
KBS TEKNISK RAPPORT

05

ORIENTERANDE TEMPERATURBE-
RÄKNINGAR FÖR SLUTFÖRVARING
I BERG AV RADIOAKTIVT AVFALL

Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-03-17

Objekt 19.02

ORIENTERANDE TEMPERATURBE-
RÄKNINGAR FÖR SLUTFÖRVARING
I BERG AV RADIOAKTIVT AVFALL

Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-03-17
Objekt 19.02

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

KBS OBJECT 19.02

INTRODUCTORY CALCULATIONS OF TEMPERATURES IN A ROCK
STORAGE FOR FINAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

SUMMARY

This report gives details concerning pre-requisites, assumptions and results for some introductory temperature calculations regarding final disposal of radioactive waste in hard rock. The calculations, which illustrate the influence of dimensional parameters, age of the waste etc, include high active waste from reprocessed nuclear fuel and waste in form of non-reprocessed spent fuel.

The calculations mainly deals with a repository geometry, where the waste containers are placed in vertical holes and surrounded by a layer of quarts sand mixed with bentonite.

For non-reprocessed fuel calculations have also been performed for an alternative geometry. In this case, the waste containers are placed directly in horizontal funnels filled with a quarts sand - bentonite mixture.

Especially for the reprocessed waste, several parameter combinations result in too high temperatures. One way to lower the temperature level could be to choose a smaller waste container diameter compared

to those 450 mm which on basis of foreign statements has been assumed for most of the calculations. The non-reprocessed fuel gives, in general, lower max. temperatures. The reason for this is the much lower volumetric heat generation.

The report points out that the maximum temperature of the waste is strongly depending on the thermal conductivities of those materials surrounding the waste. However, due to different material composition, water content, temperature etc, those properties could be strongly varying. It is of importance to verify by experiment the thermal conductivities of the materials used.

Titel och författare KBS. Objekt 19:02. Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall		Org enh och nr TPM-RV- 454	
Roland Blomquist		Antal ex/Antal sid 40/12 + 30	Datum 1977-03-17
Ersätter	Kompletterar	Konto nr 54309	Godkänd av <i>K. K. K.</i>
Distribueras till			
COMMERCIAL			

Text

SAMMANFATTNING

I rapporten redovisas förutsättningar, antaganden och resultat för de orienterande temperaturberäkningar beträffande slutförvaring av radioaktivt avfall i berg som utförts på uppdrag av KBS. Beräkningarna, som belyser inverkan av dimensionsparametrar, avfallets ålder m m, omfattar såväl avfall från upparbetningsanläggning som direktdeponerat avfall i form av inkapslade bränslestavar.

Beräkningarna för båda avfallsalternativen behandlar huvudsakligen en depågeometri där avfallsbehållarna förvaras i vertikalt borrarade hål med ett skikt av bentonitlera blandad med kvartssand närmast kring behållarna.

För det direktdeponerade avfallet behandlas dessutom ett depåalternativ där avfallsbehållarna slutförvaras i tunnlar fyllda med ovannämnda lersand-blandning.

För speciellt det upparbetade avfallet fås vid många parameterkombinationer besvärande höga temperaturer. Ett sätt att sänka temperaturnivån kan vara att välja mindre diameter på avfallsbehållarna än de 450 mm som på basis av utländska uppgifter antagits för huvuddelen av beräkningarna. Det direktdeponerade avfallet ger, allmänt sett, lägre maxtemperaturer, detta beroende på att värmeutvecklingen per volymenhet där blir mycket lägre.

1977-03-17

I rapporten påpekas att avfallets maxtemperatur är starkt beroende av värmeledningsförmågan för de material som omger avfallet. Denna egenskap kan till följd av olika material-sammansättning, fukthalt, temperatur m m vara kraftigt varierande. Det är viktigt att de valda materialens värmeöverförande egenskaper verifieras experimentellt.

INNEHÅLL

	Sid
INLEDNING	4
TIDIGARE BERÄKNINGAR	4
BERÄKNINGSMETODIK	4
FYSIKALISKA DATA FÖR BERG OCH LERA	5
AVFALL FRÅN UPPARBETNINGSANLÄGGNING	6
Allmänt	6
Dimensioner	6
Värmeutveckling	7
Beräknade temperaturer	7
DIREKTDEPONERAT AVFALL	9
Allmänt	9
{ Dimensioner	9
Värmeutveckling	10
Beräknade temperaturer	11
REFERENSER	12
FIGURER	
BILAGA:	TPM-RV-375. Temperaturstörningar i urberg orsakade av underjordslagring av radioaktivt avfall. AB Atomenergi 1974.

1977-03-17

INLEDNING

På uppdrag av KBS har orienterande beräkningar utförts för att belysa temperaturfrågorna i samband med slutförvaring av radioaktivt avfall i berg. Beräkningarna har omfattat såväl avfallsbehållare från uppdragsanläggning som inkapslade bränslestavar avsedda för direktdeponering. Deponeringen har antagits ske på sådant sätt att de cylindriska behållarna placeras i vertikala hål på visst avstånd från varandra djupt nere i berget. Alla hål har antagits ligga på samma nivå. Beräkningarna har inriktats på att studera inverkan av bl a följande parametrar:

håldiameter
avfallsbehållarnas diameter
avstånd mellan hål
hålens aktiva längd
avfallets ålder vid deponering
förvaringsdepåns dimensioner

Dessutom har ett typfall med direktdeponering i horisontella lerfyllda tunnlar genomräknats.

TIDIGARE BERÄKNINGAR

Liknande temperaturberäkningar har i mindre omfattning tidigare utförts på uppdrag av AKA-utredningen. En rapport beträffande dessa beräkningar har som bilaga fogats till föreliggande rapport.

BERÄKNINGSMETODIK

I samband med beräkningarna för AKA-utredningen framtogs ett för ändamålet lämpat datorprogram. Det teoretiska underlaget för detta program redovisas i Ref 1 som bifogas.

I samband med här redovisat arbetet har programmet modifierats för att underlätta parameterstudierna.

1977-03-17

Beräkningsmetodikerna innefattar vissa approximationer, men av dessa orsakade fel bedöms vara betydligt mindre än de osäkerheter i beräkningsresultaten som fås på grund av osäkerhet i värmeledningsförmåga för lera och berg, värmeutveckling i avfallet m m.

Temperaturförlopp av här studerat slag har ett par generella egenskaper som kan vara nyttiga att känna till vid studiet av här redovisade resultat:

- a Om man ändrar initialeffekten i en värmekälla, men förutsätter samma tidsförlopp, dvs samma sönderfallskonstanter, kommer temperaturstörningen överallt i berget och vid alla tidpunkter att ändras i proportion till ändringen i initial-effekt.
- b Den resulterande temperaturstörningen från ett flertal värmekällor i berget kan överallt och för alla tidpunkter beräknas genom att beräkna störningarna från varje enskild värmekälla och sedan addera dessa.

FYSIKALISKA DATA FÖR BERG OCH LERA

Följande värden har antagits:

Granit, värmeledningsförmåga	3.35 W/m ² °C
densitet	2 700 kg/m ³
värmekapacitivitet	800 J/kg °C
Bentonitlera blandad med kvartssand, värmeledningsförmåga	3.35 W/m °C

Värdena för värmeledningsförmågan är osäkra. För granit är värmeledningsförmågan beroende av materialets sammansättning och temperatur. Bentonit-kvartssand-blandningens värmeledningsförmåga är beroende av bl a materialens sammansättning, andel kvartssand, fukthalt och temperatur. Enligt uppgift från Högskolan i Luleå kan man för nämnda ler-sand-blandning räkna med en värmeledningsförmåga på 3 ä 4 W/m °C. Att just värdet 3.35 använts beror på att det sammanfaller med det för granit använda, vilket förenklar beräkningarna.

1977-03-17

Uppenbart är att ytterligare undersökningar behövs för att få fram tillförlitliga värden på värmeledningsförmågan för granit av aktuella sammansättningar. För ler-sand-blandningen torde behovet av experimentella undersökningar vara ännu större eftersom man där först bl a måste bestämma lämpligaste andel sand och sedan ta fram tillförlitliga värden på värmeledningsförmågan inklusive dess beroende av olika parametrar.

AVFALL FRÅN UPPARBETNINGSANLÄGGNING

Allmänt

Avfallet förutsätts inneslutet i cylinderformade behållare. Som tidigare nämnts förutsattes deponeringen ske i vertikala hål djupt nere i berget. Deponeringszonen förutsätts i alla hål belägen på samma nivå. Hålen förutsätts placerade med lika delning i ett kvadratisk gitter. I samma hål kan lagras en eller flera behållare, i det senare fallet utan större mellanrum i vertikal led. Förvaringshålen antas ha större diameter än avfallsbehållarna. Utrymmet mellan hålvägg och behållareyta förutsätts fyllt med bentonitlera uppblandad med kvartssand.

För beräkningen antas att deponeringen i hela området sker samtidigt. I det verkliga fallet kommer deponeringen naturligtvis att ske successivt under viss tidsperiod. Beräkningsantagandet att hela deponeringen sker samtidigt medför att de beräknade temperaturerna i vissa fall blir något högre än de som verkligen kommer att uppträda.

Dimensioner

Baserat på bl a franska uppgifter har avfallsbehållarnas diameter för huvuddelen av beräkningarna antagits till 450 mm. För att studera diameterns inverkan har även vissa beräkningar gjorts för mindre diametrar. Något längdmått på behållarna har ej antagits. Istället har vissa värden an-

1977-03-17

tagits beträffande deponeringszonens längd per hål. Antagna värden beträffande övriga dimensioner i depån är:

håldiameter		600	900 mm
avstånd mellan hål	5	15	30 m
hålens aktiva längd	4	16	64 m
deponeringsområdets dimensioner		200x200 m	400x400 m

Värmeutveckling

Baserat på bl a franska uppgifter och AKA-utredningen har följande värmeutveckling antagits för avfallet:

Ålder efter uttag ur reaktor	10	30	50	100 år
Effektutveckling	15	9.0	5.3	1.7 W/1

Effektutvecklingen avses motsvara glas innehållande ~ 20 % fissionsprodukter.

För temperaturberäkningarna indelas de värmeproducerande isotoperna i ett antal grupper för vilka individuell initial värmeutveckling och sönderfallskonstant anges. Denna indelning inklusive bestämmandet av erforderliga konstanter har gjorts med stöd av Ref 2.

Beräknade temperaturer

Med hjälp av tidigare nämnt datorprogram har för den varmaste behållaren i depån yttemperaturen som funktion av tiden beräknats för ett antal fall. De primära resultaten från dessa beräkningar redovisas på 5 st figurlad, Fig 1 - 5. Antagna ingångsparametrar anges i figurerna.

Av figurerna framgår att vissa kombinationer av ingångsparametrarna ger helt orealistiska temperaturer, i vissa fall högt över smälttemperaturerna för glas och berg. Värdena har dock medtagits då de synes bidra till att belysa parametrarnas inverkan. Av figurerna framgår också att de-

1977-03-17

påns utsträckning för större värden än 200x200 m knappast påverkar uppträdande maxtemperaturer. Av figurerna framgår dessutom att ändring av håldiametern vid oförändrad behållarediameter ej påverkar behållaretemperaturen men väl maximala bergtemperaturen. Att behållaretemperaturen förblir oförändrad beror givetvis på att samma värmeledningsförmåga antagits för berg och bentonit blandad med kvartssand.

Allmänt sett är de flesta maxtemperaturerna oacceptabelt höga med tanke på lerans och bergets förmodade temperaturtålighet. Det har därför inte ansetts föreligga behov av att ytterligare redovisa temperaturförloppet för samtliga beräkningsfall. För de fall däremot, där maxtemperaturen ligger under 200°C har maxtemperaturen för behållareyta och hålyta uppritats sfa tiden från 0 fram till 80 år. Resultaten redovisas i Fig 4:1 och 4:2.

Av Figurerna 1 till 5 framgår att man med behållarediametern 450 mm måste vänta länge med deponeringen för att få acceptabelt låga maxtemperaturer efter placeringen i berg. Vid sidan av lång väntetid finns andra sätt att få ned maxtemperaturen. Ett sätt är att minska längden av förvaringszonen i varje hål, ett annat är minska andelen fissionsprodukter i glaset och ett tredje sätt är att minska avfallsbehållarnas diameter. Inverkan av det senare sättet belyses av beräkningsresultat redovisade i Fig 6. Fig 6:1 och 6:2 redovisar tidsförloppet för den varmaste behållarens yttemperatur för behållardiametrarna 300 och 200 mm.

Exempel på beräknade radiella temperaturfördelningar i området närmast kring depåns varmaste behållare redovisas i Fig 7, 8 och 9. Figurerna visar temperaturfördelningarna 10 år efter deponering, vilket i dessa fall ungefär motsvarar tiden för max behållaretemperatur.

1977-03-17

Fig 10 visar den beräknade makroskopiska temperaturfördelningen i förvaringsområdet som funktion av tiden för ett typiskt fall. För deponeringszonen visar figuren medeltemperaturen med avseende på lokala fördelningarna kring varje enskild behållare.

DIREKTDEPONERAT AVFALL

Allmänt

Bränslestavarna förutsätts inkapslade i kroppar av cylindrisk form. Beträffande avfallets geometriska placering i berget och tidsförloppet för deponeringen gäller samma som tidigare angivits för det upparbetade avfallet.

Utöver de beräkningsfall som avser deponering enligt för upparbetat avfall angiven geometrisk modell har för det direktdeponerade avfallet ytterligare ett typfall genomräknats. Detta fall avser avfallskroppar omgivna av ett 25 cm tjockt strålskydd av järn deponerade horisontellt längs centrumlinjen av horisontella tunnlar fyllda med bentonitlera med inblandad kvartssand.

Dimensioner

Med stöd av uppgifter från ASEA-ATOM har avfallskropparnas diameter antagits till 650 mm. Här har vidare förutsatts odelade stavar vilket ger en längd på avfallskroppen av ca 4.4 m. En sådan avfallskropp förutsätts rymma ca 350 bränslestavar, vilket i sin tur motsvarar ca 1 ton uran. Alternativet med 25 cm järn som strålskydd kring avfallskroppen ger en ytterdiameter av 1 150 mm och en längd av ca 5 m.

Förvaringsdepåns dimensionsparametrar har för alternativet med vertikalt stående cylindrar i ett skikt valts enligt följande:

1977-03-17

håldiameter	900	1 200	mm
avstånd mellan hål	5	15	30 m
hålens aktiva längd	4.4	17.6	70.4 m
deponeringsområdets dimensioner	400x400 m		

För typfallet med horisontella och parallella lerfyllda tunnlar har följande dimensioner antagits

deponeringsområdets storlek	400x400 m
antal nivåer	5 st
avstånd mellan nivåer	25 m
horisontellt avstånd mellan tunnlar	25 m

Tunneldiametern har ej fastlagts till något bestämt värde. Eftersom berget och lermaterialet som tidigare nämnts har antagits ha samma värmeledningsförmåga och dessutom kan antas ha ungefär samma värmekapacitivet blir avfallskropparnas maximala temperatur oberoende av tunneldiametern.

Värmeutveckling

Som tidigare nämnts förutsätts avfallskropparnas innehåll motsvara ca 1 ton uran/st. Enligt AKA-utredningen kan värmeutvecklingen i avfallet från denna mängd uran uppskattas enligt följande:

Ålder efter uttag ur reaktor, år	10	30	50	100
Värmeutveckling, W/4.4 m:s avfallskropp	860	520	310	100

Beträffande den för temperaturberäkningarna gjorda gruppindelningen av de värmeproducerande isotoperna gäller samma som anges för det upparbetade avfallet.

1977-03-17

Beräknade temperaturer

Förvaringsdepå med vertikalt stående avfallskroppar i ett skikt

Yttemperaturen för den varmaste behållaren i depån har beräknats som funktion av tiden för ett antal fall. De primära resultaten från dessa beräkningar redovisas i Fig 11, 12, 13 och 14. Antagna ingångsparametrar anges i figurerna.

I likhet med vad som tidigare angivits för upparbetat avfall har även här vissa parameterkombinationer medfört orealistiskt höga temperaturer. Allmänt sett ligger dock temperaturerna för det direktdeponerade avfallet lägre, detta givetvis på grund av att värmeproduktionen i avfallet volymmässigt sett är väsentligt lägre. För de parameterkombinationer där maxtemperaturen är $< 200^{\circ}\text{C}$ har maxtemperaturen för behållareytan och hålväggen uppritats sfa tiden från 0 till 80 år. Resultaten redovisas i Fig 11:1 till 11:3, 12:1 till 12:3, och 13:1 till 13:3. Beräkningsfallen enligt Fig 14 har ej detaljredovisats, eftersom de resulterar i temperaturer som nästan sammanfaller med resultaten enligt Fig 11.

Exempel på beräknad temperaturfördelning i området närmast kring depåns varmaste behållare redovisas i Fig 15 för ett typiskt fall. Valda ingångsparametrar framgår av figuren.

Fig 16 visar den beräknade makroskopiska temperaturfördelningen i förvaringsområdet som funktion av tiden för ett typiskt fall. För deponeringszonen visar figuren medeltemperaturen med avseende på lokala fördelningen kring varje enskild behållare.

Förvaringsdepå med horisontella lerfyllda tunnlår

Fig 17 redovisar förutsättningar och resultat för ett genomräknat typfall där slutförvaring av avfallskroppar med 25 cm strålskydd av järn sker i horisontella lerfyllda tunnlår. Behållarna antas ligga horisontellt i en rad längs tunnlårnas

1977-03-17

centrumlinjer och med 2 ms avstånd mellan de 5 m långa behållarna.

Tunnlarna förutsätts fyllda med bentonitlera blandad med kvartssand. Värmeledningsförmågan för denna blandning har som tidigare nämnts antagits till $3.35 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$. Eftersom tunnarna är relativt stora är det omgivande ler-sand-skiktet av betydande tjocklek. Dess värmeledande förmåga har därför avgörande betydelse för avfallsbehållarnas maxtemperatur. Om värmeledningsförmågan blir väsentligt lägre än vad som här antagits kommer avfallets och ler-sand-blandningens maxtemperaturer att öka betydligt. Det förtjänar därför att ånyo påpeka vikten av att man genom experiment så tidigt som möjligt verkligen verifierar värmeledningsegenskaperna för det eller de material man avser skall omge behållarna.

REFERENSER

1. BLOMQUIST R
Temperaturstörningar i urberg orsakade av underjordslagring av radioaktivt avfall.
TPM-RV-375.
AB Atomenergi 1974.
(Bifogas som bilaga.)
2. Siting of Fuel Reprocessing Plants and Waste Management Facilities.
ORNL-4451. USAEC, 1970.

1977-03-17

Deponering av upparbetat avfall. Parameterstudie

Behållarediameter	450 MM
Håldiameter	600 MM
Ålder vid deponering	10 år
Initial värmeutveckling	15 W/ℓ = 2 385 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	200 x 200 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4	5	382	~ 1 600	/	~ 50
4	15	42.4	~ 355	~ 380	~ 8
4	30	10.6	~ 315	~ 350	~ 1
16	5	1 530	~ 6 000	/	~ 50
16	15	170	~ 800	~ 815	~ 25
16	30	42.4	~ 445	~ 475	~ 6
64	15	678	~ 2 200	/	~ 50
64	30	170	~ 700	~ 715	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

1977-03-17

Deponering av upparbetat avfall. Parameterstudie

Behållarediameter	450 MM
Håldiameter	600 MM
Ålder vid deponering	10 år
Initial värmeutveckling	15 W/l = 2 385 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4	5	382	~ 1 600	—	~ 50
4	15	42.4	~ 355	~ 380	~ 8
4	30	10.6	~ 315	~ 350	~ 1
16	5	1 530	~ 6 000	—	~ 50
16	15	170	~ 810	~ 825	~ 25
16	30	42.4	~ 445	~ 475	~ 6
64	15	678	~ 2 200	—	~ 50
64	30	170	~ 710	~ 725	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

1977-03-17

Deponering av upparbetat avfall. Parameterstudie

Behållarediameter	450 MM
Håldiameter	600 MM
Ålder vid deponering	30 år
Initial värmeutveckling	9.0 W/ℓ = 1 430 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4	5	229	~ 1 000	—	~ 40
4	15	25.4	~ 225	~ 240	~ 12
4	30	6.36	~ 200	~ 220	~ 1
16	5	915	~ 3 700	—	~ 45
16	15	102	~ 510	~ 520	~ 30
16	30	25.4	~ 280	~ 295	~ 6
64	15	407	~ 1 400	—	~ 50
64	30	102	~ 460	~ 470	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

1977-03-17

Deponering av upparbetat avfall. Parameterstudie

Behållarediameter	450 MM
Håldiameter	600 MM
Ålder vid deponering	50 år
Initial värmeutveckling	5.3 W/ℓ = 845 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4	5	135	~ 600	~ 605	~ 30
4	15	15.0	~ 140	~ 150	~ 10
4	30	3.76	~ 125	~ 140	~ 1
16	5	541	~ 2 200	—	~ 40
16	15	60.1	~ 310	~ 315	~ 30
16	30	15.0	~ 170	~ 180	~ 6
64	15	240	~ 850	~ 855	~ 50
64	30	60.1	~ 275	~ 280	~ 40

Ostörda bergets temperatur +20°C.

