

Rapport

**R-19-27**

December 2020



# Beräkningar av temperaturen i kopparhöljet och bufferten i förenklade parameterstudier

**Peter Renström**

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL  
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna  
Phone +46 8 459 84 00  
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING



ISSN 1402-3091

**SKB R-19-27**

ID 1864725

December 2020

# **Beräkningar av temperaturen i kopparhöljet och bufferten i förenklade parameterstudier**

Peter Renström, AEC AB

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).  
Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens egna. SKB kan dra andra  
slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

© 2020 Svensk Kärnbränslehantering AB



# Sammanfattning

AEC AB har mellan 2017 och 2019 haft ett uppdrag åt SKB syftande till att implementera resultat från gammaträningssimuleringar utförda vid Uppsala Universitet som laster i en termisk finita element-modell. I samband med det utvecklades även en analytisk handboksmodell för verifiering av finita element-modellen. Båda modellerna är relativt okomplicerade med korta beräkningstider och har i föreliggande rapport använts till att beräkna hur temperaturen i slutförvaret på och nära kapseln kan förväntas variera med andra fysikaliska parametrar än deponerad gammastrålningsenergi. Syftet har, förutom att dokumentera modellerna, varit att visa hur man med enkla medel snabbt kan analysera inverkan av varierande parametrar i allmänhet. Speciellt har inverkan från resteffektnivå, värmeöverföringsförmåga i koppar, bentonit och berg systematiskt undersökts. Spaltvidderna vid kopparhöljet har också värderats termiskt relaterat till stipulerade tillverkningstoleranser för insats, kapsel och buffertblock. Rapporten ger även översiktliga förslag på hur beräkningsmodellerna framöver skulle kunna användas för temperaturberäkningar och viss termisk dimensionering av kapseln och dess nära omgivning i inkapslingsanläggningen respektive transportbehållaren.

Beräkningsmodellerna i denna rapport beskriver en ensam kapsel i form av en endimensionell modell längs en radie lokaliserad i mittplanet parallellt med kapselns ändar och hanterar endast koncentriskt placerade insatser, kapslar och buffertblock. Dock visar Ikonen (2020) att en excentrisk placerad insats i kapseln kan ge upp till 2 °C högre kopparterperatur. En excentrisk placering av kapseln i buffertblocken, vilket får anses som sannolik i det verkliga fallet, kan enligt Ikonen (2020) förväntas ge någon enstaka grads lägre maxtemperatur på kopparhöljet.

Beräkningarna i kapitel 3 visar i likhet med Ikonen (2020) att termiska parametrar närmare kapseln, bortsett från resteffekten, inte påverkar temperaturen längre ifrån densamma. Detta beror fysikaliskt sett på att temperaturrandvillkoret i det avlägsna berget bestämmer den absoluta temperaturnivån medan storleken på det radiella värmeflödet inifrån kapseln och utåt bestämmer de relativa temperaturskillnaderna mellan punkter på olika radier från kapselcentrum. Till exempel påverkas inte temperaturen i bufferten nämnvärt av kopparemissivitet eller spaltvidder vid kopparhöljet. En slutsats man kan dra av detta är att om kopparhöljets maxtemperatur är en kritisk faktor behöver man, bortsett från resteffekten, inte lägga vikt vid termiska parametrar som befinner sig radiellt innanför kopparytan, såsom intern spaltvidd och kapselintern värmeöverföringsförmåga, utan istället fokusera på utvändiga spalt, värmeöverföringsförmåga i buffert och berg samt kapselavståndet. Relaterat till beräkningarna i Ikonen (2020) skulle dessa för Forsmarks del främst behöva justeras med hänsyn till den mest pessimistiska värmeledningsförmågan hos bufferten, eftersom skillnaden i både koppar- och bufferttemperatur mellan Ikonens värmeledningstal ( $k_{eff} = 1,0 \text{ W/(mK)}$ ) och det mest pessimistiska ( $k_{eff} = 0,68 \text{ W/(mK)}$ ) beräknas till cirka 8 °C efter 13 års deponering vilket skulle ge en kopparterperatur på en bit över 100 °C. Den utvändiga spaltvidden ger endast en skillnad på cirka en halv grad mellan Ikonens värde (10 mm) och det mest pessimistiska (11,1 mm) så den differensen kan i stort sett bortses från. Däremot har Ikonen redan räknat med den mest pessimistiska bergkonduktiviteten (2,55 W/(mK)) vilket jämfört med medelvärdet i Forsmark (3,57 W/(mK)) beräknas ge omkring 8 °C högre kopparterperatur efter 13 års deponering. Detta skulle i viss mån kunna kompensera för den pessimistiska buffertkonduktiviteten, men det är svårt att uttala sig om utan räkna transient och ta hänsyn till skillnaderna i termisk diffusivitet.

För att undvika en överdrivet pessimistisk dimensionering borde man möjligen även väga in sannolikhetsfördelningar i känslighetsresonemangen för att få en mer rättvisande bild – till exempel förefaller förekomsten av berg i Forsmark med den låga konduktiviteten 2,55 W/(mK) väldigt sparsam jämfört med berg med genomsnittskonduktiviteten 3,57 W/(mK) medan sannolikheten kan vara betydande för att bentoniten i Forsmarks torra bergmiljö håller den låga konduktiviteten 0,68 W/(mK) en lång tid efter deponering.

## Abstract/Summary

AEC AB has had an assignment for SKB between 2017 and 2019 aimed at implementing results from gamma-ray simulations performed at Uppsala University as loads in a thermal finite element model. In conjunction with this, an analytical handbook model for verification of the finite element model was also developed. Both models are relatively straightforward with short calculation times and have been used in the present report to calculate how the temperature in the final repository on and near the canister can be expected to vary with physical parameters other than deposited gamma radiation energy. The purpose, in addition to documenting the models, has been to show how the impact of varying parameters in general can be quickly analysed by simple means. In particular, the effects of residual power level, heat transfer capacity in copper, bentonite and rock have been systematically investigated. The gap widths at the copper wall have been thermally evaluated related to stipulated manufacturing tolerances for insert, canister and buffer blocks. The report also gives an overview of how the calculation models could in the future be used for temperature calculations and, to some degree, thermal dimensioning of the canister and its close surroundings in the encapsulation plant and transport container, respectively.

The calculation models in this report describe a single canister simplified as a one-dimensional model along a radius located in the center plane parallel to the ends of the canister and are limited to concentrically placed inserts, canisters and buffer blocks. However, Ikonen (2020) shows that an eccentrically placed insert in the canister can cause up to 2 °C higher copper temperature. An eccentric placement of the canister in the buffer blocks, which may be considered likely in the real case, can be expected to give a single degree of lower max temperature on the copper casing according to Ikonen (2020).

