

Bergvärme

Varifrån kommer värmen?

Göran Hellström

Göran Hellström¹ and Signhild Gehlin²

¹ Lund University of Technology, Mathematical Physics, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

² Swedish Center for Shallow Geothermal Energy, Box 1127, SE-22104 Lund, Sweden

signhild@geoenergicentrum.se

Innehåll

1. Markens begynnelsestemperatur

- Historiskt klimat
- Klimat sedan 1700-talet
- Global uppvärmning
- Uppvärmning från husgrunder

2. Cirkulation av köldbärare utan värmeuttag

3. Värmetransport i marken

4. Överlagrat värmeuttag

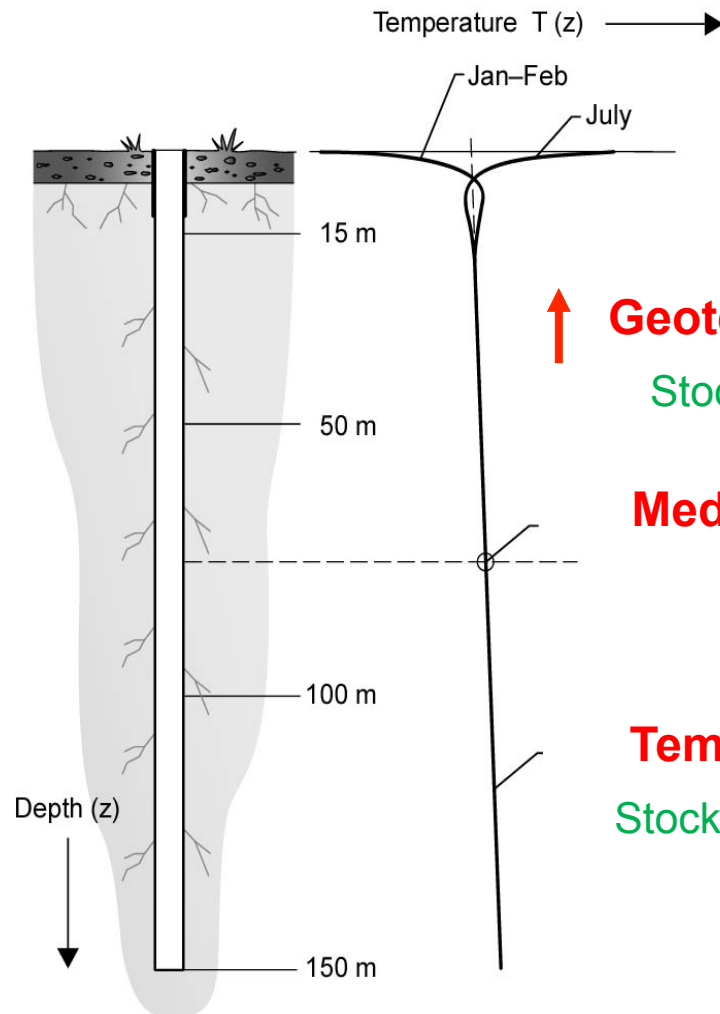
5. Tidsskala

6. Värmeflöde från markytan

7. Återladdning

8. Sammanfattning

Vertikal temperaturprofil i marken



↑ **Geotermiskt värmefflöde (W/m^2)**
Stockholm ca $50 \text{ mW}/m^2$ ($0,4 \text{ kWh}/m^2$, år)

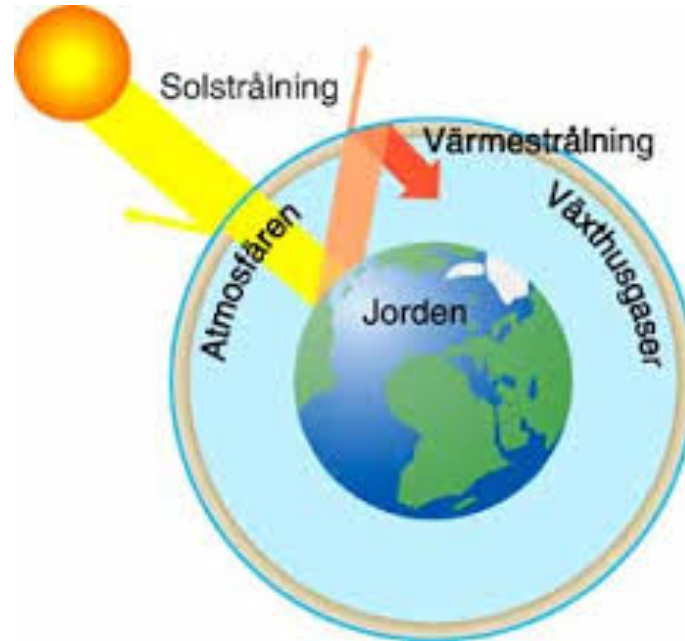
Medeltemperatur ($^{\circ}C$)

Temperaturgradient (K/m)

Stockholm 13-15 K/km

“Klassisk” beskrivning av vertikal temperaturprofil
Säsongsvariation nära markyta och linjär temperaturökning med djup

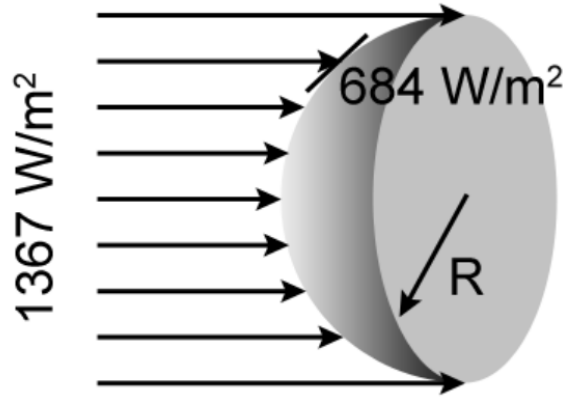
Värme från jordens inre



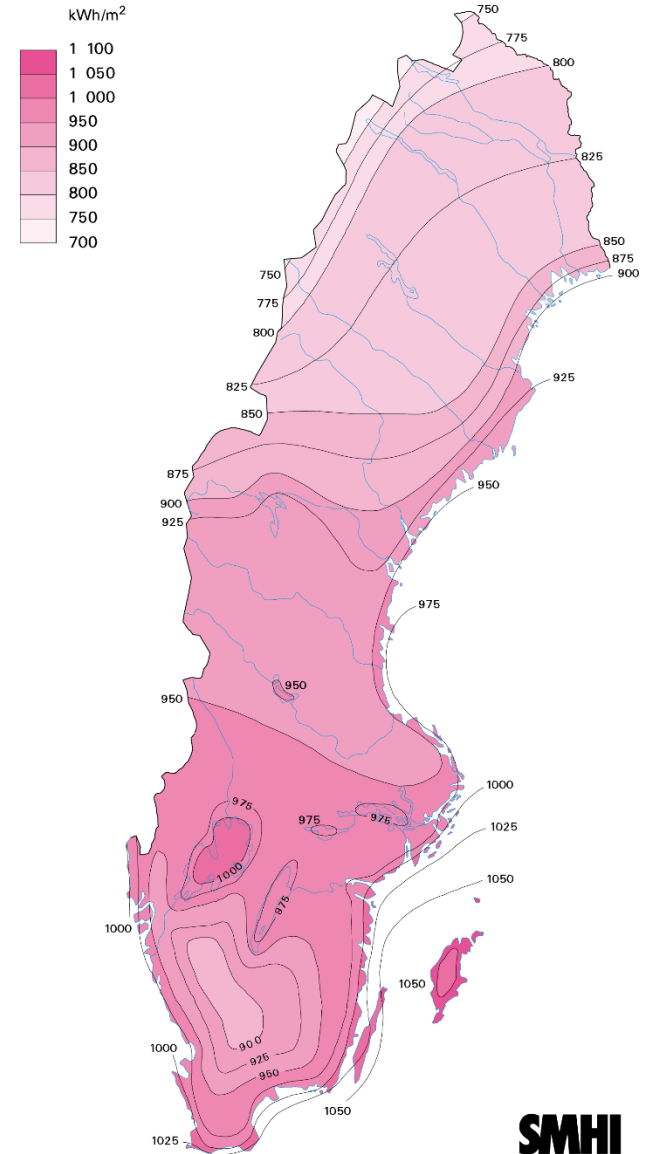
- 44 TW värme flödar ut från jordens inre (ca 87 mW/m²)
- 20 TW beror på radioaktiv värmegenerering
 - 24 TW från nedkylning av jordens inre

Om solen slocknar, så motsvaras detta flöde av det en jämviktstemperatur för svartkroppsstrålning på -240 °C