Deponering av upparbetat avfall

Behållarediameter: 450 mm

Håldiameter: 600 mm

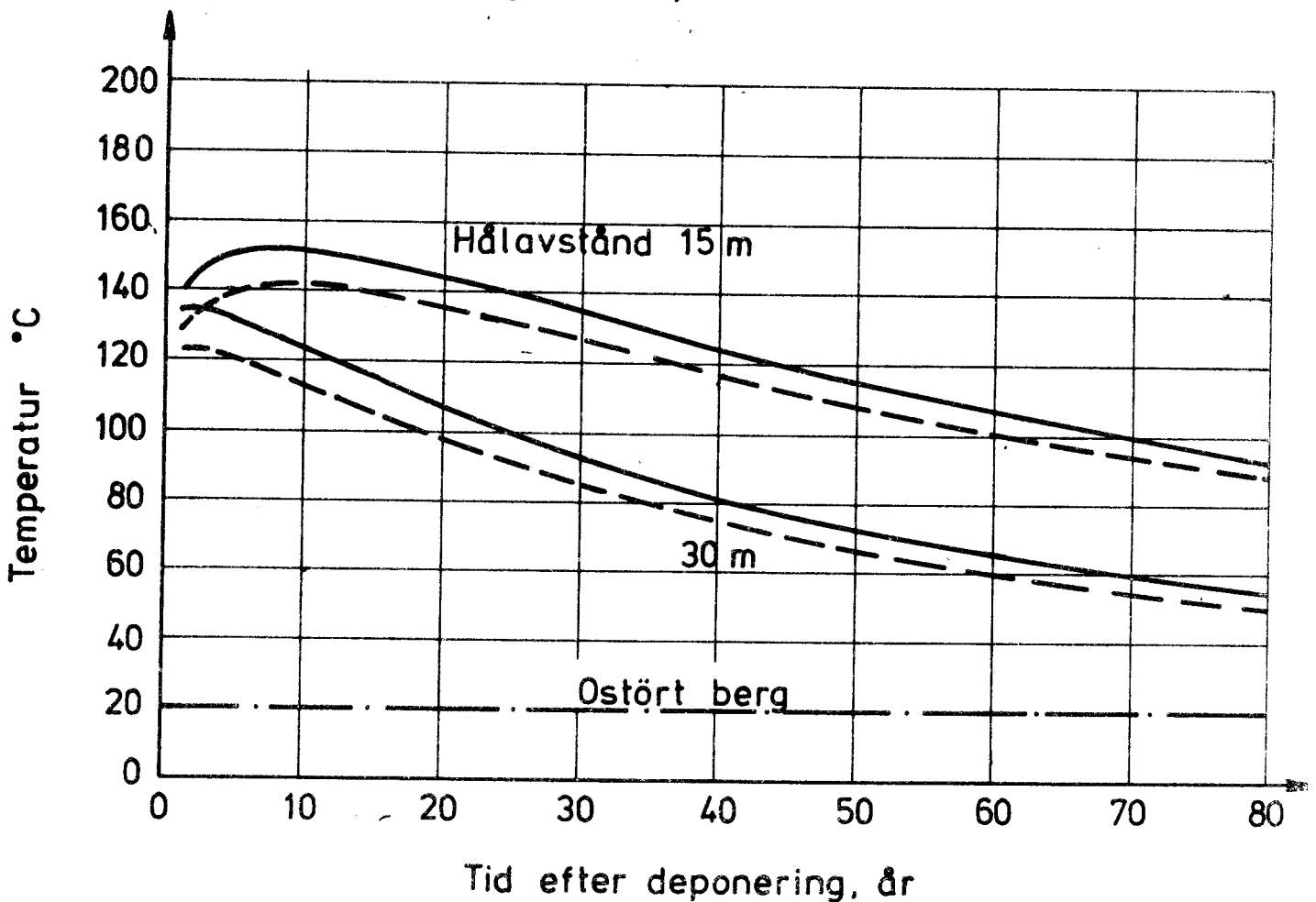
Avfallets ålder vid dep: 50 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Deponering av upparbetat avfall

Behållarediameter: 450 mm

Håldiameter: 600 mm

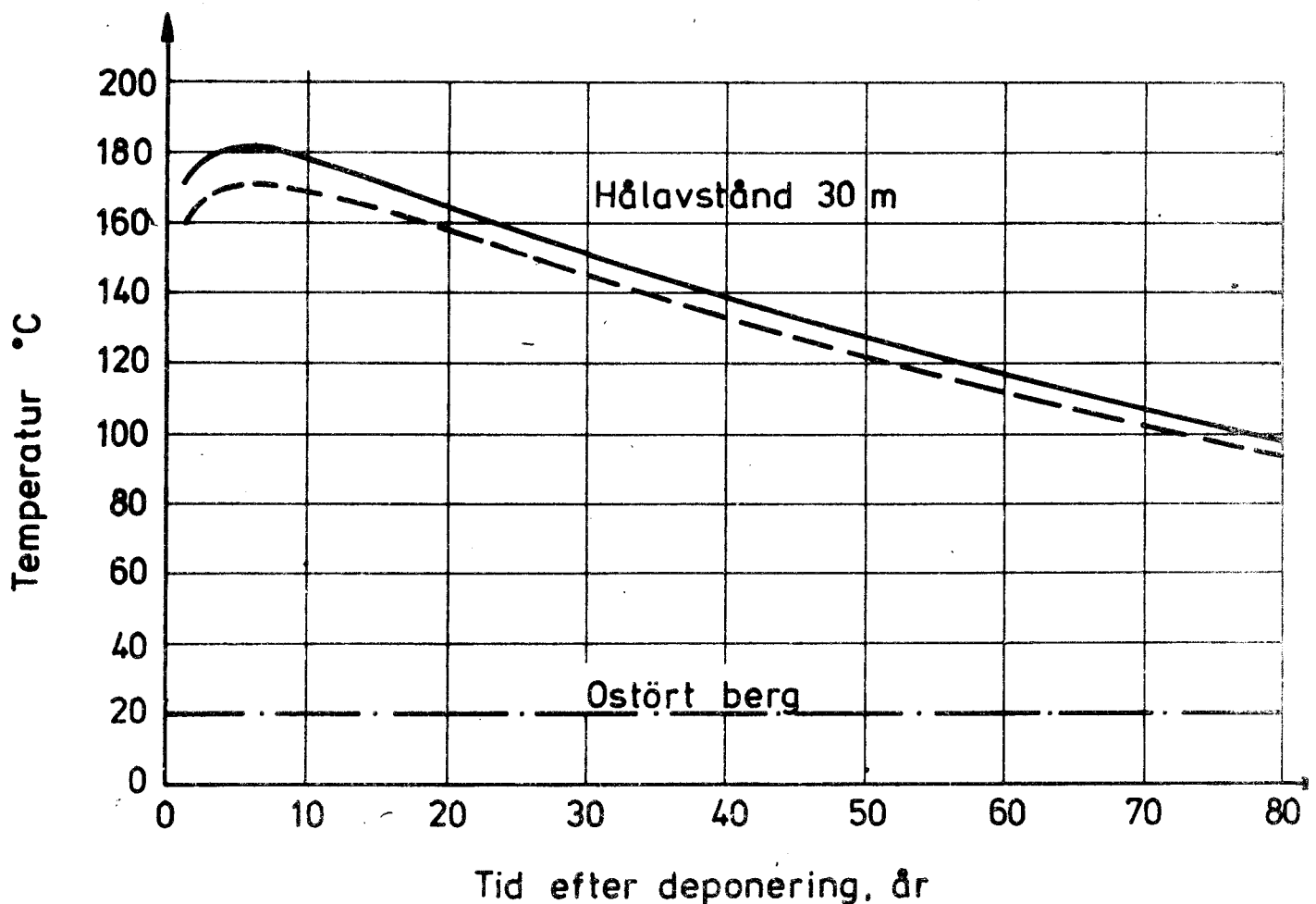
Avfallets ålder vid dep: 50 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 16 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
- - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



1977-03-17

Deponering av upparbetat avfall. Parameterstudie

Behållarediameter 450 MM
 Håldiameter 900 MM
 Ålder vid deponering 10 år
 Initial värmeutveckling 15 W/l = 2 385 W/m
 Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4	5	382	~ 1 600	/	~ 50
4	15	42.4	~ 320	~ 385	~ 8
4	30	10.6	~ 270	~ 345	~ 1
16	5	1 530	~ 6 000	/	~ 50
16	15	170	~ 780	~ 820	~ 25
16	30	42.4	~ 405	~ 475	~ 6
64	15	678	~ 2 200	/	~ 50
64	30	170	~ 690	~ 725	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

1977-03-17

Deponering av upparbetat avfall. Inverkan av avfallsbehållarnas diameter

Alder vid deponering	30 år
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400 M
Hålens aktiva längd	4 M
Avstånd mellan hål	15 M
Initial värmeutveckling	9 W/l

Behållare diameter, MM	Hål-diameter MM	Initial värmeutveckling W/M	Initial värmeutveckling W/M ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
450	600	1 430	25.4	~ 225	~ 240	~ 12
300	450	636	11.3	~ 118	~ 128	~ 10
200	350	283	5.03	~ 67	~ 73	~ 8

Ostörda bergets temperatur +20°C.

Deponering av upparbetat avfall

Behållarediameter: 300 mm

Håldiameter: 450 mm

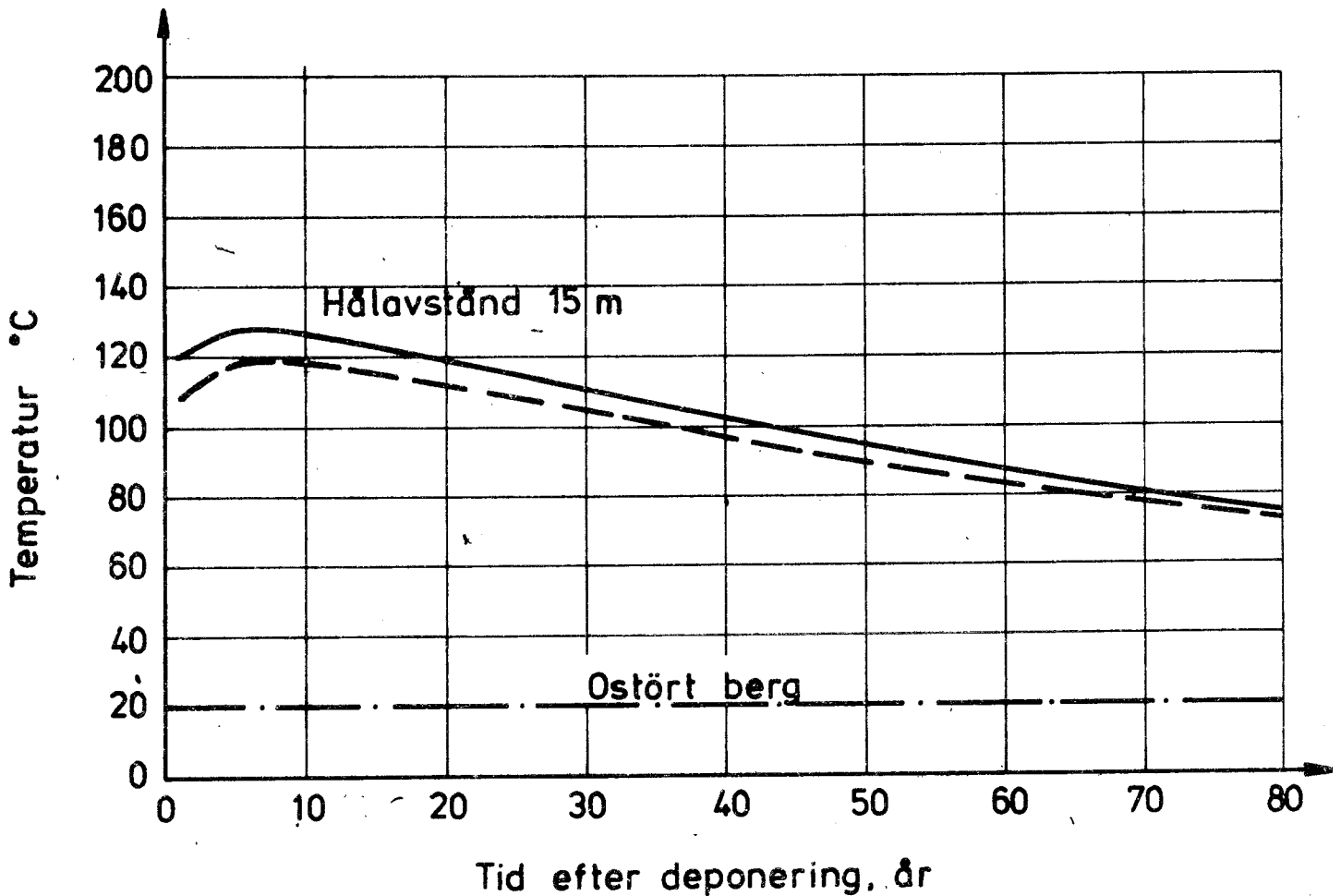
Avfallets ålder vid dep: 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Deponering av upparbetat avfall

Behållarediameter: 200 mm

Håldiameter: 350 mm

Avfallets ålder vid dep: 30 år

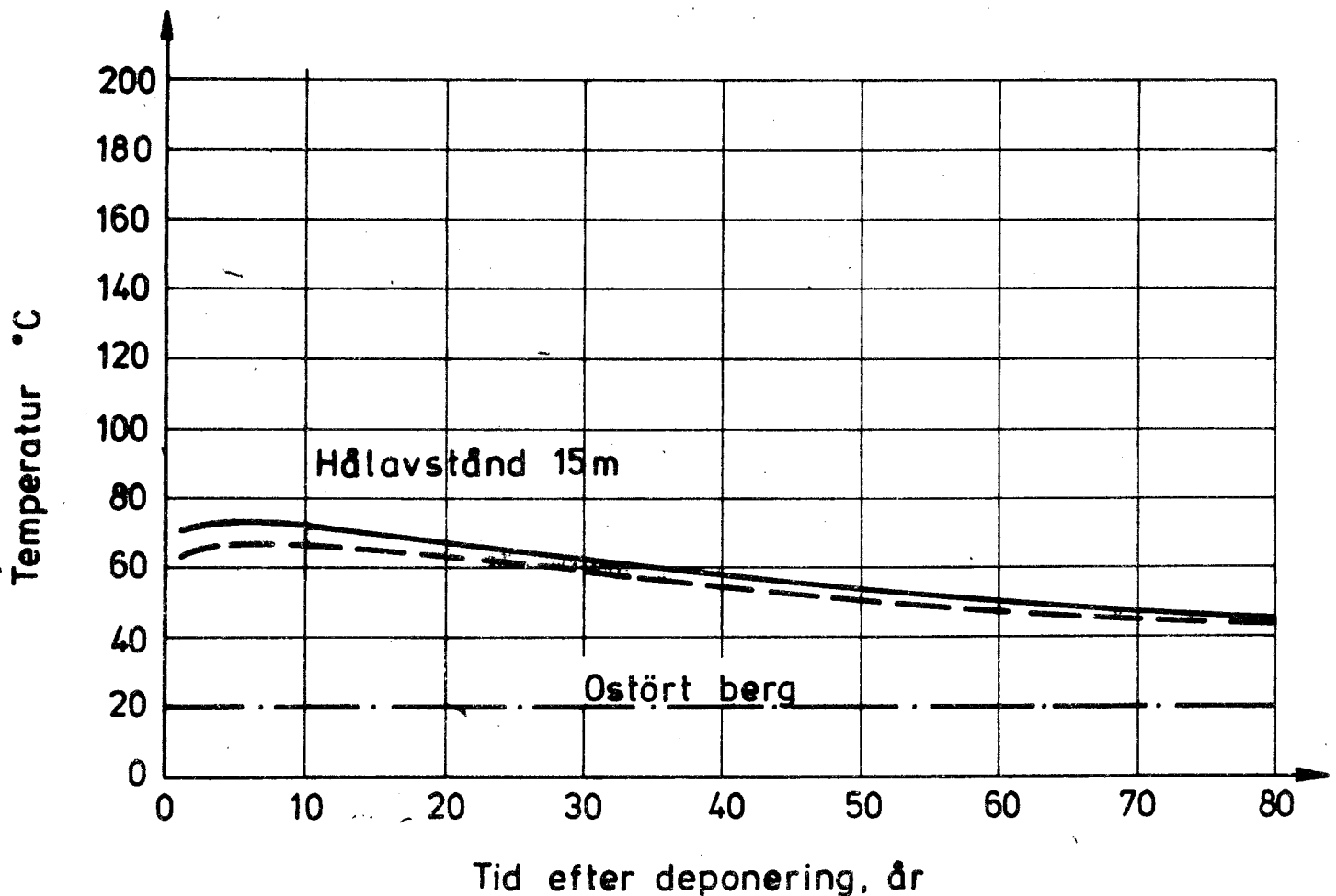
Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur

----- Hålväggens temp. vid denna behållare



Radiell temperaturfördelning i lera och berg
närmast kring den varmaste behållaren.

Upparbetat avfall.

Behållarediameter 450 mm

Håldiameter 600 mm

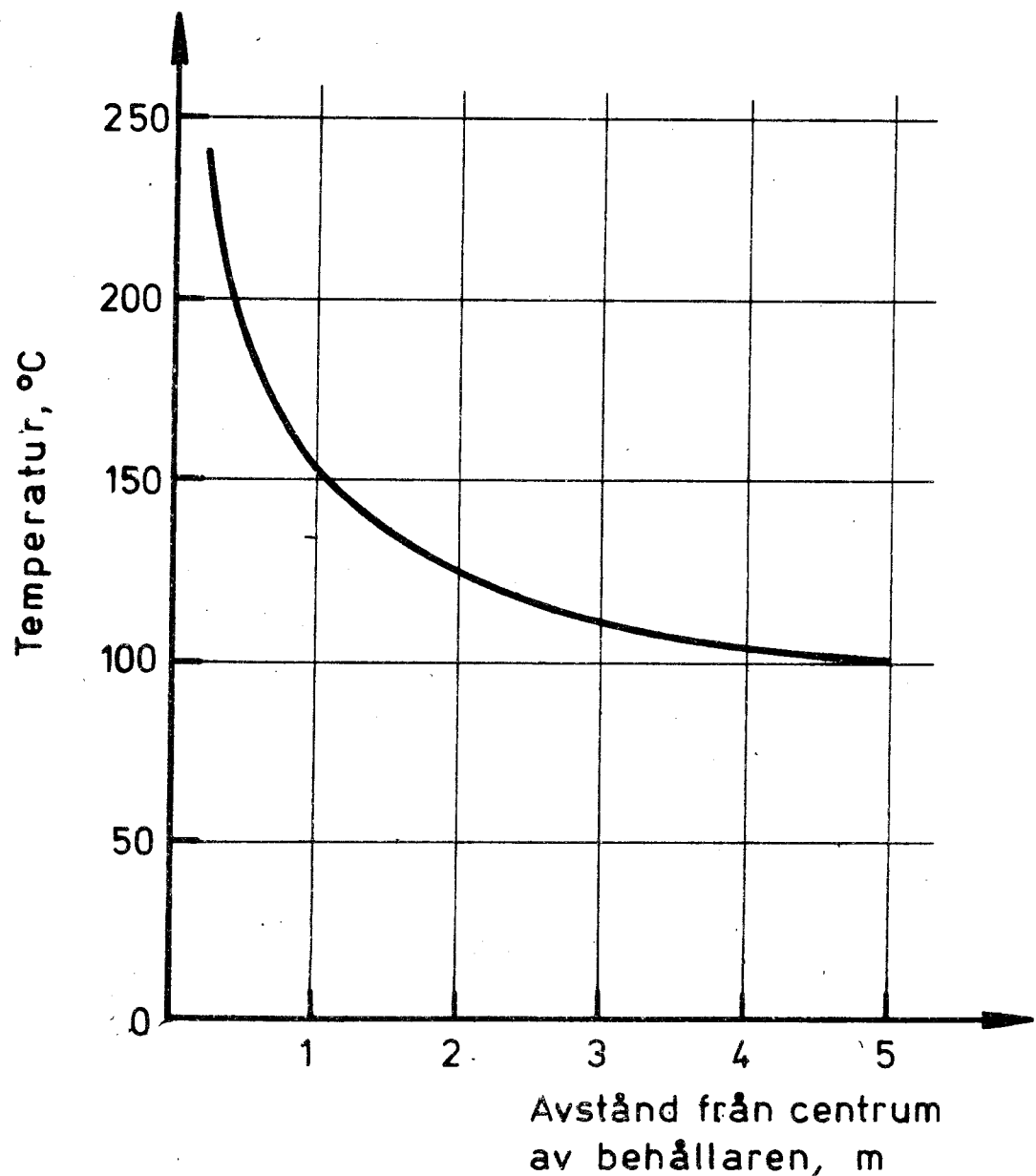
Avfallets ålder vid deponering 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 m

Hålens aktiva längd 4 m

Avstånd mellan hål 15 m

Tid efter deponering 10 år



Radiell temperaturfördelning i lera och berg
närmast kring den varmaste behållaren.
Upparbetat avfall.

