

SKBF
KBS

TEKNISK
RAPPORT

79-04

**Temperatur- och spänningsberäkning
för slutförvar**

Taivo Tarandi

VBB Vattenbyggnadsbyrån, Stockholm februari 1979

TEMPERATUR- OCH SPÄNNINGSBERÄKNING FÖR
SLUTFÖRVAR

Taivo Tarandi
VBB Vattenbyggnadsbyrån
Stockholm februari 1979

Denna rapport utgör redovisning av ett arbete som utförts på uppdrag av SKBF projekt KBS. Slutsatser och värderingar i rapporten är författarens och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med uppdragsgivarens.

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

TEMPERATUR- OCH SPÄNNINGSBERÄKNING FÖR
SLUTFÖRVAR

Taivo Tarandi

Summary

Temperature and stress distribution in and around the final storage facility has been calculated for three different arrangements of the tunnels:

- 2 planes with 60 m vertical distance between them
- 2 planes with 100 m distance and
- 1 plane.

The highest temperatures and stresses occur for the 2 plane alternative with distance 60 m between planes.

The maximum compressive stress is in this case 24.0 MPa 140 years after the time of deposition, compared with 12.6 MPa in the 1 plane case.

The maximum tensile stress exists at the surface and is in the 2 plane case 6.0 MPa 800 - 1,500 years after deposition, compared with 4.2 MPa for the 1 plane variant.

An estimation of maximum tensile stresses between the tunnel planes yields a value of 1.5 MPa.

The above-mentioned stresses are due to temperature distribution induced by the radioactive waste. To obtain the total stresses, initial stresses in the undisturbed rock, which vary according to location, are to be added to these stresses.

Sammanfattning

Föreliggande rapport redogör för beräkning av temperatur- och spänningsfördelning i och omkring slutförvaret, dels för 2-plansutförande med avstånden 60 respektive 100 m mellan tunnelplanen, dels för 1-plans utförande.

De högsta temperaturerna och spänningarna erhålls vid 2-plansutförandet med avståndet 60 m mellan tunnelplanen.

Den maximala tryckspänningen inom förvaret är vid detta fall 24,0 MPa 140 år efter deponeringen jämfört med 12,6 MPa vid 1-plansutförandet vid samma tidpunkt.

Den maximala dragspänningen uppträder vid markytan och är vid 2-plansfallet 6,0 MPa 800 - 1 500 år efter deponeringen jämfört med 4,2 MPa vid 1-plansutförande.

En uppskattning av max dragspänning mellan tunnelplanen vid början av förvaringen ger ca 1,5 MPa.

Ovanstående spänningar avser spänningar p g a av förvaringen förorsakade temperaturändringarna, varför för erhållande av de totala spänningarna de i orört berg rådande egenspanningarna - olika i olika förläggningsorter - skall superponeras till dessa värden.

1. Inledning

Syftet med föreliggande beräkning var från början att analysera spänningstillståndet i och omkring slutförvaret för använt bränsle i 2-plans utförande.

För att förenkla beräkningsarbetet visade det sig nödvändigt att utföra även beräkning av temperaturfördelning med samma beräkningsmodell som spänningsberäkningen.

Såväl temperatur- som spänningsberäkningen utfördes härvid med det förenklade antagandet att effektutvecklingen är jämnt fördelad mellan de bägge tunnelplanen. Detta antagande medför något för höga temperaturer inom förvaret. Detta leder till konservativa resultat vad beträffar uppstående spänningar.

Som jämförelse har även motsvarande beräkning utförts för 1-plans utförande, varvid effektutvecklingen har antagits ske i ett skikt med tjockleken 30 m.

Beräkningen avser ändring av temperaturer och spänningar på grund av den deponerade effekten. De erhållna temperaturerna och spänningarna kan superponeras på rådande temperatur- och spänningstillstånd i orört berg.

2. Förutsättningar

Beräkningen utförs för BWR-bränsle. Effektutvecklingen per ton uran varierar med tiden enligt [1], tabell 6, se Bilaga 1.

Vid föreliggande beräkning antas mängden bränsle vara 1,4 ton per kapsel. Vid deponeringstidpunkten 40 år efter uttag ur reaktorn erhålls begynnelseeffekten till 772 W/kapsel.

Avståndet mellan tunnlar är 25 m och avståndet mellan kapslar 6 m, motsvarande yteffekttäthet 10,3 respektive 5,1 W/m² vid 2-plans respektive 1-plans utförandet.

Med antalet kapslar 7 000 blir förvarets ekvivalenta radie

$$R_2 = \sqrt{\frac{7\,000 \cdot 25 \cdot 6}{2 \cdot \pi}} = 408,78 \text{ m vid 2-plan}$$

$$R_1 = \sqrt{2} \cdot R_2 = 578,1 \text{ m vid 1-plan}$$

Beräkningen utförs för avstånden 60 respektive 100 m mellan tunnelplanen.

Den rotationssymmetriska beräkningsmodellen framgår av figur 1A (2-plan) respektive 1B (1-plan). Dessutom utförs en separat temperaturberäkning med modell enligt figur 1C för analys av förhållanden vid de olika tunnelplanen.

Temperaturberäkning utförs med VBB's temperaturberäkningsprogram ROTEMP, spänningsberäkning med datorprogrammet STARDYNE 3 hos CDC, Stockholm.

Berget antas bete sig elastiskt. Vid modellens cylindrisk ytteryta antas rörelsen vara möjlig såväl radiellt som vertikalt, vid den plana bottenytan endast radiellt.

Resultatet av denna beräkning visar, såsom framgår nedan, att på grund av modellens utsträckning - ca 2 km såväl radiellt som vertikalt - randvillkoren icke har någon nämnvärd inverkan på spänningstillståndet i och vid förvaret.

Materialgenskaper

Värmeledningsförmåga i berget	3,0	W/m ⁰ C
Specifika värmnet	2,15	MJ/m ³ ⁰ C
Värmeövergångstal vid markytan	10	W/m ² ⁰ C
Elasticitetsmodul	40	GPa
Poissons tal	0,21	
Längdutvidgningskoefficient	8,5·10 ⁻⁶	1/ ⁰ C

3. Beräkningsresultat

3.1 Temperaturfördelning

Temperaturfördelningen vid några representativa tidpunkter framgår av tabell I-III för de tre olika alternativen. Som sådana tidpunkter har valts när:

- temperaturen når sitt maximivärde
- temperatur-"vågen" når markytan
- värmeflödet vid markytan når sitt maximivärde, d v s temperaturgradienten vid markytan är maximum.

Temperaturfördelningens variation med djupet under markytan vid centrum av anläggningen framgår av figur 2-4 för de olika alternativen.

Härvid sker också jämförelse med temperaturer beräknade med endimensionell modell, figur 2C och 3C.

I början av förvaringen - tills värmevågen når markytan - ger den tvådimensionella modellen med sin grova rutindelning för höga temperaturer inuti förvaret. Detta leder således till att de erhållna spänningarna är konservativt beräknade.

För längre tider, se exempelvis figur 2B och 3B, ger den endimensionella modellen för höga temperaturer. Detta beror på att den endimensionella modellen icke

tar hänsyn till värmetransport i radiell riktning, som vid 2-plans fallet med dess relativt korta radiella utsträckning blir betydande.

Vid 1-plans utförande, se figur 4, är den radiella utsträckningen större, och skillnaden i temperaturfördelning, erhållen med de olika modellerna, obetydlig, åtminstone för tidpunkter som kommer ifråga i detta sammanhang.

Temperaturhöjningen som funktion av tiden vid centrum av förvaret framgår av figur 5 och 6, där även kapselns och bergets maximitemperatur är inritad.

Jämfört med 1-plans utförandet leder 2-plans utförande till en avsevärd höjning av bergets temperatur, dock ej till en tvådubbling av temperaturerna, som man kanske skulle förmoda med anledning av att effekten per horisontell ytenhet vid 2-plans fallet är två gånger större än vid 1-plans fallet.

Detta beror på att en icke oväsentlig värmekapacitet i bergmassivet mellan de två tunnelplanen fördröjer uppvärmningen.

Ännu större är inverkan på de lokala temperaturerna i omedelbar närhet av en bränslekapsel. Vid 60 m avstånd mellan tunnelplanen erhålls en mindre temperaturhöjning, ca 7°C , jämfört med 1-plans fallet. Vid 100 m avstånd blir temperaturen vid den andra maximipunkten ca 3°C högre än vid den första maximipunkten, som är identisk med motsvarande temperatur vid 1-plans fallet.

3.2 Spänningsfördelning

Spänningsfördelningen vid förvarets centrumlinje vid de olika tidpunkterna framgår av figur 7 för fallet med 60 m mellan tunnelplanen. Den största tryckspän-

ningen 24 MPa föreligger vid mitten av förvaret och inträffar ca 140 år efter deponeringstidpunkten. Den största dragspänningen föreligger vid markytan och uppgår maximalt till 6,0 MPa 800 - 1 500 år efter deponeringen.

Förutom vid markytan erhålls dragspänningar även i ett område omedelbart utanför förvarets ytterrand, se figur 8, och uppgår maximalt till 2,4 MPa i vertikalriktning 140 år efter deponeringen, figur 8A.

Eftersom spänningar vid 100 m avstånd mellan tunnelplanen visade sig endast obetydligt avvika (lägre) från motsvarande vid 60 m fallet, återges de ej här. De är dock inritade i figur 11 som jämförelse med de andra alternativen.

Motsvarande spänningsfördelningar för 1-plans utförandet framgår av figur 9-10.

Den största tryckspänningen 12,6 MPa inträffar ca 140 år efter deponering och den största dragspänningen 4,2 MPa 800 - 1 500 år efter deponeringen.

Jämförelsen mellan de olika alternativen sker bäst i den ovan omnämnda figur 11. Man kan konstatera att den betydligt lägre temperaturnivån vid 1-plans fallet medför - som sig bör - i motsvarande mån lägre spänningsnivå.

3.3 Deformationer och inverkan av randvillkoren

I detta sammanhang kan det vara av intresse att studera inverkan av randvillkoren.

Vid tidpunkten 140 år - då tryckspänningar är störst - vid 60 m avstånd mellan tunnelplanen är den maximala radiella deformationen 7,3 mm.

Om denna rörelse skulle vara förhindrad - motsvarande fast inspänning - uppstår ett radiellt tryck

$$p_r = \frac{E \cdot \Delta r}{r_y \cdot (1-\nu)}$$

där

E = bergets elasticitetsmodul = 40 GPa

Δr = radiell deformation = 7,3 mm

r_y = modellens ytterradie = 219 m

ν = Poissons tal = 0,21

p_r = 0,164 MPa

Detta värde är mindre än 1 % av den maximala tryckspänningen, varför randvillkoren vid ytterranden är utan betydelse. Det skall dock nämnas att vid 1 500 år är den maximala radiella deformationen 21,5 mm, d v s ca 3 gånger större, men då är emellertid tryckspänningarna betydligt lägre.

Beträffande dragspänningar så är de erhållna värdena något konservativa på grund härav.

3.4 Inverkan av lokal temperaturfördelning mellan tunnelplan

Som framgår av figur 2C och 3C erhålls vid 2-plans utförande, speciellt vid 100 m avstånd mellan tunnelplanen, en kraftig temperaturvariation mellan tunnelplanen i början av förvaringen, varför vissa dragspänningar väntas uppträda i detta område.

Med hjälp av nedanstående tabell görs en uppskattning av maximal dragspänning.

Tidpunkt år	σ_{\max} MPa	σ_{\min} MPa	$\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$ MPa	T_{\max} °C	$\frac{\sigma_{\max}-\sigma_{\min}}{T_{\max}}$	$\frac{\sigma_{\max}}{T_{\max}}$
300	3,7	-21,5	25,2	60	0,420	0,0617
600	4,7	-18,7	23,4	55	0,426	0,0855
960	4,9	-15,7	20,6	48	0,430	0,1021
1 500	4,7	-12,5	17,2	39	0,441	0,1205

Tabellen visar den största (dragspänning vid markytan) och den minsta (tryckspänning vid förvaret) spänningen vid den vertikala centrumlinjen av anläggningen. Dessutom är den maximala spänningsdifferensen och den maximala temperaturändringen angivna.

Av tabellen framgår att förhållandet mellan denna spänningsdifferens och maximitemperatur är tämligen konstant för dessa olika tidpunkter, 0,42 - 0,44.

I tabellen är också angivna förhållandet mellan maximal dragspänning och maximitemperatur. Detta förhållande som kan anses representera medeltemperaturen i hela den betraktade bergvolymen varierar givetvis mera med tiden. Den maximala dragspänningen kan nämligen anses vara proportionell till medeltemperaturen. Vid tidpunkten noll är medeltemperaturen noll och därmed borde motsvarande dragspänning vara noll.