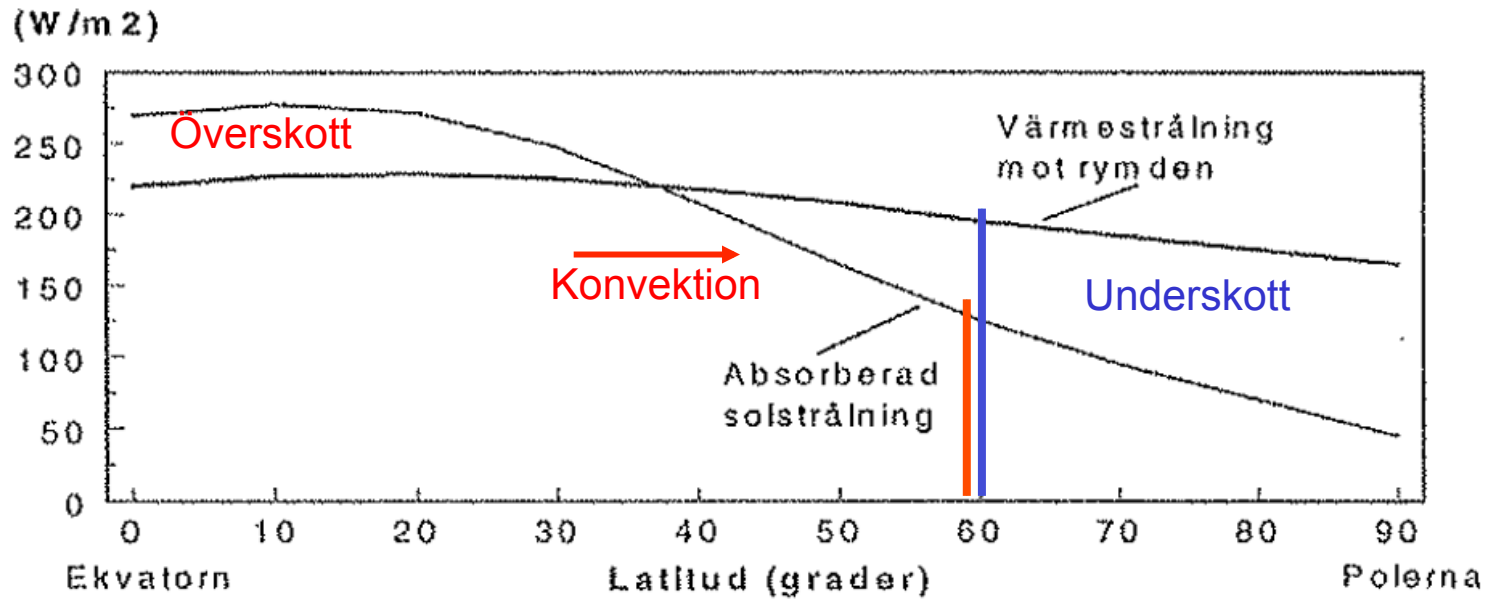
Solinstrålning



Solinstrålning ca 1000 kWh/m^2 , år



Energibalans

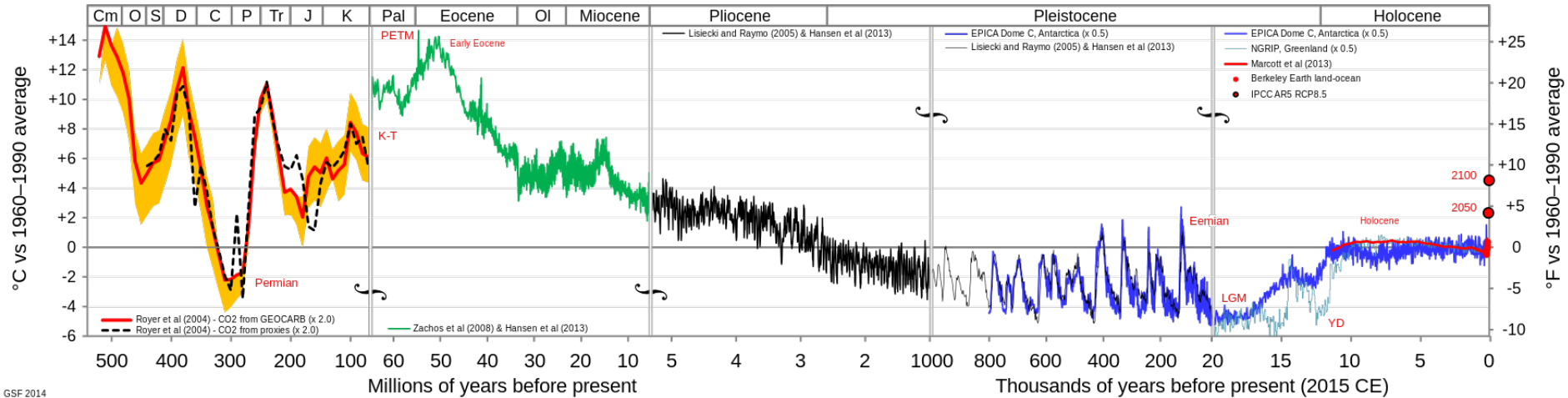


Energibalans vid markytan

- + Solinstrålning +1000 kWh/m², år
- + Konvektiv värmetransport från luft ?
- + Värme från jordens inre + 0,4 kWh/m²,år
- + Kondensation ?
- Värmeutstrålning till "rymden" -1500 kWh/m², år
- Förångning

0

Historiskt klimat

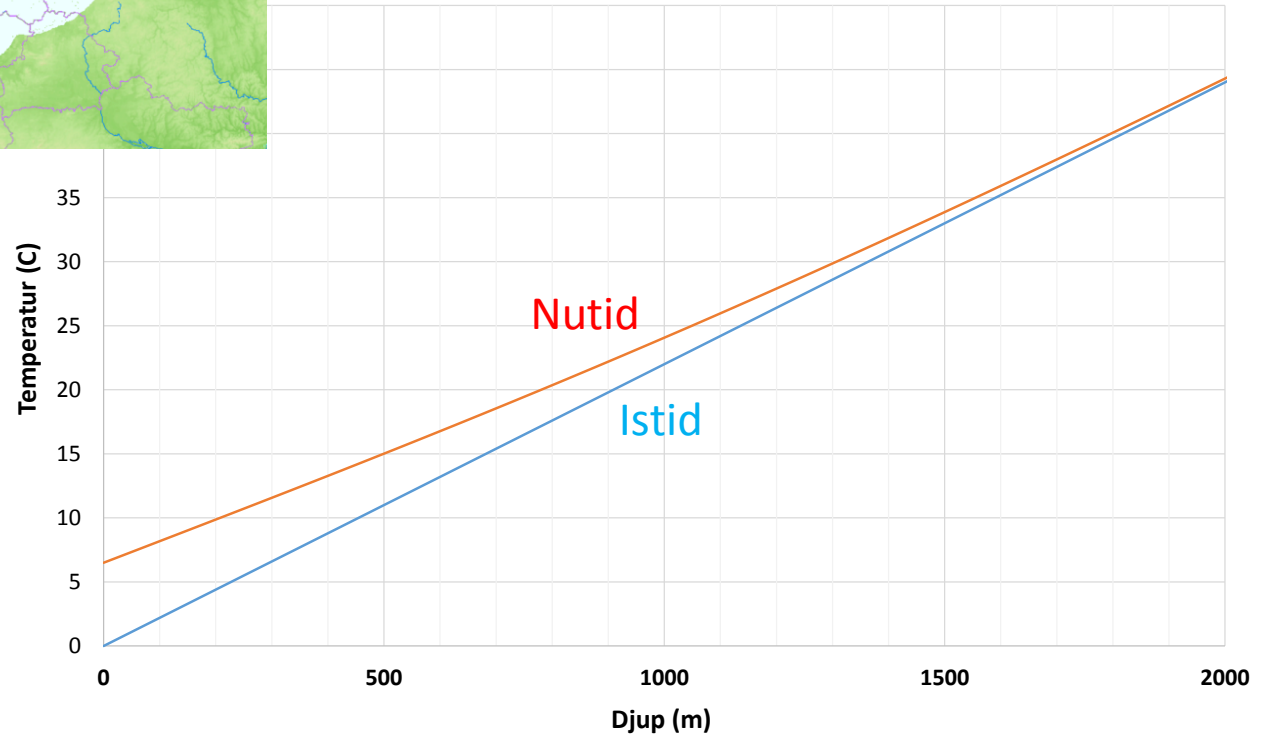


Jordens temperatur i förhållande till dagens nivå (1960-1990)

Astronomiska orsaker:

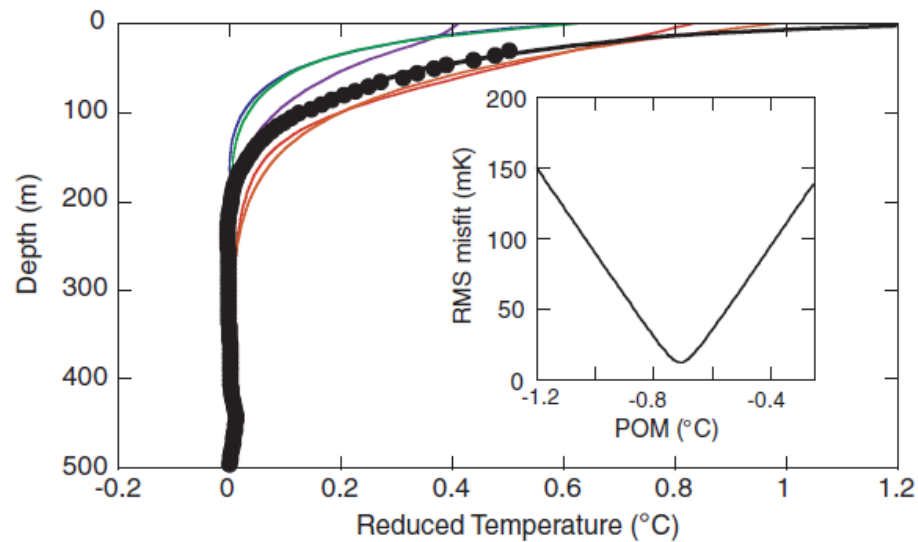
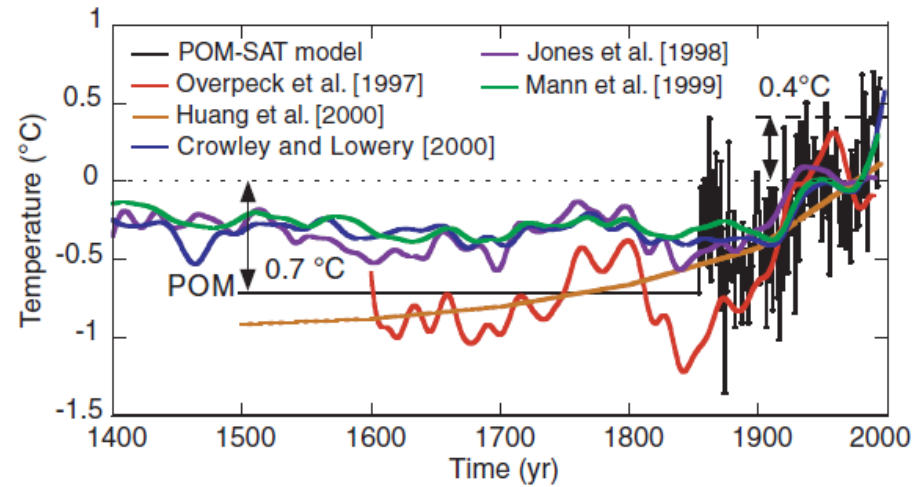
- Solens variabilitet (solfläckar) (11-års cykel)
- Jordens lutning och elliptiska bana (21,000-års cykel)
- Variation jordens elliptiska bana (lutning) (41,000-års cykel)
- Variation jordens elliptiska bana (eccentricitet) (100,000-års cykel)

