund
Jan Rennerfelt
Orrje & Co, Stockholm 1977-11-07
- 37 Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts
Hans Fagerström, VBB
Björn Lundahl, Stabilator
Stockholm oktober 1977
- 38 Utformning av bergrumsanläggningar
Alf Engelbrektson, VBB
Arne Finné, KBS
Stockholm december 1977
- 39 Konstruktionsstudier, direktdeponering
ASEA-ATOM
Västerås
- 40 Ekologisk transport och stråldoser från grundvattenburna radioaktiva ämnen
Ronny Bergman
Ulla Bergström
Sverker Evans
AB Atomenergi 1977-12-20
- 41 Säkerhet och strålskydd inom kärnkraftområdet.
Lagar, normer och bedömningsgrunder
Christina Gyllander
Siegfried F Johnson
Stig Rolandson
AB Atomenergi och ASEA-ATOM 1977-10-13

- 42 Säkerhet vid hantering, lagring och transport av använt kärnbränsle och förglasat högaktivt avfall
Ann-Margret Ericsson
Kemakta november 1977
- 43 Transport av radioaktiva ämnen med grundvatten från ett bergförvar
Bertil Grundfelt
Kemakta november 1977
- 44 Beständighet hos borsilikatglas
Tibor Lakatos
Glasteknisk Utveckling AB
- 45 Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar i berg för förglasat radioaktivt avfall Rapport 3
Roland Blomquist
AB Atomenergi 1977-10-19
- 46 Temperaturberäkningar för slutförvar för använt bränsle
Taivo Tarandi
Vattenbyggnadsbyrån Stockholm 1978
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser
John Stokes
Roger Thunvik
Inst för kulturteknik KTH maj 1978
- 48 The mechanical properties of the rocks in Stripa, Kråkemåla, Finnsjön and Blekinge
Graham Swan
Högskolan i Luleå 1977-09-14
- 49 Bergspänningsmätningar i Stripa gruva
Hans Carlsson
Högskolan i Luleå 1977-08-29
- 50 Lakningsförsök med högaktivt franskt glas i Studsvik
Göran Blomqvist
AB Atomenergi november 1977
- 51 Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock
F Ringdal
H Gjöystdal
E S Husebye
Royal Norwegian Council for scientific and industrial research
- 52 Calculations of nuclide migration in rock and porous media, penetrated by water
H Häggblom
AB Atomenergi 1977-09-14
- 53 Mätning av dissolutionshastighet för silver i lera-sand-blandning
Bert Allard
Heino Kipatsi
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15