Antags konservativt att detta förhållande varierar linjärt i tidsintervallet 0 - 600 år, erhålls för tiden närmast deponeringstidpunkten

$$\sigma_{\max} = [0,0617 - (0,0855 - 0,0617)] T_{\max} = 0,0379 T_{\max}$$

Antags dessutom att vardera temperaturtoppen vid de olika tunnelplanen bidrar lika mycket, blir den maximala dragspänningen vid tidpunkten 20 år med temperaturerna enligt figur 3C

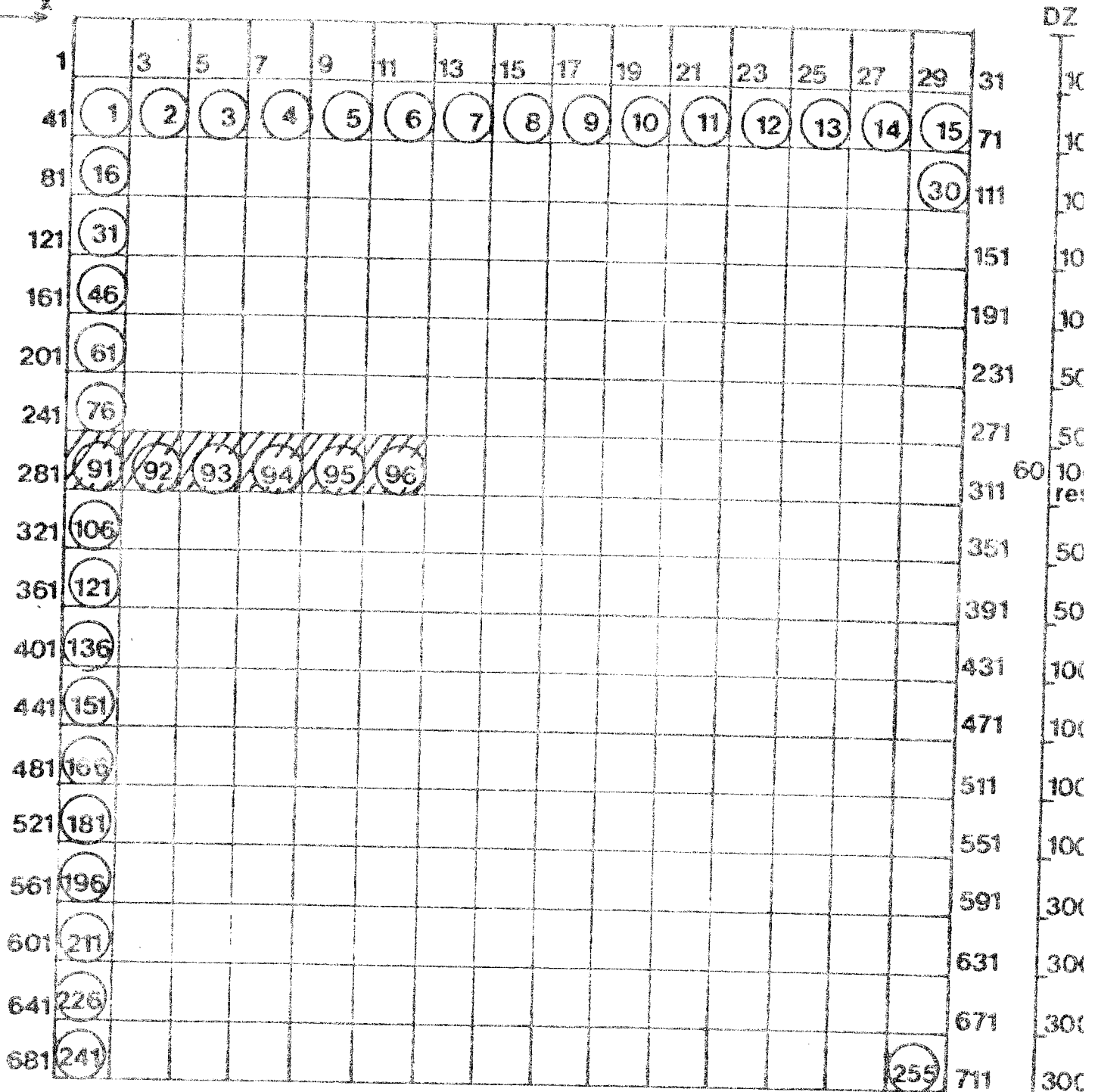
$$\sigma_{\max} = 0,0379 (15 + 25) = 1,516 \text{ MPa}$$

Eftersom vid denna tidpunkt en viss övertemperatur, ca 3°C, föreligger i området, torde den verkliga dragspänningen mellan tunnelplanen vara lägre än ovanstående värde.

LITTERATUR

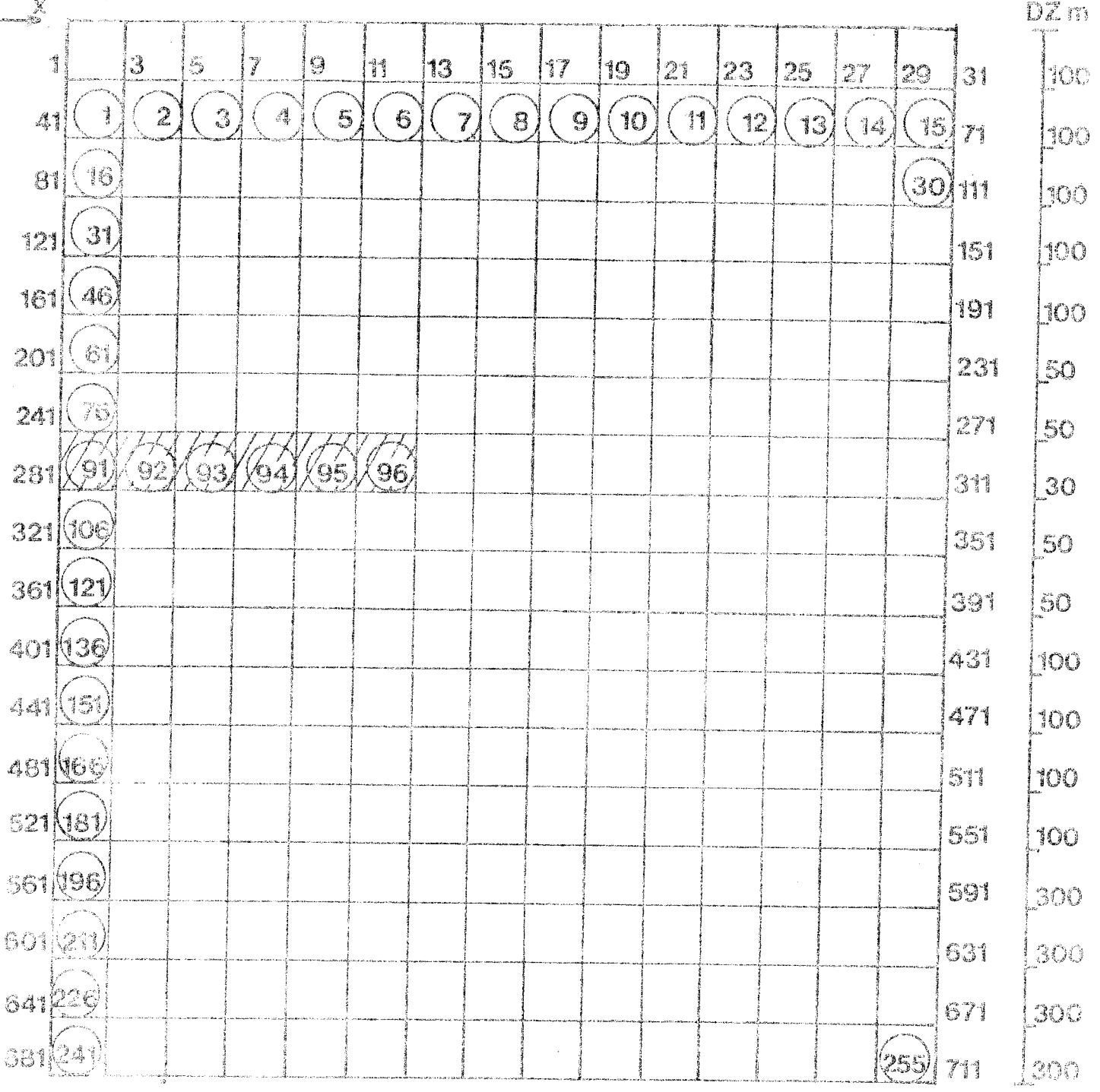
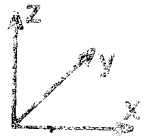
1. K Ekberg, N Kjellbert, G Olsson: Resteffektstudier för KBS del 1, Litteraturgenomgång del 2, Beräkningar KBS Teknisk Rapport 07