Uppvärmning sedan istiden



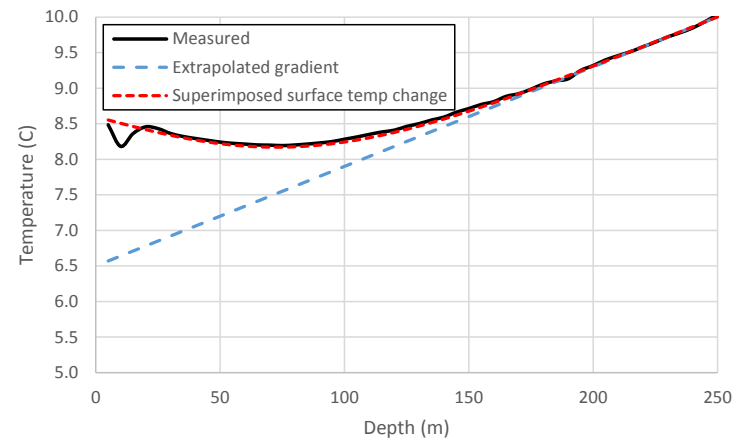
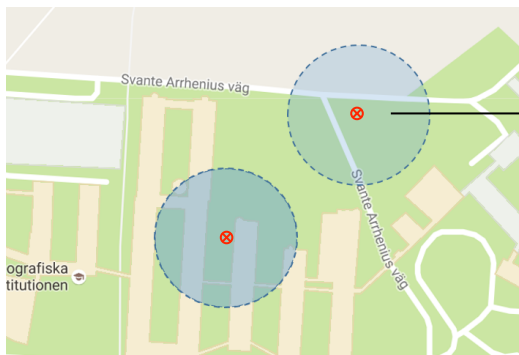
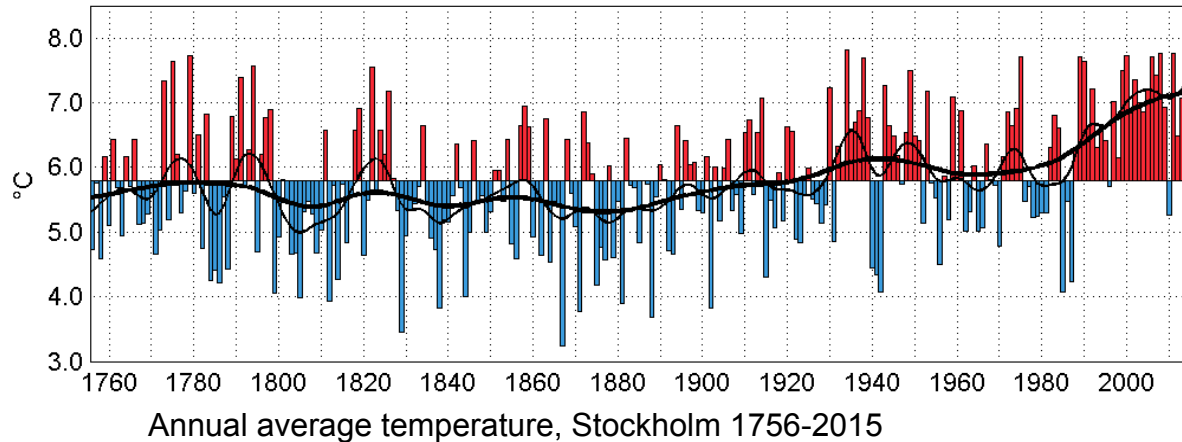
Uppvärmningen sedan istiden har höjt marktemperaturen drygt 5 °C (Stockholm)

Temperaturprofil och global uppvärmning



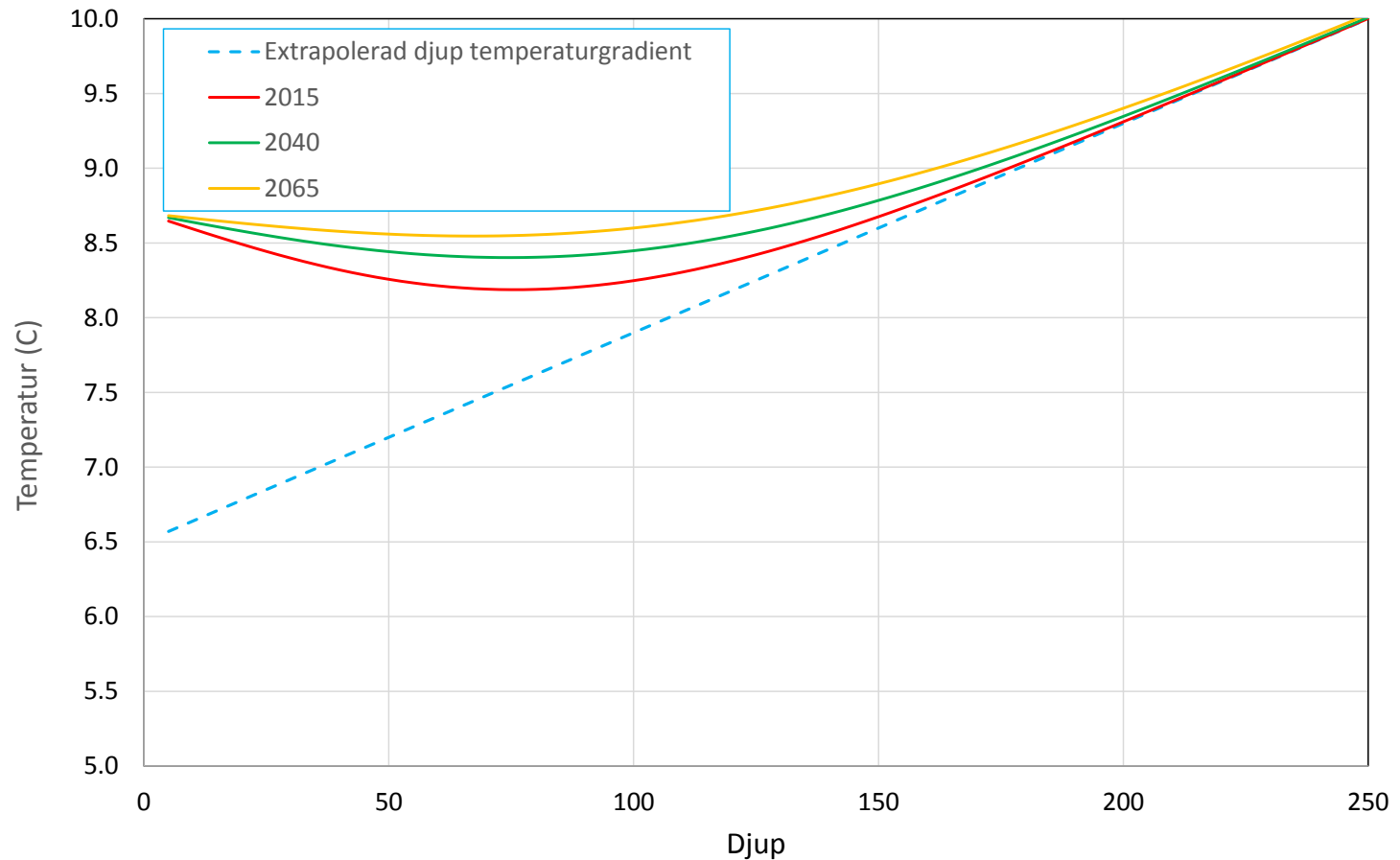
Ändring av vertikal temperaturprofil pga global uppvärmning

Temperaturprofil och global uppvärmning



Ändring av vertikal temperaturprofil pga global uppvärmning
Borrhål vid Norra Frescati, Stockholm

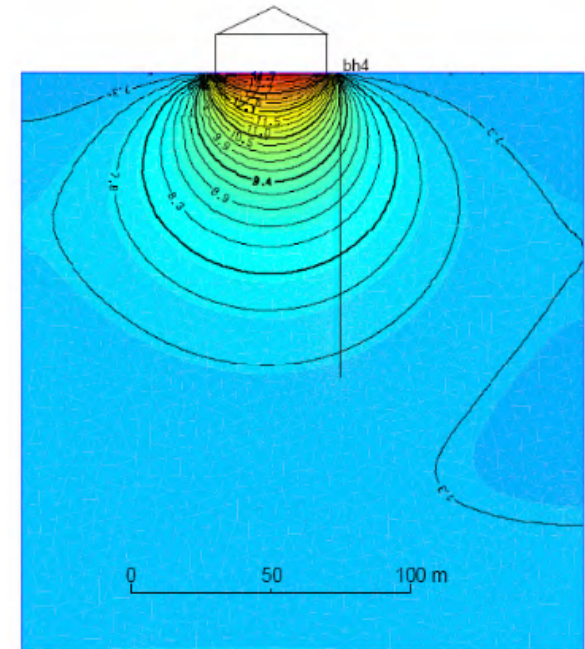
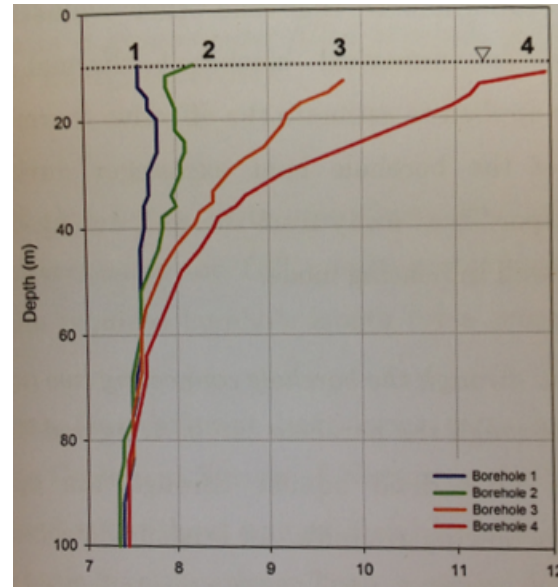
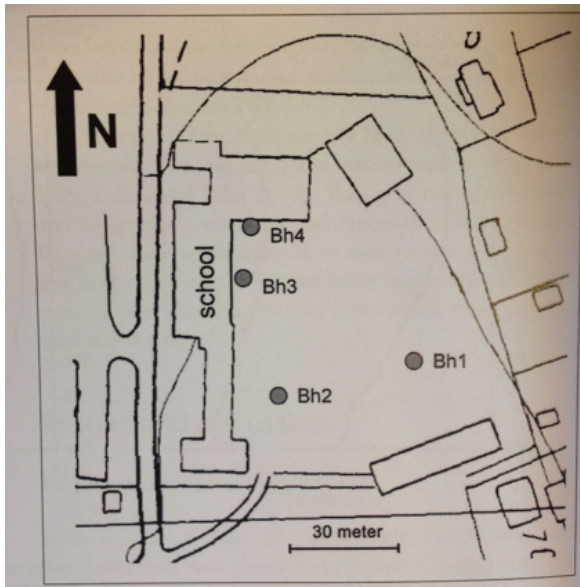
Temperaturprofil och global uppvärmning