The calculations in Chapter 3, like Ikonen (2020), show that thermal parameters closer to the canister, apart from the residual effect, do not affect the temperature further away from the canister. This is physically because the temperature boundary condition at the distant rock determines the absolute temperature level, while the magnitude of the radial heat flow from within the canister and outward determines the relative temperature differences between points at different radii from the canister center. For example, the temperature in the buffer is not significantly affected by copper emissivities or gap widths at the copper casing. One conclusion that can be drawn from this is that if the maximum temperature of the copper casing is a critical factor, it is, apart from the residual power, not necessary to pay attention to thermal parameters that are radially inside the copper surface, for instance internal gap width and canister internal heat transfer capacity. Instead, one should focus on the outer gap, heat transfer capacity in buffer and rock and the canister spacing. In relation to the calculations made in Ikonen (2020), for Forsmark, these would primarily need to be adjusted for the most pessimistic thermal conductivity of the buffer, since the difference in both copper and buffer temperature between Ikonen's thermal conductivity ( $k_{eff} = 1.0 \text{ W/(mK)}$ ) and the most pessimistic value ( $k_{eff} = 0.68 \text{ W/(mK)}$ ) is calculated to be about 8 °C after 13 years of deposition which would give a copper temperature slightly above 100 °C. The outer gap width only gives a difference of about half a degree between Ikonen's value (10 mm) and the most pessimistic (11.1 mm), so that difference can more or less be neglected. On the other hand, Ikonen has assumed the most pessimistic rock conductivity (2.55 W/(mK)), which compared to the average in Forsmark (3.57 W/(mK)) is estimated to give about 8 °C higher copper temperature after 13 years of deposition. This could to some extent compensate for the pessimistic buffer conductivity, but it is difficult to judge without performing a transient analysis and taking the differences in thermal diffusivity into account.

In order to avoid an unreasonably pessimistic sensitivity analysis one might also have to consider probability distributions – for example, the occurrence of rock in Forsmark with the low conductivity 2.55 W/(mK) seems very sparse compared with rock with the average conductivity 3.57 W/(mK), while the probability could be significant that the bentonite in Forsmark's dry rock environment maintains the low conductivity 0.68 W / (mK) a long time after deposition.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund och syfte</b>	7
<b>2</b>	<b>Modellbeskrivning</b>	9
2.1	Generella antaganden	9
2.2	Materialegenskaper	11
2.3	Termisk last	11
2.4	Finita element-modell	12
2.5	Analytisk handboksmodell	15
<b>3</b>	<b>Beräkningar</b>	17
3.1	Slutförvaret	17
3.1.1	Allmänt	17
3.1.2	Spalter vid kopparhöljet	17
3.1.3	Buffertens termiska egenskaper	19
3.1.4	Bergets termiska egenskaper	20
3.1.5	Bergets initialtemperatur	20
3.1.6	Kopparens emissivitet	21
3.1.7	Resteffekt	22
3.1.8	Modellparametern $\Phi$	22
3.1.9	Den mest ogynnsamma parameteruppsättningen	22
3.2	Inkapslingsanläggningen	23
3.3	Transportbehållaren	24
<b>4</b>	<b>Resultatsammanfattning</b>	25
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	29
	<b>Referenser</b>	31
<b>Bilaga 1</b>	Utskrift av analytisk handboksmodell	33
<b>Bilaga 2</b>	Jämförelser finita element- och analytisk handboksmodell	37
<b>Bilaga 3</b>	Resonemang kring beräkningsmodellernas mått	41





# 1 Bakgrund och syfte

AEC AB har mellan 2017 och 2019 haft uppdrag åt SKB syftande till att implementera resultat från gammaträlnings-simuleringar utförda vid Uppsala Universitet som laster i en termisk finita element-modell. Med hjälp av denna har inverkan från den deponerade gammastrålningens energi på temperaturen i slutförvaret för olika bränslekonfigurationer tidigare beräknats och redovisats (Renström 2020).

Renström (2020) fokuserar på att utföra beräkningar av temperaturutvecklingen i kopparhöljet och kapselns nära omgivning i slutförvaret. Eftersom temperaturvariationen i kopparhöljet tack vare kopparens höga värmeledningsförmåga är liten (Ikonen 2020, figur 61 och 63), speciellt i omkretsled, är det naturligt att anta en axi-symmetrisk beräkningsmodell liknande Ikonens (2020, avsnitt 6.1). Som ett första steg, för att ”känna på problemet”, använder Renström (2020) en förenklad modell av en ensam kapsel i form av en endimensionell finita element-modell längs en radie lokaliserad i mittplanet parallellt med kapselns ändar. Modellen har mått, fysikaliska egenskaper och temperaturlast så långt möjligt enligt Ikonen (2020, avsnitt 6.1). I jämförande beräkningar visar sig modellen ge tillräckliga resultat för att kunna dra värdefulla slutsatser angående deponerad gammastrålningsenergi. Vidare axi-symmetrisk modellering bedöms därefter inte vara motiverad för problemställningen som studeras i Renström (2020).

I samband med ovan beskrivna uppdrag utvecklades även en analytisk handboksmodell för verifiering av finita element-modellen. Både finita element-modellen och den analytiska handboksmodellen är relativt okomplicerade med korta beräkningstider och de lämpar sig därför väl för enklare parameterstudier och känslighetsanalyser. De har i föreliggande rapport använts till att beräkna hur temperaturen i slutförvaret på och nära kapseln kan förväntas variera med andra fysikaliska parametrar än deponerad gammastrålningsenergi. Syftet har, förutom att dokumentera modellerna, varit att visa hur man med enkla medel snabbt kan analysera inverkan av varierande parametrar i allmänhet. Speciellt har inverkan från resteffektnivå, värmeöverföringsförmåga i koppar, bentonit och berg systematiskt undersökts. Spaltvidderna vid kopparhöljet har också värderats termiskt relaterat till stipulerade tillverkningsstoleranser för insats, kapsel och buffertblock. Rapporten ger även översiktliga förslag på hur beräkningsmodellerna framöver skulle kunna användas för temperaturberäkningar och viss termisk dimensionering av kapseln och dess nära omgivning i inkapslingsanläggningen respektive transportbehållaren.



## 2 Modellbeskrivning

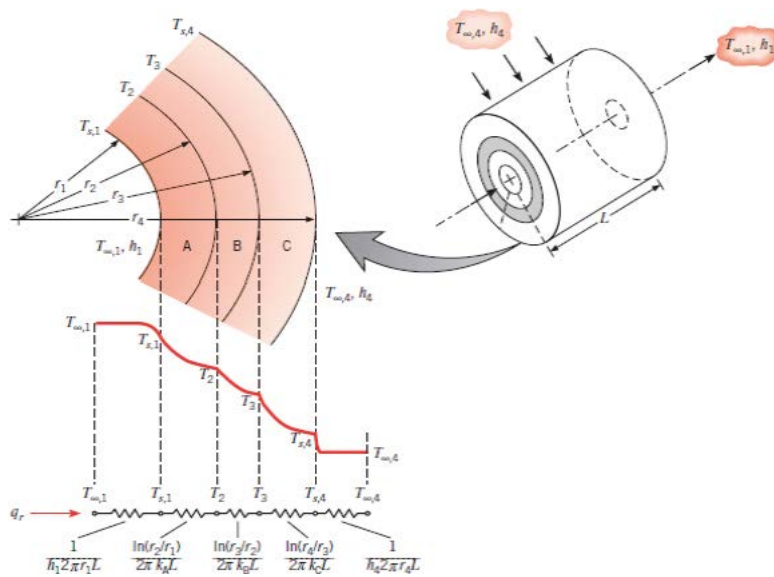
### 2.1 Generella antaganden

Temperaturfältet kring en ensam värmeproducerande cylindrisk kapsel placerad djupt ner i berggrunden kan betraktas som sammansatt av två delar, ett närfält och ett fjärrfält. Närfältet vid mittplanet parallellt med kapselns ändrar kan antas beskrivas med värmeöverföring i en cylindrisk geometri (figur 2-1) medan fjärrfältet kan beskrivas med värmeöverföring i en sfärisk geometri (figur 2-2).