Behållarediameter 300 mm

Håldiameter 450 mm

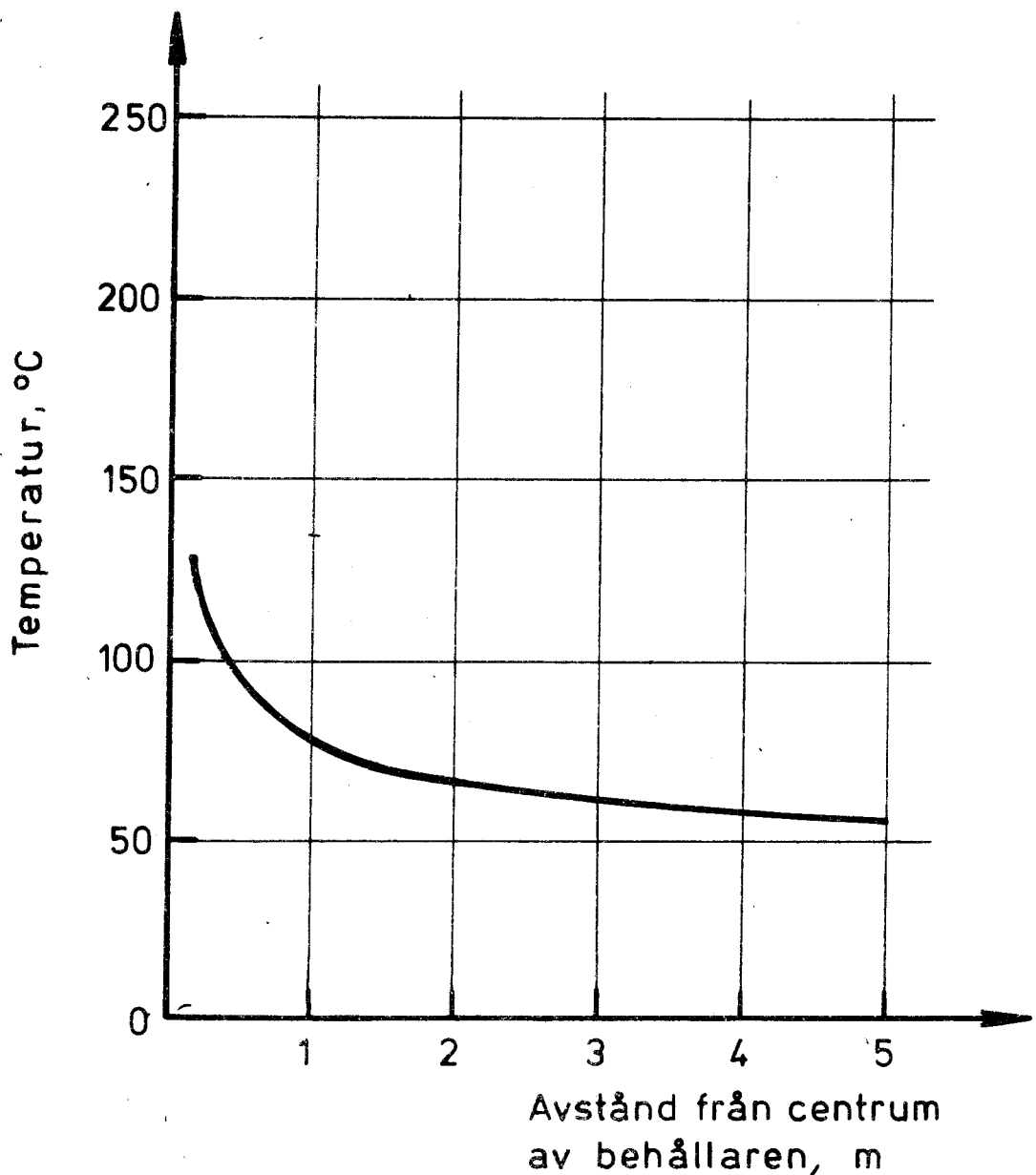
Avfallets ålder vid deponering 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 m

Hålens aktiva längd 4 m

Avstånd mellan hål 15 m

Tid efter deponering 10 år



Radial temperaturfördelning i lera och berg
närmast kring den varmaste behållaren.

Upparbetat avfall.

Behållarediameter 200 mm

Håldiameter 350 mm

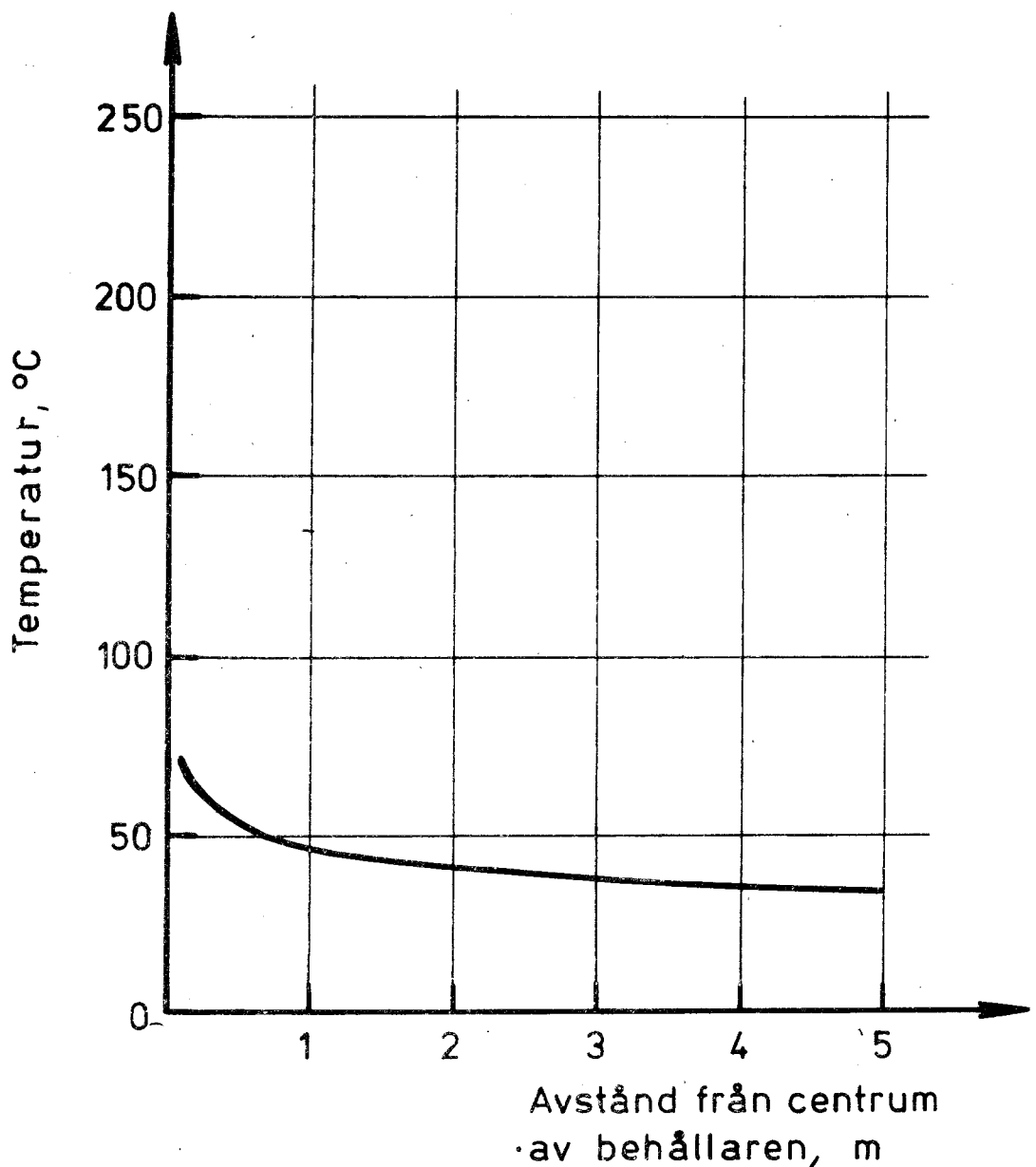
Avfallets ålder vid deponering 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 m

Hålens aktiva längd 4 m

Avstånd mellan hål 15 m

Tid efter deponering 10 år



Makroskopisk temperaturfördelning i förvaringsdepå
Upparbetat avfall.

Behållarediameter 300 mm

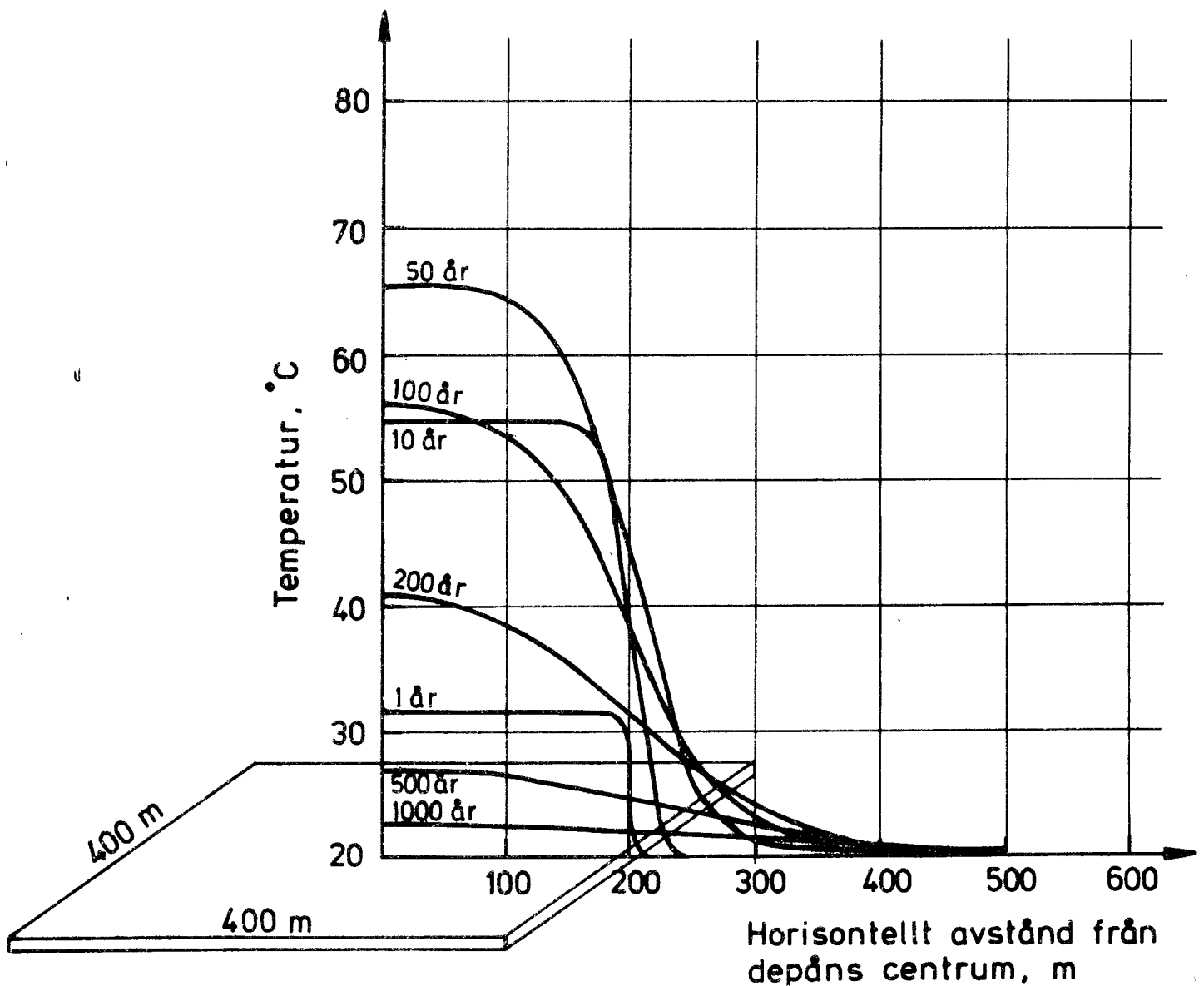
Håldiameter 450 mm

Avfallets ålder vid dep. 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 m

Hålens aktiva längd 4 m

Avstånd mellan hål 15 m



1977-03-17

Direktdeponering. Parameterstudie

Behållarediameter	650 MM
Håldiameter	900 MM
Ålder vid deponering	10 år
Initial värmeutveckling	860 W/beh = 195 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4.4	5	34.4	~ 160	~ 161	~ 40
4.4	15	3.82	~ 46	~ 48	~ 10
4.4	30	0.956	~ 41	~ 44	~ 1
17.6	5	138	~ 545	~ 546	~ 50
17.6	15	15.3	~ 90	~ 92	~ 30
17.6	30	3.82	~ 52	~ 55	~ 6
70.4	5	550	~ 1 700	—	~ 60
70.4	15	61.1	~ 210	~ 211	~ 50
70.4	30	15.3	~ 80	~ 82	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

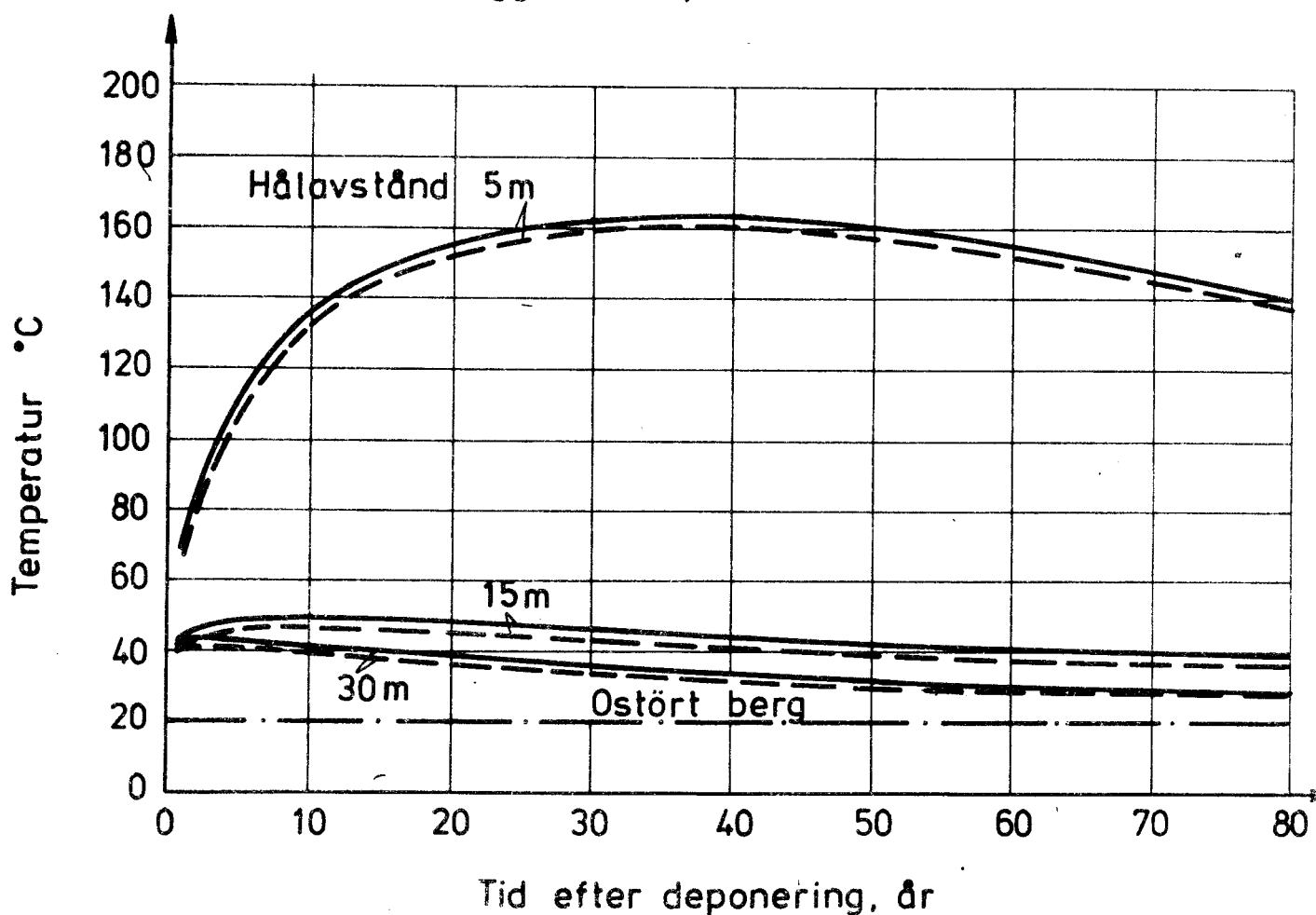
Avfallets ålder vid dep: 10 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 4.4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

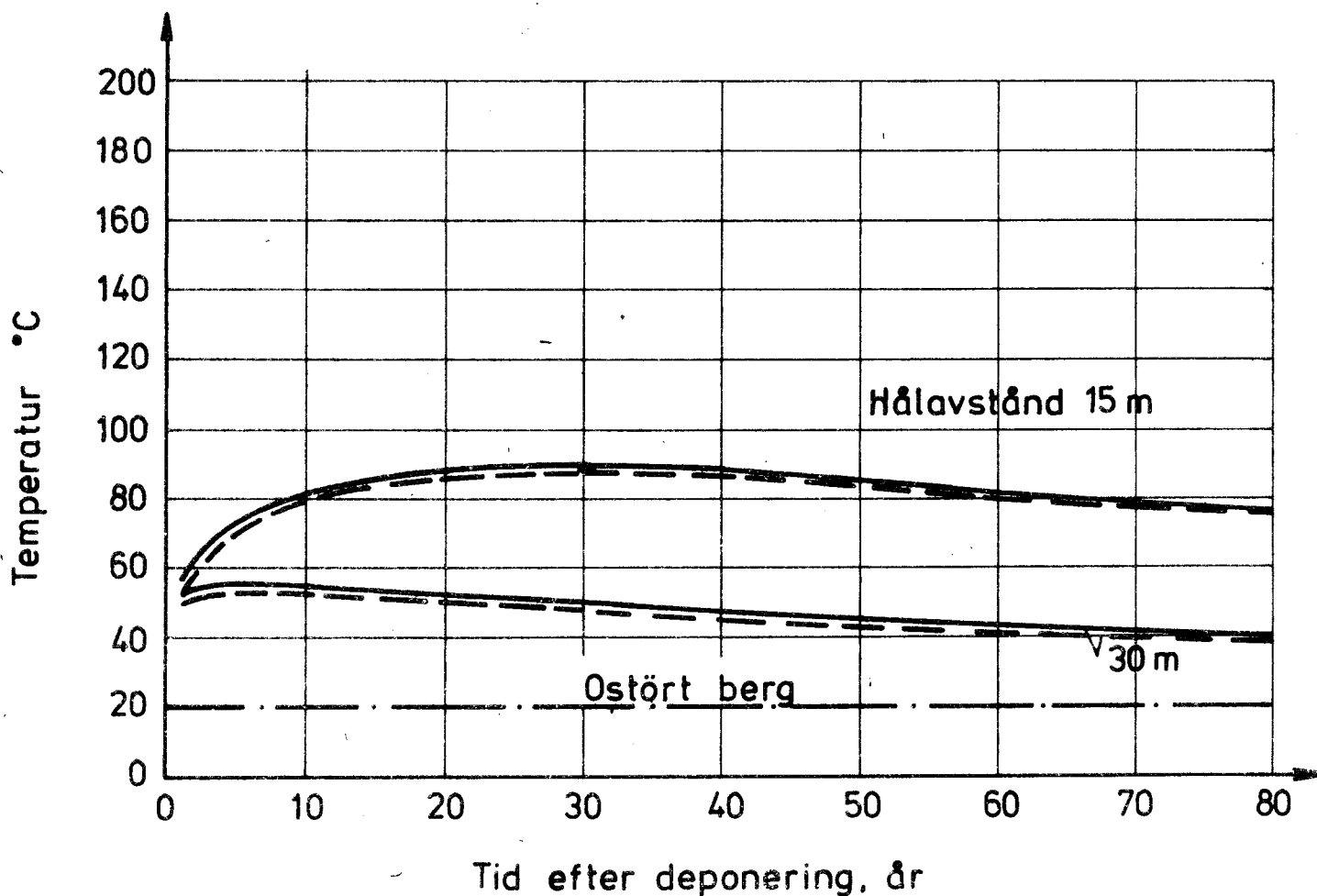
Avfallets ålder vid dep: 10 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 17.6m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