DR = 8 * 68,13 3 * 150 4 * 300 m

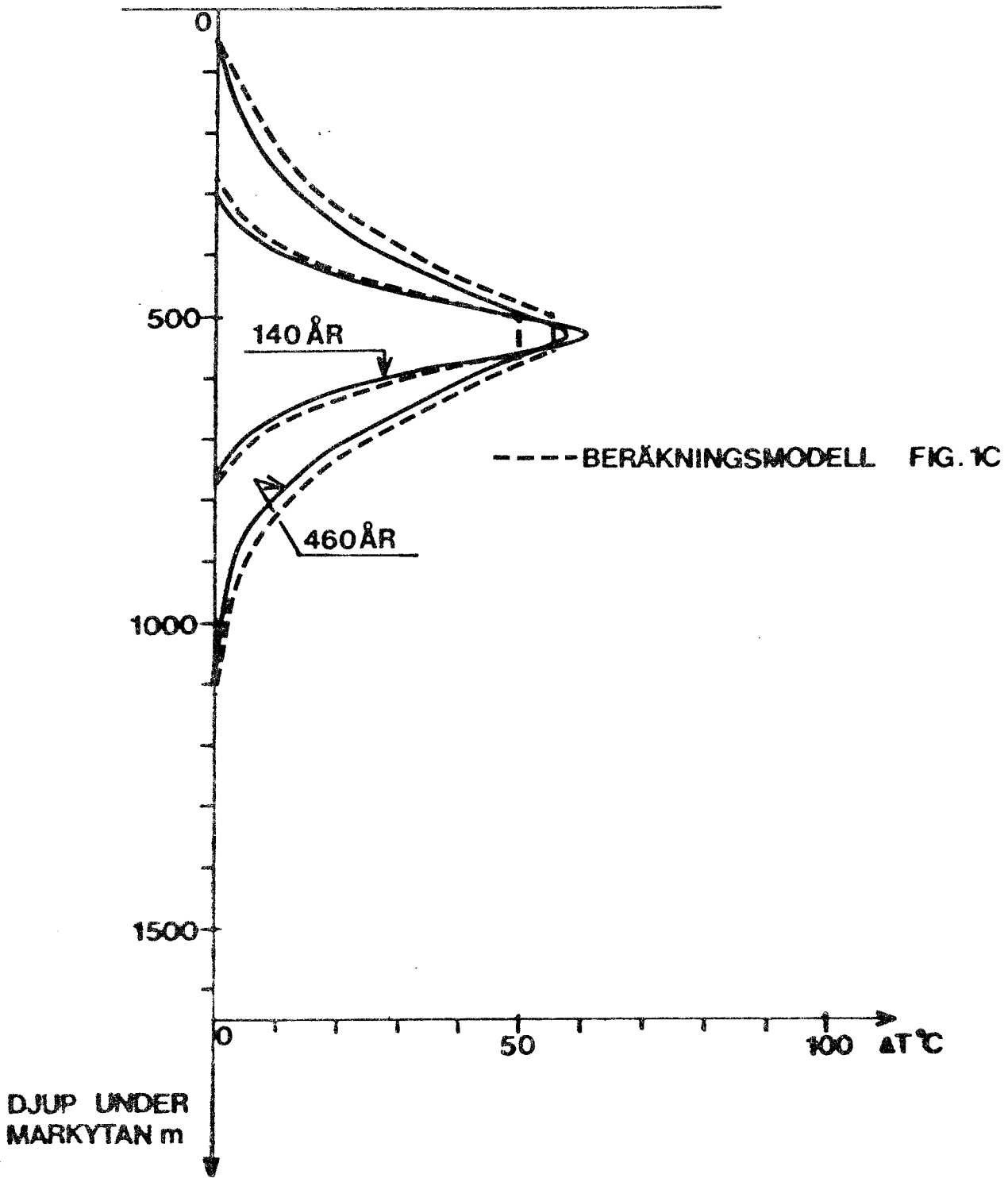


Figur 1A. Beräkningsmodell
2-plan

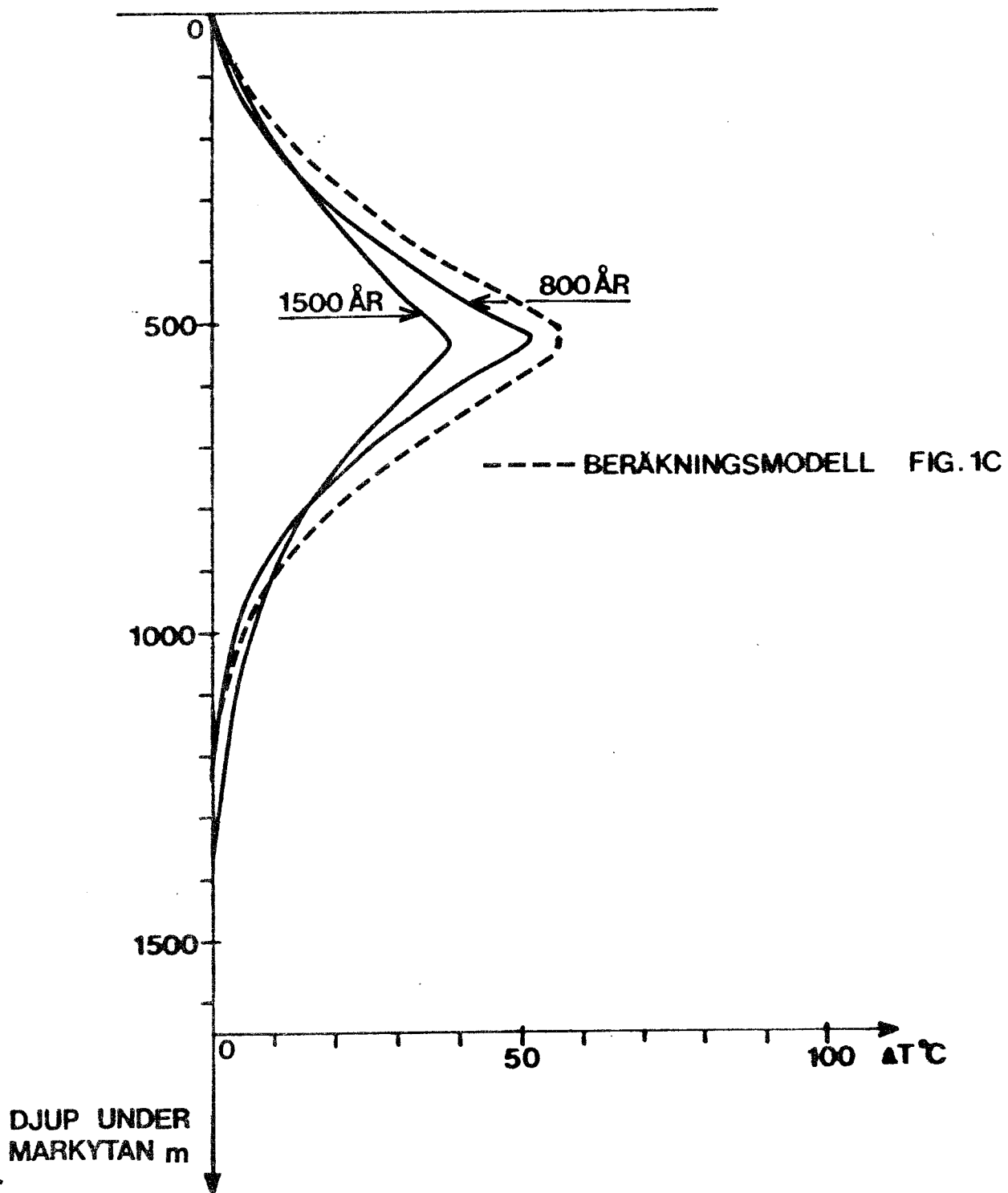
DR= 8×96,35 3×150 4×300 m



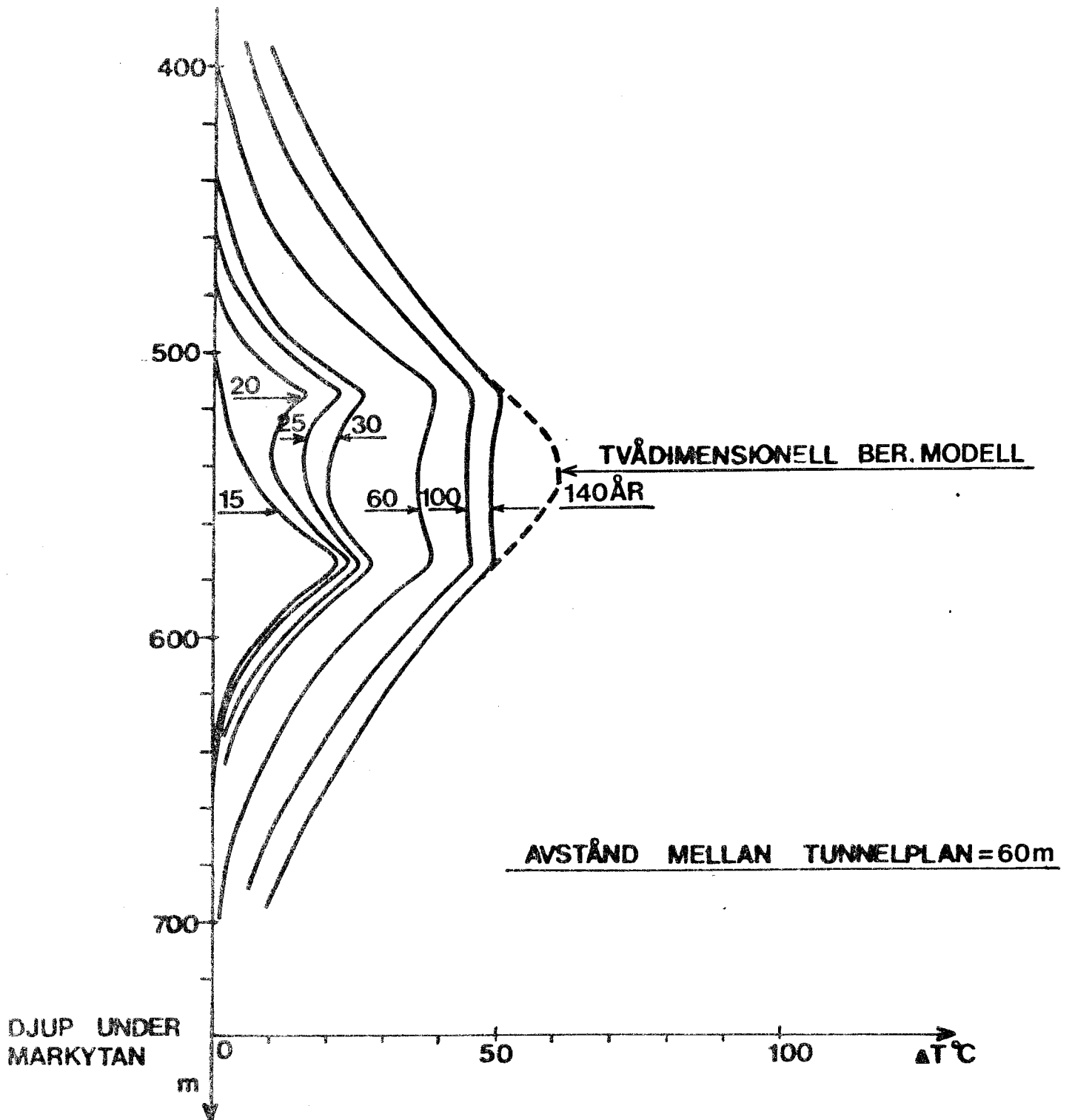
Figur 1B. Beräkningsmodell
1-plan



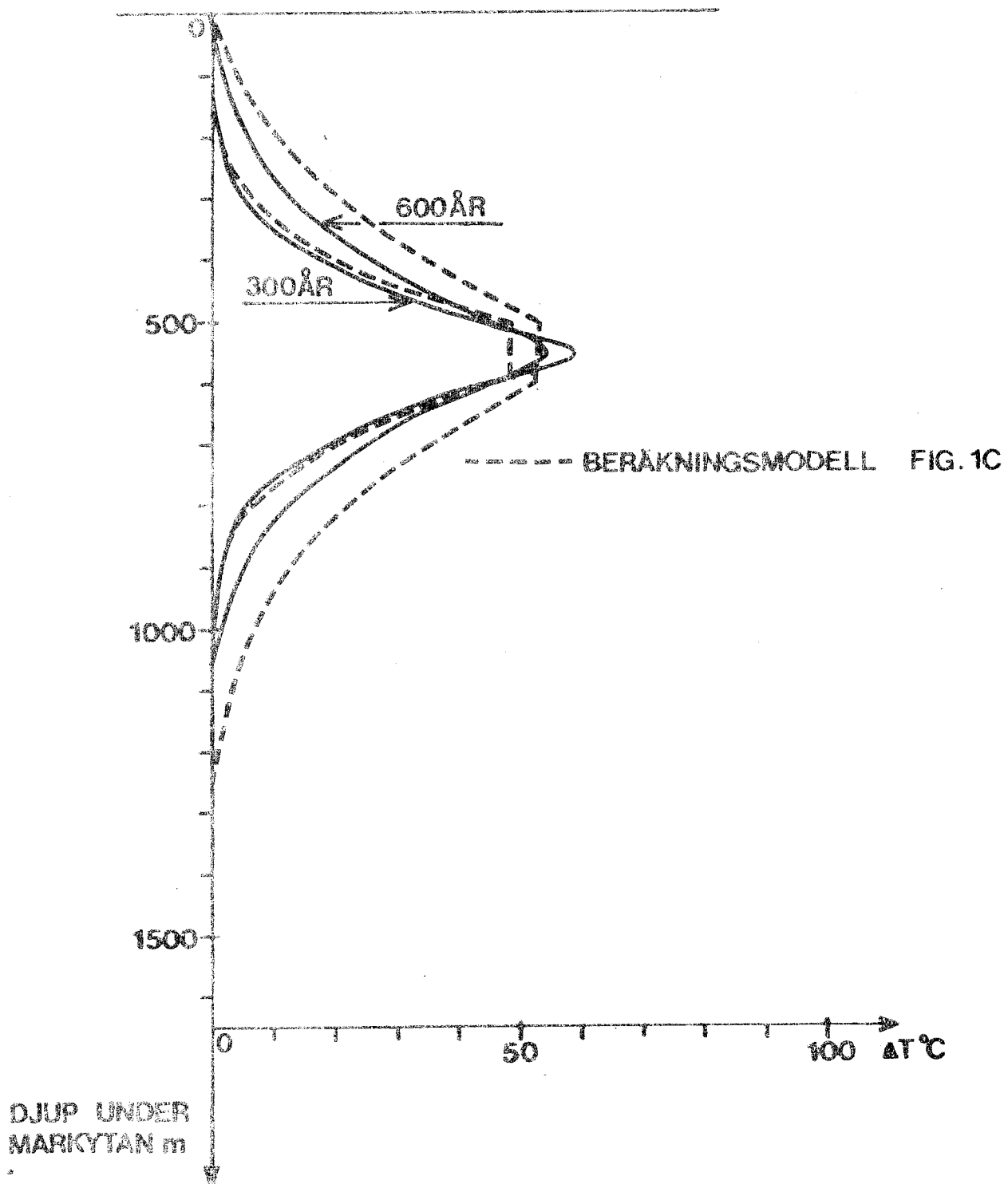
Figur 2A. Temperaturfördelning vid centrum.
Avstånd mellan tunnelplan 60 m



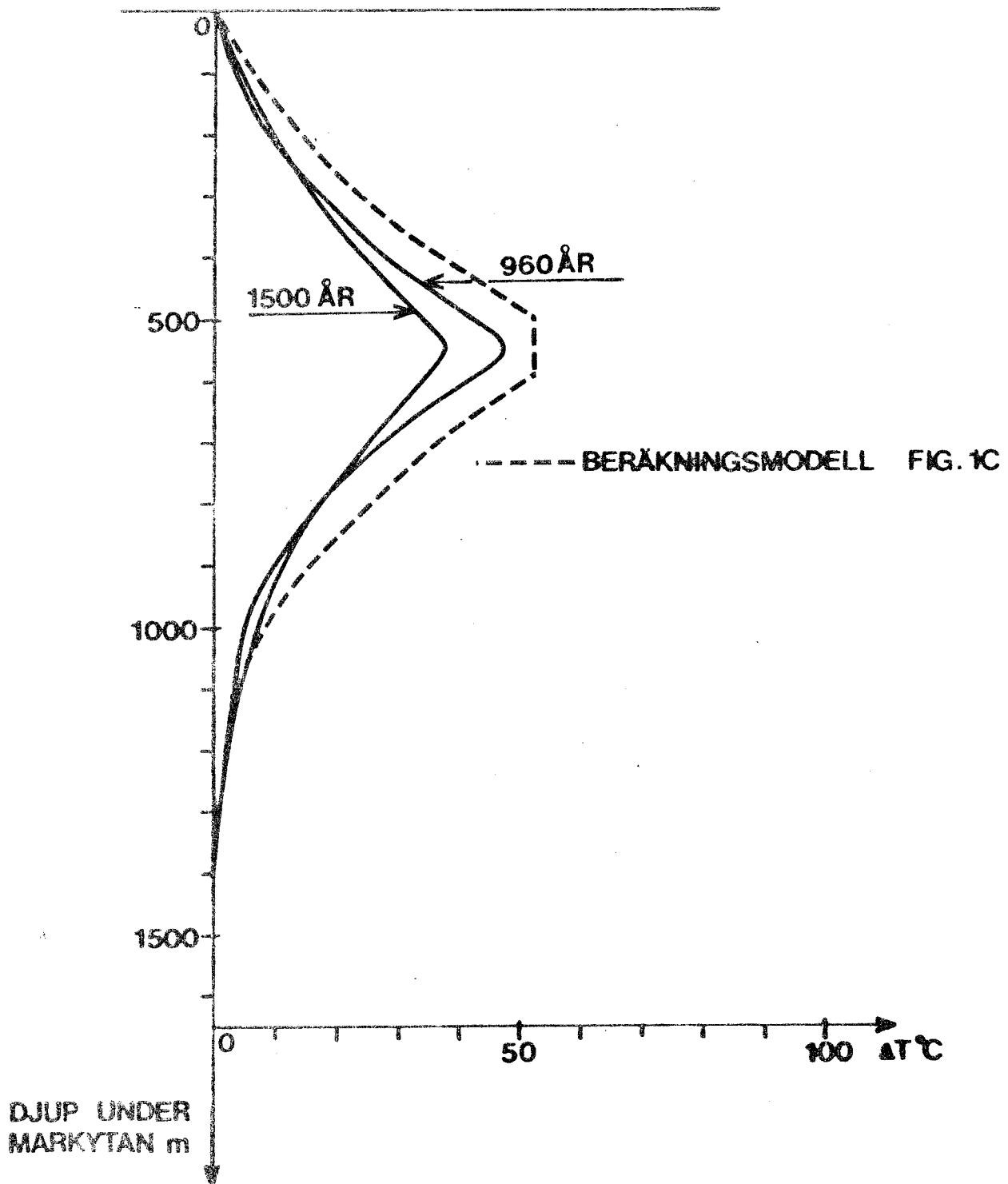
Figur 2B. Temperaturfördelning vid centrum.
Avstånd mellan tunnelplan 60 m