Vertikal temperaturprofil idag och 25 och 50 år
Tillför ca 90 mW/m² från markytan

Borrhålets (250 m) medeltemperatur ökar med 0,1 °C/25 år

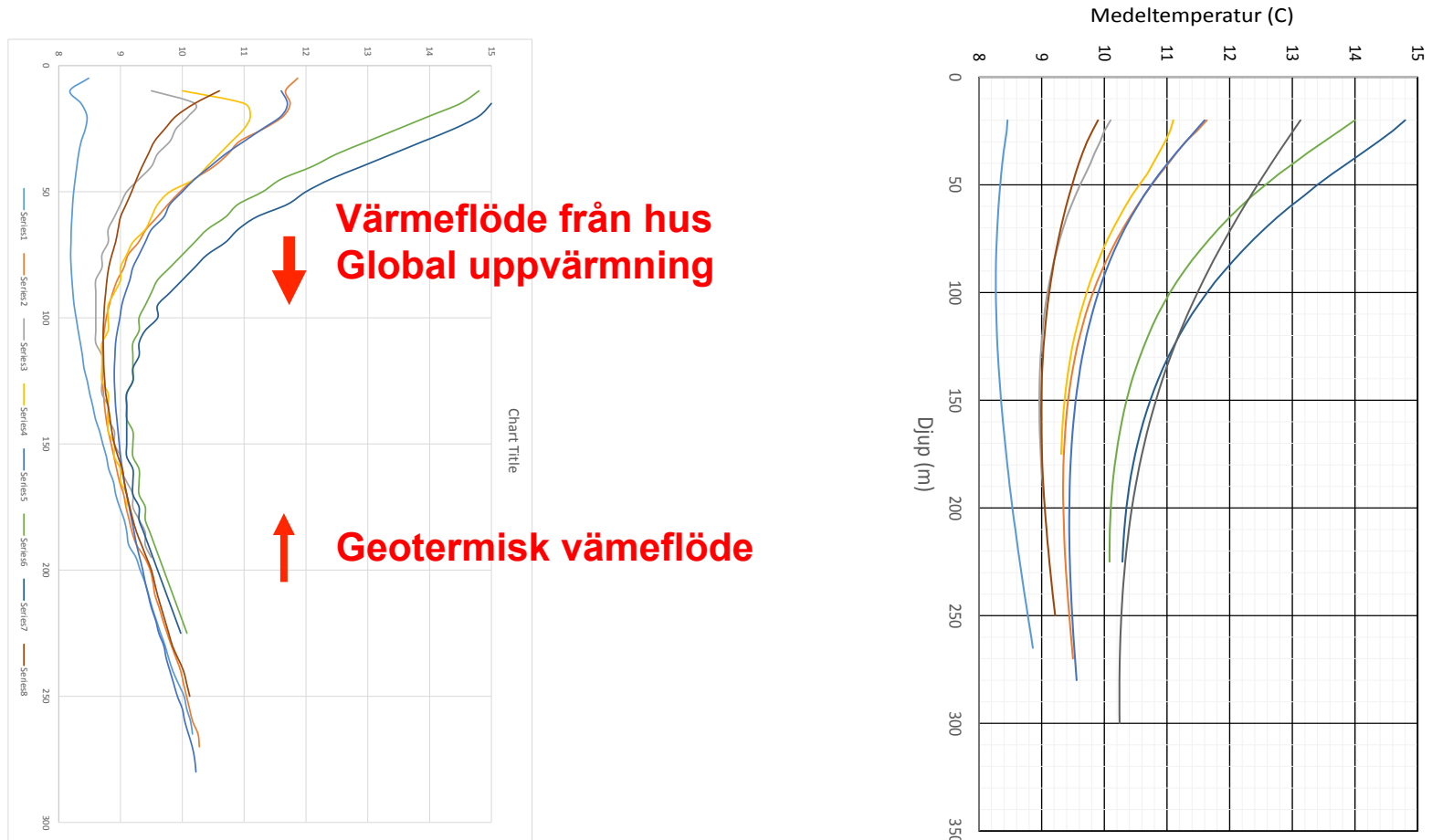
Värmeflöde från husgrunder



Ref: H Liebel

Temperaturprofiler påverkade av värmeförluster från ovanliggande husgrunder

Värmefflöde från husgrunder



Vertikal temperaturprofil i Stockholm (olika byggnadstäthet)

Motsvarande medeltemperatur för borrhål från markyta till angivet djup

Förhöjd medeltemperatur för borrhål i bebyggda områden
Borrhålets medeltemperatur kan minska med ökat borrhåldjup

Energibalans

Energibalans vid markytan

+ Solinstrålning	+1000 kWh/m ² , år
+ Konvektiv värmetransport från luft	?
+ Värme från jordens inre	+ 0,4 kWh/m ² ,år
+ Kondensation	?
- Värmeutstrålning till "rymden"	-1500 kWh/m ² , år
- Förångning	0
+ Global uppvärmning	+ 0,8 kWh/m ² , år
+ Husgrunder	+ max 2,5 kWh/m ² , år

Bergvärme



Enfamiljshus

Uttag 20 MWh/år

Tomt 2000 m²

Uttag 10 kWh/m²,år



Villaområde

Uttag 20 MWh/år

Tomt 1000 m²

Uttag 20 kWh/m²,år

Bergvärme - fastigheter



Flerfamiljshus - förort

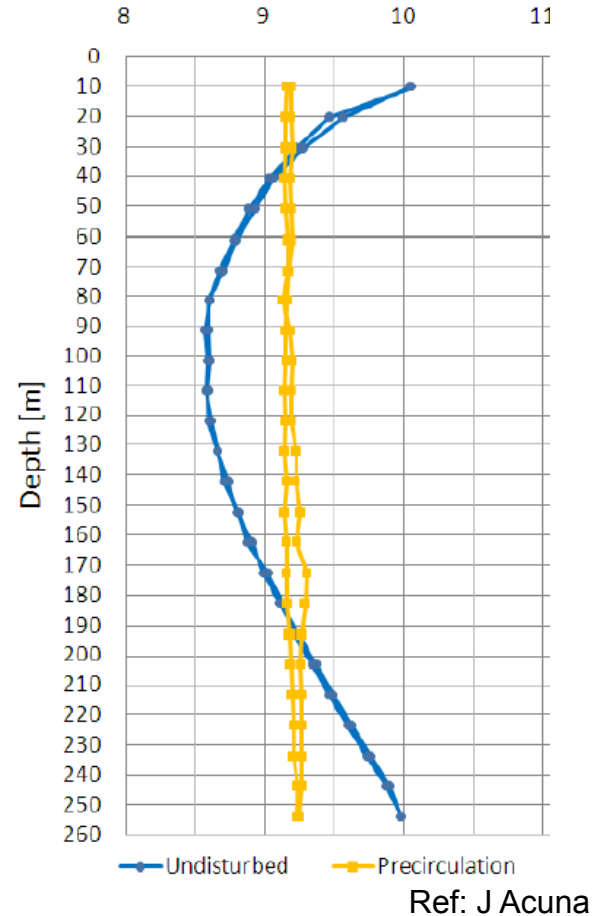
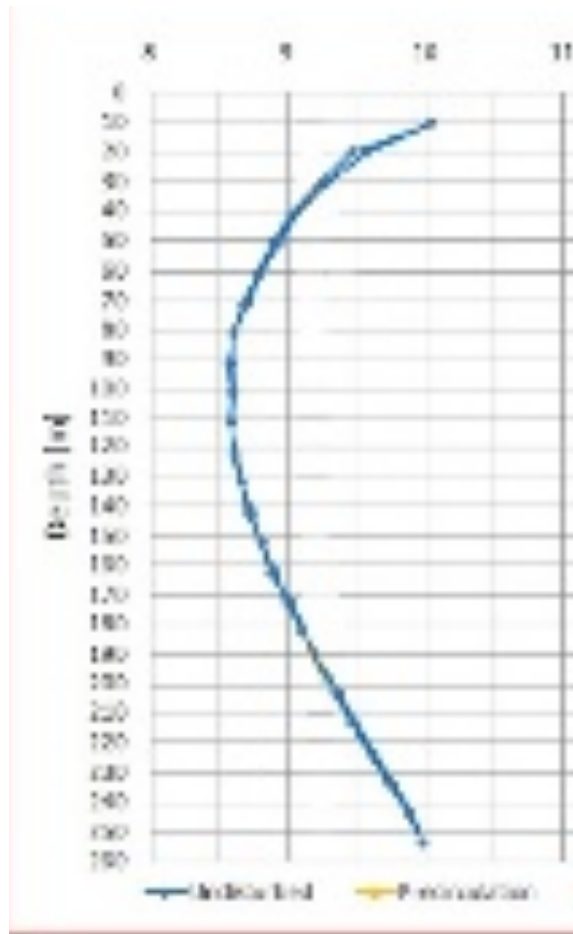
Värmelast ca 100 kWh/m²,år