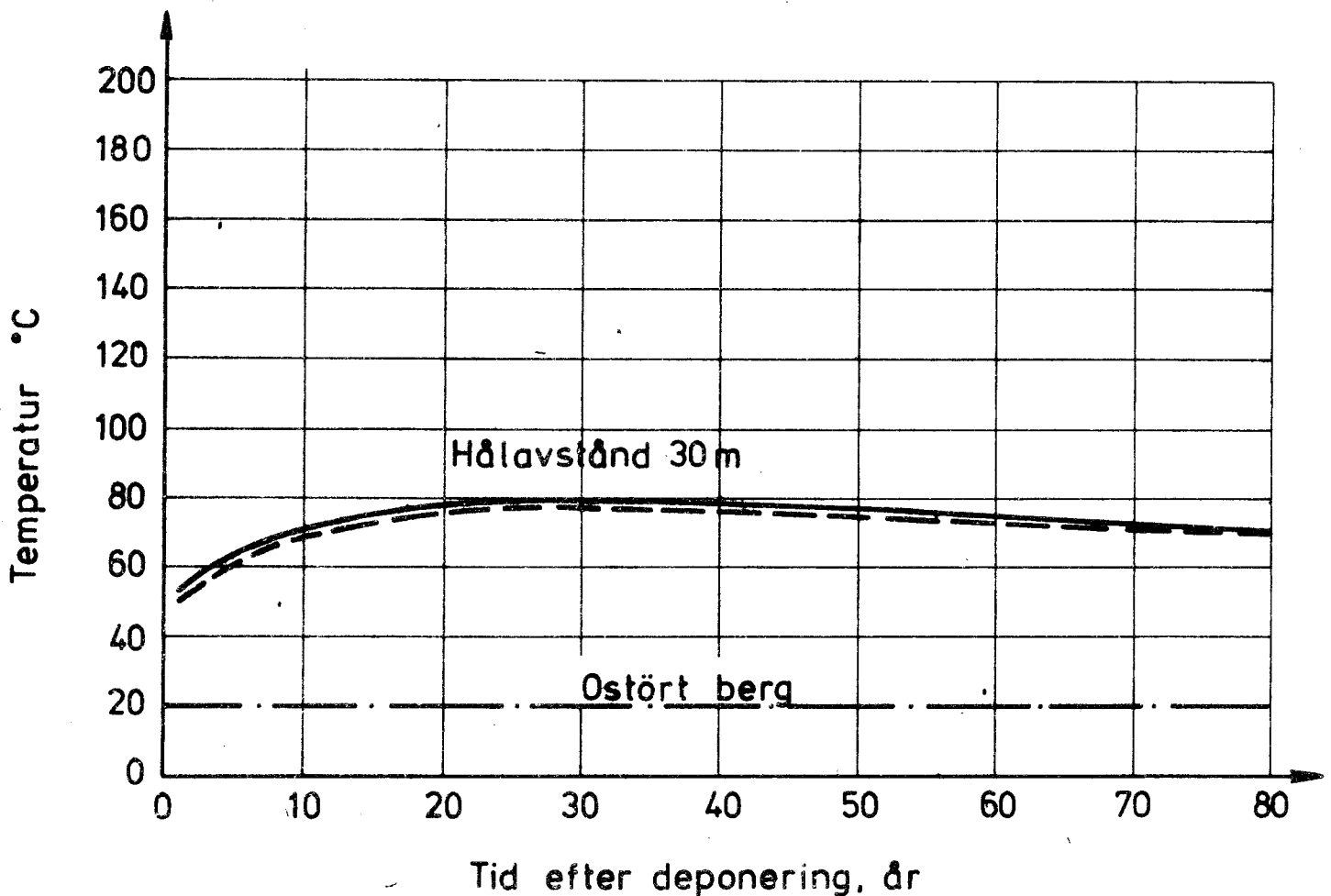
Avfallets ålder vid dep: 10 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 70.4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



1977-03-17

Direktdeponering. Parameterstudie

Behållarediameter	650 MM
Håldiameter	900 MM
Ålder vid deponering	30 år
Initial värmeutveckling	520 W/beh = 118 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4.4	5	20.8	~ 110	~ 111	~ 40
4.4	15	2.31	~ 36	~ 38	~ 10
4.4	30	0.578	~ 33	~ 35	~ 2
17.6	5	83.2	~ 350	~ 351	~ 50
17.6	15	9.24	~ 63	~ 64	~ 25
17.6	30	2.31	~ 40	~ 42	~ 6
70.4	5	333	~ 1 050	—	~ 80
70.4	15	37.0	~ 140	~ 141	~ 50
70.4	30	9.24	~ 57	~ 58	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

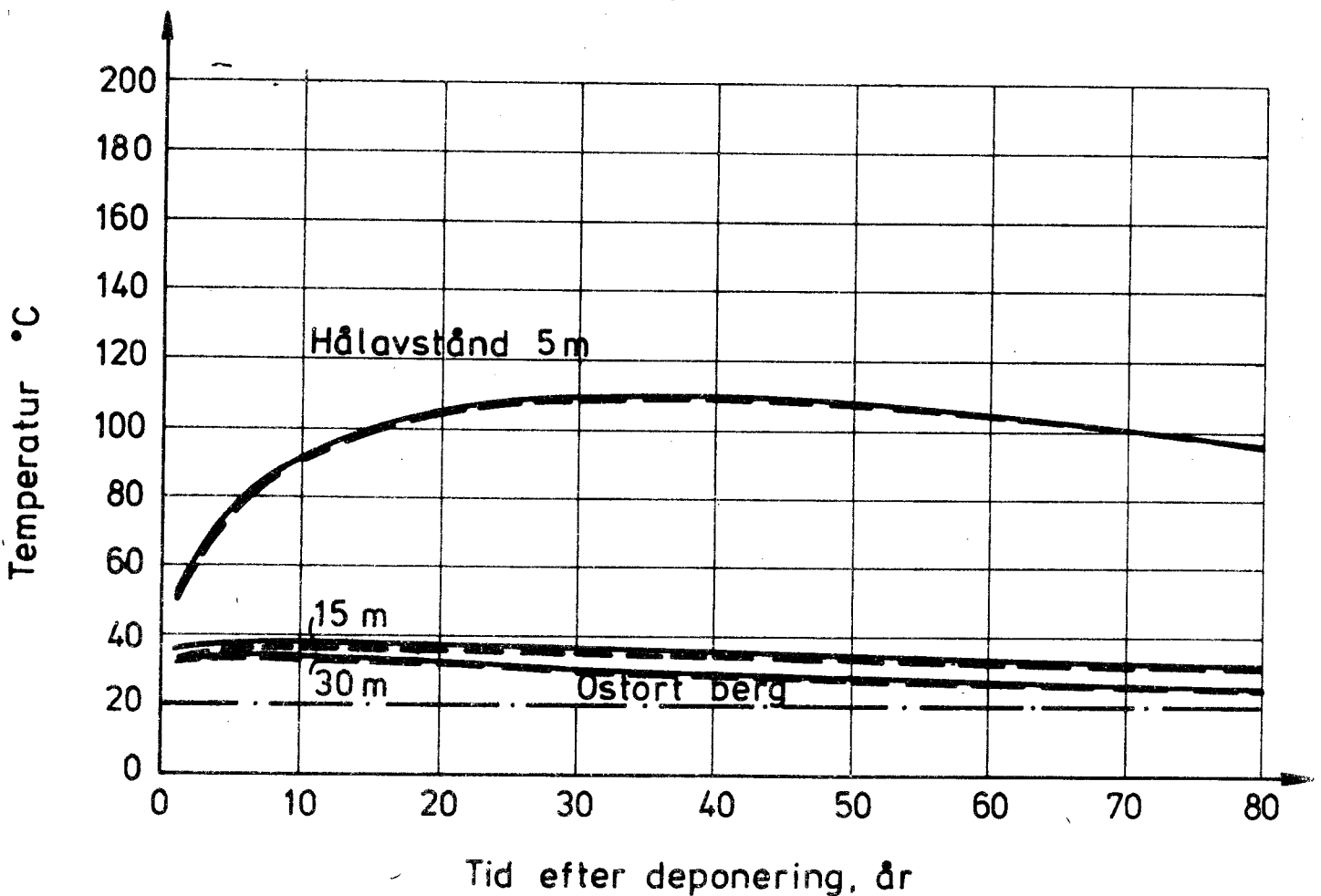
Avfallets ålder vid dep: 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 4.4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter : 900 mm

Avfallets ålder vid dep: 30 år

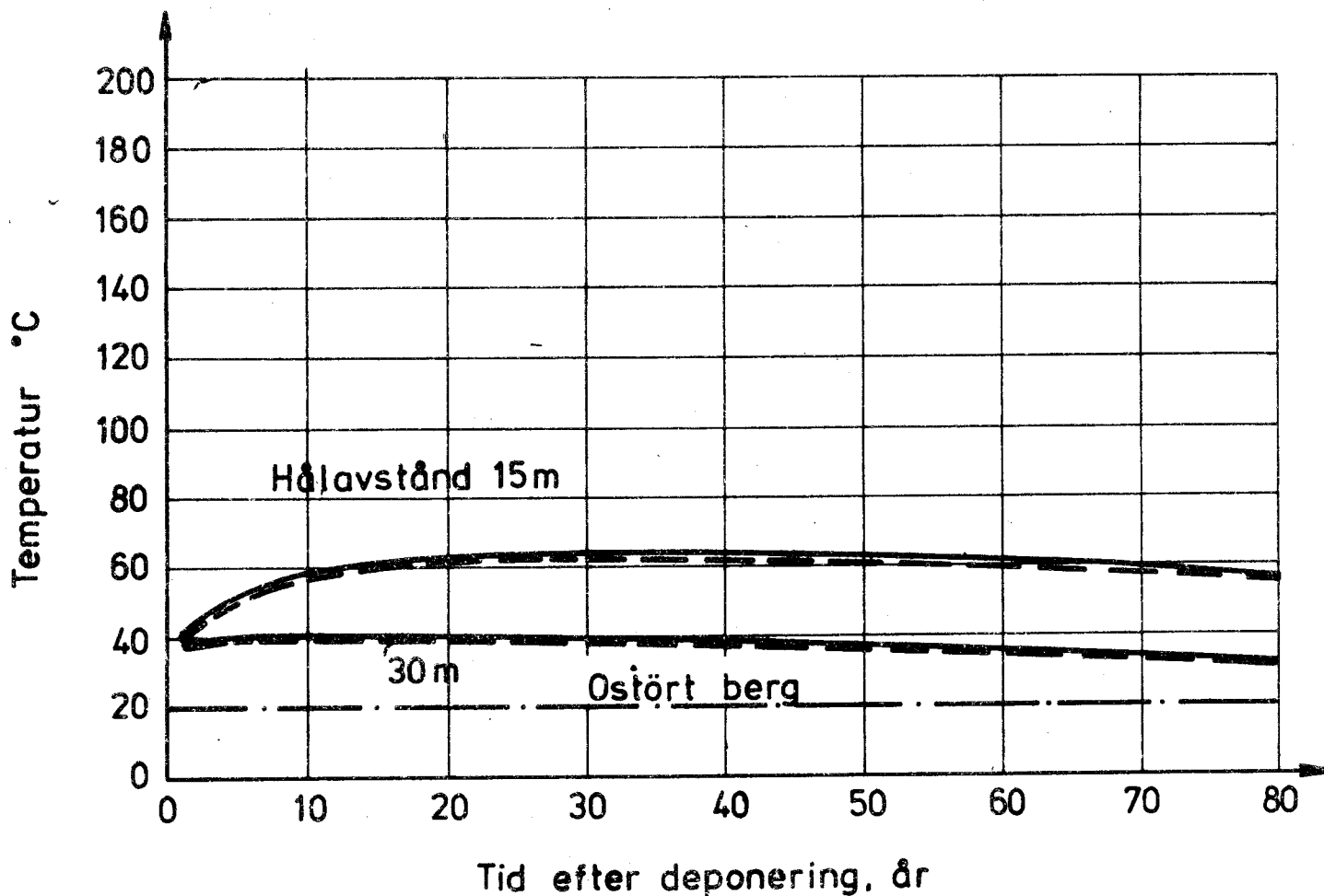
Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 17.6 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur

- - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

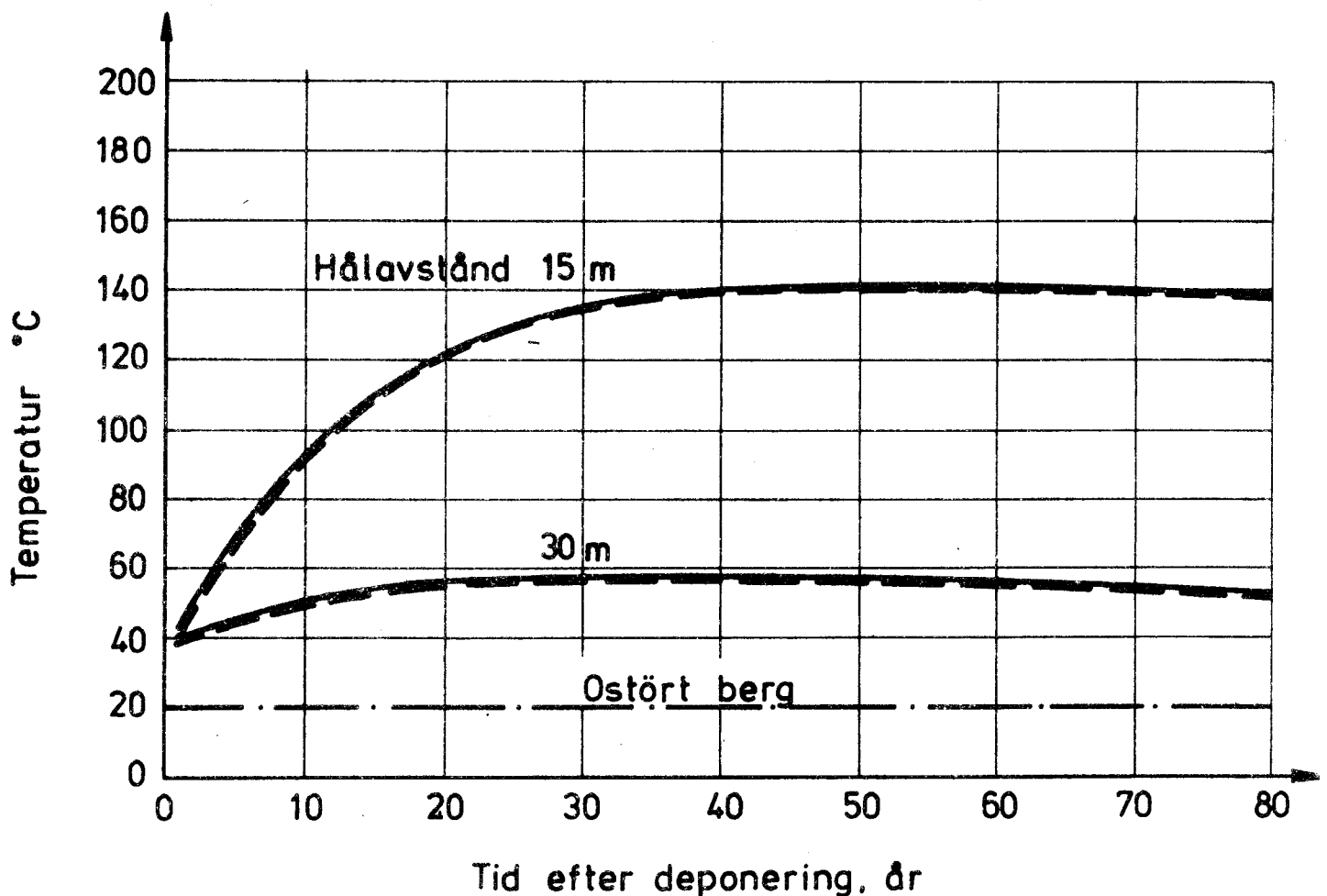
Avfallets ålder vid dep: 30 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 70.4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
- - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering. Parameterstudie

Behållarediameter	650 MM
Håldiameter	900 MM
Ålder vid deponering	50 år
Initial värmeutveckling	310 W/beh = 70 W/m
Förvaringsdepåns dimensioner	400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4.4	5	12.4	~ 73	~ 74	~ 40
4.4	15	1.38	~ 30	~ 31	~ 10
4.4	30	0.344	~ 28	~ 29	~ 2
17.6	5	49.6	~ 220	~ 221	~ 50
17.6	15	5.51	~ 45	~ 46	~ 30
17.6	30	1.38	~ 32	~ 33	~ 10
70.4	5	198	~ 670	~ 671	~ 60
70.4	15	22.0	~ 90	~ 91	~ 50
70.4	30	5.51	~ 42	~ 43	~ 40

Ostörda bergets temperatur +20°C.

Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter : 900 mm

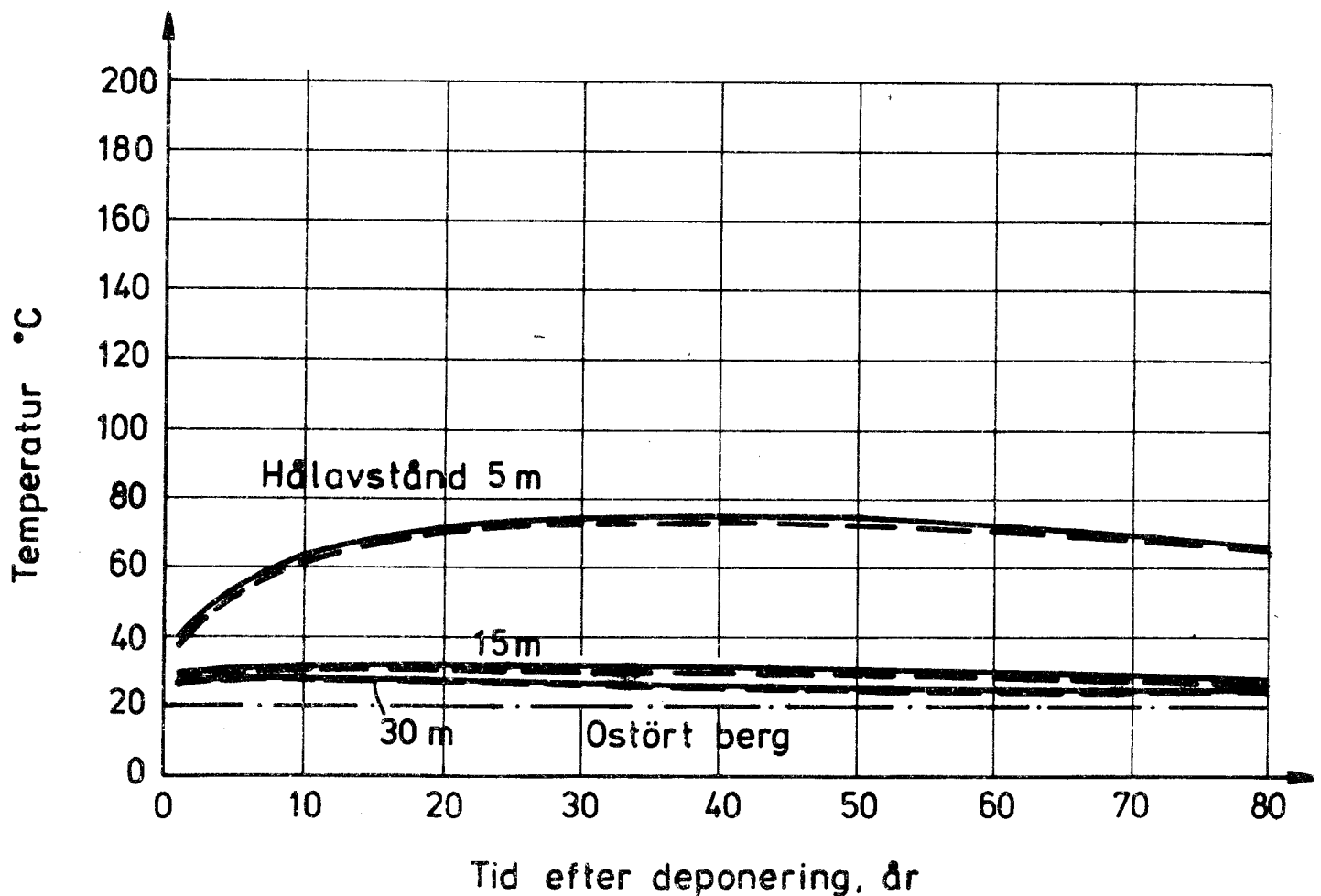
Avfallets ålder vid dep: 50 år

Förvaringsdepåns dimensioner : 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 4.4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
 - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