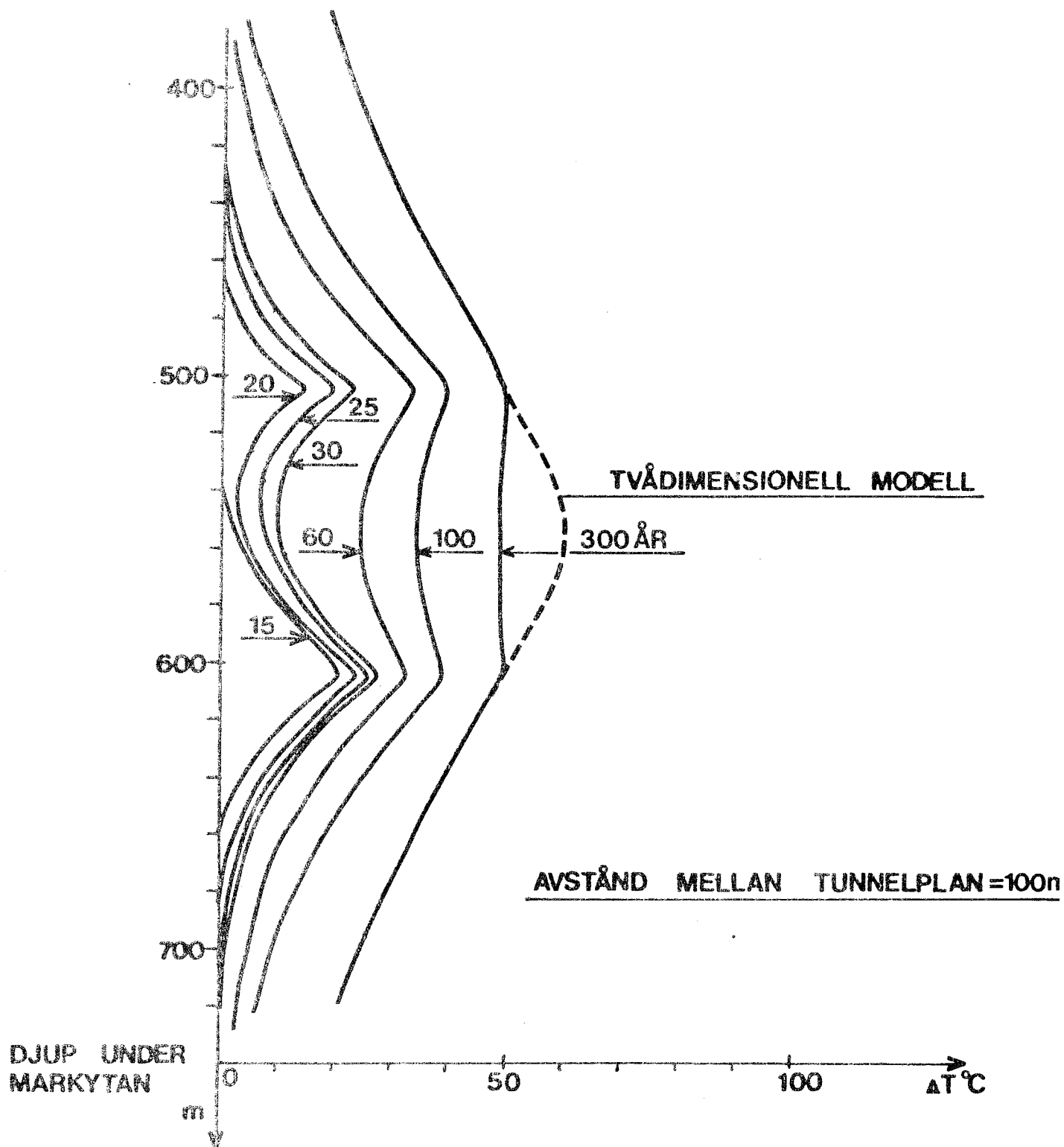
Figur 2C. Temperaturfördelning vid centrum med beräkningsmodell enligt Figur 1C



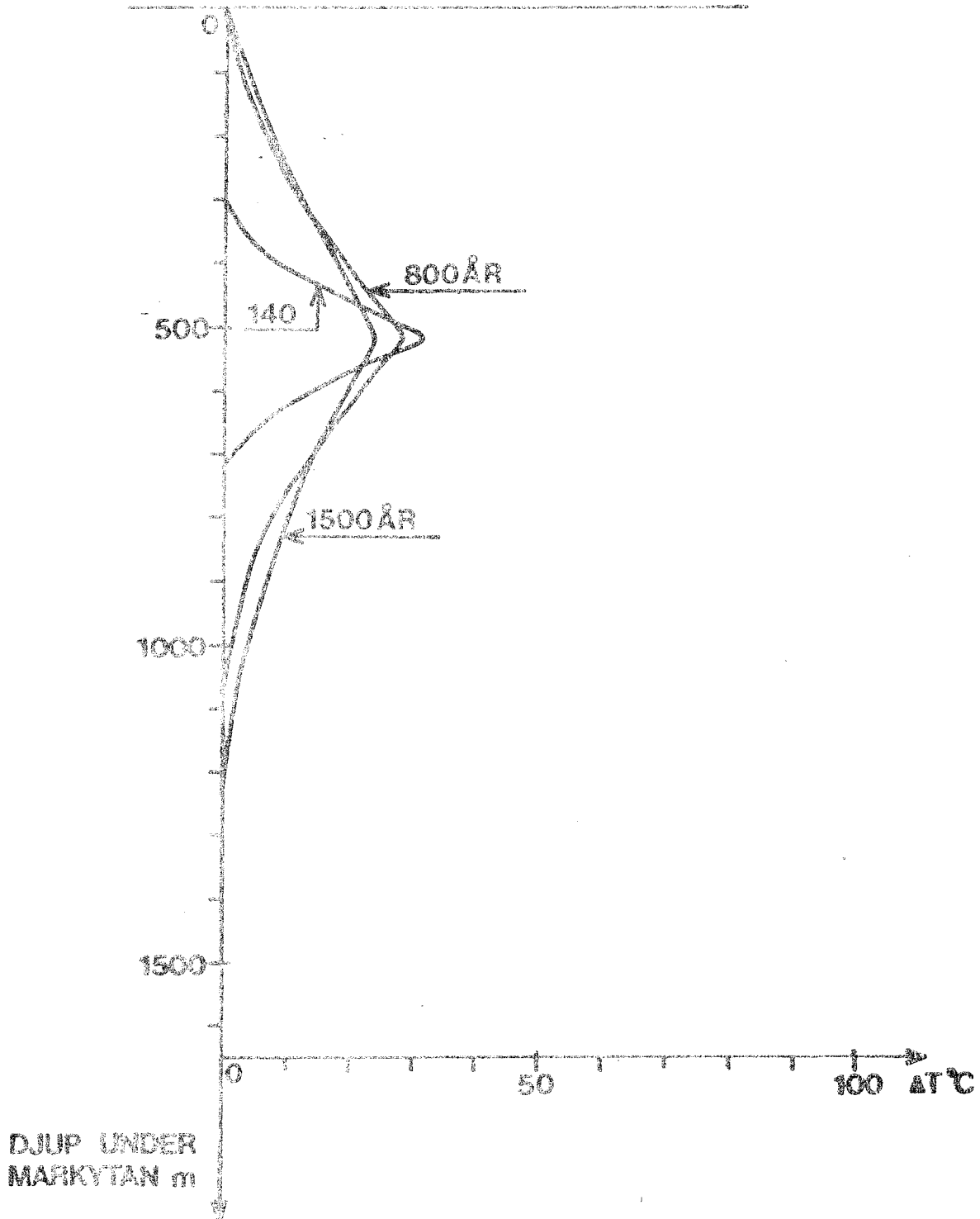
Figur 3A. Temperaturfördelning vid centrum.
 Avstånd mellan tunnelplan 100 m



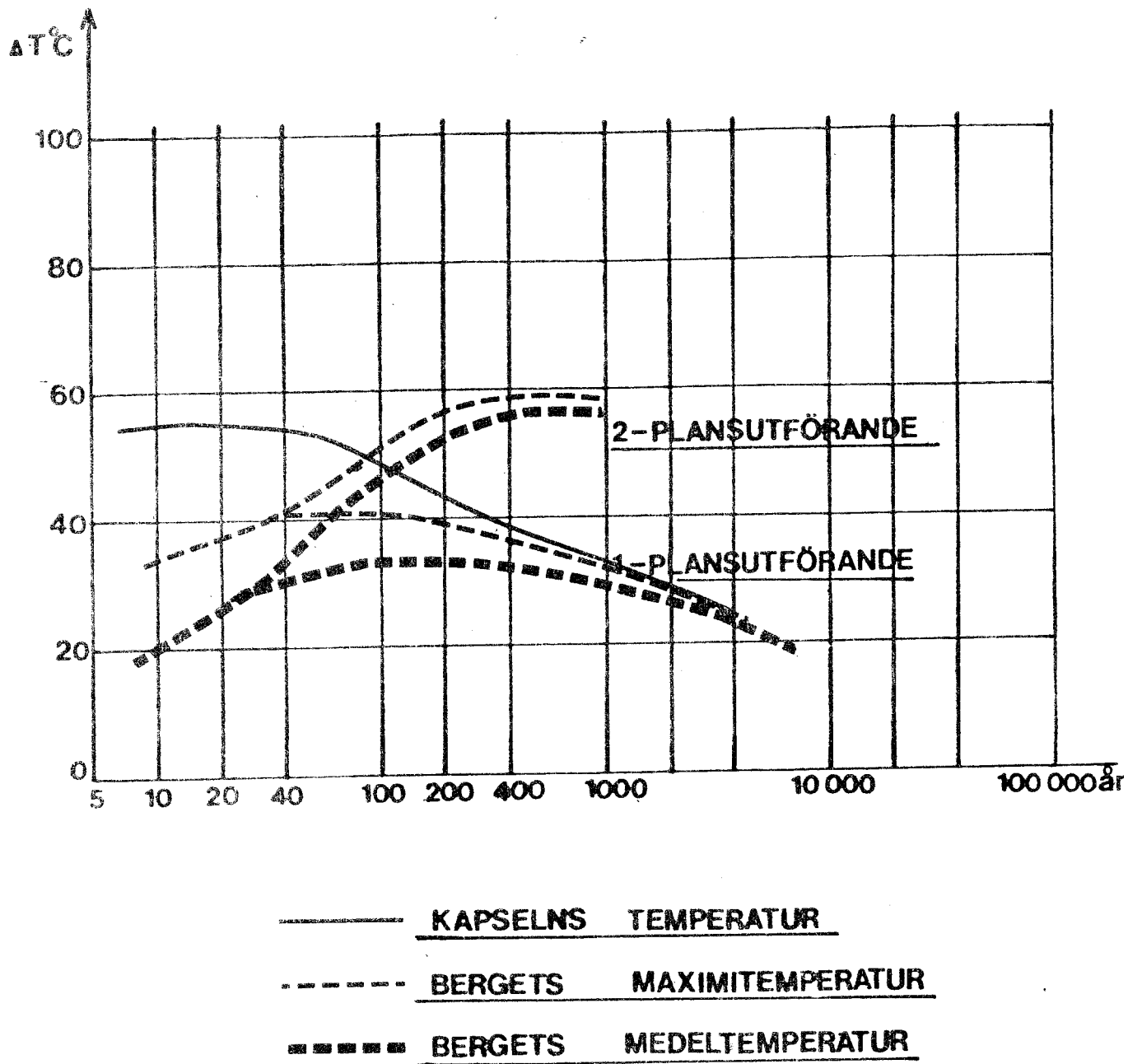
Figur 3B. Temperaturfördelning vid centrum.
Avstånd mellan tunnelplan 100 m



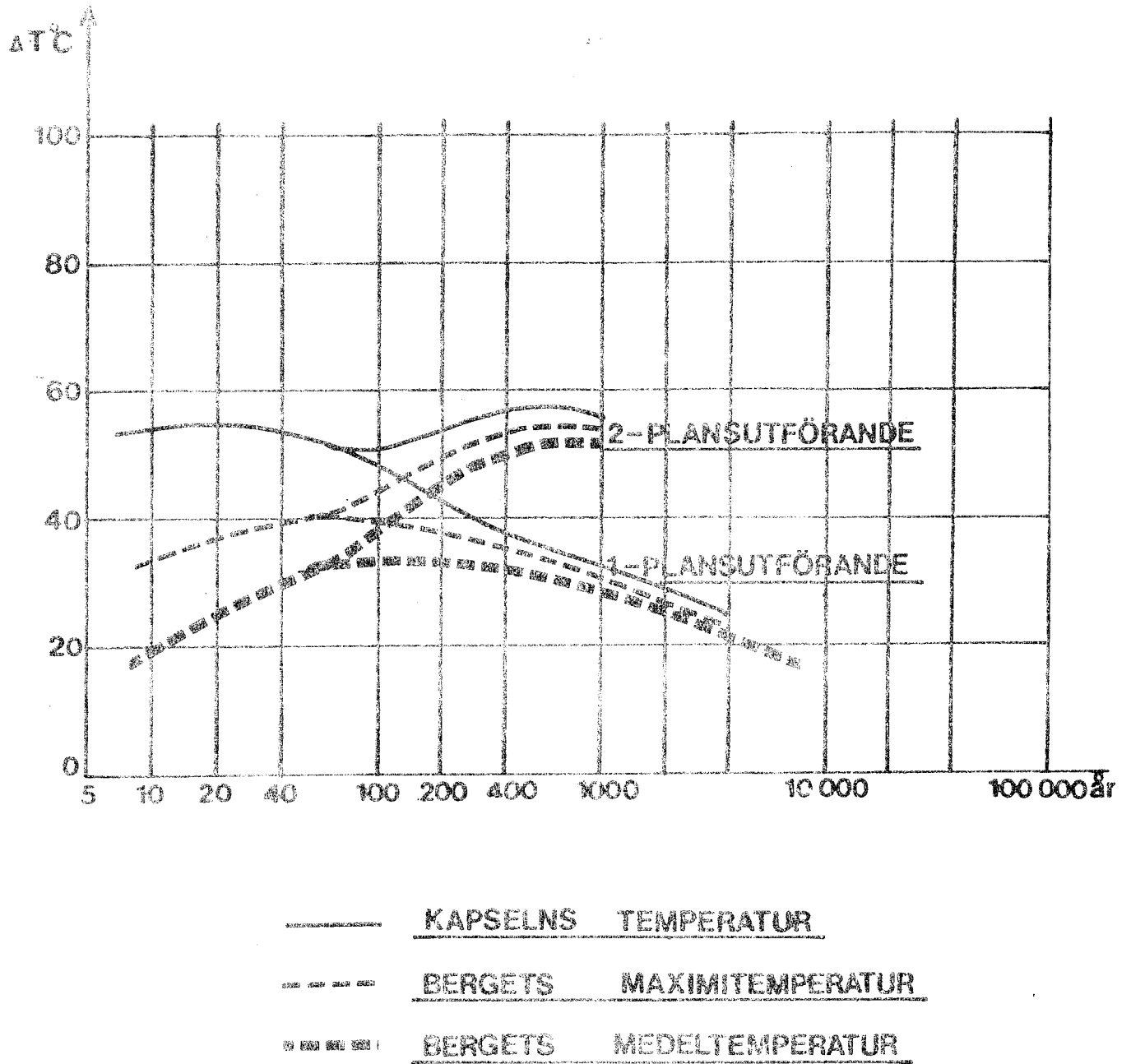
Figur 3C. Temperaturfördelning vid centrum med beräkningsmodell enligt Figur 1C