Fastighet i stadsmiljö

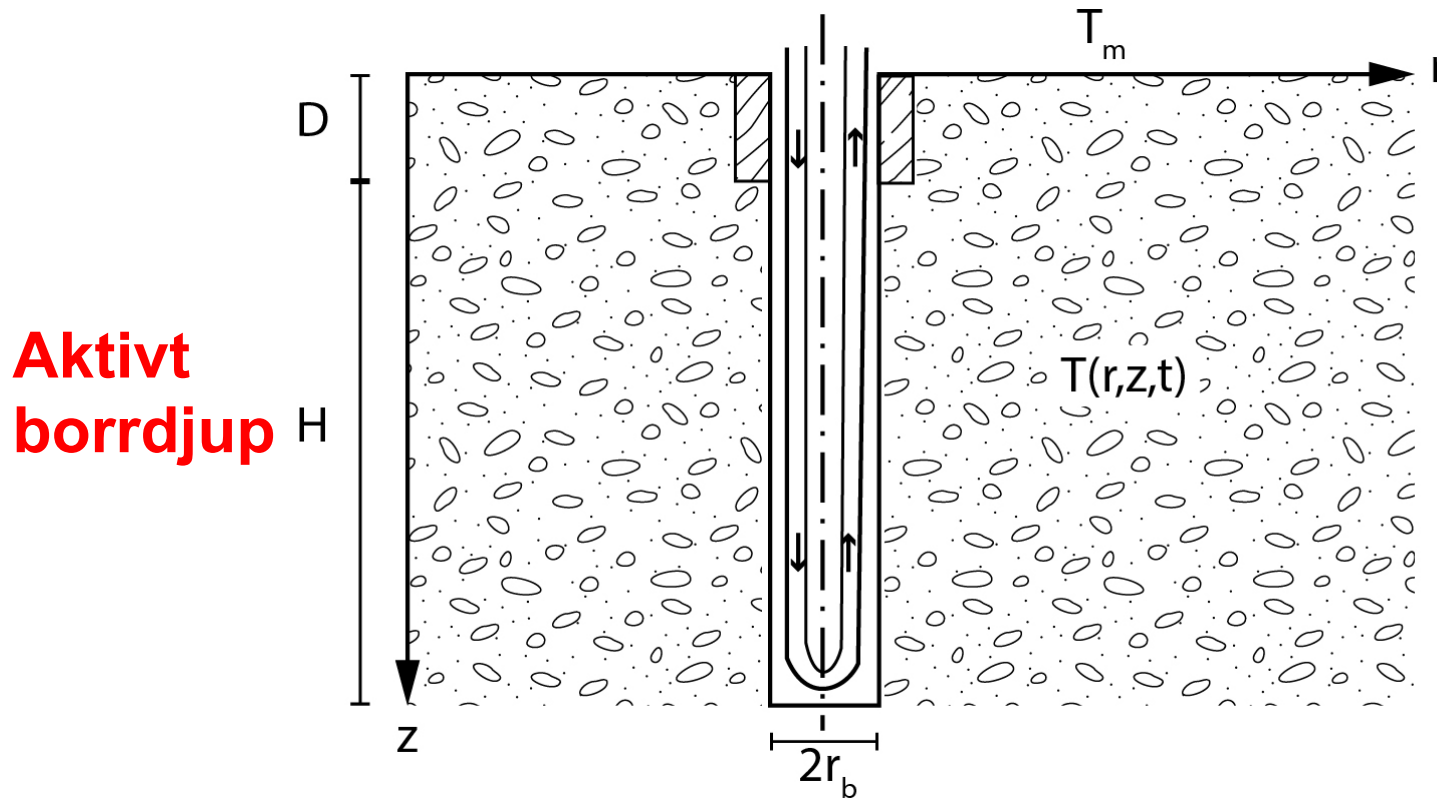
Värmelast ca 250 kWh/m²,år

Cirkulation utan värmeuttag



Vertikal temperaturprofil längs borrhål före (blå) oh efter (gul)
start av köldbärcirkulation
Inget nettouttag av värme

Borrhålsgeometri



Vertikalt borrhål med U-rör

Ekvationer

Värmeledningsekvationen:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Homogen borrhålstemperatur:

$$T(r_b, z, t) = T^b(t) \quad D \leq z \leq (D + H)$$

Specifikt värmeuttag q (W/m) vid borrhålsvägg:

$$-2\pi r_b \lambda \left[\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right]_{r=r_b} = q(z, t) \quad D \leq z \leq (D + H)$$

Ekvationer

Totalt värmeuttag Q (W):

$$\int_D^{D+H} q(z, t) dz = Q(t)$$

Begynnelsestemperatur i marken:

$$T(r, z, 0) = T_m + T_z(z)$$

Superposition

Marktemperaturen $T(r,z,t)$ kan med hjälp av superpositionsteknik uttryckas som summan av två komponenter $T_1(r,z,t)$ och $T_2(r,z,t)$:

$$T(r,z,t) = T_1(r,z,t) + T_2(r,z,t)$$

Båda komponenterna uppfyller värmeledningsekvationen.
Tillsammans uppfyller de randvillkor och begynnelsevillkor.

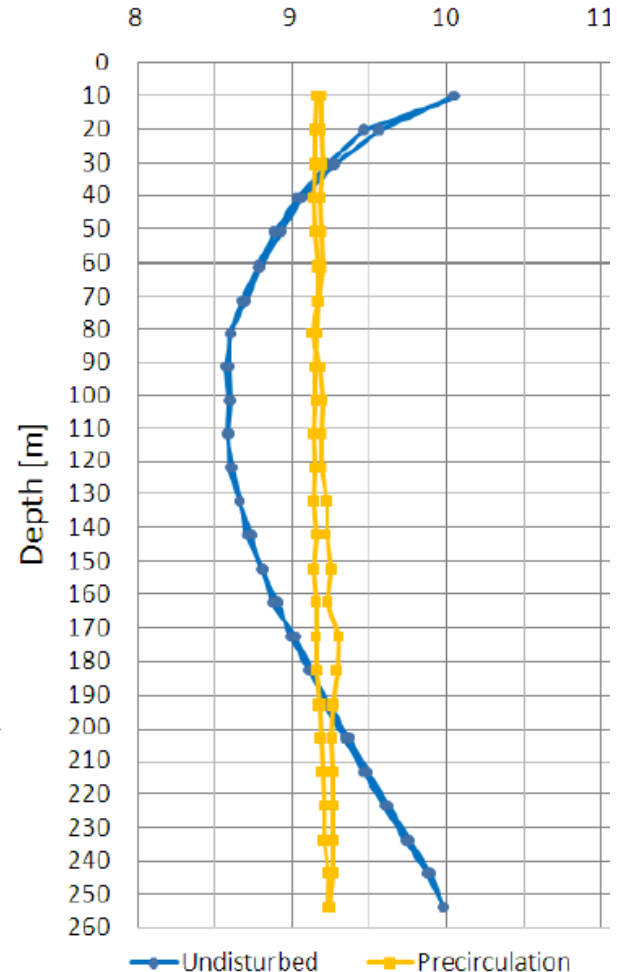
Temperaturkomponent 1

Låt en komponent beskriva den fullständiga termiska processen då köldbäraren cirkuleras utan nettouttag av värme:

$$Q_1(t) = \int_D^{D+H} q_1(z, t) dz = 0$$

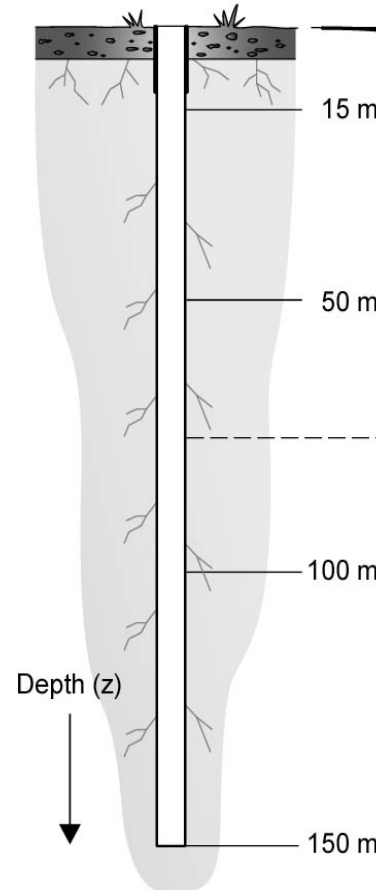
Markens begynnelsestemperatur varierar med djupet:

$$T_1(r, z, 0) = T_m + T_z(z)$$

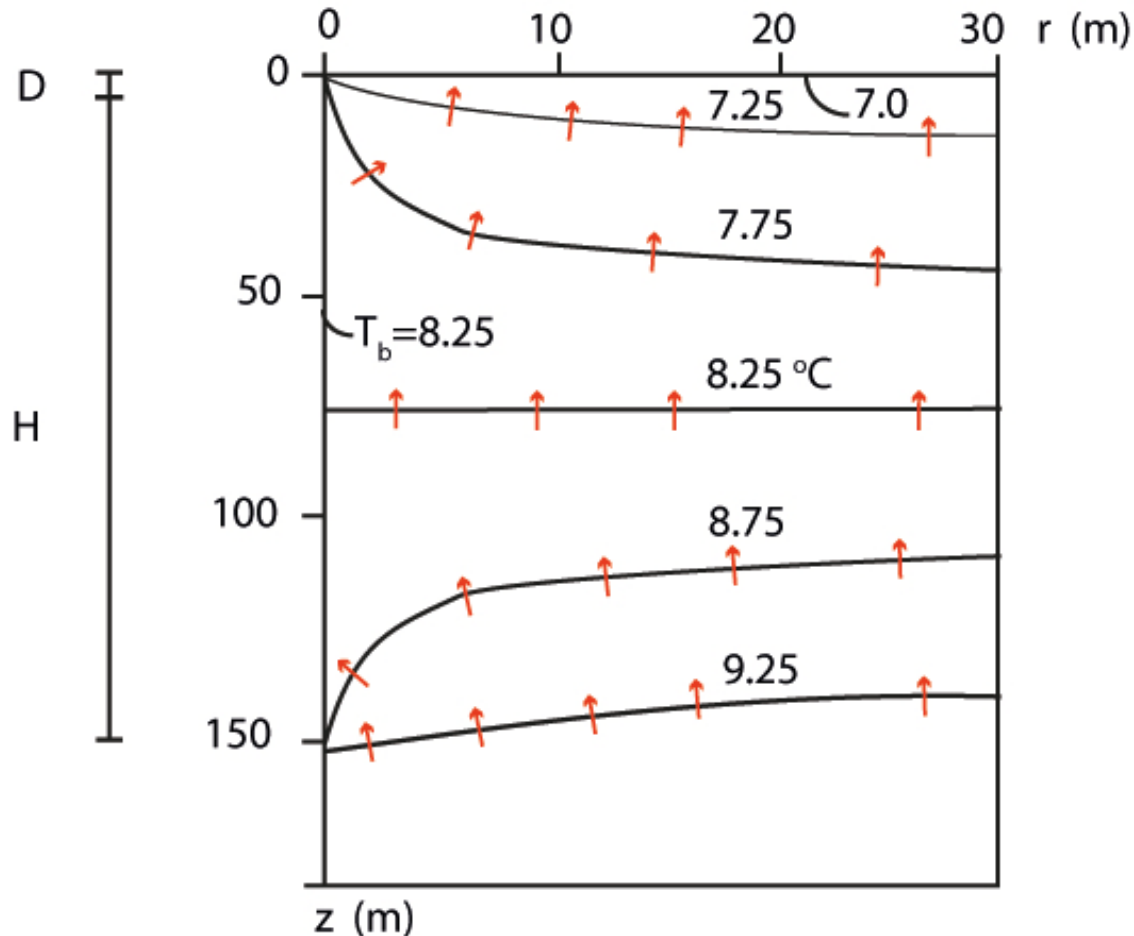


Exempel

Totalt borrhålsdjup	150 m
Aktivt djup	146 m
Inaktivt djup	4 m
Värmeledningsförmåga	3,5 W/m,K
Värmekapacitet	2,2 MJ/m ³ ,K.
Markytanstemperatur	7 °C
Vämeuttag netto	15 MWh/år
Temperaturgradient	0,017 K/m