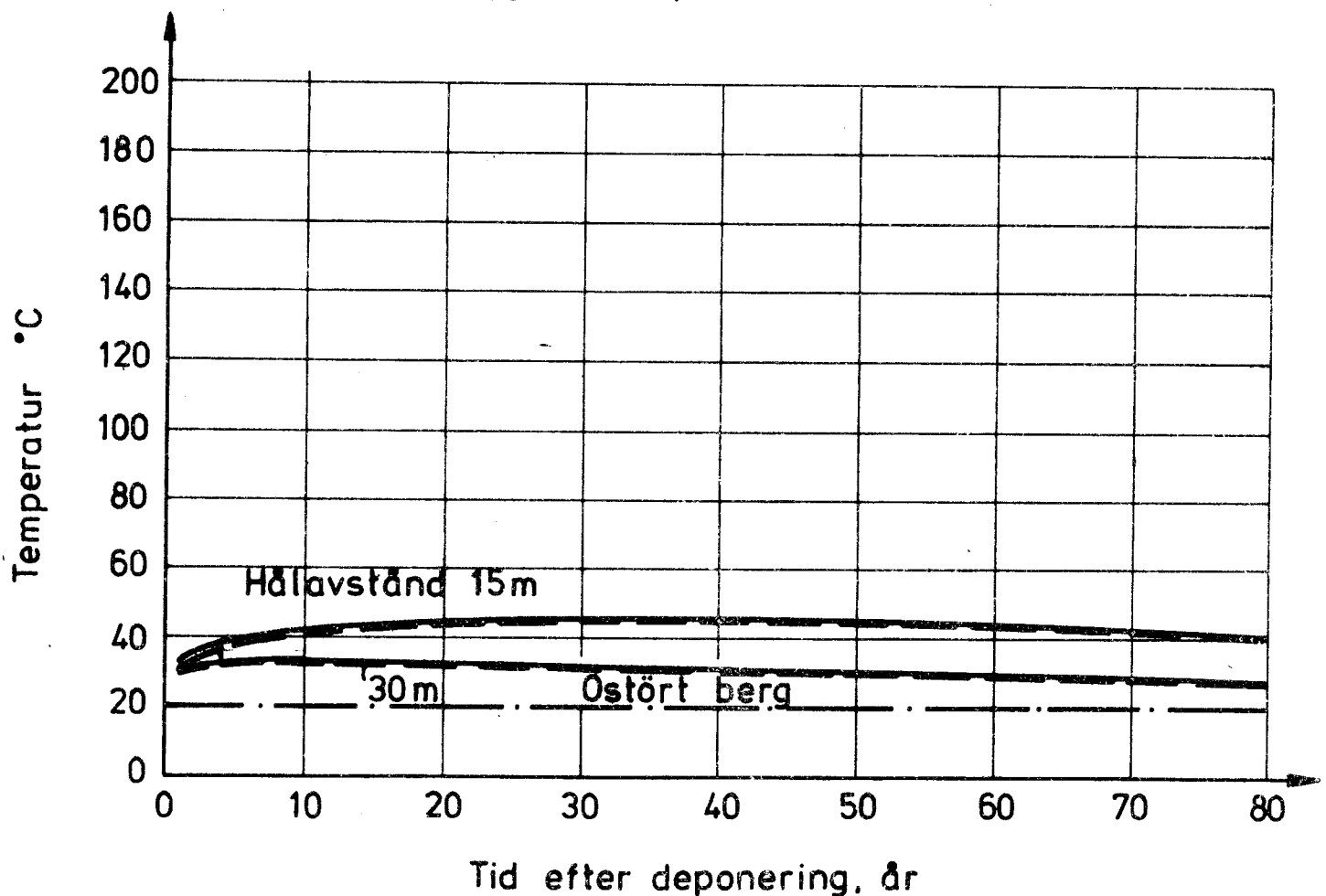
Avfallets ålder vid dep: 50 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 17.6 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
- - - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



Direktdeponering

Behållarediameter: 650 mm

Håldiameter: 900 mm

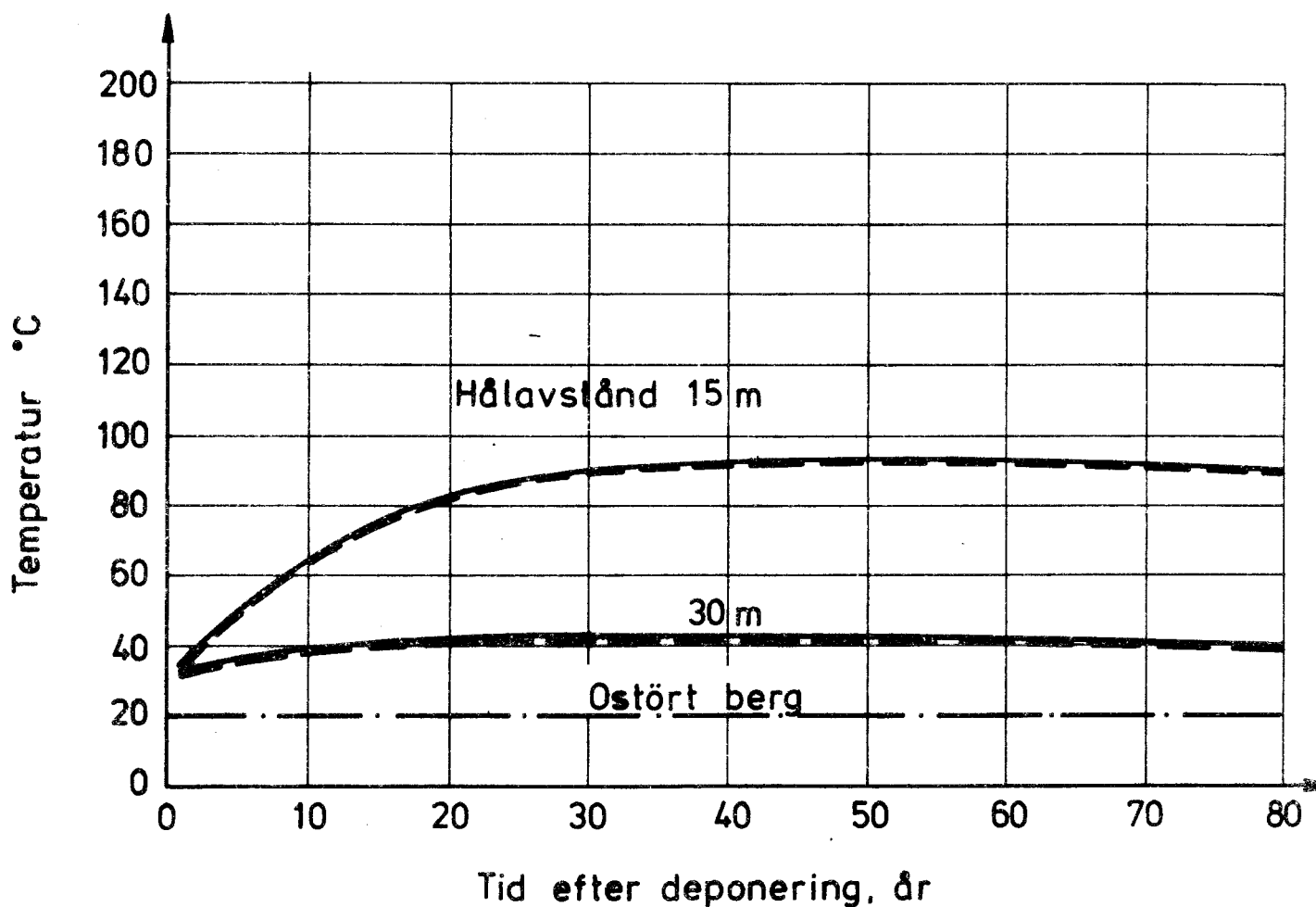
Avfallets ålder vid dep: 50 år

Förvaringsdepåns dimensioner: 400 x 400 m

Hålens aktiva längd: 70.4 m

Avstånd mellan hål: Se fig.

———— Varmaste behållarens yttemperatur
- - - - Hålväggens temp. vid denna behållare



1977-03-17

Direktdeponering. Parameterstudie

Behållarediameter 650 MM
 Håldiameter 1 200 MM
 Ålder vid deponering 10 år
 Initial värmeutveckling 860 W/beh = 195 W/m
 Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 M

Hålens aktiva längd, M	Avstånd mellan hål, M	Initial värmeutveckling, W/m ² depåarea	Max temp på hålväggen °C	Max temp på behållareytan °C	Tid, År
4.4	5	34.4	~ 158	~ 160	~ 40
4.4	15	3.82	~ 44	~ 48	~ 10
4.4	30	0.956	~ 38	~ 44	~ 1
17.6	5	138	~ 542	~ 544	~ 50
17.6	15	15.3	~ 88	~ 91	~ 30
17.6	30	3.82	~ 50	~ 55	~ 6
70.4	5	550	~ 1 700	—	~ 60
70.4	15	61.1	~ 208	~ 210	~ 50
70.4	30	15.3	~ 78	~ 81	~ 30

Ostörda bergets temperatur +20°C.

Radiell temperaturfördelning i lera och berg
närmast kring den varmaste behållaren.

Direktdeponering

Behållarediameter 650 mm

Håldiameter 900 mm

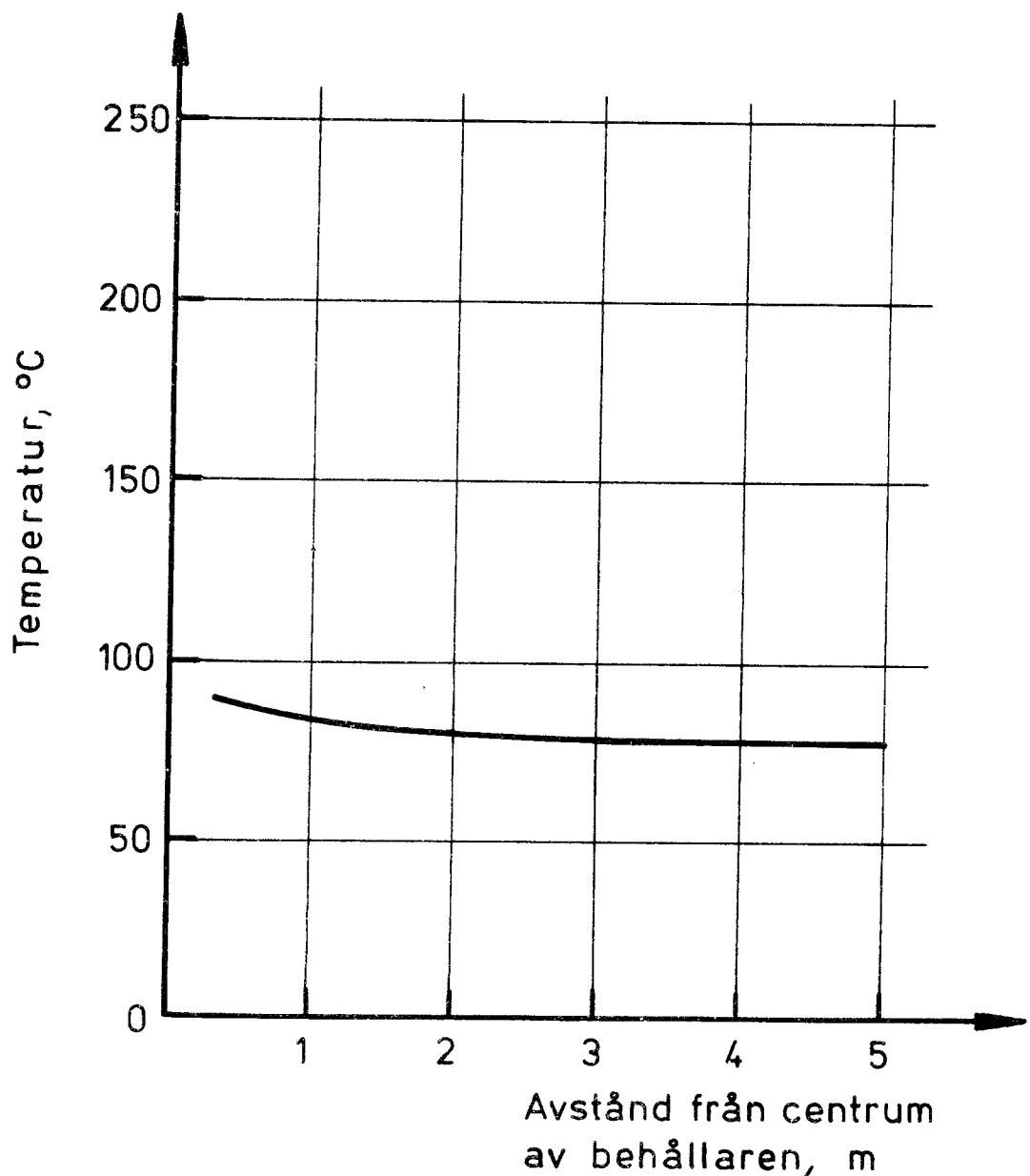
Avfallens ålder vid deponering 10 år

Förvaringsdepåns dimensioner 400 × 400 m

Hålens aktiva längd 17.6 m

Avstånd mellan hål 15 m

Tid efter deponering 30 år



Makroskopisk temperaturfördelning i förvaringsdepå
Direktdeponering.

Behållarediameter 650 mm

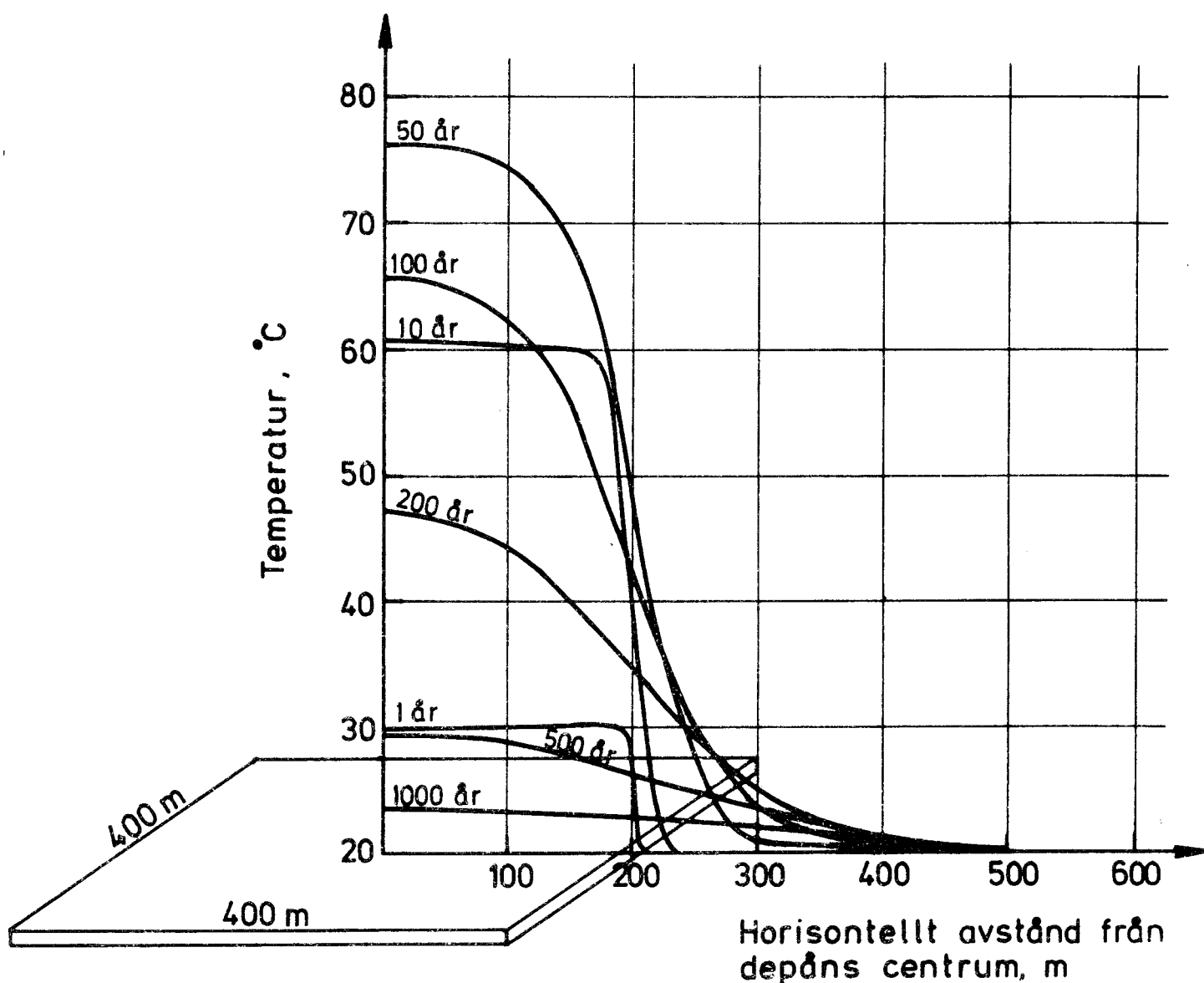
Håldiameter 900 mm

Avfallets ålder vid dep. 10 år

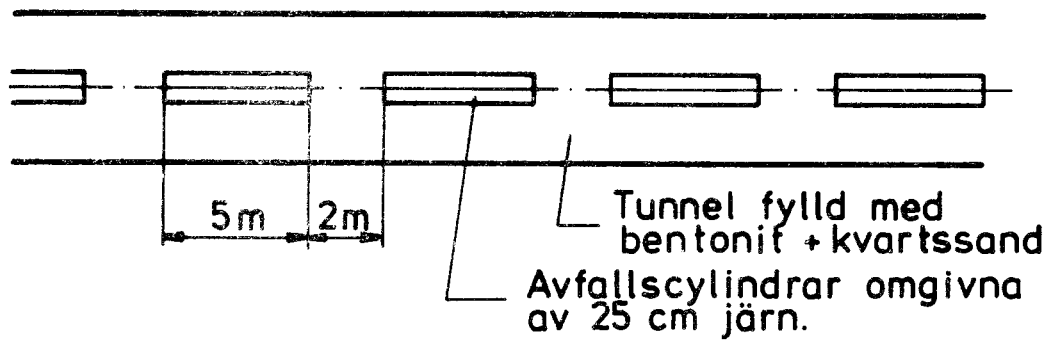
Förvaringsdepåns dimensioner 400 x 400 m

Hålens aktiva längd 17.6 m

Avstånd mellan hål 15 m



Varmaste behållarens yttemperatur vid direktdeponering i lerfyllda tunnlar i berget.



Behållarediameter inkl. järn 1150 mm

Behållarelängd inkl. järn 5 m

Deponering efter 30 år

Värmeutveckling vid deponering 520 W

Värmeledningsförmåga bentonit+kvartssand 3.35 w/m, °C
granit 3.35 w/m, °C

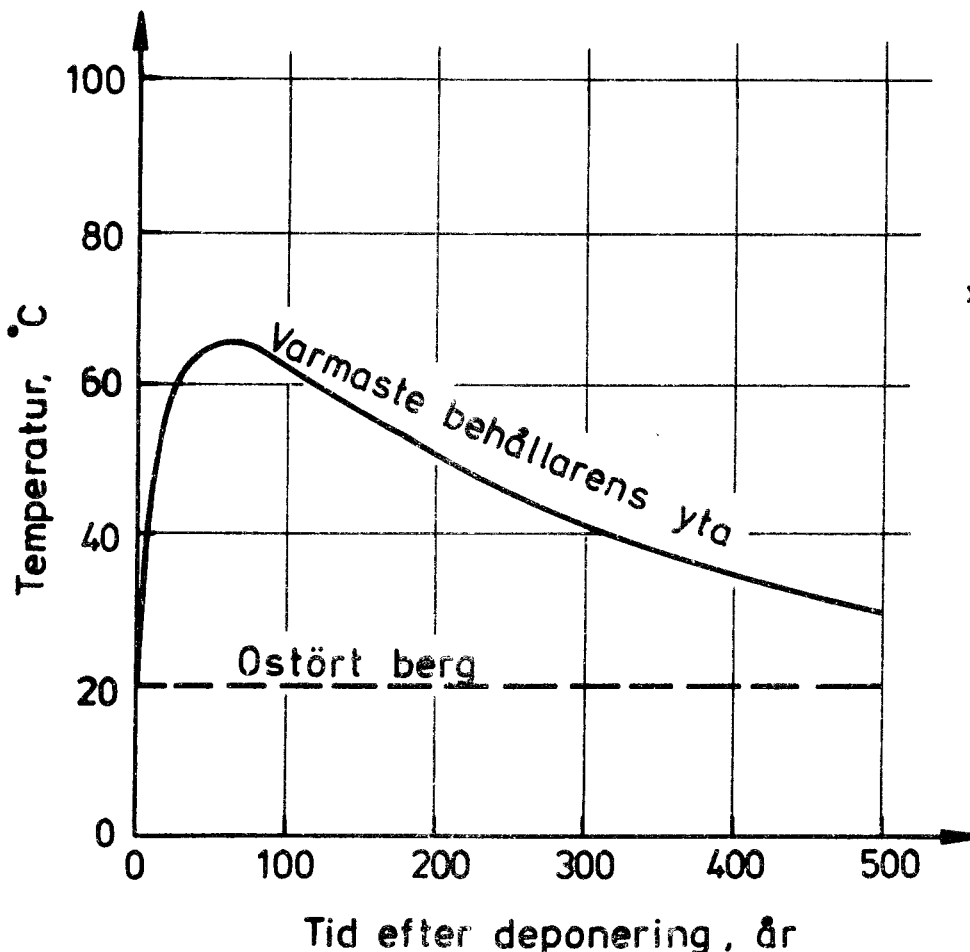
Deponeringsområde 400 × 400 m

Tunnellängd 400 m

Tunneldiameter Valfri^(x)

Hor. centrumavstånd mellan tunnlar 25 m

5 våningar, centrumavstånd mellan våningarna 25 m



x) Eftersom samma värmeledningsförmåga antas för granit och tunnelfyllning är behållarnas max-temperatur oberoende av tunneldiametern.