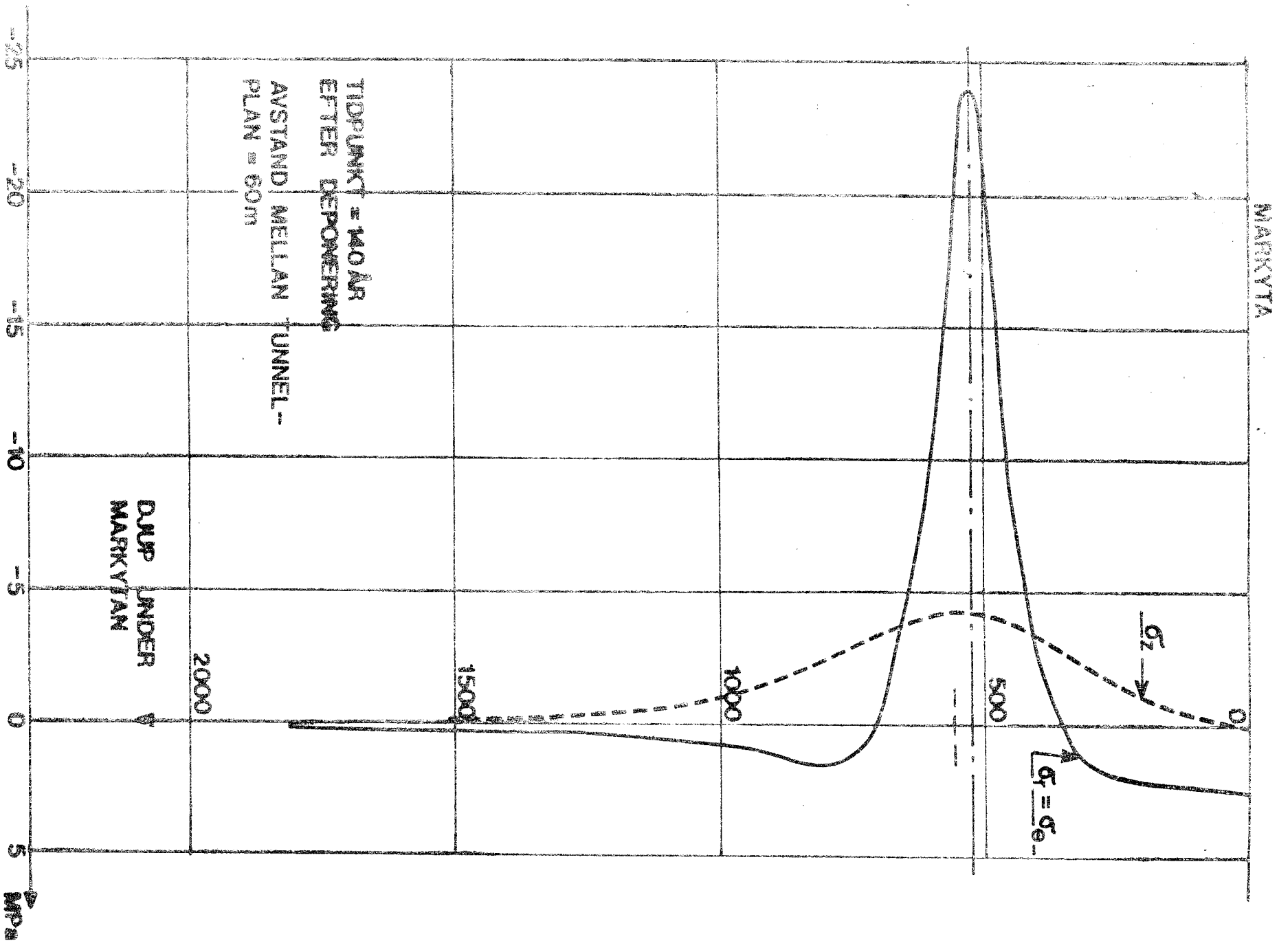
Figur 4. Temperaturfördelning vid centrum.
1-plans utförande



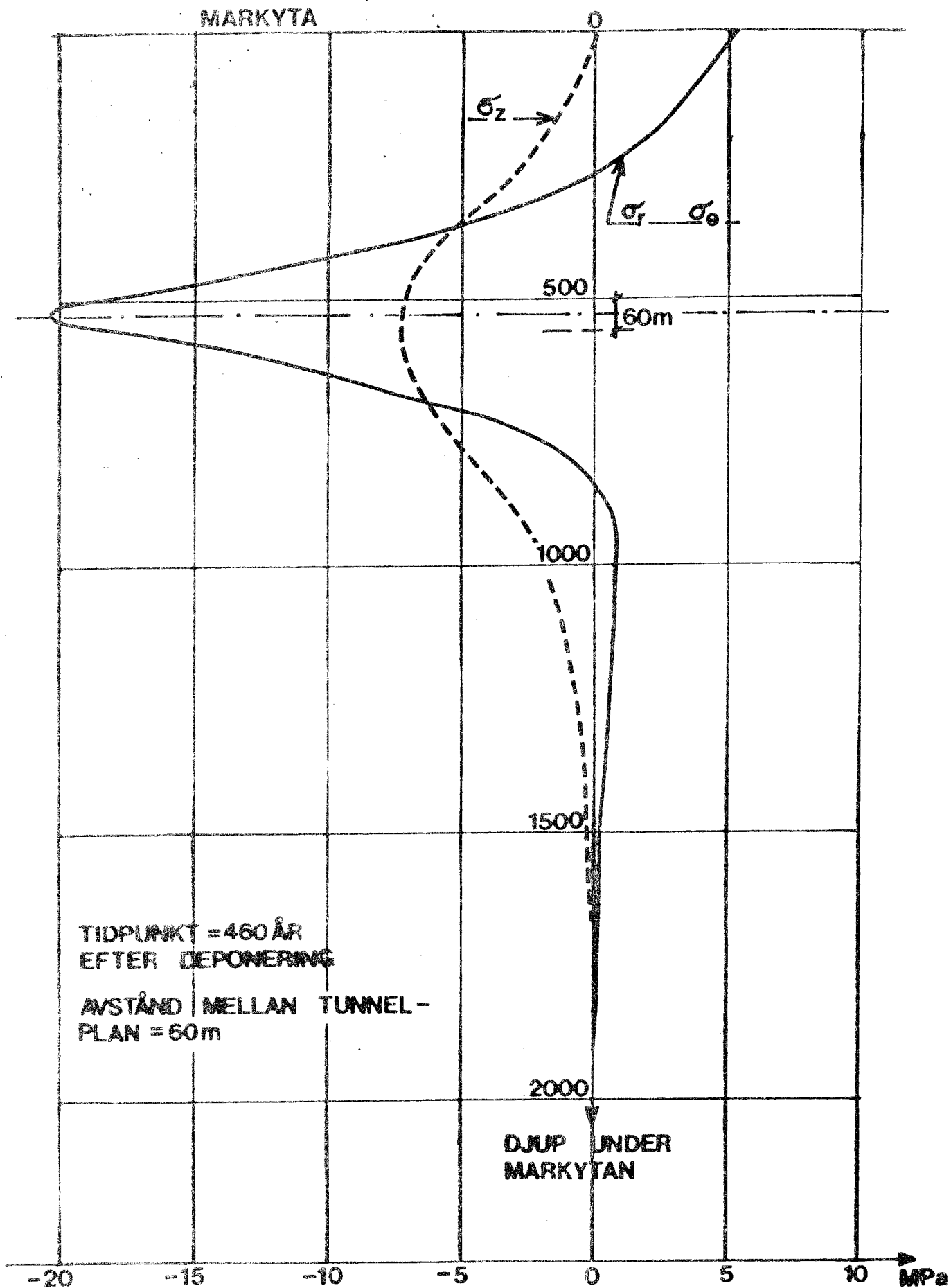
Figur 5. Variation av temperatur vid centrum
2-plan avstånd 60 m



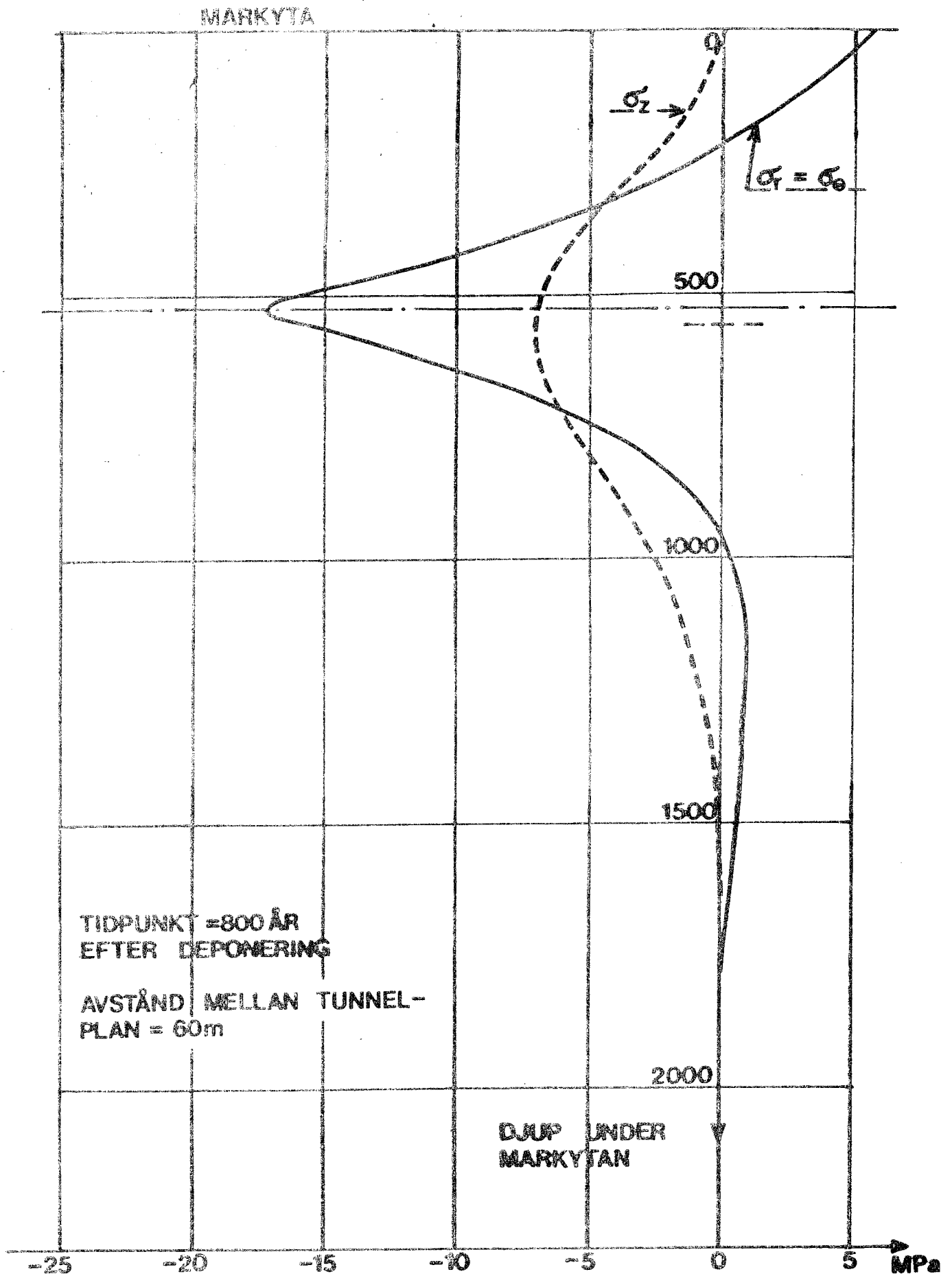
Figur 6. Variation av temperatur vid centrum 2-plan avstånd 100 m