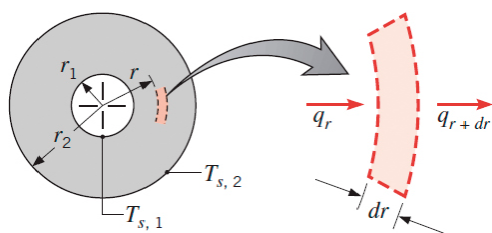
Problemställningen belyses analytiskt för en betydligt mer komplex modell i Ikonen et al. (2018, kapitel 3) där hänsyn även tas till omgivande kapslars effekt via superposition.

En fråga är vid vilken radie som den cylindriska geometrin ska övergå i den sfäriska för att beskriva det verkliga fallet, en cylindrisk kapsel med en viss begränsad längd, så bra som möjligt. Ett resonemang kring detta förs i bilaga 3.

Intressant att notera angående yttre randvillkor är att det termiska motståndet i en cylindrisk geometri ökar obegränsat med ökande radie medan det i en sfärisk geometri närmar sig ett gränsvärde (figur 2-3). Det betyder att den stationära (det vill säga tidsberoende eller icke-transienta) temperaturen i en cylindrisk geometri bestäms av temperaturen på den yttre randen men också av den yttre randens avstånd från centrum. I den sfäriska geometrin är det däremot tillräckligt att specificera omgivningstemperaturen på den yttre randen om den bara befinner sig på ett tillräckligt långt avstånd från centrum. Här förutsätts berget för enkelhets skull vara termiskt homogent och det bortses från markytans och den geotermiska gradientens inverkan.



Figur 2-1. Värmeledning och konvektion i cylindrisk geometri (Incropera et al. 2006).



Figur 2-2. Värmeledning och konvektion i sfärisk geometri (Incropera et al. 2006).

- cylindrisk vägg:  $R_{i,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$   $\rightarrow \infty$  om  $r_2 \rightarrow \infty$
- sfärisk vägg:  $R_{i,cond} = \frac{1}{4\pi k} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$   $\rightarrow 1/4\pi k r_1$  om  $r_2 \rightarrow \infty$

**Figur 2-3.** Värmeledningsmotstånd i cylindrisk respektive sfärisk geometri (Incropera et al. 2006). För sfäriskt motstånd, men inte för cylindriskt, existerar en stationär lösning oberoende av avståndet från centrum till den yttre randen  $r_2$ .

Nära en ensam kapsel i slutförvaret klingar den lokala transienta värmeöverföringen mellan två punkter av inom ett par dygn medan tidsberoendet är betydande mellan punkter på större avstånd allteftersom värmen från kapseln diffunderar globalt ut i berget. Detta kan illustreras genom det dimensionslösa Fouriers tal

$$Fo = k \cdot t / \rho c_p L^2$$

som relaterar värmeledningsförmågan till värmelagringskapaciteten som funktion av tid, avstånd och termiska materialegenskaper så att om  $Fo \gg 1$  så råder stationära, icke-transienta, förhållanden medan om  $Fo \ll 1$  så är transienta effekter av betydelse (Incropera et al. 2006). Nära kapseln, med materialegenskaper enligt tabell 2-1 och med den typiska längdskalan 1 m, är

$$Fo \approx 23,6 \times t / (2,7 \times 10^6 \times 1^2) = 8,7 \times 10^{-6} \times t$$

för kapseln och

$$Fo \approx 1 \times t / (2,4 \times 10^6 \times 1^2) = 4,2 \times 10^{-6} \times t$$

för bufferten, medan för berget, med den typiska längdskalan 10 till 100 m,

$$Fo \approx 2,55 \times t / (2,12 \times 10^6 \times 10^2) = 1,2 \times 10^{-8} \times t$$

eller

$$Fo \approx 2,55 \times t / (2,12 \times 10^6 \times 100^2) = 1,2 \times 10^{-10} \times t$$

vilket med  $Fo = 1$  uppskattar efter vilket minsta tidsspänn transienta effekter börjar tappa betydelse till  $1/8,7 \times 10^{-6} \text{ s} = 1,3$  dygn för punkter nära kapseln,  $1/4,2 \times 10^{-6} \text{ s} = 2,8$  dygn nära bufferten men  $1/1,2 \times 10^{-8} \text{ s} = 2,6$  år till  $1/1,2 \times 10^{-10} \text{ s} = 264$  år för berget. För temperaturskillnader lokalt i kapseln och bufferten innebär detta att de bör kunna betraktas som kvasi-stationära för tidsrymder längre än någon vecka. Den absoluta temperaturnivån på kapselytan behöver däremot längre tid för att kunna betraktas som kvasi-stationär: om man antar ett avstånd till yttre randen på 40 m erhåller man ett sfäriskt värmemotstånd som är

$$(1/0,525 \text{ m} - 1/40 \text{ m}) / (1/0,525 \text{ m}) = 98,7 \%$$

av värmemotståndet för en oändlig rymd, vilket med en temperaturskillnad mellan kapselytan och ouppvärmigt berg på typiskt  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  uppskattar felet i kapselytans temperatur till  $98,7\% \times 70 \text{ }^\circ\text{C} \approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Avståndet 40 m kräver teoretiskt sett ett tidsspänn på cirka 40 år för att betydelsen av transienta effekter ska bli lägre än stationära. Jämförande beräkningar (bilaga 2, figur B2-1) bekräftar denna storleksordning för konstant resteffekt men också att god överensstämmelse mellan kvasi-stationära och transienta beräkningar med avtagande resteffekt nås redan efter 5 till 10 års deponering. Resteffekten sjunker alltså i så långsam takt att kvasi-stationära beräkningar av kapseltemperaturen kan motiveras efter ett antal års deponering. För temperaturskillnader mellan närbelägna punkter och för relativa parameterstudier bedöms kvasi-stationära modeller definitivt vara användbara.

Det har därför bedömts vara motiverat att förutom en finita element-modell även bygga en motsvarande analytisk stationär beräkningsmodell baserad på ”handboksformler” för parameterstudier och verifiering av finita element-modellen. Den analytiska handboksmodellen redovisas i avsnitt 2.5.

Beräkningsmodellernas mått framgår av finita element-modellen beskriven i avsnitt 2.4 och utskriften av den analytiska handboksmodellen i bilaga 1.

## 2.2 Materialegenskaper

Beräkningsmodellerna är en-dimensionella och kapselns innehåll kan följaktligen inte modelleras i detalj. De termiska materialegenskaperna för bränsleknippena, stålprofilerna och insatsen har därför medelvärdesbildats enligt Ikonen (2020, s 61).