Titel och författare TEMPERATURSTÖRNINGAR I URBERG ORSAKADE AV UNDERJORDSLAGRING AV RADIOAKTIVT AVFALL			Org enh och nr TPM-RV-375
Roland Blomquist			Antal ex/Antal sid 25/11 + fig
			Datum 1974-12-06
Ersätter	Kompletterar	Konto nr 58593	Godkänd av <i>K Luthman</i>
Distribueras till DW Hultgren 20 ex CRV Luthman RV Sjöholm			

Text

SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport redovisar en första orienterande genomräkning av de temperaturstörningar som erhålls i berggrunden i samband med lagring av högaktivt avfall. I rapporten behandlas såväl lokal temperaturstörning kring enskild behållare som den makroskopiska temperaturstörningen i en förvaringsdepå med ett stort antal avfallsbehållare fördelade i en djupt liggande zon av urberget. För det senare fallet har ett datorprogram framtagits. Rapporten redovisar också beräknade maximaltemperaturer i avfallsmaterialet.

INNEHÅLL

	<u>sid</u>
1. ALLMÄNT	3
2. DET HÖGAKTIVA AVFALLETS FORM OCH VÄRMEUTVECKLING	3
3. FYSIKALISKA DATA FÖR URBERG	3
4. TEMPERATURSTÖRNING KRING ENSKILD AVFALLSBEHÅLLARE	4
4.1 Beräkningsmetodik	4
4.2 Beräknade temperaturstörningar	4
5. MAKROSKOPISKA TEMPERATURSTÖRNINGAR I OCH KRING EN DEPÅ AV ETT STORT ANTAL AVFALLSBEHÅLLARE	5
5.1 Förutsättningar beträffande förvaringsdepåns geometriska utformning	5
5.2 Beräkningsmetodik	5
5.3 Beräknade temperaturstörningar	7
6. ENSKILDA AVFALLSBEHÅLLARES MAX YTTEMPERATUR	8
7. TEMPERATURER INUTI AVFALLSBEHÅLLARE	10
8. REFERENSER	11

1. ALLMÄNT

Som framgår av AKA-utredningens lägesrapport [1] är deponering i urberg ett aktuellt alternativ beträffande slutlig förvaring av högaktivt avfall. Denna slutliga deponering avses ske direkt i berget utan speciellt anordnade kylsystem. I avfallet utvecklade värme avleds via omgivande berg. I deponeringszonen fås en ökning av bergets temperatur. På uppdrag av Åke Hultgren, DW, har en första orienterande genomräkning av uppträdande temperaturstörningar utförts.

Beräkningarna avser dels temperaturförhållanden kring enskild förvaringsbehållare, dels den makroskopiska temperaturfördelningen i och kring hela deponeringsområdet och dels den i det radioaktiva materialet erhållna maximaltemperaturen.

2. DET HÖGAKTIVA AVFALLETS FORM OCH VÄRMEUTVECKLING

Sannolik form för det solidifierade högaktiva avfallet är långsmala cylindriska behållare. Typisk diameter kan vara 10 till 30 cm och typisk längd 1 till 3 m. Förväntad ungefärlig värmeutveckling i avfallet anges i nedanstående tabell.

Svalningstid, år	1	10	30	50	100	1000
Värmeutveckling, W/liter	100	10	6.0	3.5	1.0	0.02

I [2] finns för viss typ av avfall detaljerade tabeller över värmeutvecklingen uppdelad på i avfallet ingående isotoper.

3. FYSIKALISKA DATA FÖR URBERG

Urberget förutsättes bestå av granit med följande data:

Densitet	2700	kg/m ³
Värmekapacitivitet	800	J/kg, °C
Värmekonduktivitet	3.35	W/m, °C
Värmediffusivitet	0.15 · 10 ⁻⁵	m ² /s

4. TEMPERATURSTÖRNING KRING ENSKILD AVFALLS- BEHÅLLARE

4.1 Beräkningsmetodik

Enligt [3] gäller för en cylindrisk hålighet på stort djup i berget vid termisk jämvikt

$$\Delta T = \frac{Q \cdot \ln \left(\frac{2L}{D} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \quad (1)$$

där

ΔT	temperaturskillnad mellan hålighetens begränsningsyta och berget på långt avstånd från håligheten	$^{\circ}\text{C}$
Q	från håligheten angiven effekt	W
L	hålighetens längd	m
D	hålighetens diameter	m
λ	bergets värmekonduktivitet	W/m, $^{\circ}\text{C}$

Då värmeavgivningen från avfallet avtar kontinuerligt med tiden kommer någon fullständigt stationär temperaturfördelning ej att uppnås så länge värmeutveckling pågår. Jämförande beräkning redovisad i avsnitt 5 visar dock att man efter en inledande period på några månader genom insättande av vid varje tillfälle aktuell effektutveckling kan beräkna temperaturskillnaden med hjälp av ekv (1) med tillräcklig noggrannhet. Bergtemperaturen kring en enskild behållare anpassar sig till jämviktstillståndet relativt sett betydligt snabbare än vad effektutvecklingen förändras.

4.2 Beräknade temperaturstörningar

I Fig 1 t o m Fig 5 visas enligt ekv (1) beräknad temperaturskillnad mellan hålighetens begränsningsyta och berget på långt avstånd därifrån. Avfallsparametrarna har i figurerna varierats enligt följande:

Fig	Effektutveckling	Diameter	Längd
1	1 W/ℓ	10 - 30 cm	1 - 3 m
2	6	10 - 30	1 - 3
3	10	10 - 30	1 - 3
4	20	10 - 30	1 - 3
5	100	10 - 30	1 - 3

Angiven temperaturskillnad avser som tidigare nämnts skillnaden mellan bergytan kring avfallsbehållaren och berget på långt avstånd därifrån. Om det mellan behållaren och bergväggen finns en luftspalt kommer det över denna spalt att finnas ytterligare en temperaturdifferens. Storleken på denna beror av spaltens bredd och effekten i avfallsbehållaren. Som exempel kan nämnas att för en 1 mm:s radiell luftspalt kring en avfallsbehållare med effektutvecklingen 10 W/ℓ och diametern 30 cm blir den beräknade temperaturdifferensen över spalten ca 20°C.

5. MAKROSKOPISKA TEMPERATURSTÖRNINGAR I OCH KRING EN DEPÅ AV ETT STORT ANTAL AVFALLSBEHÅLLARE

5.1 Förutsättningar beträffande förvaringsdepåns geometriska utformning

Av [1] framgår att rimligt deponeringsdjup kan vara några hundratal meter under markytan. För sådan förvaring förefaller det mest ekonomiskt att utforma depån med ett djupt schakt ned till önskad lägsta nivå och sedan från detta schakt spränga ut sidotunnlar på ett antal lämpliga nivåer. Detta ger en deponeringszon i berget som kan sträcka sig kanske några hundra meter i djupled och kanske något hundratal meter horisontellt i alla riktningar kring huvudschaktet.

5.2 Beräkningsmetodik

Den i föregående avsnitt antagna depåmodellen kräver en beräkningsmetodik som behandlar transient värmeledning i tre dimensioner i en kropp med oändlig utsträckning. Beräkningen måste också ta hänsyn till att värmeutvecklingen förändras med tiden.

Om värmeutvecklingen antas jämnt fördelad i en rätblocksförmad volym kan temperaturförloppet i och utanför denna volym enligt [4] beräknas såsom

$$\Delta T = \frac{q \cdot e^{-\lambda t}}{8c} \int_0^t e^{\lambda \mu} \left[\left(\operatorname{erf} \frac{x+a}{\sqrt{4k\mu}} - \operatorname{erf} \frac{x-a}{\sqrt{4k\mu}} \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{y+b}{\sqrt{4k\mu}} - \operatorname{erf} \frac{y-b}{\sqrt{4k\mu}} \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{z+d}{\sqrt{4k\mu}} - \operatorname{erf} \frac{z-d}{\sqrt{4k\mu}} \right) \right] d\mu \quad (2)$$

där

a	volymens halva längd	m
b	volymens halva bredd	m
c	värme kapacitivitet	J/m ³ , °C
d	volymens halva höjd	m
erf	error function	
k	värmediffusivitet	m ² /s
q	effektutveckling vid deponering	W/m ³
ΔT	temperaturskillnad gentemot temperaturen på långt avstånd från den värmeutvecklande volymen	°C
t	tid	s
x	längdkoordinat	m
y	breddkoordinat	m
z	höjdkoordinat	m
λ	sönderfallskonstant	1/s
μ	integrationsvariabel	s

Origo för x, y, z-systemet förutsätts ligga i centrum av den värmeutvecklande volymen.

Tillämpning av denna metod på förvaringsdepån medför att man får approximera värmeutvecklingen till att vara jämnt fördelad i en viss volym. Det är möjligt att dela upp depåvolymen i önskat antal delar, tillämpa ekv (2) på varje sådan del var för sig och sedan addera beräknade temperaturtransienter i önskad punkt.

Det är också möjligt att dela upp de värmeproducerade isotoperna i önskat antal grupper, föreskriva initial värmeutveckling och sönderfallskonstant för varje grupp, tillämpa ekv (2) på varje grupp var för sig och sedan genom addition bestämma temperaturtransienten i önskad punkt.

Det är vidare möjligt att låta värmeproduktionen i olika delvolymerna av depån börja vid skilda tidpunkter och sedan genom addition av beräknade temperaturtransienter för de olika delvolymerna erhålla temperaturförloppet i önskad punkt.

För lösning av ekv (2) har i samråd med Tollander, RD, ett datorprogram framtagits. Integrationen utföres med hjälp av rutinen AINTAL [5] och för beräkning av erf-funktionen används en tidigare av Tollander utarbetad rutin. Programmet innefattar möjlighet att vid beräkningen dela upp avfallets värmeproducerande isotoper i önskat antal grupper.

5.3 Beräknade temperaturstörningar

Fig 6 visar beräknat temperaturförlopp i en förvaringsdepå med antagna dimensioner längd 200 m, bredd 200 m och höjd 300 m. Den jämnt fördelade effektutvecklingen har antagits ha initialvärdet 2120 kW. Detta motsvarar t ex 1000 behållare med längden 3 m och diametern 30 cm deponerade efter 10 år (initial effektutveckling 10 W/l). De värmeutvecklande isotoperna har vid beräkningen med stöd av [3] delats upp i 7 grupper för vilka föreskrivits individuell initial värmeutveckling och sönderfallskonstant. Fig 6 visar temperaturfördelningen i horisontell led. Utanför själva depåområdet övergår temperaturstörningen mot sfärisk form. Detta innebär att när man kommit ett stycke från depån är temperaturstörningen på visst avstånd från depåns centrum ungefär lika stor i alla riktningar.

I Fig 7 visas beräknat temperaturförlopp i en förvaringsdepå uppdelad i 4 värmeproducerande zoner. De 4 zonerna har vardera längden 200 m, bredden 200 m och höjden 3 m och är placerade rakt ovanför varandra med delningen 100 m i vertikalled. Totala initialeffekten i depån förutsätts

även här vara 2120 kW. I Fig 8 har centrumtemperaturen i de båda mittre skikten uppritats som funktion av tiden. Av figuren framgår även hur tiden för deponeringen påverkar temperaturstörningens storlek. De tre kurvorna avser samma mängd avfall deponerad efter respektive 10, 30 och 50 års svalning. Totala initialeffekten har antagits till respektive 2120, 1270 och 740 kW.

I Fig 9 slutligen visas det med hjälp av ekv (2) beräknade temperaturförloppet i berget omedelbart intill en ensam behållare med längden 3 m och diametern 30 cm. De tre kurvorna avser deponering efter respektive 10, 30 och 50 år. Specifika initialeffekten har satts till respektive 10, 6 och 3.5 W/liter. För anpassning till ekv (2) har cylindern approximerats med ett rätklock med längden 3 m, samma yta och samma totala värmeutveckling som den cylindriska behållaren. Som jämförelse har för deponeringstiden 10 år inlagts en kurva beräknad enligt ekv (1) utgående från den vid beräkningen enligt ekv (2) antagna effekttransienten. Som synes är överensstämmelsen god.

För uppskattning av temperaturförloppet vid annan initial-effekt kan nämnas att temperaturstörningarna enligt Fig 6, 7, 8 och 9 är direkt proportionella mot initialeffekten under hela tidsförloppet.

6. ENSKILDA AVFALLSBEHÅLLARES MAX YTTEMPERATUR

En enskild avfallsbehållares max yttemperatur kan sägas sammansatt av

- a) Den ostörda bergtemperaturen på långt avstånd från depån.
- b) Temperaturstegringen kring den aktuella behållaren p g a värmeavgivningen från omgivande behållare.
- c) Temperaturstegring i omgivande berg p g a behållarens egen värmeutveckling.
- d) Temperaturdifferens över spalten kring behållaren.

I princip kan en noggrann beräkning av bidraget enl b) göras genom att med hjälp av ekv (2) beräkna bidraget från varje enskild behållare i önskad punkt och sedan genom addition av resultaten fastställa totala bidraget. Med hänsyn till att depån innehåller ett stort antal behållare medför detta ett omfattande räknearbete. En förenklad metodik som säkert också ger gott resultat är att för beräkning av temperaturbidragen från längre bort belägna behållare direkt tillämpa ekv (2) på volymer innehållande hela grupper av behållare.

För det tidigare studerade behållare-exemplet med längden 3 m och diametern 30 cm har en beräkning gjorts av maximala yttemperaturen vid förvaring i avfallsdepån enligt Fig 7. Beräkningen har utförts enligt följande:

1. Från det makroskopiska temperaturförloppet enligt Fig 8 har subtraherats bidraget från den i centrum placerade behållaren. Detta bidrag har beräknats enligt ekv (2) för förutsättningen att behållarens effekt är jämnt fördelad i "tillhörande" bergvolym med dimensionerna ca 12.7 x 12.7 x 3 m.
2. Till resultatet har adderats temperaturstörningen kring en enskild behållare enligt Fig 9.
3. Till detta har sedan adderats en antagen temperaturdifferens över spalten kring behållaren. Differensen har satts till 20°C för 10 års svalning och har sedan antagits minska i direkt proportion till effektutvecklingen.
4. Till detta har slutligen adderats en till 15°C antagen bergtemperatur på långt avstånd från depån.

Resultatet framgår av Fig 10. Där anges behållarens yttemperatur som funktion av tiden vid förutsatt deponering efter respektive 10, 30 och 50 års svalning.

7. TEMPERATURER INUTI AVFALLSBEHÅLLARE

Om man bortser från störningsområden nära ändarna gäller för temperaturfördelningen inuti en slank solid cylinder med intern värmeutveckling

$$T = T_0 + \frac{q}{4\lambda} (r_0^2 - r^2) \tag{3}$$

där

q	intern effektutveckling	W/m ³
r	radie	m
r ₀	ytterradie	m
T	temperatur vid radie r	°C
T ₀	temperatur vid ytterradien r ₀	°C
λ	värmeledningsförmåga	W/m °C

Temperaturdifferensen ΔT mellan cylinderns yta och centrum blir

$$\Delta T = \frac{q r_0^2}{4\lambda} \tag{4}$$

I nedanstående tabell har samlats beräknade temperaturdifferenser centrum - ytan för ett antal olika effektutvecklingar och cylinderdiametrar och för en antagen värmeledningsförmåga av 1 W/m °C.

Diam	Effekt			
	10 W/ℓ	6 W/ℓ	3.5 W/ℓ	1.0 W/ℓ
10 cm	6.3 °C	3.8 °C	2.2 °C	0.6 °C
20	25	15	8.8	2.5
30	56	34	20	5.6

I Fig 11 redovisas maximala centrumtemperaturer för den tidigare studerade avfallsbehållaren med 30 cm:s diameter vid förvaring i avfallsdepå enligt Fig 7. Kurvorna har erhållits genom att till resultaten i Fig 10 addera den enligt ekv (4) beräknade temperaturdifferensen mellan behållarens centrum och mantelytan.

8. REFERENSER

1. Kärnkraftens högaktiva avfall,
Lägesrapport från Aka-utredningen den 24 juni
1974
2. Siting of Fuel Reprocessing Plants and Waste
Management Facilities,
ORNL-4451, USAEC, 1970
3. Rohsenow, Hartnett,
Handbook of Heat Transfer,
McGraw-Hill, New York, 1973
4. Mufti, Irshad R,
Geothermal Aspects of Radioactive Waste
Disposal into the Subsurface,
Journal of Geophysical Research, vol 76, no 35,
december 1971
5. Tollander B,
Routine No 1042:AINTAL,
AE Rutinbibliotek 66-03-14

/Wg

Fig 1

TEMPERATURSKILLNAD MELLAN DEN CYLINDERFORMADE HÅLIGHETENS
BEGRÄNSNINGSYTA OCH BERGET PÅ LÅNGT AVSTÅND DÄRIFRÅN.

EFFEKTUTVECKLING I CYLINDER 1 W/L

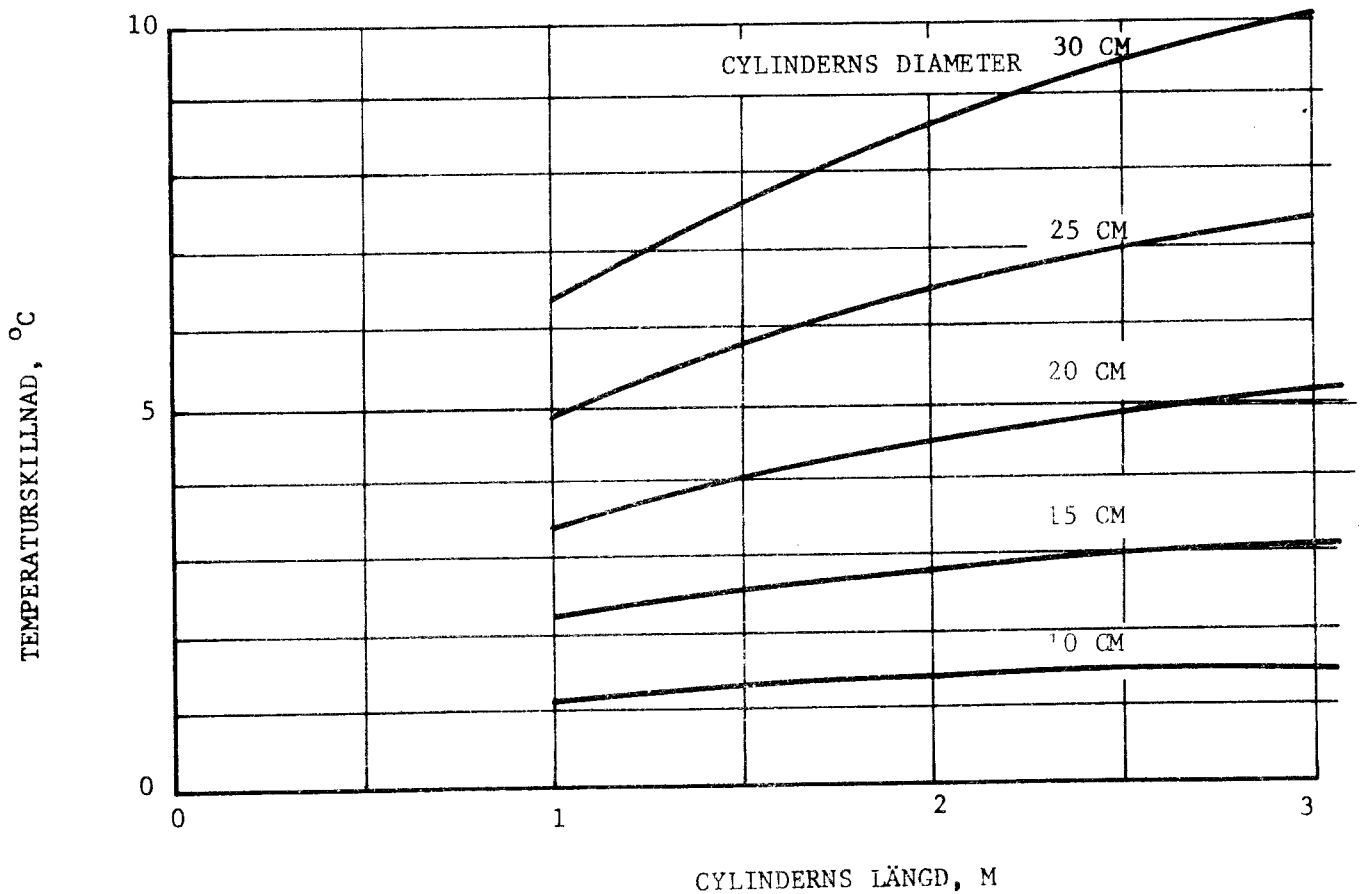


Fig 2

TEMPERATURSKILLNAD MELLAN DEN CYLINDERFORMADE HÄLIGHETENS
BEGRÄNSNINGSYTA OCH BERGET PÅ LÅNGT AVSTÅND DÄRIFRÅN.