Temperaturkomponent 1



Beräknad marktemperatur för komponent 1 efter 25 år

Värme omfördelas från borrhålets nedre del till den övre delen

Temperaturkomponent 2

Det aktiva värmeuttaget $Q(t)$ representeras av komponent 2:

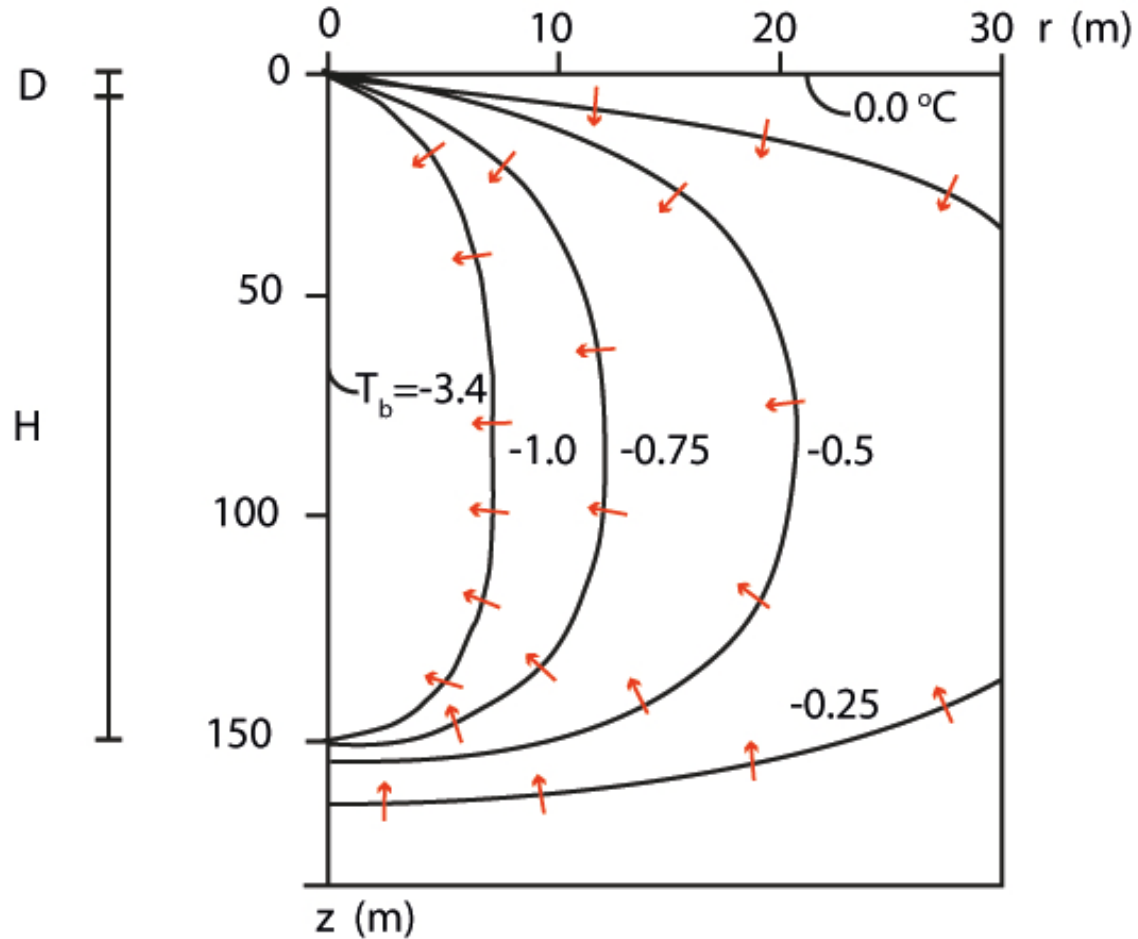
$$Q_2(t) = \int_D^{D+H} q_2(z, t) dz = Q(t)$$

Begynnelsestemperaturen ges här av:

$$T_2(r, z, 0) = 0$$

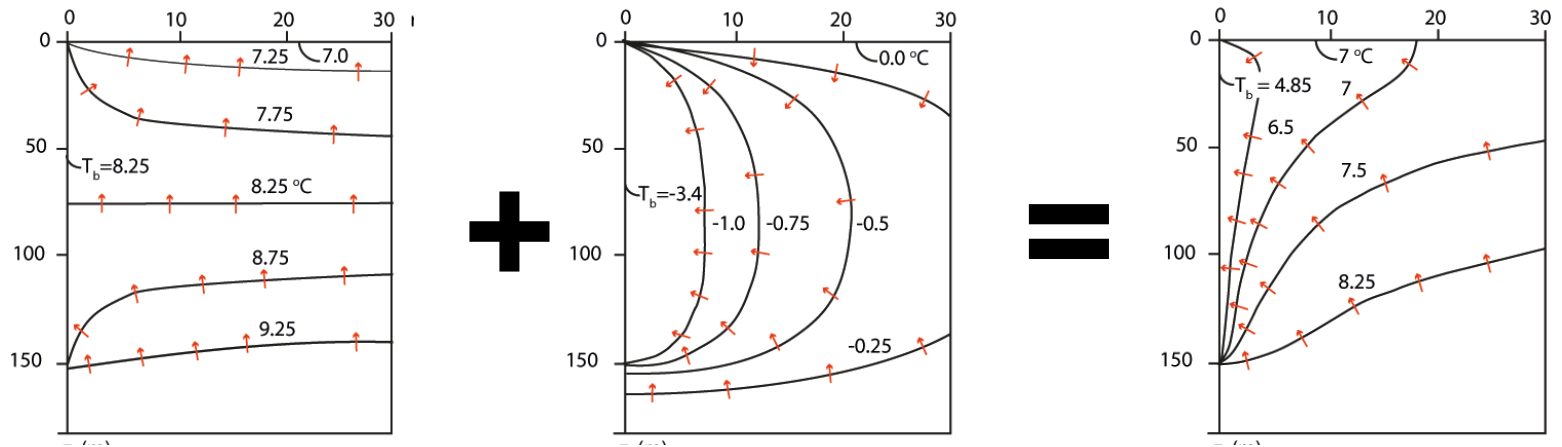
*Den termiska processen för aktivt värmeuttag är **oberoende** av initial vertikal temperaturprofil och geotermiskt värme flöde*

Temperaturkomponent 2



Beräknad marktemperatur för komponent 2 efter 25 år

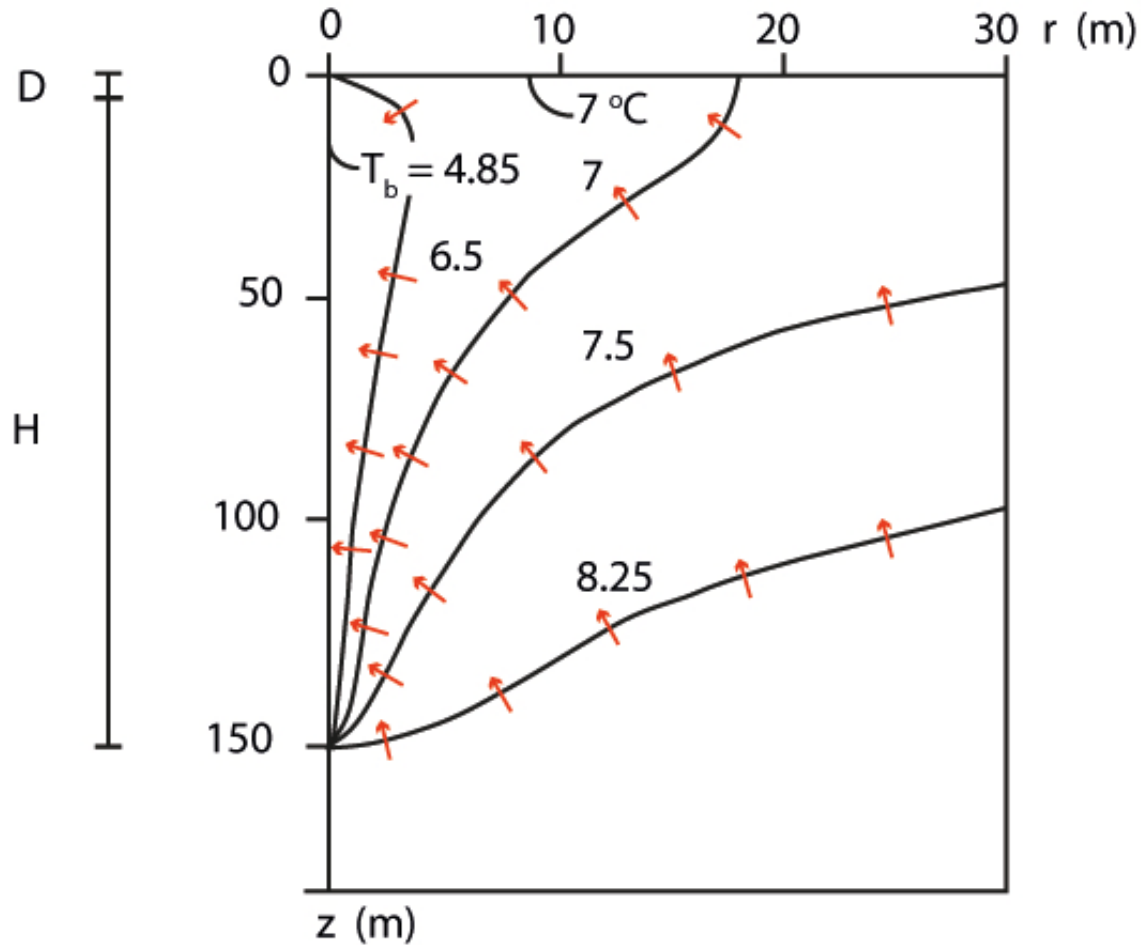
Total marktemperatur



$$T\downarrow 1 (r,z,t) \quad + \quad T\downarrow 2 (r,z,t) \quad = \quad T(r,z,t)$$