Den pellettfyllda spalten mellan den kompakterade bentoniten och berget antas ha samma egenskaper som bentoniten så att hela bufferten antas ha homogena, ”effektiva”, materialegenskaper (Hedström 2020, s 10).

Nominella materialegenskaper visas i tabell 2-1. De är antagna vid cirka 100 °C och är för enkelhets skull inte temperaturberoende. För vissa materialegenskaper har även variationsintervall definierats för känslighetsanalyser. Dessa redovisas i kapitel 3.

**Tabell 2-1. Nominella materialegenskaper. Referenser: 1) Ikonen (2020), 2) Incropera et al. (2006), 3) Hökmark et al. (2010), 4) Ikonen (2009).**

Material	k (W/m/K)	Referens	$\rho \cdot c_p$ (MJ/m <sup>3</sup> /K)	Referens	$\epsilon$ (emissivitet)	Referens
Interna delar	23,6	1)	2,7	1)	-	-
Segjärn	-	-	-	-	0,6	1)
Argon	0,022	1)	8,58E-04	1)	-	-
Koppar	390	1)	3,45	1)	0,1/0,3 in-/utsida	1)
Luft	0,03	1)	8,8E-04	2)	-	-
Buffert	1	3)	2,4	1)	0,8	4)
Berg	2,55	1) 3)	2,12	3)	-	-

## 2.3 Termisk last

Resteffekten för bränsle med utbränningen 40 MWd/kgU visas i tabell 2-2 med antagandet att en SKB-BWR-kapsel innehåller 2,1 ton uran (Ikonen 2020, tabell 6). Resteffekten för 33 år efter drift interpoleras till cirka 1 705 W vilket har valts som initialvärde i de transienta beräkningarna. Det har bedömts som intressant att studera en initial resteffekt på omkring 1 700 W eftersom högre effekt enligt kraven inte kommer att kapslas in (SKB 2010c). Dessutom har värdet historiskt använts i flera tidigare beräkningsrapporter, till exempel i Hökmark (2009) och Ikonen (2020).

**Tabell 2-2. Resteffekt som funktion av tid efter uttag ur reaktor.**

Antal år efter drift	SKB-BWR (W/tU)	Per kapsel (W)
10	1340	2814
20	1040	2184
30	854	1793,4
33= tidpunkt för deponering i slutförvaret, t=0 i de transienta beräkningarna	812	1705,2
40	714	1499,4
50	603	1266,3
60	514	1079,4
70	443	930,3
80	386	810,6
90	340	714
100	303	636,3

Den initiala kapseffekten  $Q$  antas, liksom i Ikonen (2020, avsnitt 6.1), vara 1 705 W och antas genereras uniformt inom en cylindervolym med längden 3,68 m och radien 0,3 m.

Modellen är förenklad och några ytterligare antaganden behöver därför göras angående applicering av värmeeffekt och modellgeometri. Enligt Hökmark et al. (2009) kan det lokala värmeflödet radiellt över kapselytan i mittplanet uppskattas till 87 % av det genomsnittliga värmeflödet räknat över den totala kapselytan, definierat som faktorn  $\Phi=0,87$ .

Om  $Q$  vore jämnt fördelad i den värmegenererande volymen skulle värmeeffekten per volymsenhet bli  $1\,705\text{ W} / (\pi \cdot (0,3\text{ m})^2 \cdot 3,68\text{ m}) = 1\,639\text{ W/m}^3$

vilket i beräkningsmodellen, med enbart radiellt värmeflöde, skulle ge ett värmeflöde över kapselytan på  $1\,705\text{ W} / (2 \cdot \pi \cdot 0,525\text{ m} \cdot 3,68\text{ m}) = 140,5\text{ W/m}^2$

Dock är det genomsnittliga värmeflödet räknat över den totala kapselytan

$$1\,705\text{ W} / (2 \cdot \pi \cdot 0,525\text{ m} \cdot (0,525\text{ m} + 4,83\text{ m})) = 96,5\text{ W/m}^2$$

vilket med  $\Phi=0,87$  skulle ge ett realistiskt värmeflöde över kapselytan i kapselns mittplan på  $96,5\text{ W/m}^2 \cdot 0,87 = 84,0\text{ W/m}^2$

Eftersom

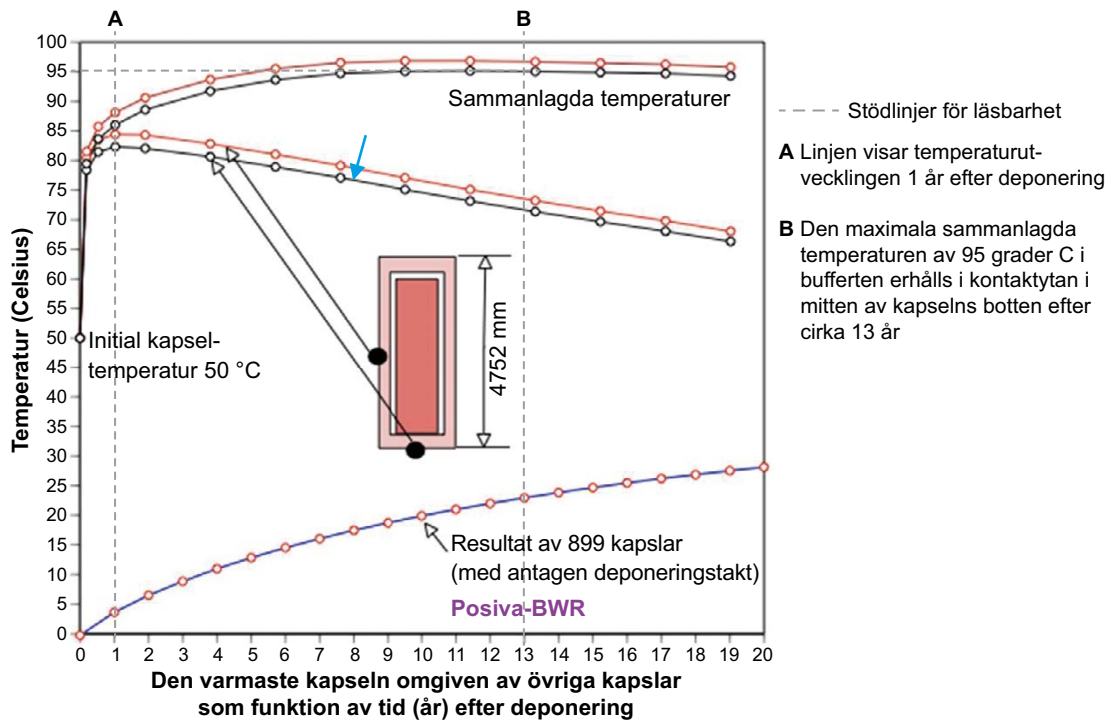
$$84,0\text{ W/m}^2 / 140,5\text{ W/m}^2 = 0,60$$

har den applicerade initiala kapseffekten per volymsenhet av den värmegenererande volymen valts till  $0,60 \cdot 1\,639\text{ W/m}^3 = 983,4\text{ W/m}^3$