EFFEKTUTVECKLING I CYLINDER 6 W/L

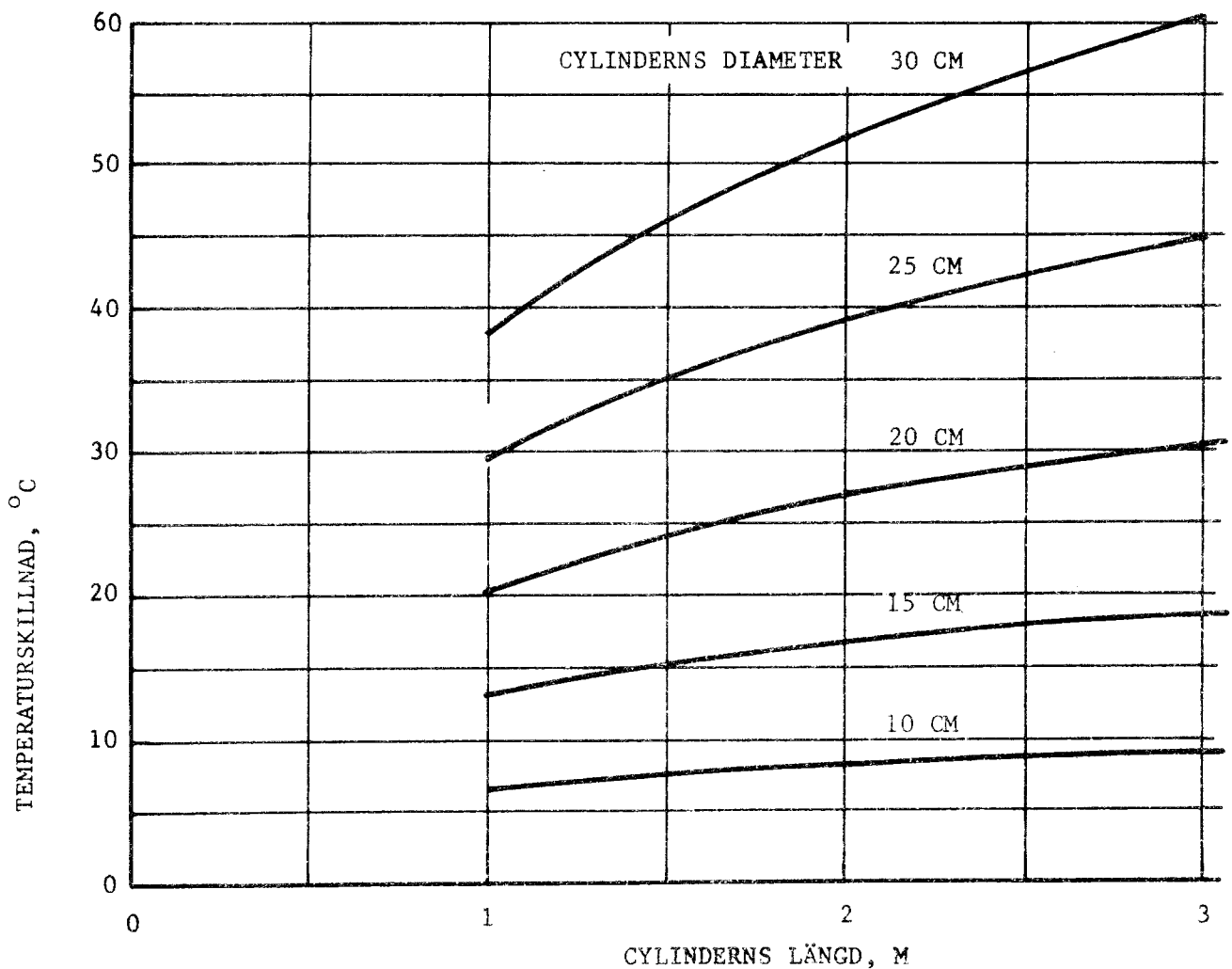


Fig 3

TEMPERATURSKILLNAD MELLAN DEN CYLINDERFORMADE HÅLIGHETENS
BEGRÄNSNINGSYTA OCH BERGET PÅ LÅNGT AVSTÅND DÄRIFRÅN.

EFFEKTUTVECKLING I CYLINDER 10 W/L

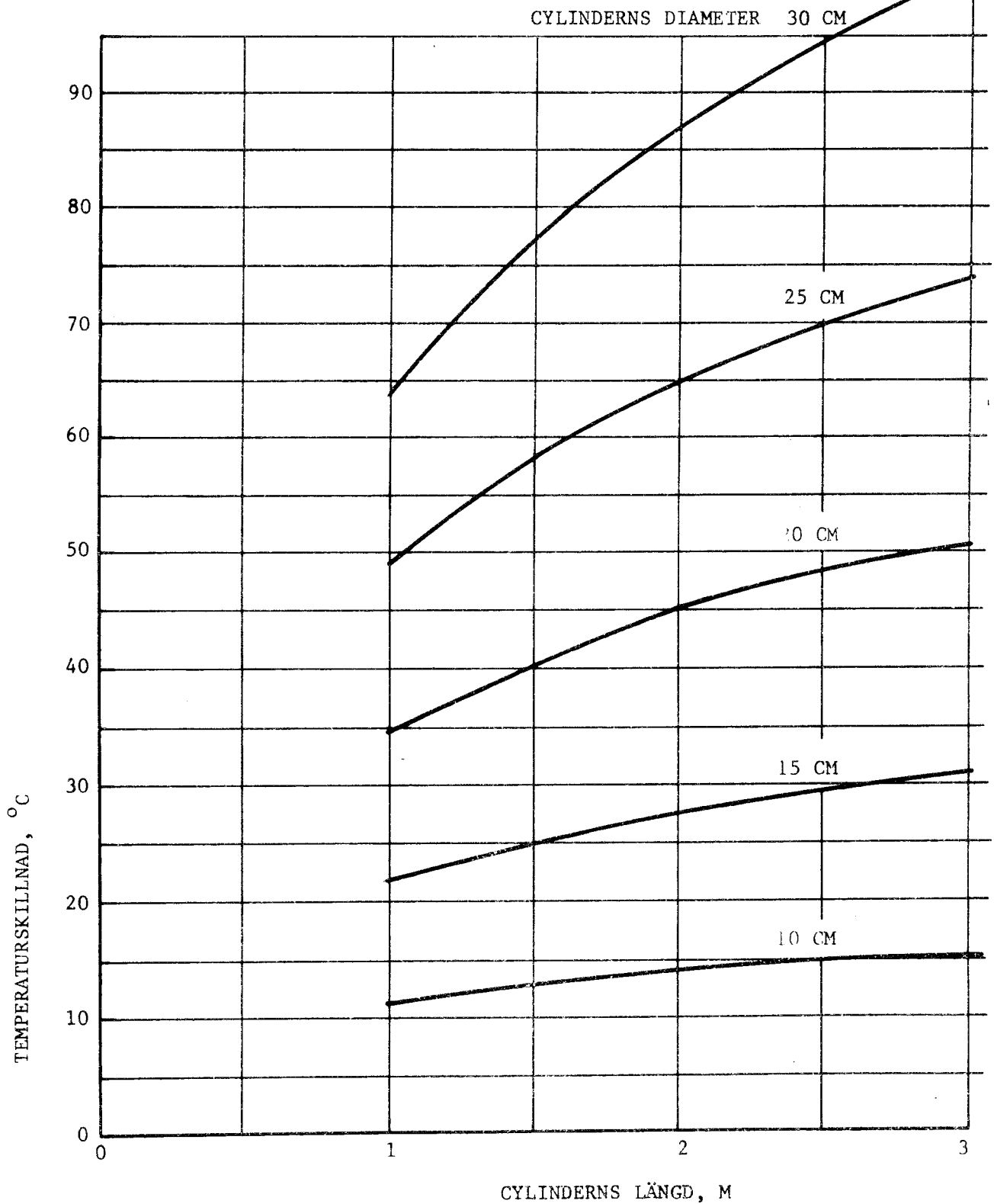


Fig 4

TEMPERATURSKILLNAD MELLAN DEN CYLINDERFORMADE HÅLIGHETENS
BEGRÄNSNINGSYTA OCH BERGET PÅ LÅNGT AVSTÅND DÄRIFRÅN.

EFFEKTUTVECKLING I CYLINDER 20 W/L

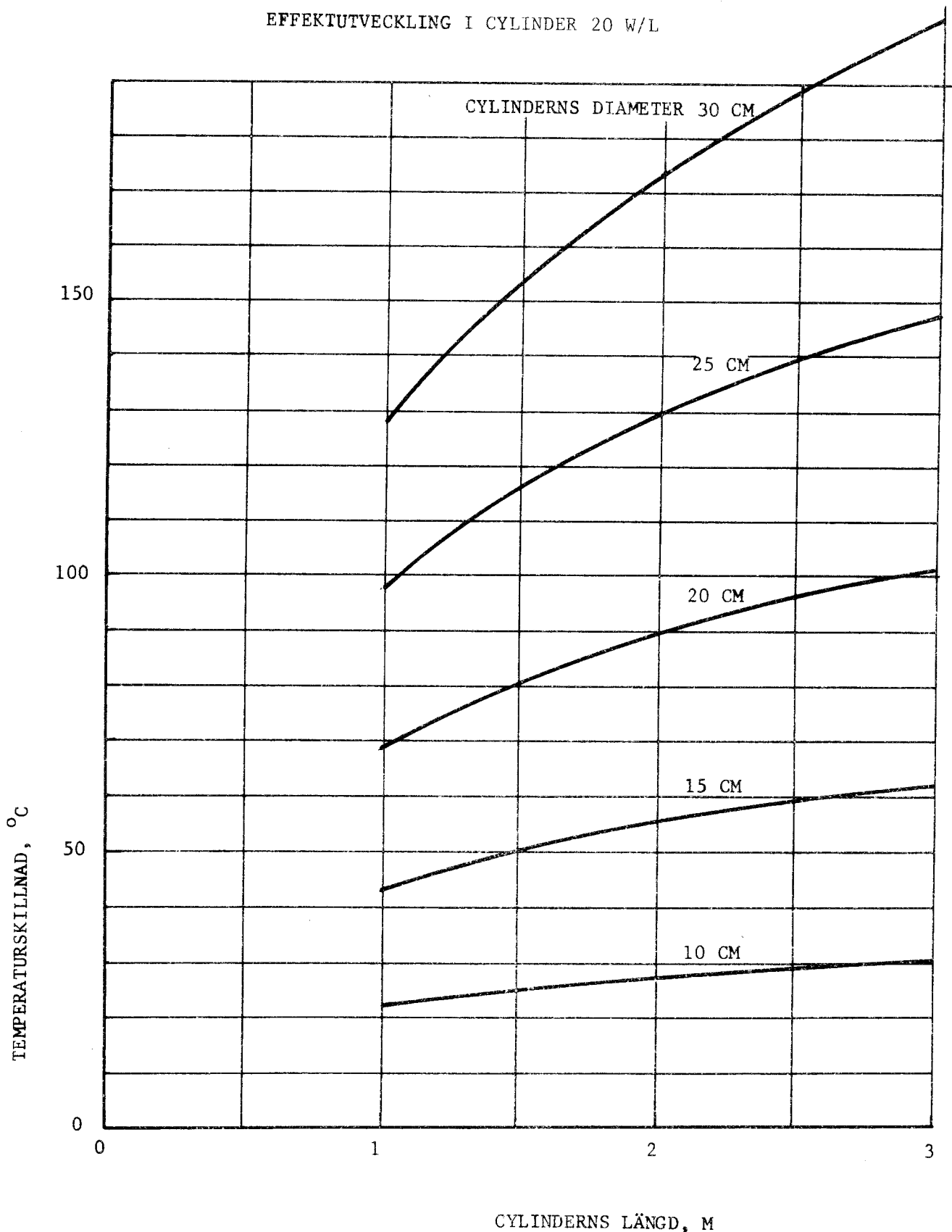


Fig 5

TEMPERATURSKILLNAD MELLAN DEN CYLINDERFORMADE HÅLIGHETENS
BEGRÄNSNINGSYTA OCH BERGET PÅ LÅNGT AVSTÅND DÄRIFRÅN.

EFFEKTUTVECKLING I CYLINDER 100 W/L

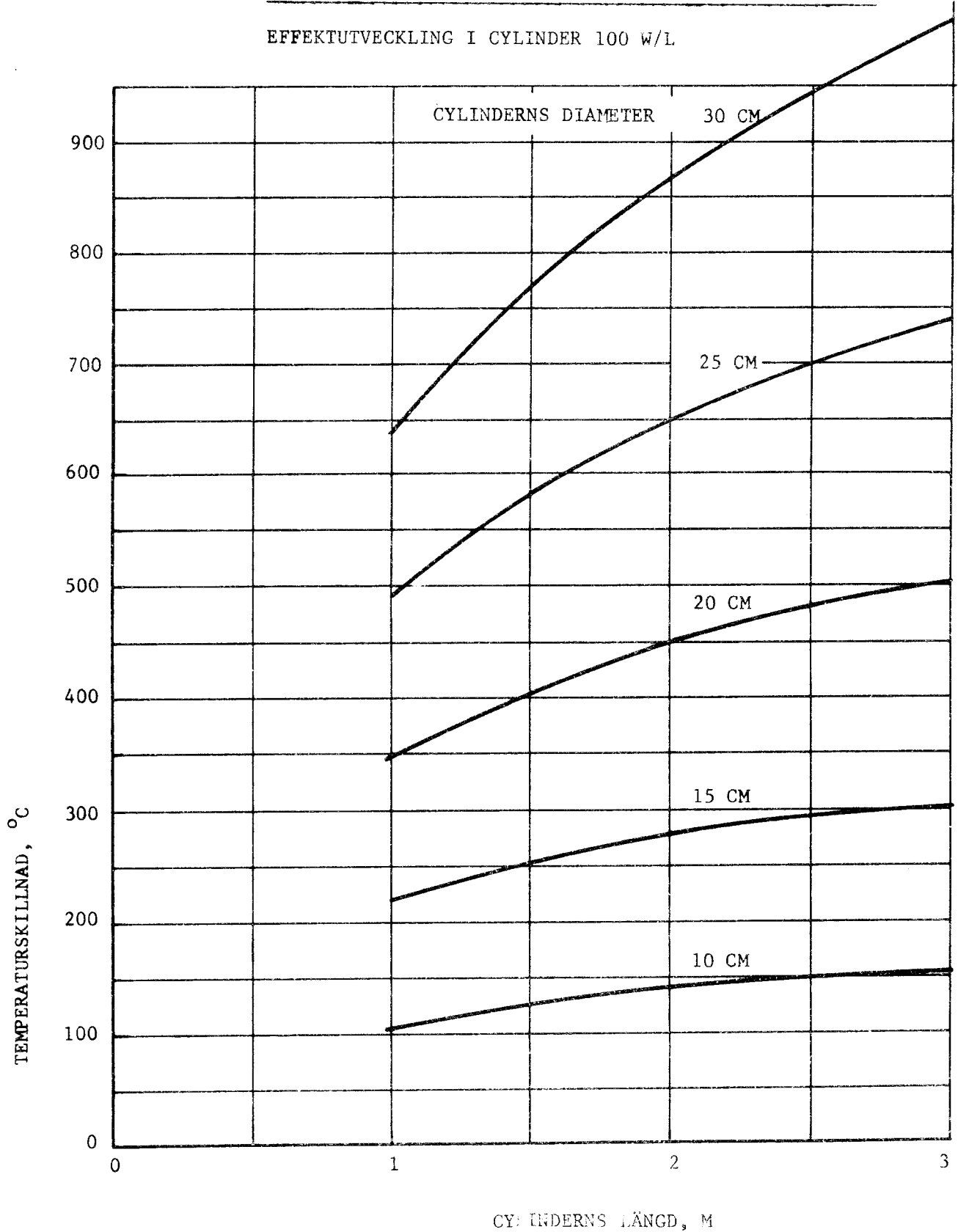


Fig 6

BERÄKNAD TEMPERATURSTÖRNING I URBERG VID LÅNGTIDSFÖRVARING
AV HÖGAKTIVT AVFALL

AVFALLET FÖRUTSÄTTES FÖRDELAT I EN BERGVOLYM MED
LÄNGD 200 M, BREDD 200 M OCH HÖJD 300 M

INITIAL TOTAL VÄRMEUTVECKLING 2120 KW. DETTA MOTSVARAR
T EX 1000 ST BEHÅLLARE MED DIAMETERN 30 CM OCH LÄNGDEN
3 M DEPONERADE EFTER 10 ÅRS AVKLINGNING (SPEC EFFEKT 10 W/L)

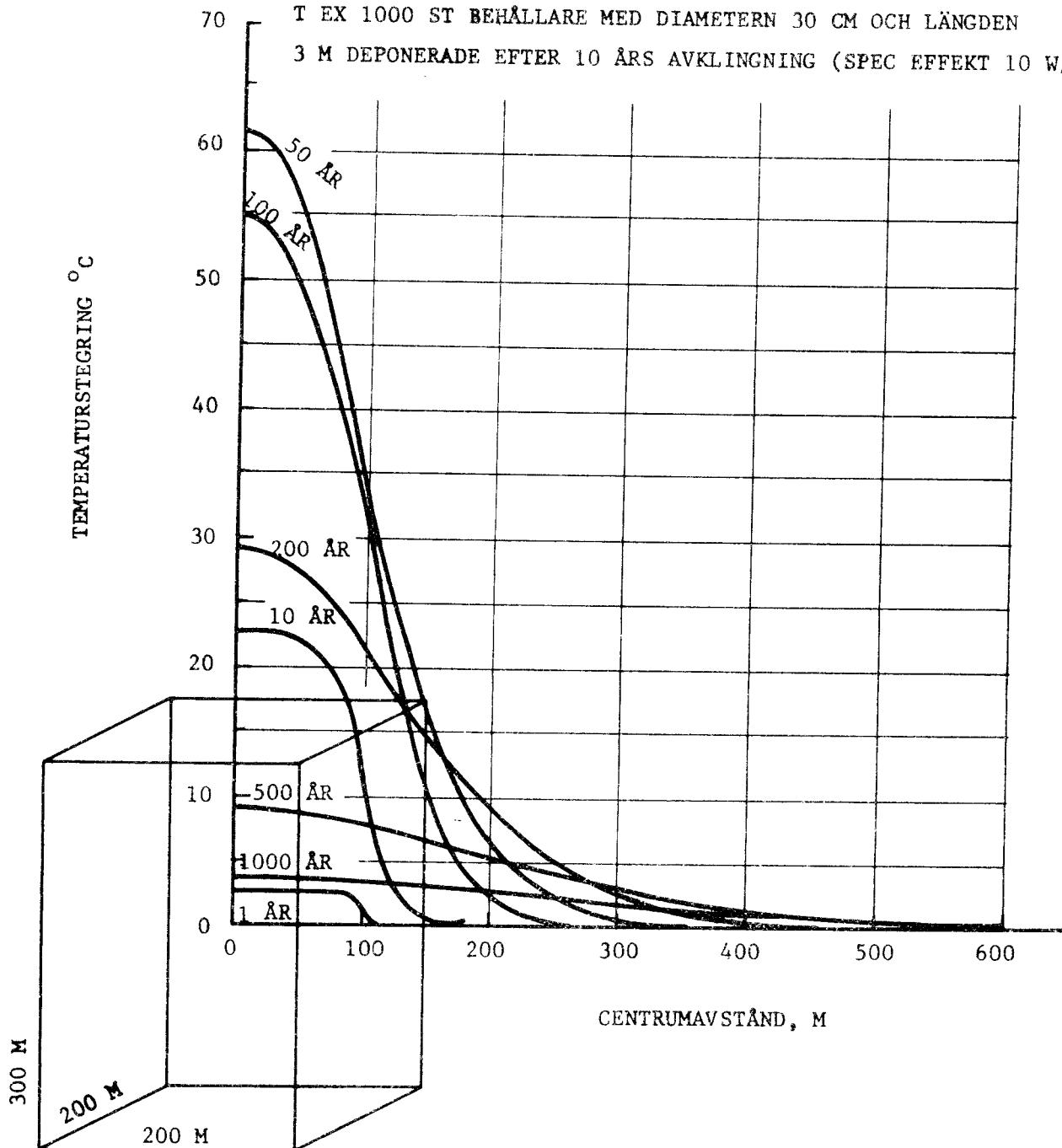


Fig 7

BESÄKNAD TEMPERATURSTÖRNING I URBERG VID LÅNGTIDSFÖRVARING AV HÖGAKTIVT AVFALL.