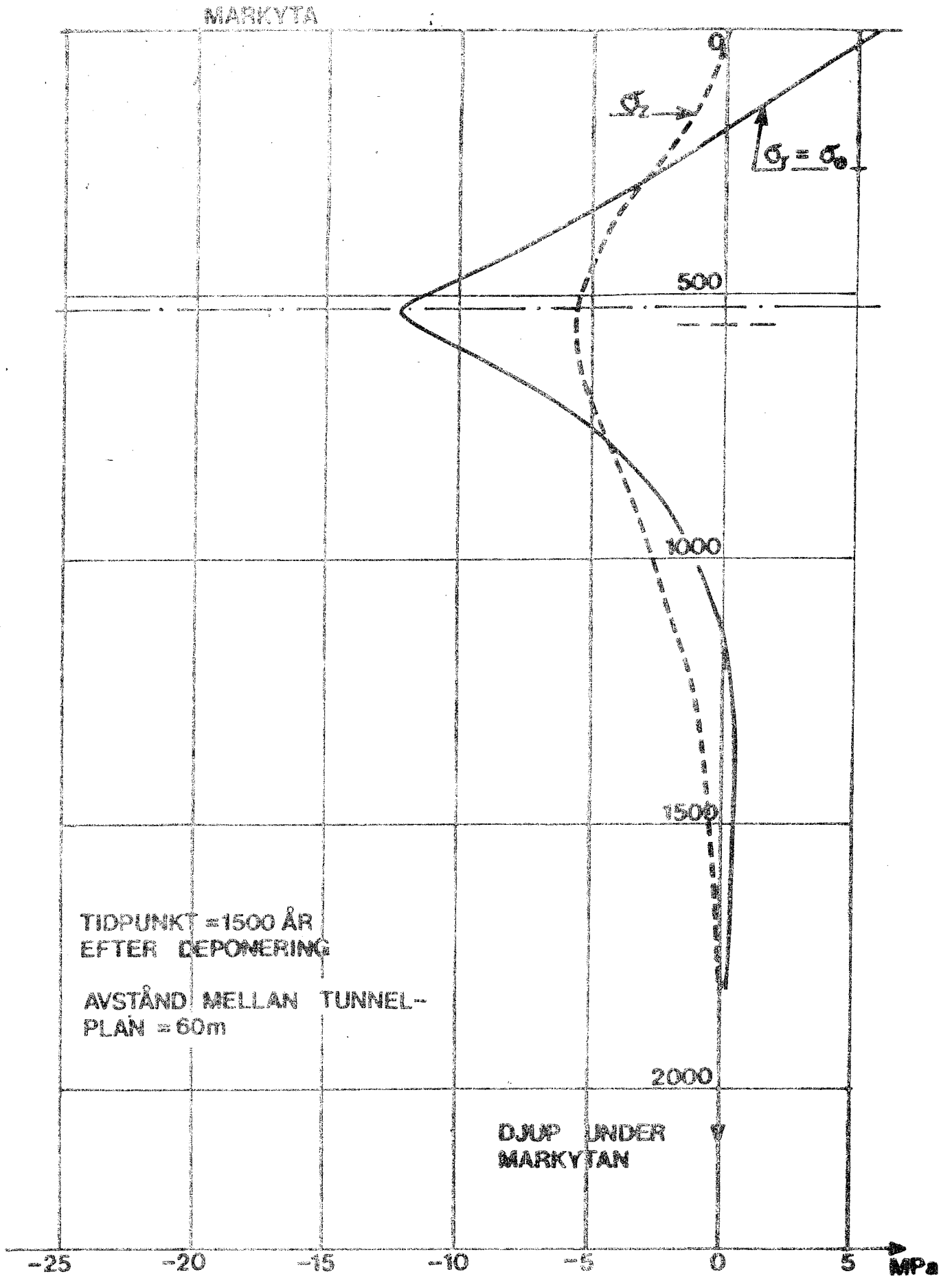
FIGUR 7A. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje



Figur 7B. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje

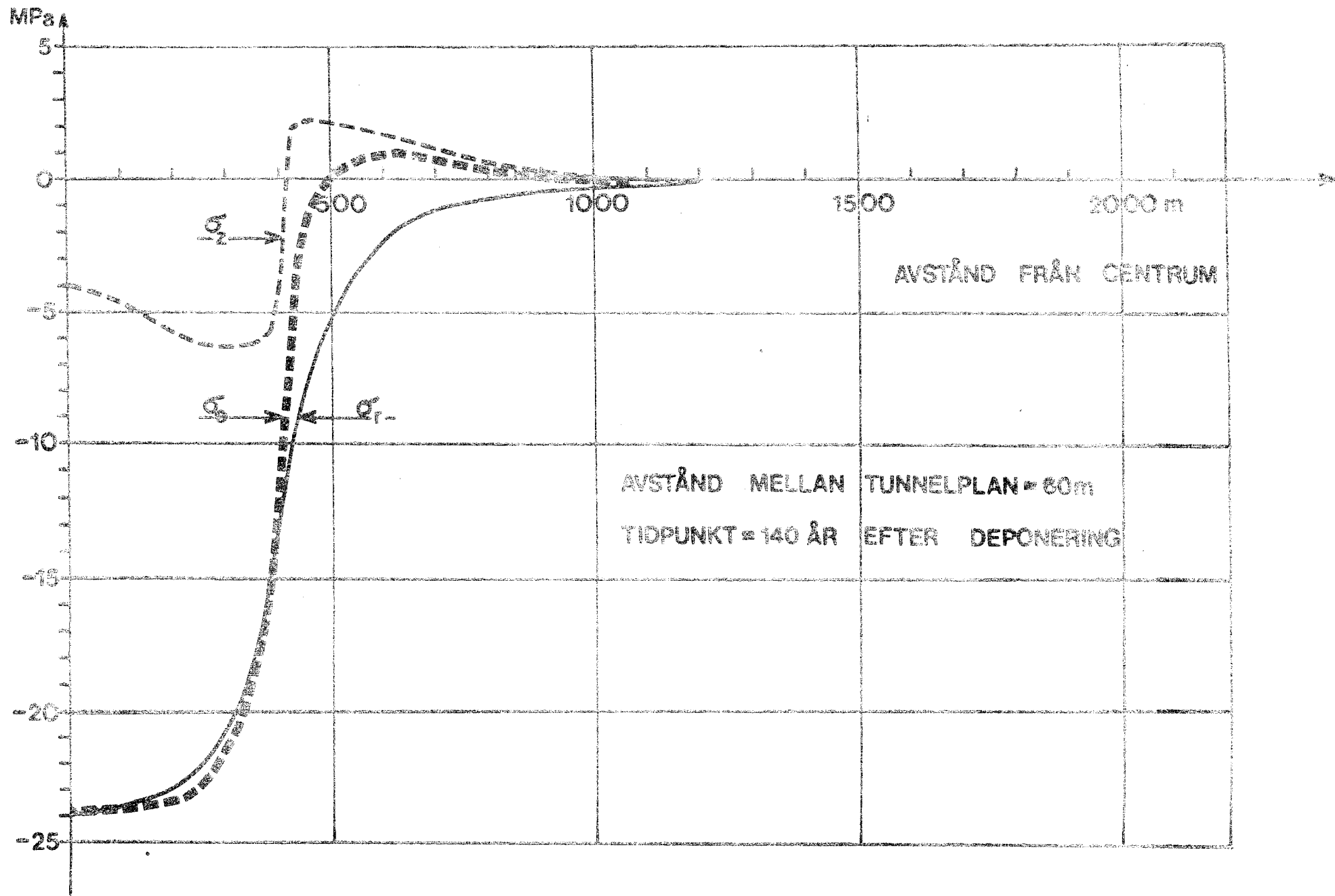


Figur 7C. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje

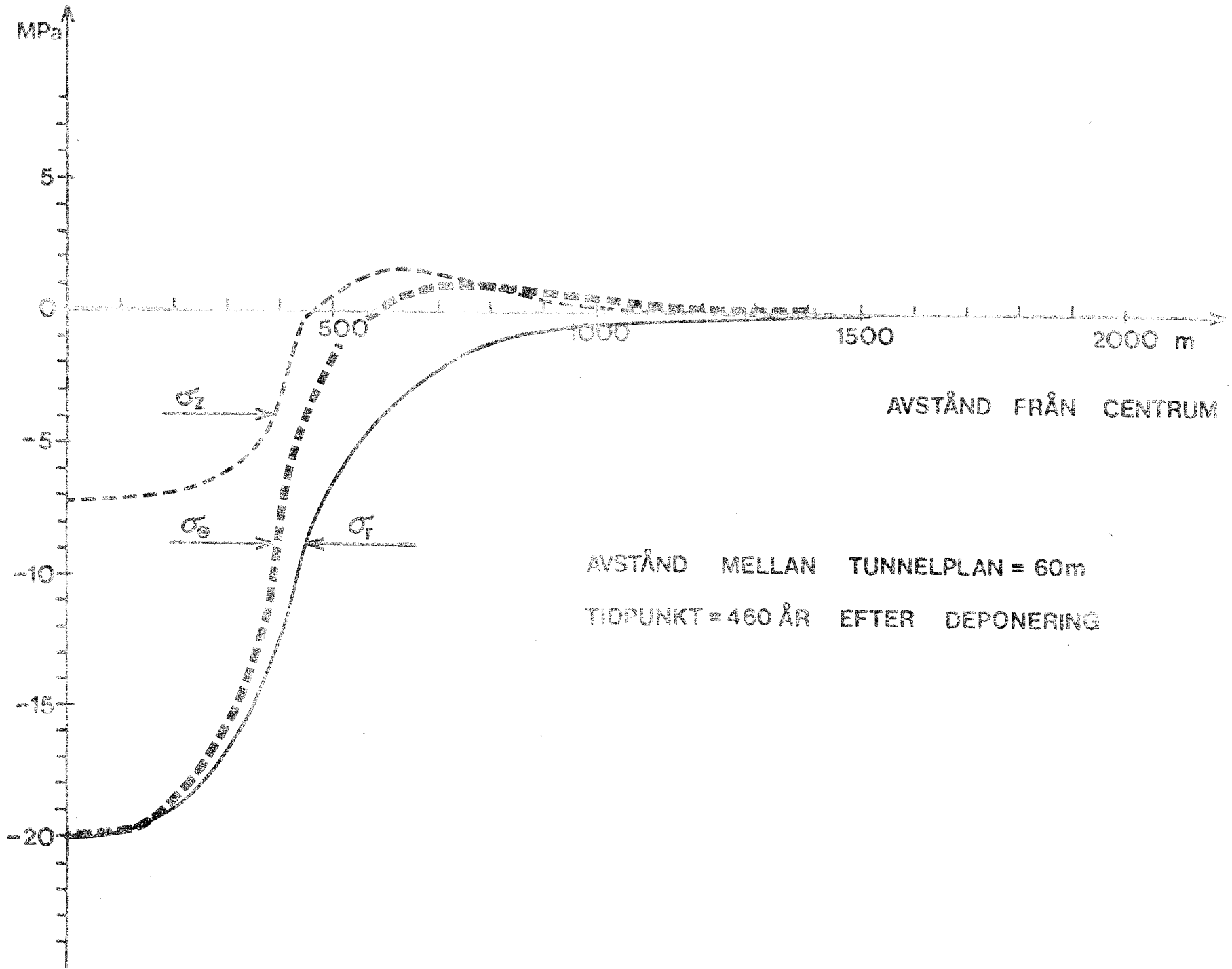


Figur 7D. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje

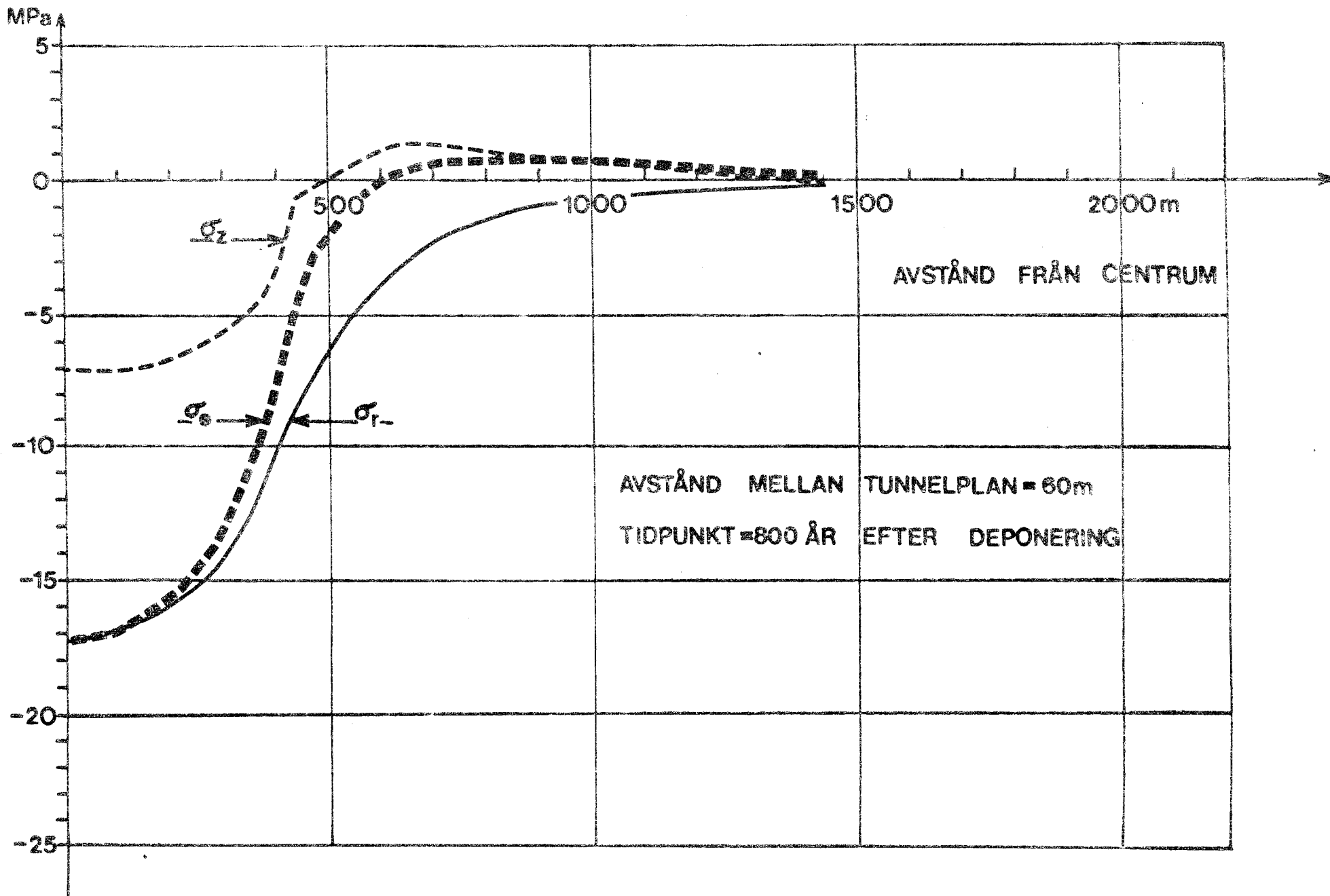
Figur 8A. Temperaturspänningar 530 m under markytan