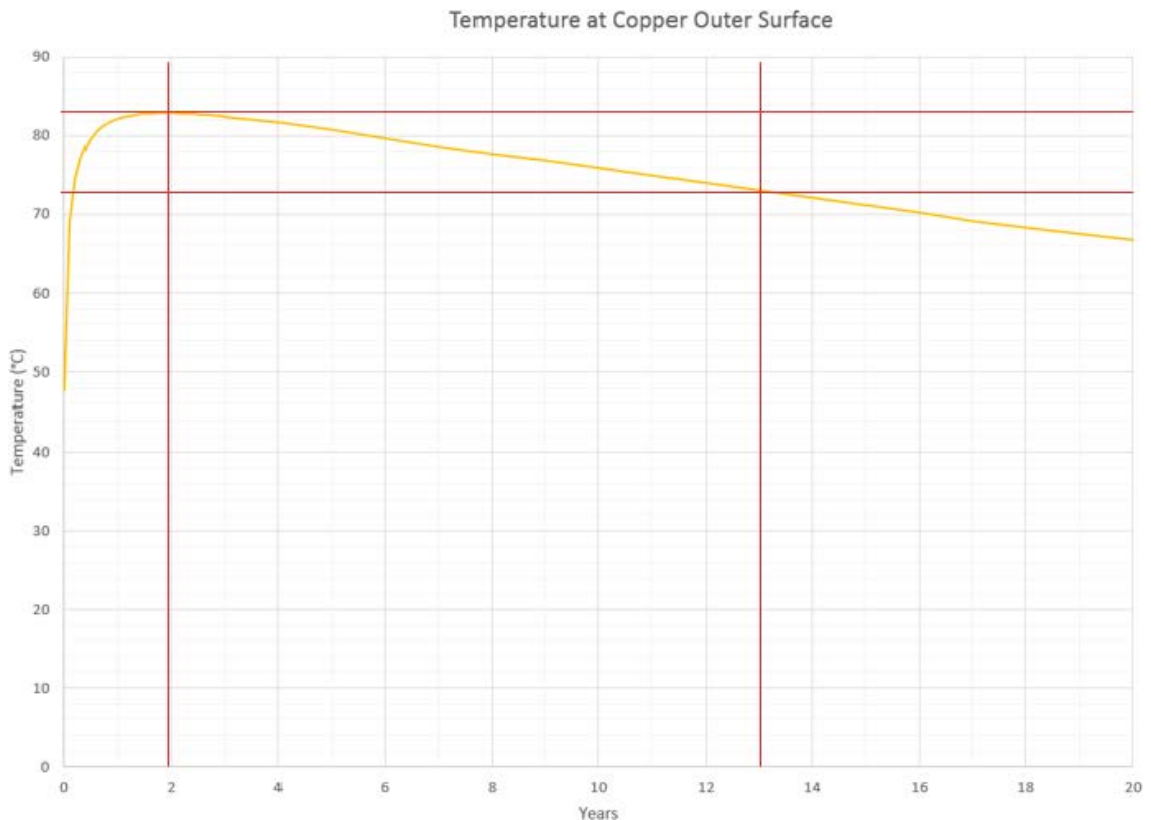
## 2.4 Finita element-modell

Tanken med den endimensionella radiella beräkningsmodellen är att den ska ge så lika resultat som möjligt som en utvald mer komplex flerdimensionell modell, i detta fall Ikonens (2020, avsnitt 6.1), avseende den stationära och transienta temperaturen på och strax utanför kapselytan (figur 2-4). Speciellt har temperaturens maximala värde för den ensamma kapseln och temperaturen vid tidpunkten 13 år för Ikonens (2020) superponerade maximala värde valt som referenser. Syftet är att på ett ingenjörsmässigt sätt förenklat kunna undersöka hur variationer i olika parametrar påverkar temperaturen där.

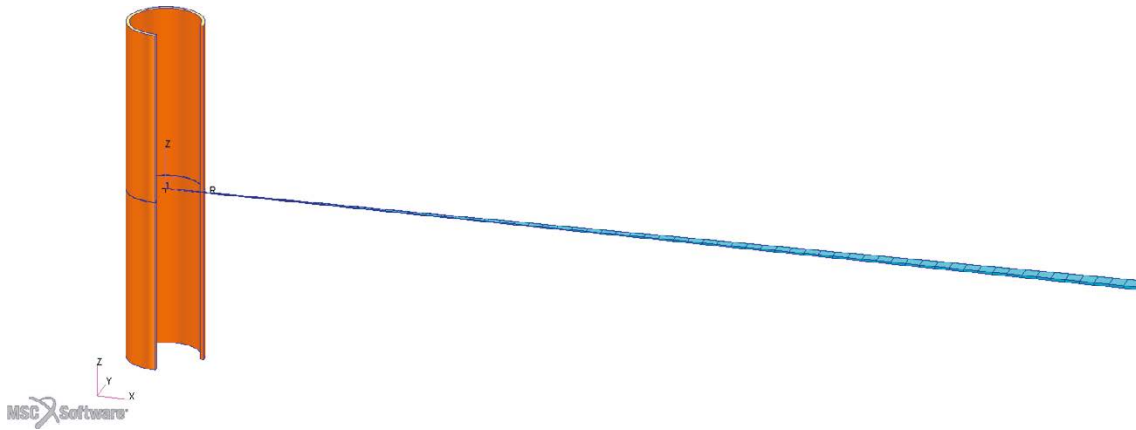
Finita element-modellen är byggd i de kommersiella programmen MSC.Patran (pre- och post-processor) och MSC.Nastran (lösare). Den består av en 1 cm hög och 1 grad vid cylindrisk kil i kapselns mittplan som vid radien 3 600 mm övergår i en sfärisk kil (figur 2-6, figur 2-7 och figur 2-8). Valet av höjd och vidd påverkar inte resultaten eftersom modellen är en-dimensionell. Värdet 3 600 mm har bestämts med passningsräkning för att Ikonens (2020, avsnitt 6.1) resultat för en ensam kapsel i slutförvaret (figur 2-5) ska reproduceras (figur 2-5). I bilaga 3 resoneras kring en mer naturlig väg att välja övergångsradien.



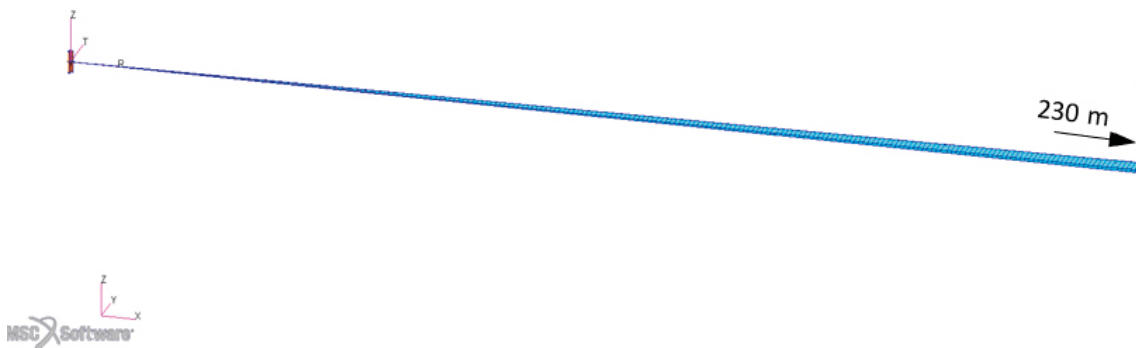
**Figur 2-4.** Blå pil: temperaturutveckling på kapselytan i mittplanet för en ensam kapsel i slutförvaret (Ikonen 2020, avsnitt 6.1). Gäller för Posiva-BWR men likheten med SKB-BWR bedöms som tillräcklig.