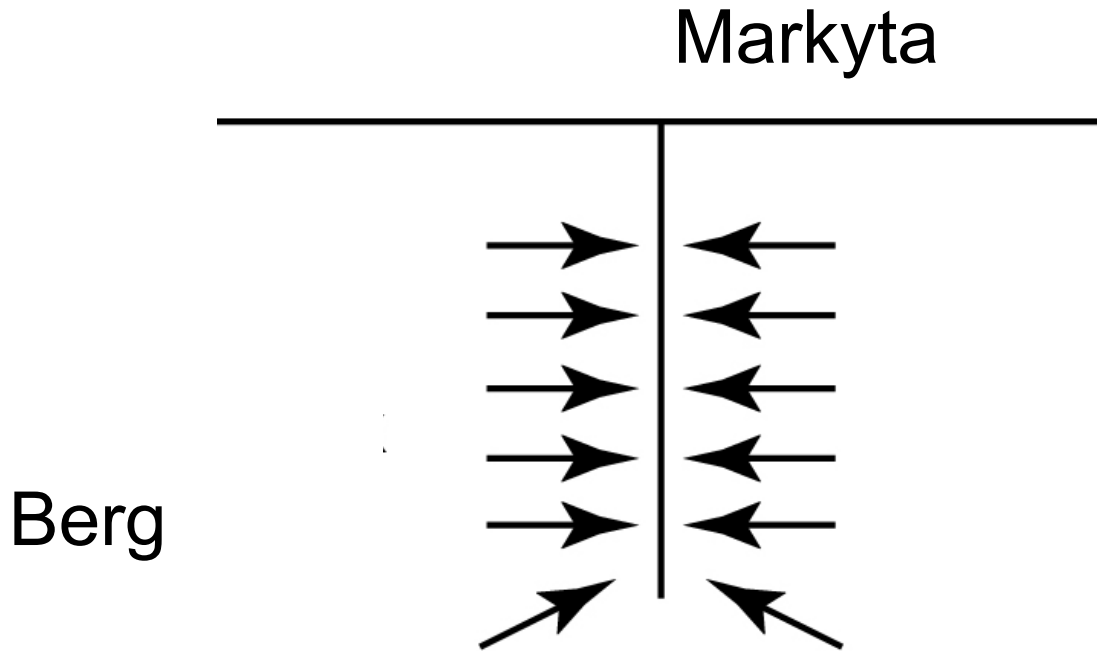
Den totala marktemperaturen erhålls genom superposition

Total marktemperatur



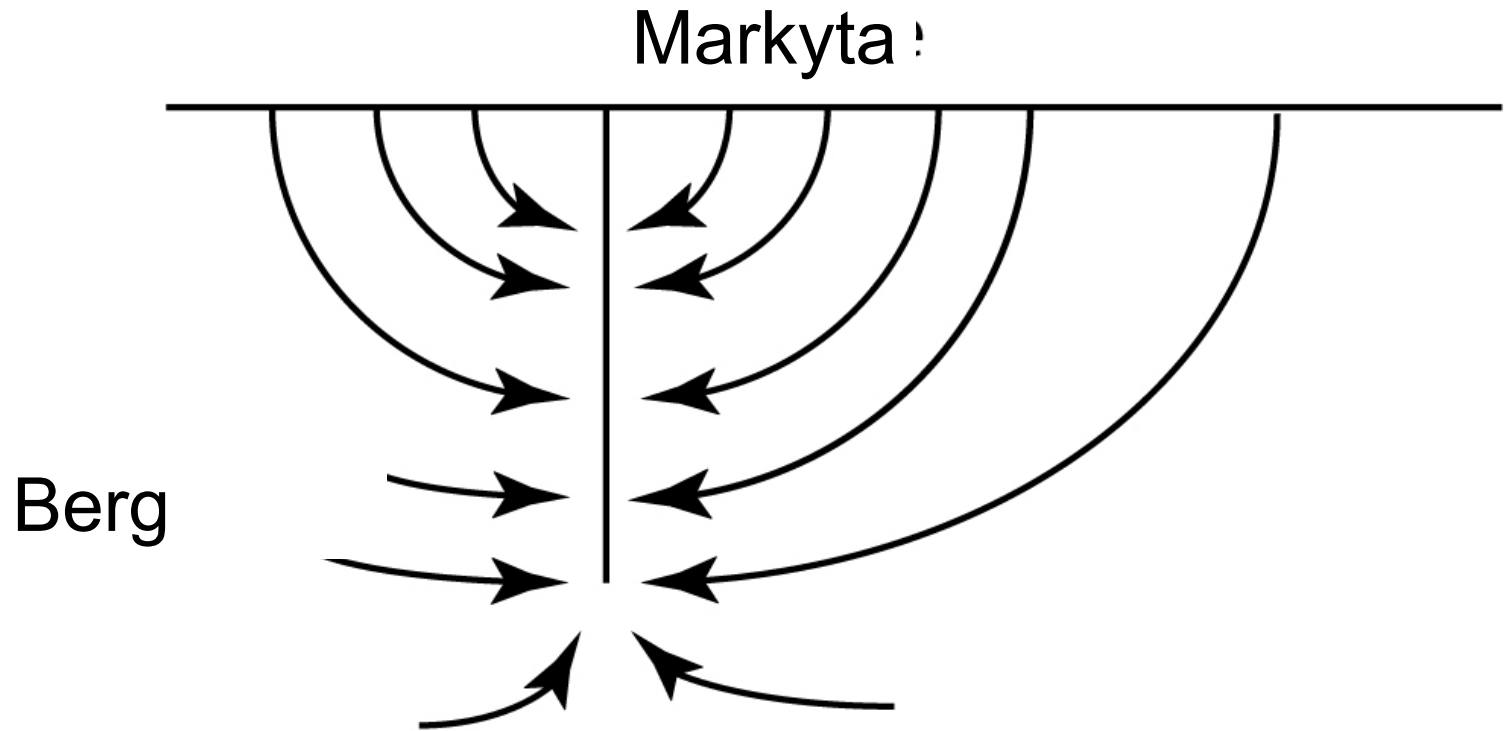
Beräknad total marktemperatur efter 25 år

I början av värmeuttaget



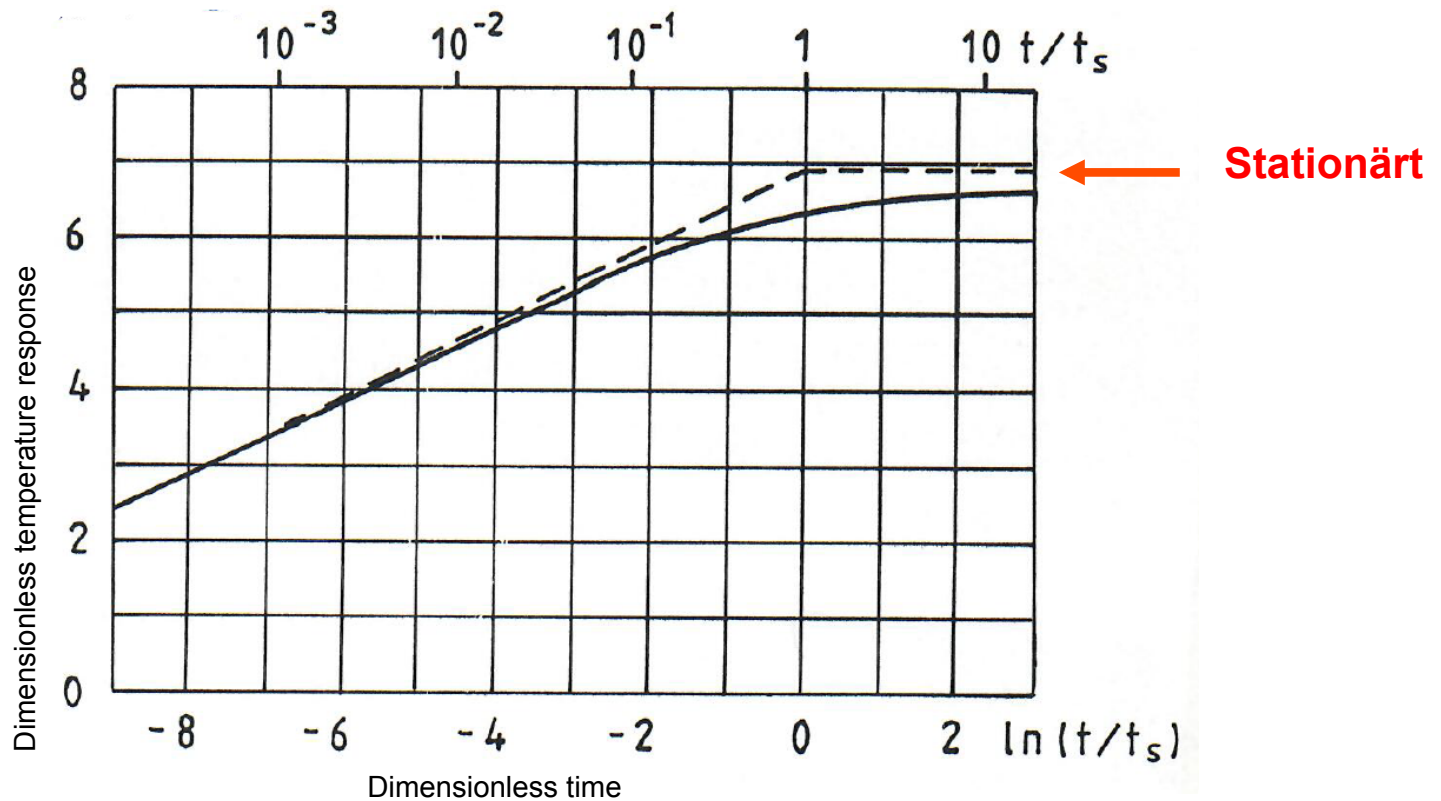
**Uttagen energi tas från omgivande mark
Marktemperaturen sjunker**