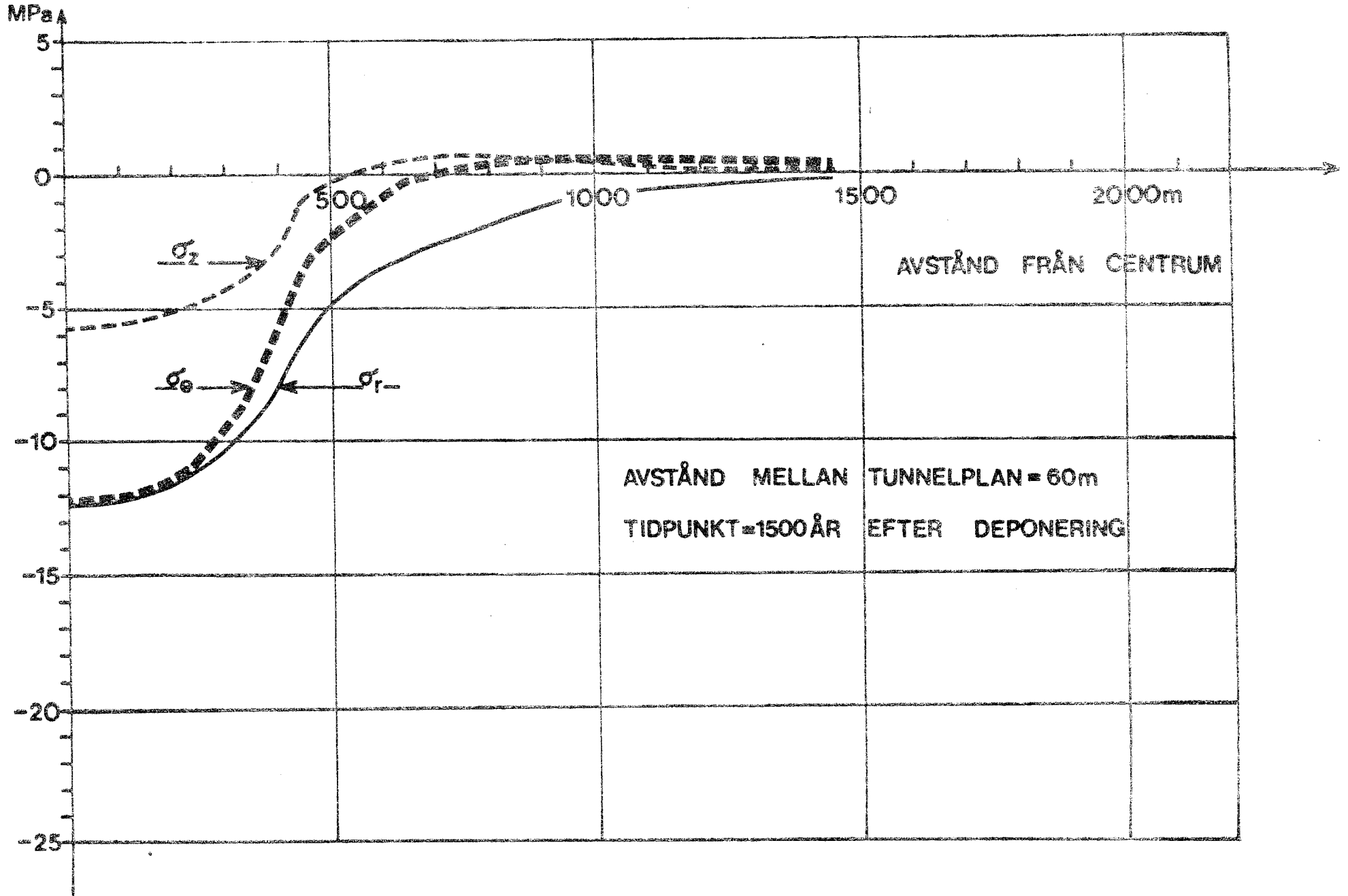
Figur 8B. Temperaturspänningar 530 m under markytan