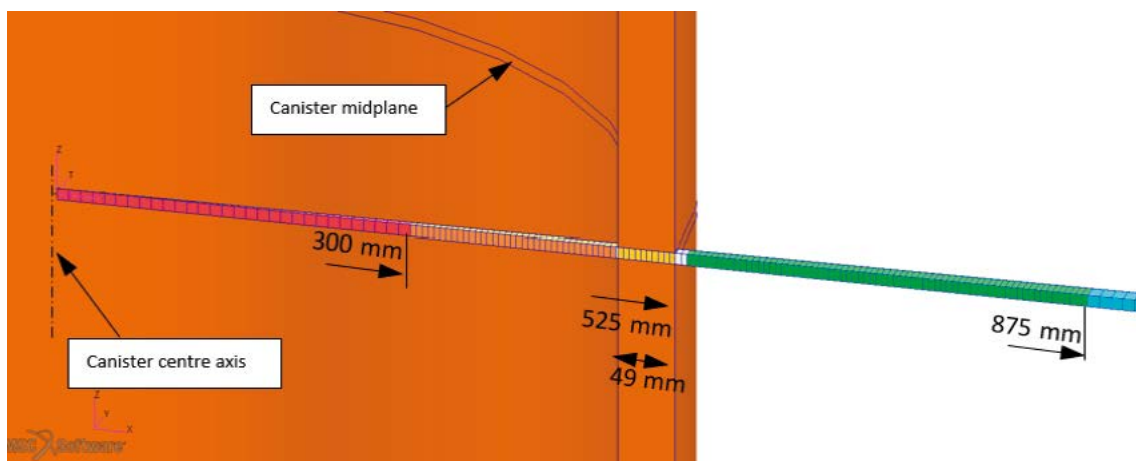
**Figur 2-5.** Temperaturutveckling på kapselytan i mittplanet för en ensam kapsel i slutförvaret beräknad med den endimensionella radiella finita element-modellen för reproduktion av resultaten från Ikonen (2020, avsnitt 6.1), figur 2-4.



**Figur 2-6.** Termisk finita element-modell. Kopparhöljet ingår inte i modellen utan visas som referens. Blått = berg.



**Figur 2-7.** Termisk finita element-modell, översikt ut till yttre randen. Kopparhöljet ingår inte i modellen utan visas som referens. Blått = berg.



**Figur 2-8.** Termisk finita element-modell, nära kapseln. Kopparhöljet ingår inte i modellen utan visas som referens. Rött = kapselinterna delar med värmelast, orange = kapselinterna delar utan värmelast, gult = kopparhöljet, grönt = buffert, blått = berg, vitt = inre och yttre spalt vid kopparhöljet.



Spaltvidderna vid kopparhöljet har, liksom i Ikonen (2020), valts till 1,5 mm på insidan och 10 mm på utsidan. I känslighetsanalyserna redovisade i kapitel 3 har vissa variationsintervall definierats för spaltvidderna.

Värme antas överföras via värmestrålning enligt Stefan-Boltzmanns lag över de radiella spalterna på kopparhöljets in- och utsida, samt konduktion utan fasövergångar. Värmeöverföring via konvektion försummas enligt Ikonen (2020, avsnitt 7.5).

Alla ränder antas termiskt isolerade.

Kapselns initialtemperatur är 50 °C (Ikonen 2020, figur 52). Valet av initialtemperatur har försumbar inverkan på beräkningsresultaten (Ikonen et al. 2018, avsnitt 4.1). Utanför kapseln är initialtemperaturen 11,2 °C vilket är ett förväntat värde för förhållandena i Forsmarks berggrund (Ikonen 2020, s 59, Hökmark et al. 2010). För att vara konsekvent och direkt kunna jämföra mot Ikonens (2020, avsnitt 6.1) beräkning torde hellre Olkiluotos värde 10,5 °C använts även i finita element-modellen. Skillnaden för kapseln kan uppskattas till 0,7 °C eftersom kapseltemperaturen kan förväntas bero linjärt mot bergets initialtemperatur (avsnitt 3.1.5).

## **2.5 Analytisk handboksmodell**

En stationär analytisk ”handboksmodell” har byggts för verifiering av finita element-modellen beskriven i avsnitt 2.4 och för parameterstudierna i kapitel 3. Den baseras på sambanden för värmeledning i cylindriska och sfäriska väggar (figur 2-3) samt värmestrålning över spalterna vid kopparhöljet. Modellen har byggts i programmet Mathcad 15 och är utskriven i bilaga 1.



## 3 Beräkningar

### 3.1 Slutförvaret

#### 3.1.1 Allmänt

Finita element-modellen och den analytiska handboksmodellen beskrivna i avsnitt 2.4 respektive 2.5 har använts i en uppsättning parameterstudier redovisade i avsnitt 3.1.2 till 3.1.8. I beräkningarna varieras en parameter i taget mellan tänkbara, realistiska max- och minvärden medan övriga mått, materialegenskaper och termiska laster förutsätts vara nominella som beskrivs i kapitel 2. Ett hypotetiskt värsta fall, med den mest ogynnsamma parameteruppsättningen i samverkan, beräknas i avsnitt 3.1.9.

Temperaturen efter 3 års deponering beräknad med den analytiska handboksmodellen kan förväntas vara ett par graders överskattningar jämfört med om den beräknats med finita element-modellen medan värdena för längre deponeringstider torde överensstämma tämligen väl med densamma (jämför med tabell 3-1 och figur B2-1). Skillnaden efter 7 års deponering är cirka 1,5 °C, efter 17 år 0,5 °C och efter 27 år 0 °C.

#### 3.1.2 Spalter vid kopparhöljet

Finita element-modellen har använts till att beräkna temperaturen för en uppsättning typiska spaltvidder på kopparhöljets in- och utsida enligt tabell 3-1 med resultat i figur 3-1 och figur 3-2. Den inre spalten förutsätts vara argonfylld, men alternativet vacuum har också beräknats.

Största tillåtna invändiga och utvändiga radiella spalt för koncentriskt placerade insatser, kapslar och buffertblock är 1,75 respektive 11,1 mm enligt konstruktionsförutsättningarna (SKB 2010a, b)<sup>1</sup>. Som minst kan den invändiga spalten vid koncentrisk positionering vara 1 mm medan den utvändiga kan vara 8,9 mm för torra buffertblock och 0 mm för vattenmättade.

Den största invändiga spalten som temperaturen beräknats för med finita element-modellen är 3,5 mm (tabell 3-1). Detta värde är inte praktiskt möjligt att nå vid koncentrisk placering och är därför mindre intressant. Excentrisk placering av insatsen i kapseln kan förväntas ge mellan 0,8 °C (Ikonen et al. 2018, s 87) till 2 °C (Ikonen 2020, s 100) högre maxtemperatur på kopparhöljet.