Efter lång tid – stationärt tillstånd



Uttagen energi tas från markytan
Stabil marktemperatur

Tidsskala

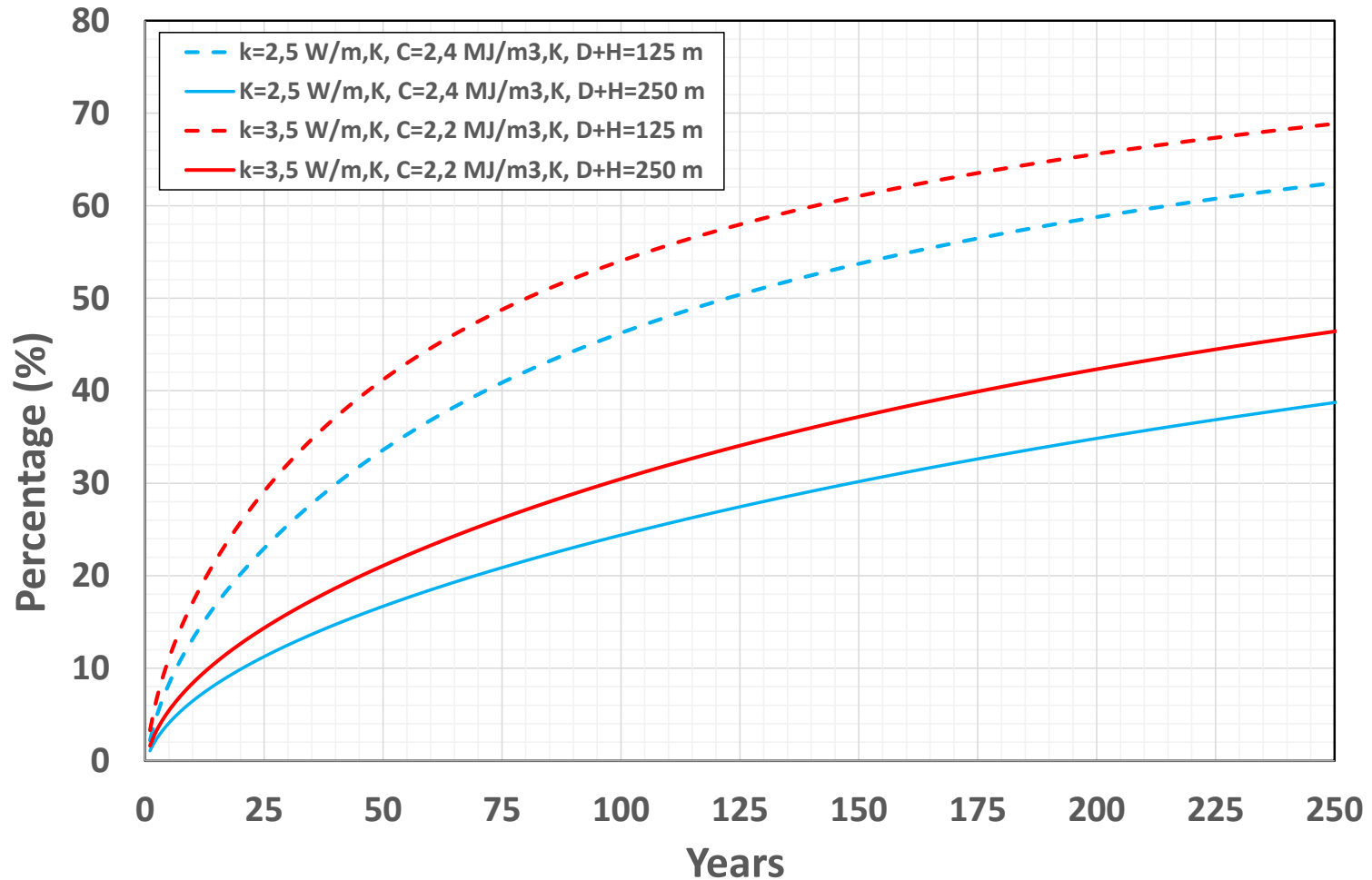


Dimensionslös temperaturrespons (g-funktion) för enskilt borrhål

Karakteristisk tid för att nå stationärt tillstånd: $t_s = H^2 / 9a$

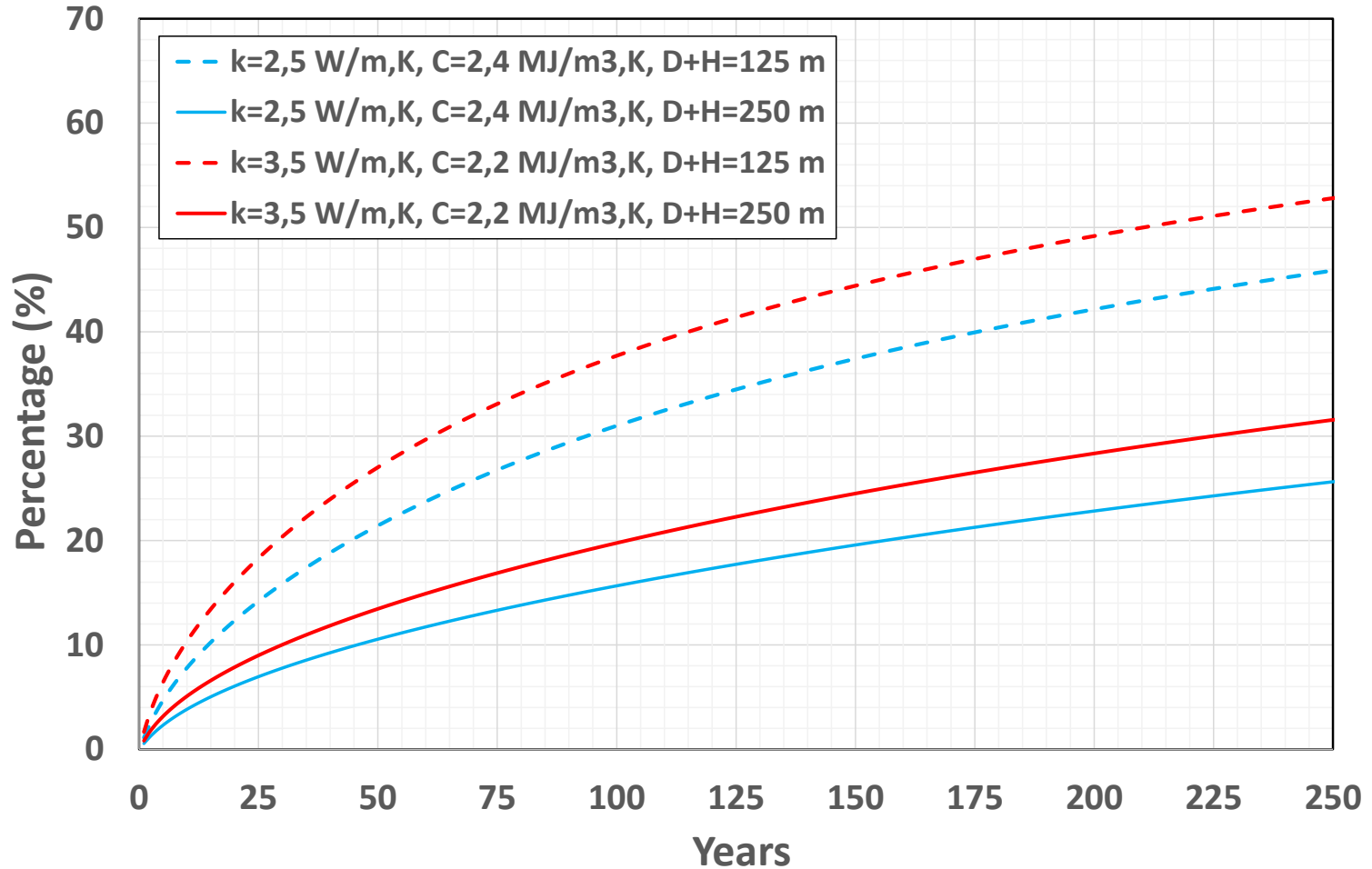
a = thermal diffusivity of the ground

Värmeflöde från markytan



**Andel av värmeuttaget som kommer från markytan (%)
(Ungefär 35 % vid karakteristisk tid t_s)**

Totalt värme flöde från markytan



Andel av totalt ackumulerat värmeuttag som kommer från markytan.

Återladdning

- De givna figurerna avser nettouttag av värme
- Exempel

Om 50 % av den årligt uttagna energimängden återladdas, så kommer 50 % av den uttagna energy från återladdningen och de övriga 50 % fördelas enligt tidigare mellan mark och markyta

Flera borrhål



- Slutsatserna ovan gäller även för anläggningar med flera borrhål
- Tätt placerade borrhål kräver ofta en hög grad av återladdning

Sammanfattning

- **Markens begynnelsestemperatur** är i hög grad beroende av solinstrålningen (soldrivna processer) och dess växelverkan med markytan. Uppvärmningen sedan istiden och pågående global uppvärmning ger betydande bidrag.
- Växelverkan mellan cirkulerande köldbärarfluid (utan nettouttag av värme) och omgivande mark medför en **omfördelning av värme** längs borrhålet.
- Det överlagrade **nettouttaget av värme är oberoende av markens temperaturprofil och geotermisk värmeflöde**
- Huvuddelen av uttagen värme kommer från sänkning av markens temperatur, dvs från **tidigare passivt lagrad solenergi**. Andelen ökar med borrhålets djup.