AVFALLET FÖRUTSÄTTTS FÖRDELAT I 4 HORISONTELLA SKIKT MED TJOCKLEKEN 3 M, LÅNGDEN 200 M, BREDDEN 200 M OCH EN INBÖRDES NIVÅSKILLNAD AV 100 M

INITIAL TOTAL VÄRMEUTVECKLING 2120 KW. DETTA MOTSVARAR T EX 1000 ST BEHÅLLARE MED DIAMETERN 30 CM OCH LÅNGDEN 3 M DEPONERADE EFTER 10 ÅRS SVALNING (SPECIFIK EFFEKT 10 W/L)

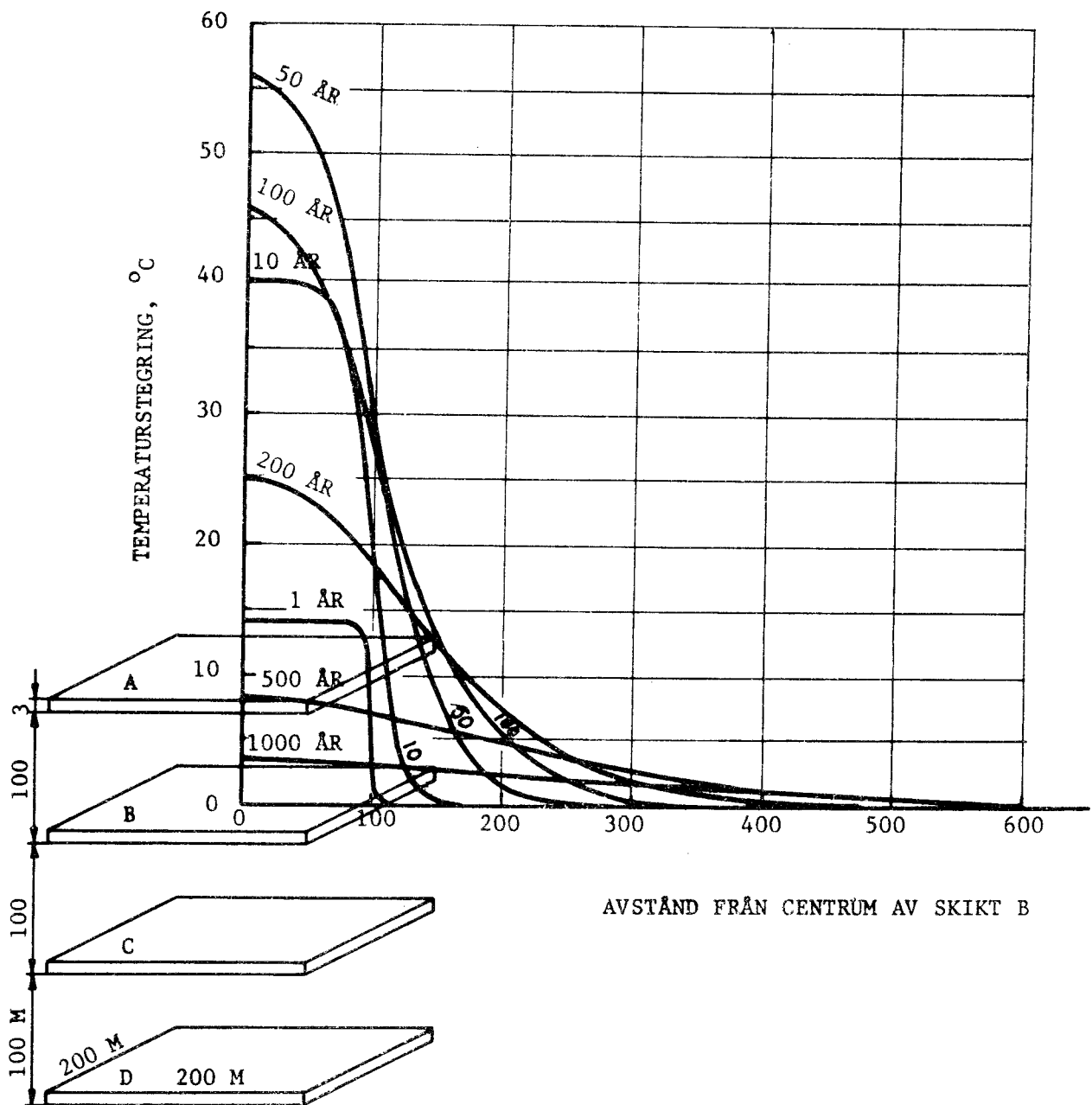


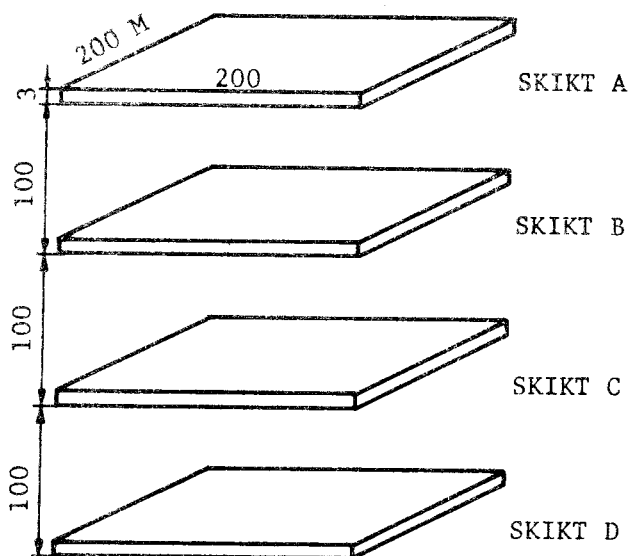
Fig 8

BERÄKNAD MAKROSKOPISK TEMPERATURSTÖRNING I DET VARMASTE PARTIET AV BERGET VID LÅNGTIDSFÖRVARING AV HÖGAKTIVT AVFALL

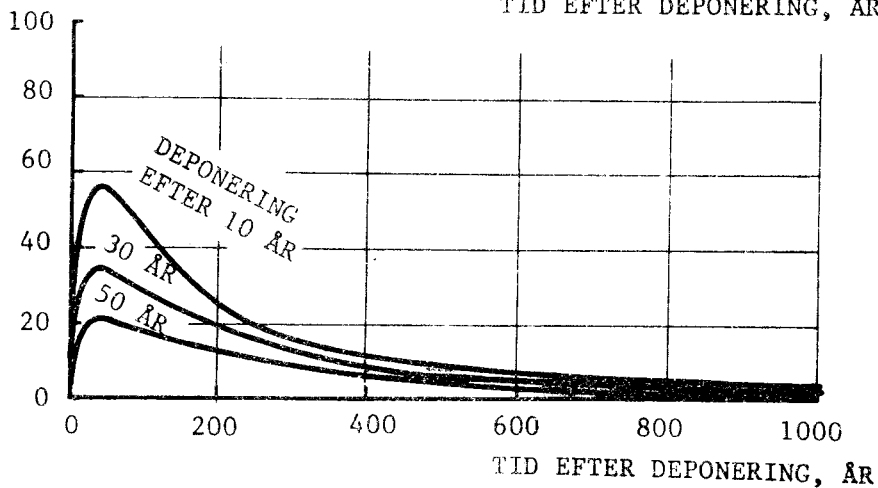
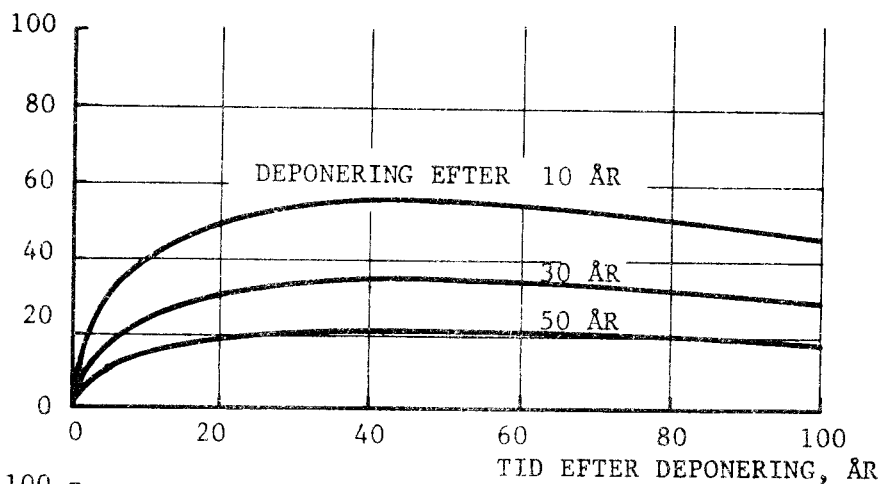
AVFALLET FÖRUTSÄTTES FÖRDELAT I 4 HORISONTELLA SKIKT MED TJOCKLEKEN 3 M, LÅNGDEN 200 M, BREDDEN 200 M OCH EN INBÖRDES NIVÅSKILLNAD AV 100 M

TOTAL EFFEKTUTVECKLING I DEPÅN VID DEPONERING:

EFTER	10 ÅR	30 ÅR	50 ÅR
EFFEKT	2120 KW	1270 KW	740 KW



TEMPERATURSTÖRNING I CENTRUM AV SKIKTEN B OCH C, °C



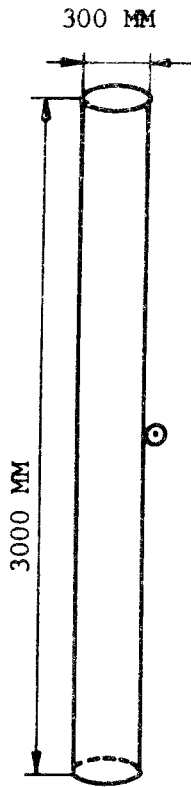


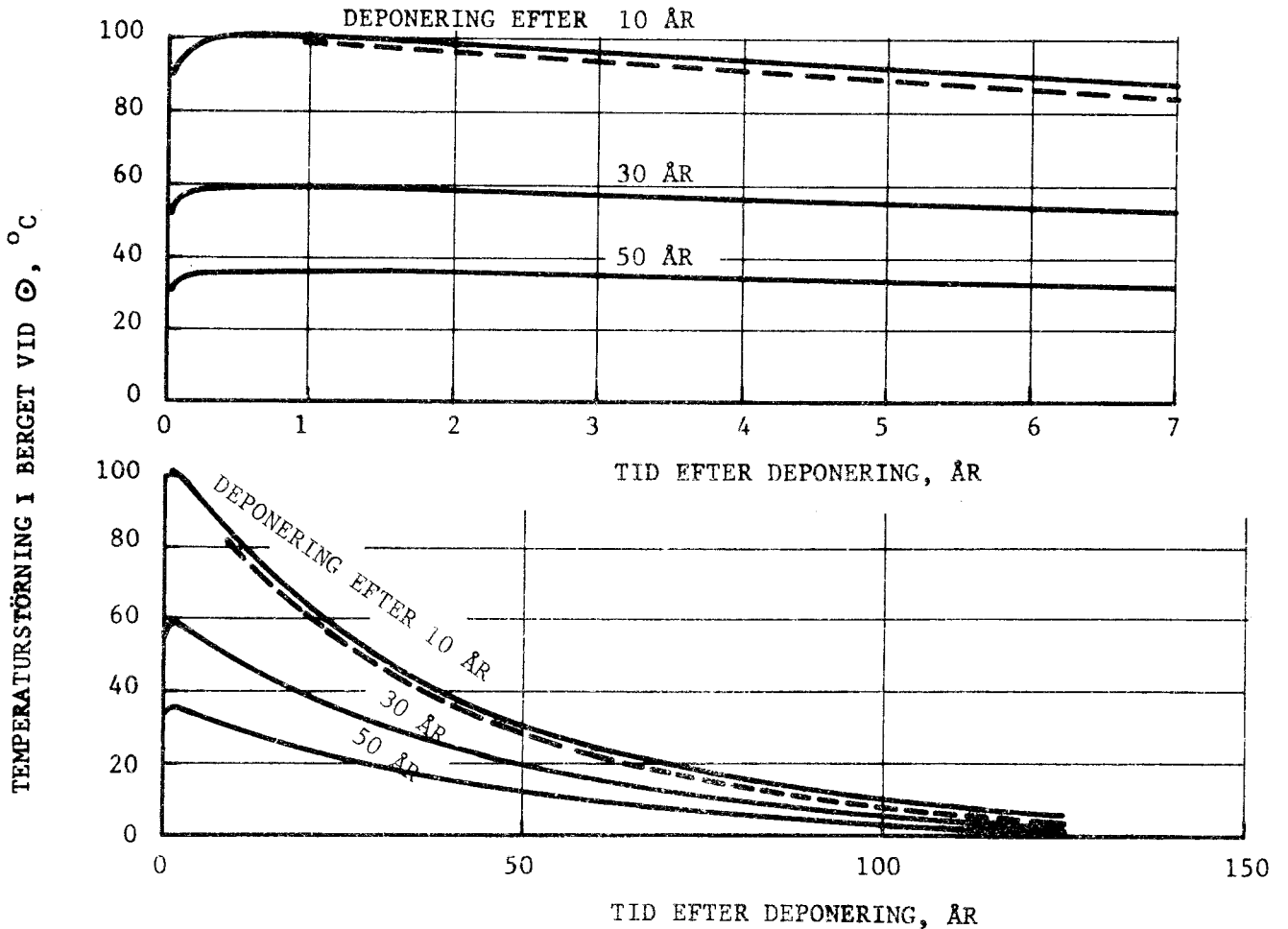
Fig 9

BERÄKNAD TRANSIENT TEMPERATURSTÖRNING I BERGET VID LÅNG-
TIDSFÖRVARING AV ENSKILD BEHÅLLARE I URBERG

BEHÅLLARENS EFFEKTUTVECKLING VID DEPONERING:

EFTER	10 ÅR	30 ÅR	50 ÅR
EFFEKT	10 W/L	6 W/L	3.5 W/L

HELDAGEN LINJE AVSER BERÄKNING ENLIGT EKV (2), STRECKAD
LINJE BERÄKNING ENLIGT EKV (1)



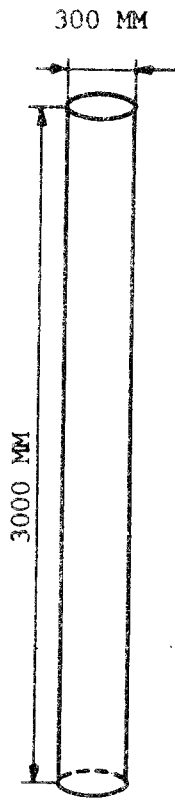


Fig 10

BERÄKNAT TEMPERATURFÖRLOPP PÅ YTAN AV DEN VARMASTE AVFALLSBEHÅLLAREN VID FÖRVARING I AVFALLSDEPÅ MED GEOMETRI ENLIGT FIG 7

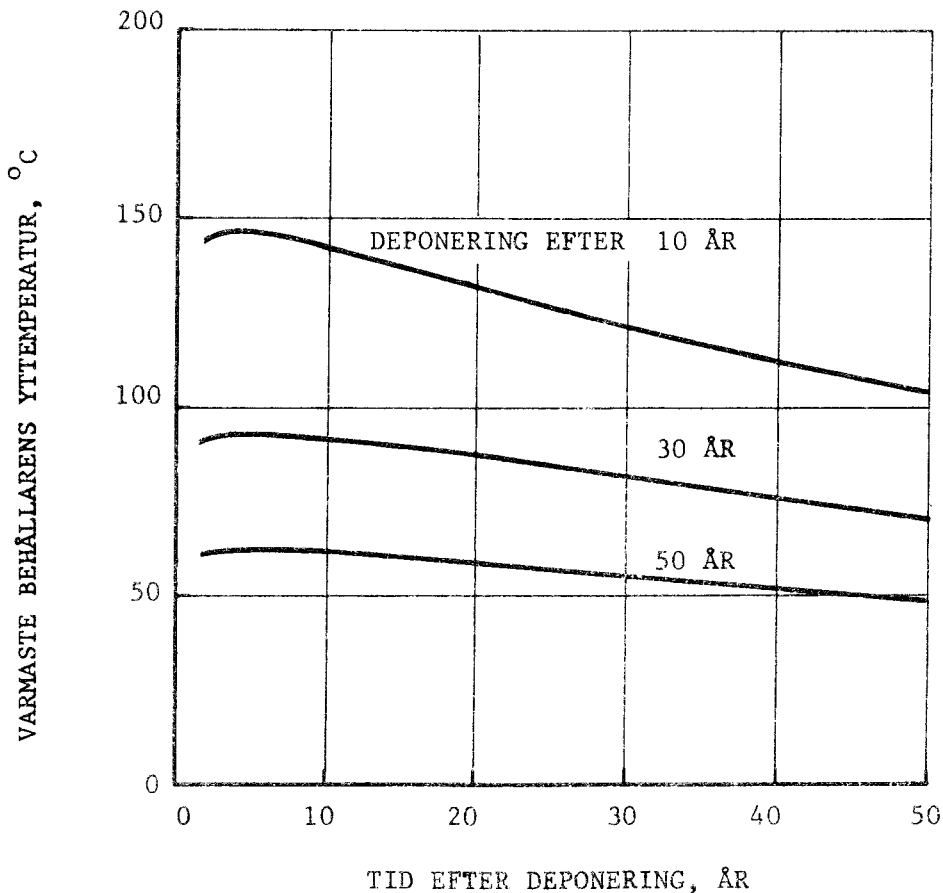
BETRÄFFANDE DEPÅNS GEOMETRI OCH EFFEKTUTVECKLING, SE FIG 7

BEHÅLLARENS EFFEKTUTVECKLING VID DEPONERING:

EFTER	10 ÅR	30 ÅR	50 ÅR
EFFEKT	10 W/L	6 W/L	3.5 W/L

LUFTSPALTEN MELLAN BERG OCH BEHÅLLARE HAR ANTAGITS GE EN TEMPERATURDIFFERENS AV 20°C VID 10 W/L OCH SEDAN MINSKA I DIREKT PROPORTION TILL EFFEKTEN

BERGTEMPERATUREN PÅ LÅNGT AVSTÅND FRÅN DEPÅN HAR ANTAGITS TILL 15°C



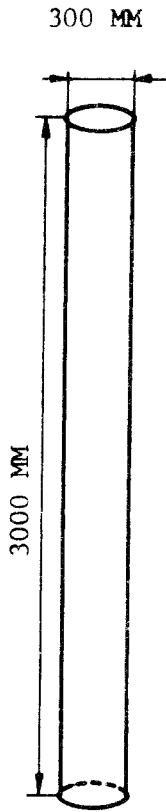
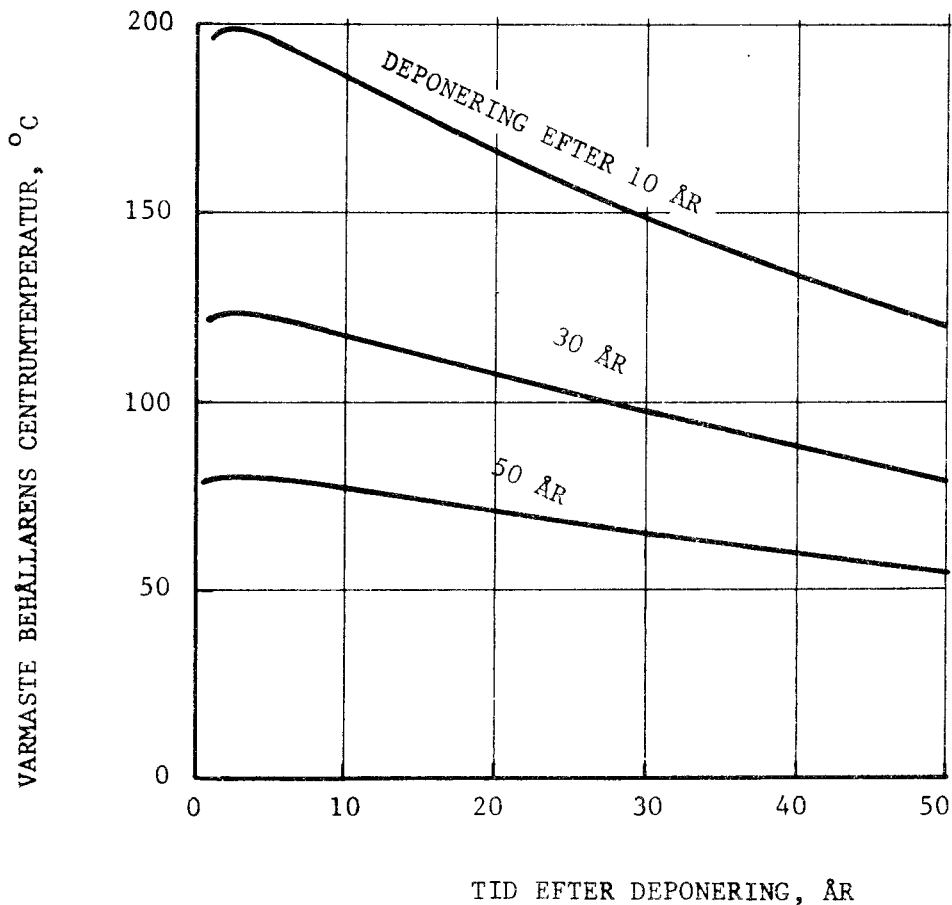


Fig 11

BERÄKNAT TEMPERATURFÖRLOPP I CENTRUM AV DEN
VARMASTE AVFALLSBEHÅLLAREN VID FÖRVARING I AV-
FALLSDEPÅ MED GEOMETRI ENL FIG 7.

AVFALLSMATERIALETS VÄRMEKONDUKTIVITET 1 W/M, °C

ÖVRIGA FÖRUTSÄTTNINGAR ENLIGT FIG 10



Förteckning över 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 och Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-04-15
03. Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans
A Jacobsson och R Pusch
Högskolan i Luleå 77-05-27
04. Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans
A Jacobsson, R Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-01
05. Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
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 för KBS del 1
Litteraturgenomgång Del 2 Beräkningar
K Ekberg, N Kjellbert, G 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