Den största utvändiga spalten som temperaturen beräknats för med finita element-modellen är 10 mm (tabell 3-1). Med spaltvidden 11,1 mm, som är största möjliga koncentrisk utvändiga spalt enligt konstruktionsförutsättningarna (SKB 2010a, b), uppskattas med hjälp av den analytiska handboksmodellen temperaturen på kopparhöljets utsida kunna bli 0,6 °C högre (tabell 3-2). Vid största möjliga excentrisk placering kan den utvändiga spalten variera från 0 mm till 22,2 mm på två diametralt motsatta positioner. Den analytiska handboksmodellen är inte byggd för excentrisk placering, men enligt beräkningar av Ikonen et al. (2018, s 87) av bentonitpelletsfyllda spalter kan en utvändig excentricitet förväntas ge 1 knapp grads lägre maxtemperatur på kopparhöljet.

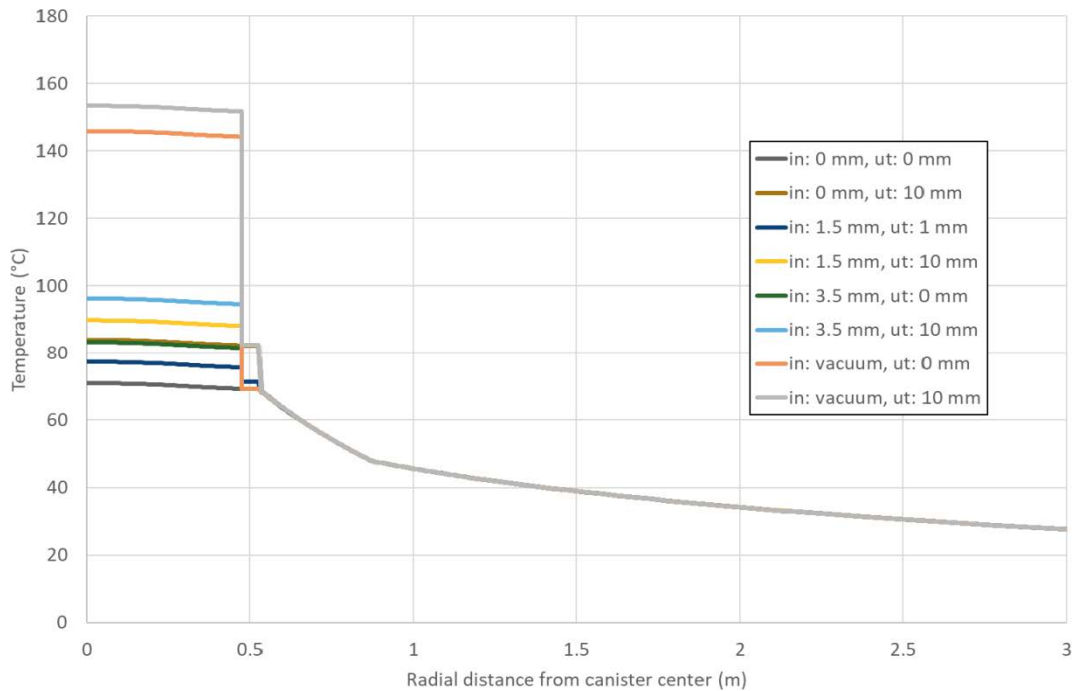
<sup>1</sup> Baserat på tillåtna tillverkningstoleranser kan den invändiga spalten för koncentriskt placerade insatser, kapslar och torra buffertblock variera mellan  $(952-0,5-(949+0,5))/2 \text{ mm} = 2/2 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$  och  $(952+0,5-(949-0))/2 \text{ mm} = 3,5/2 \text{ mm} = 1,75 \text{ mm}$  (SKB 2010a, s 29–34) medan den utvändiga spalten kan variera mellan  $(1070-1-(1050+1,2))/2 \text{ mm} = 17,8/2 \text{ mm} = 8,9 \text{ mm}$  och  $(1070+1-(1050-1,2))/2 \text{ mm} = 22,2/2 \text{ mm} = 11,1 \text{ mm}$  (SKB 2010a, s 29–34, 2010b, s 28).

**Tabell 3-1. Temperaturer vid kopparhöljet beräknade med finita element-modellen för olika spaltvidder efter 3 års deponering (36 års svalning). 11,1 mm istället för 10 mm utvärdig spaltvidd uppskattas med hjälp av den analytiska handboksmodellen ge 0,6 °C högre  $T_{Cu}$ .**

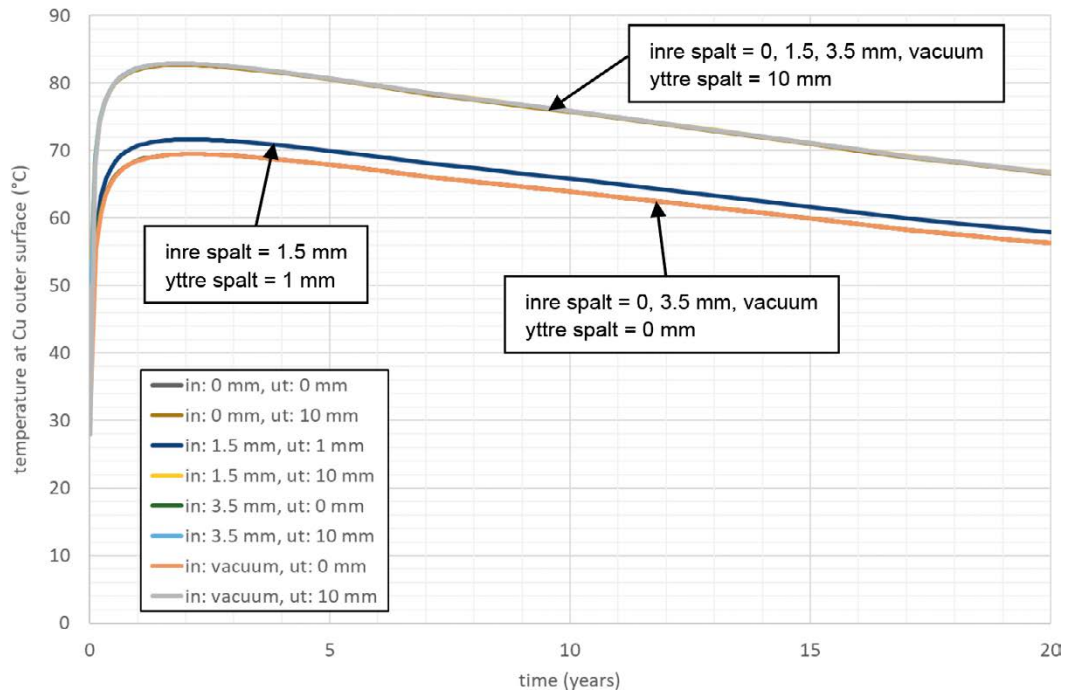
In (mm)	Ut (mm)	$\Delta T_{in}$ (°C)	$\Delta T_{ut}$ (°C)	$T_{Cu}$ (°C)
0	0	0	0	69,2
0	10	0	14,0	82,3
1,5	1	4,2	2,8	71,4
1,5	10	5,6	14,0	82,4
3,5	0	12,3	0	69,2
3,5	10	12,1	14,0	82,4
Vacuum	0	74,9	0	69,2
Vacuum	10	69,3	14,0	82,4

**Tabell 3-2. Temperaturer på kopparhöljet (°C) från tabell 3-1 ordnade efter spaltvidder. Temperaturen för 11.1 mm utvärdig spaltvidd uppskattad med hjälp av den analytiska handboksmodellen.**

Utvändig spalt (mm)	Invändig spalt (mm)			
	0	1.5	3.5	Vacuum
0	69,2		69,2	69,2
1		71,4		
10	82,3	82,4	82,4	82,4
11,1	82,9	83,0	83,0	83,0



**Figur 3-1. Temperatur som funktion av radiellt avstånd från kapselcentrum för olika spaltvidder.**



Figur 3-2. Temperatur på kopparhöljets utsida som funktion av tid efter deponering för olika spaltvidder.