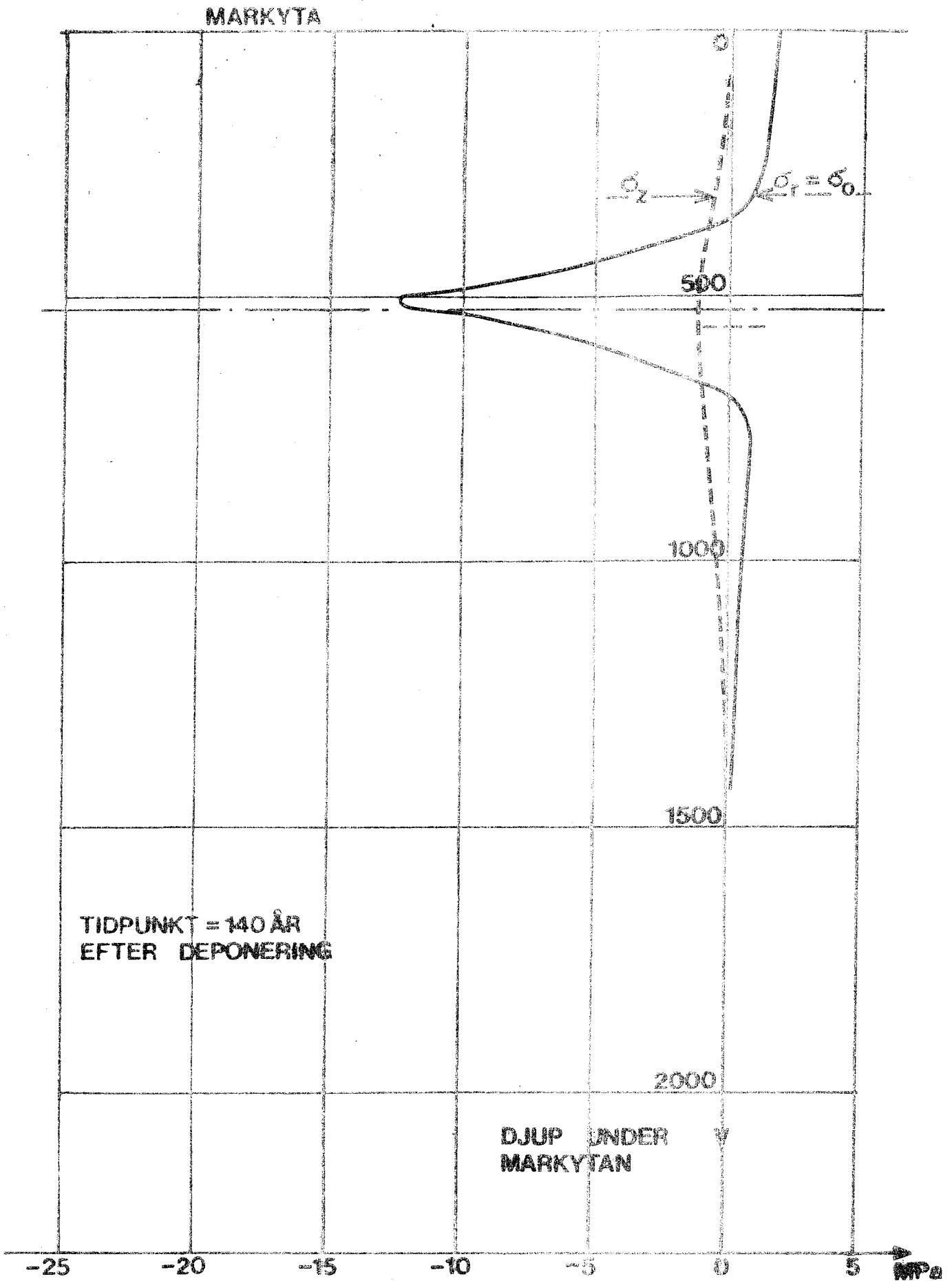


Figur 8C. Temperaturspänningar 530 m under markytan

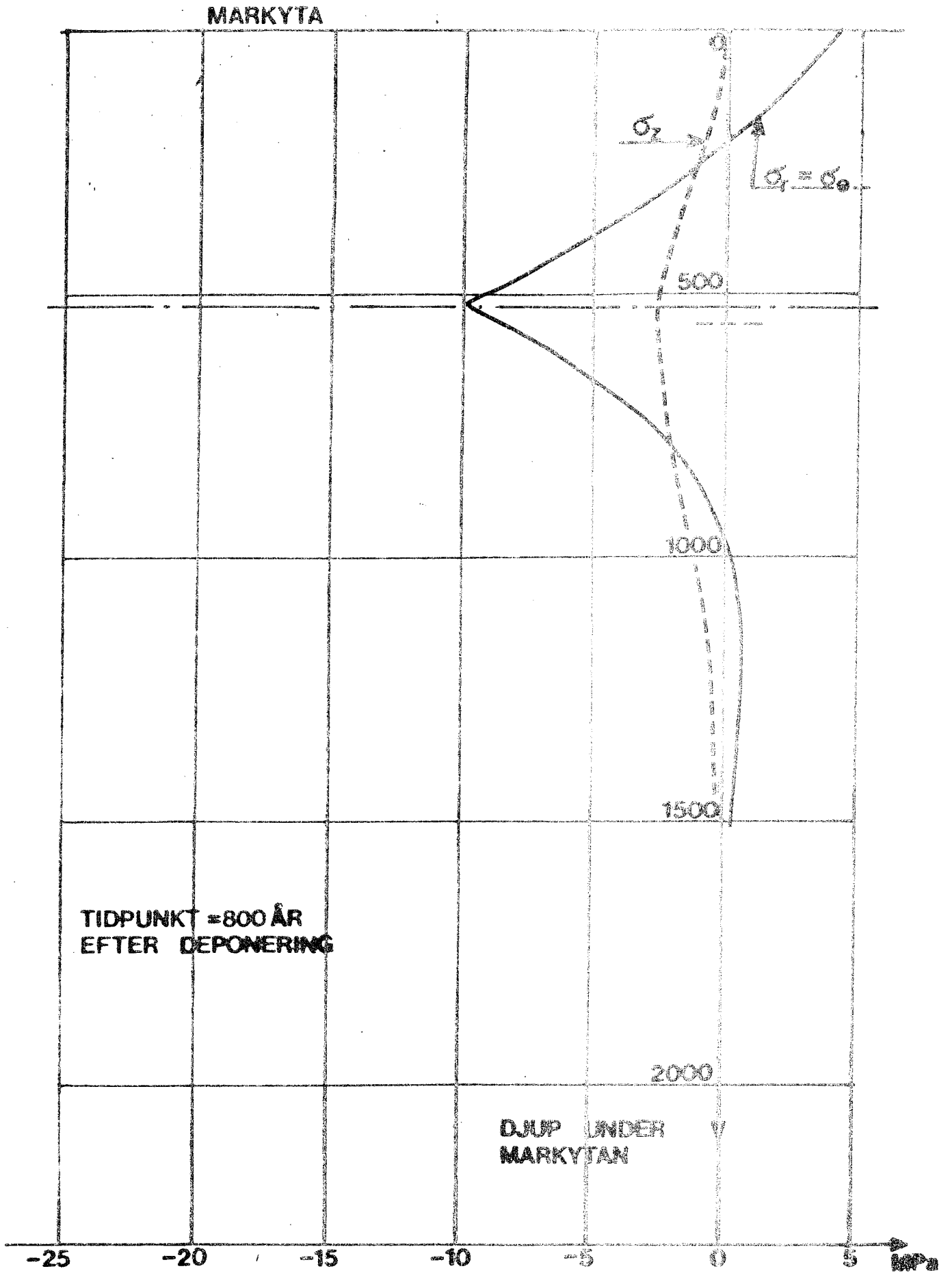


Figur 8D. Temperaturspänningar 530 m under markytan

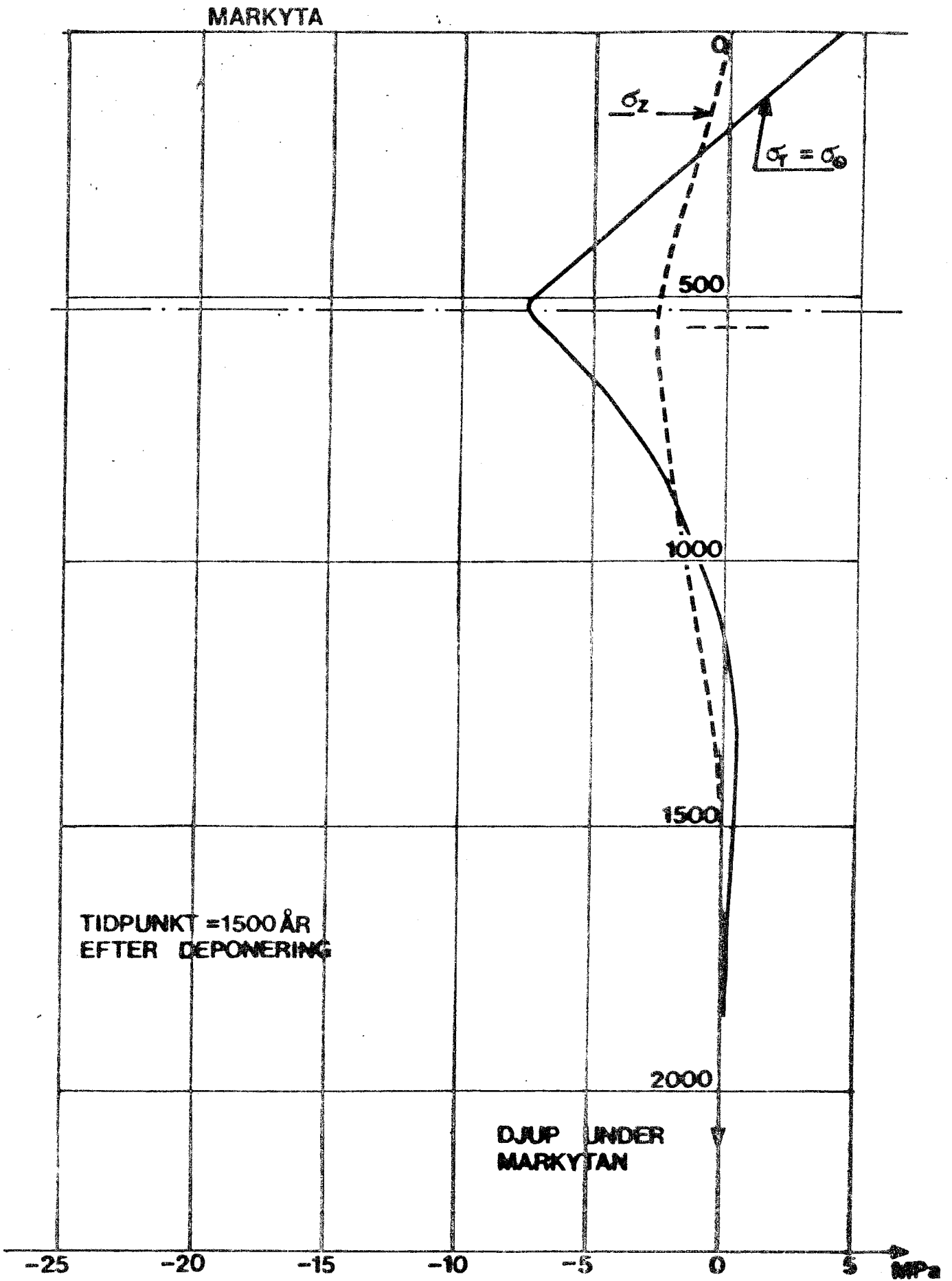




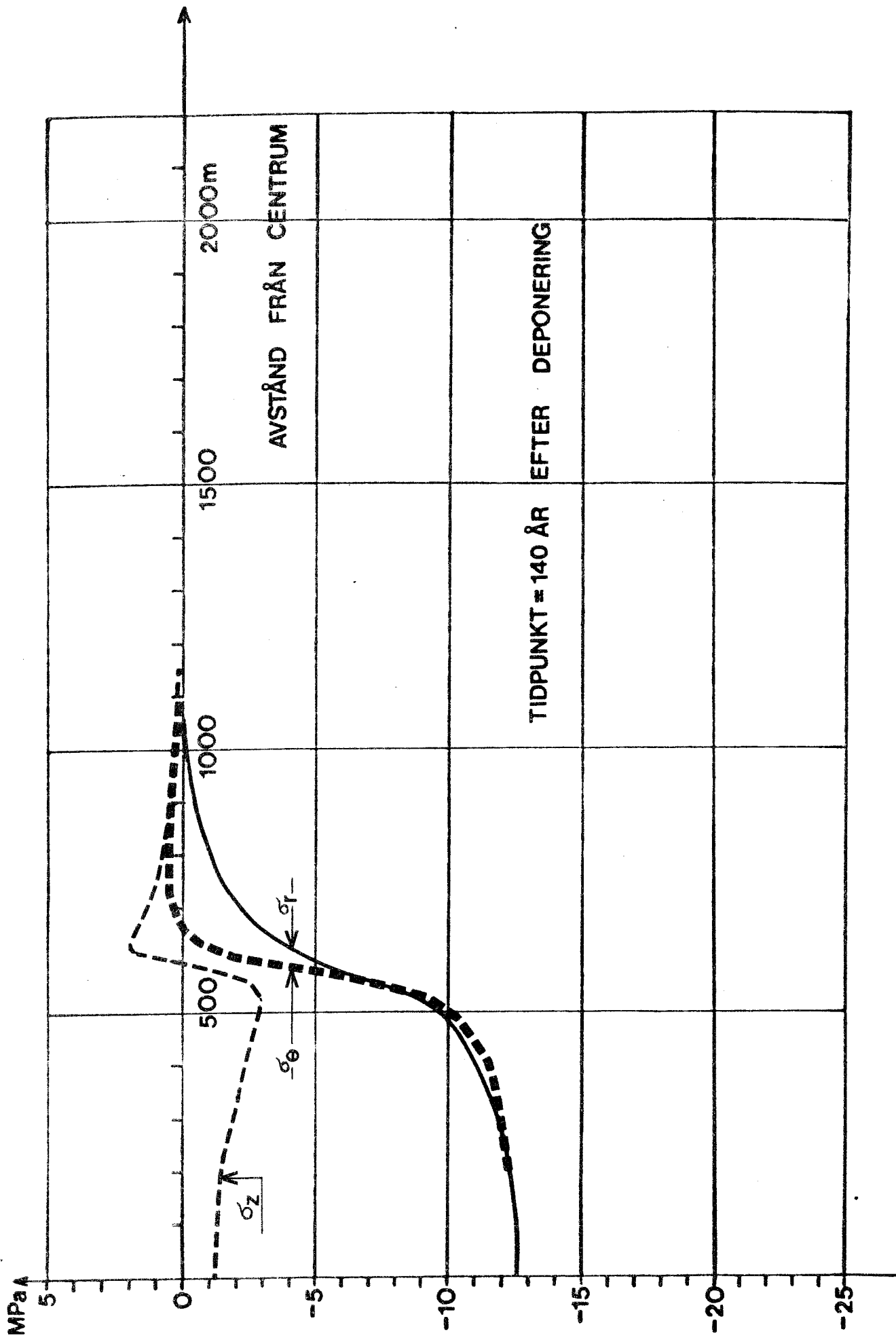
Figur 9A. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje vid 1-plans utförande



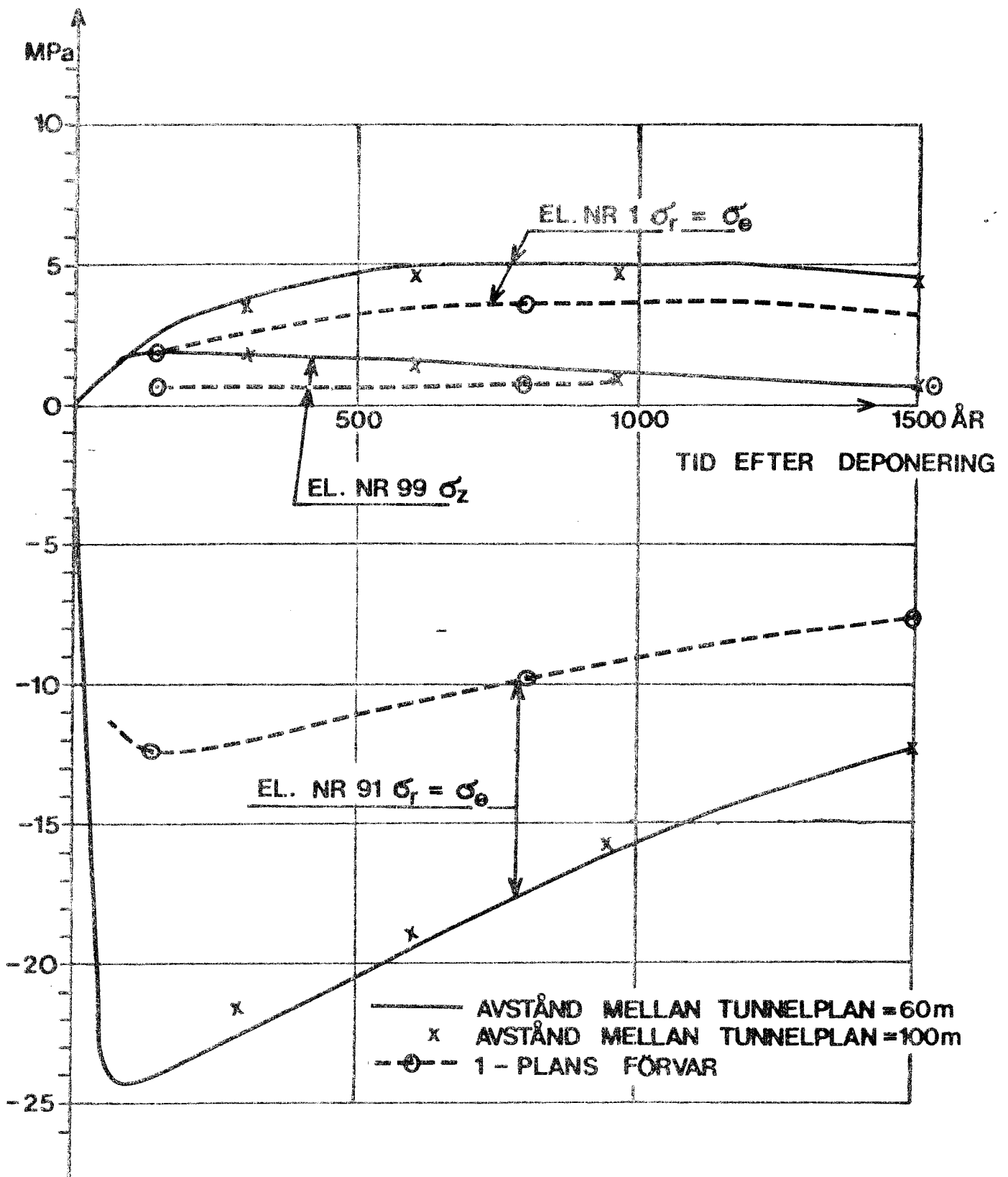
Figur 9B. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje vid 1-plans-utförande



Figur 9C. Temperaturspänningar vid förvarets centrumlinje vid 1-plans-utförande



Figur 10. Temperaturspänningar 515 m under markytan vid 1-plans-utförande



Figur 11. Temperaturspänningar sfa tiden

DECAY TIME	1	2	3	4	1+3	2+4	2+3
YEARS							
	FP	FP	HM	HM	FP+HM	FP+HM	ORIFP
	BEGAFIP	ORIGEN	BEGAFIP	ORIGEN	BEGAFIP	ORIGEN	+BEG HM
1	6559	7250	400	301	6959	7551	7650
2	3524	3920	194	155	3719	4075	4114
5	1269	1380	147	121	1416	1511	1597
10	785	836	157	126	942	962	993
15	655	693	164	130	819	823	857
20	572	605	168	133	740	738	778
30	446	472	172	135	616	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	226
200	7,53	8,40	117	93,6	124	102	126
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	35,7	43,2
2000	0,0095	0,0183	23,6		23,6		23,6
5000	0,0094	0,0181	15,3		15,3		15,3
10 000	0,0092	0,0177	10,9		10,9		10,9

RECOMMENDED VALUES
ILLUSTRATED IN FIG.3

FÖRTECKNING ÖVER SENS KONKRETA SÄS TEKNISKA RAPPORTER

- 79-01 Clay particle redistribution and piping phenomena in bentonite/
quartz buffer material due to high hydraulic gradients
Roland Pusch
University of Luleå 1979-01-10
- 79-02 Försöksområdet vid Finnsjön
Beskrivning till berggrunds- och jordartskartor
Karl-Erik Almén
Lennart Ekman
Andrzej Olkiewicz
Sveriges Geologiska Undersökning november 1978
- 79-03 Bergmekanisk bedömning av temperaturbelastning vid slutförvaring
av radioaktivt avfall i berg
Ove Stephansson
Bengt Leijon
Högskolan i Luleå 1979-01-10
- 79-04 Temperatur- och spänningsberäkning för slutförvar
Taivo Tarandi
VBB Vattenbyggnadsbyrån, Stockholm februari 1979
- 79-05 Kompletterande berggrundsundersökningar inom Finnsjö- och
Karlshamnsområdena
Andrzej Olkiewicz
Sören Scherman
Karl-Axel Korafält
Sveriges Geologiska Undersökning 1979-02-02
- 79-06 Kompletterande permeabilitetsmätningar i Karlshamnsområdet
Gunnar Gidlund
Kenth Hansson
Ulf Thoregren
Sveriges Geologiska Undersökning februari 1979
- 79-07 Kemi hos berggrundsvatten i Blekinge
Gunnar Jacks
Institutionen för Kulturteknik, KTH, februari 1979
- 79-08 Beräkningar av grundvattencörelser inom Sternöområdet i Blekinge
John Stokes
Institutionen för Kulturteknik, KTH, februari 1979
Preliminär utgåva