### 3.1.3 Buffertens termiska egenskaper

Enligt resonemanget i avsnitt 2.1 är de stationära egenskaperna mer tongivande än de transienta på korta avstånd nära kapseln. Det betyder att den viktigaste termiska materialegenskapen som direkt påverkar temperaturen hos bufferten är konduktiviteten  $k$  medan densiteten  $\rho$  och värmekapacitiviteten  $c_p$  har mindre betydelse ( $k$  är dock beroende av  $\rho$ , se Hedström 2020).

Den analytiska handboksmodellen har använts till att beräkna temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta för tre olika men realistiska värden på konduktiviteten, min-normal-max, enligt tabell 3-3. Hökmark et al. (2010, s 49) anger  $k_{eff}$  till 1,0 W/(mK) för torra hål och 1,3 W/(mK) för vattenmättade medan Hedström (2020, s 1) visar att värdena ner mot 0,68 W/(mK) inte kan uteslutas. Den utvändiga spalten är 10 mm.

I beräkningsmodellen har inte bufferten delats upp i kompakterat block och pellets, även om det mycket väl skulle kunna göras, utan den effektiva konduktiviteten  $k_{eff}$  har beräknats enligt Hedström (2020, ekvation 8). Som maximalt värde på  $k_{eff}$  har dock 1,30 valts enligt ovan trots att maximala block- och pelletsvärdet endast ger ett  $k_{eff}$  på 1,20.

Resultaten visas i tabell 3-4.

Tabell 3-3. Buffertkonduktiviteter som temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta beräknats för. Referenser: 1) Hedström (2020), 2) Ikonen (2020), 3) Hökmark et al. (2010)

Värde	$k$ (W/mK) block	Referens	$k$ (W/mK) pellets	Referens	$k_{eff}$ (W/mK)	Referens
Min	1	1) s 1	0,2	1) s 1	0,68	1) s 1
normal	1,2	1) s 1	0,4	1) s 1	1,0	1) s 10, 2) s 59
max	1,48	1) s 8	0,5	1) s 8	1,30	3) s 49

**Tabell 3-4. Temperatur på kopparhöljet och på buffertens inneryta för olika buffertkonduktiviteter och deponeringstider beräknade med den analytiska handboksmodellen.**

$k_{\text{eff}}$	3 år (°C)		7 år (°C)		17 år (°C)		27 år (°C)	
	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert
Min	94,1	80,8	88,3	75,7	76,8	65,7	67,4	57,6
Normal	84,9	71,1	79,8	66,7	69,5	58,1	61,2	51,2
Max	80,4	66,4	75,6	62,3	66,0	54,4	58,2	48,0

### 3.1.4 Bergets termiska egenskaper

Den analytiska handboksmodellen har använts till att beräkna temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta för två olika bergkonduktiviteter enligt tabell 3-5. Som lägsta värde har valts 2,55 W/(mK) och som högsta 3,57 W/(mK) enligt Hökmarks et al. (2010) lägsta dimensionerande respektive genomsnittliga värde för berget i Forsmark. Det lägsta värdet har väsentligt mycket lägre förekomst än det genomsnittliga i de borrprover som gjorts i Forsmark (Hökmark et al. 2010, figur 4-8).

Anledningen till att endast konduktiviteten  $k$  studeras men inte densiteten  $\rho$  och värmekapacitiviteten  $c_p$  är att de senare främst påverkar den transienta temperaturutvecklingen genom diffusiviteten  $\alpha=k/(\rho c_p)$  såtillvida att en låg diffusivitet ger en lägre maximal temperatur som inträffar längre fram i tiden medan en hög diffusivitet ger en högre maximal temperatur som inträffar tidigare, givet att konduktiviteten  $k$  hålls konstant (se kurvan "Decay Heat" för en ensam kapsel i figur B2-1). I en stationär beräkningsmodell, som den analytiska handboksmodellen, ingår inte dessa storheter.

Resultaten visas i tabell 3-6.

**Tabell 3-5. Bergkonduktiviteter som temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta beräknats för.**

Värde	$k$ (W/mK)	Referens
Min	2,55	Hökmark et al. (2010, s 41)
Max	3,57	Hökmark et al. (2010, s 41)

**Tabell 3-6. Temperatur på kopparhöljet och på buffertens inneryta för olika bergkonduktiviteter och deponeringstider beräknade med den analytiska handboksmodellen.**

$k$	3 år (°C)		7 år (°C)		17 år (°C)		27 år (°C)	
	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert
Min	84,9	71,1	79,8	66,7	69,5	58,1	61,2	51,2
Max	74,3	59,9	69,9	56,3	61,1	49,3	54,0	43,7

### 3.1.5 Bergets initialtemperatur

En grads högre initialtemperatur i berget kan approximativt antas ge en grads högre temperatur på buffertens inneryta om man bortser från temperaturberoende materialegenskaper i buffert och berg. Även kopparhöljets temperatur kan antas ha samma beroende av bergets initialtemperatur, även om värmeöverföringen genom värmestrålning över eventuella spalter gör att ett sådant samband överskattar denna temperatur något.

Ikonen (2020) använder initialtemperaturen 10,5 °C för Posiva (Olkiluoto) och 11,2 °C för SKB (Forsmark). Initialtemperaturen skiljer sig åt något för de två tänkta deponeringsorterna men varierar också med djupet under markytan på grund av den geotermiska gradienten: 10,5 °C, 11,6 °C och 12,8 °C på 400 m, 500 m respektive 600 m djup i Forsmark enligt Hökmark et al. (2010, s 40).

Den analytiska handboksmodellen har använts till att beräkna temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta för tre olika initiala bergtemperaturer enligt tabell 3-7. Resultaten i tabell 3-8 visar att temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta praktiskt taget varierar ett-till-ett med bergets initialtemperatur.

**Tabell 3-7. Initiala bergtemperaturer som temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta beräknats för.**

Värde	T <sub>berg</sub> (°C)	Referens
Min	10,5	Ikonen (2020) för Olkiluoto, Hökmark et al. (2010) för Forsmark på 400 m djup
Normal	11,2	Ikonen (2020) för Forsmark
Max	12,8	Hökmark et al. (2010) för Forsmark på 600 m djup

**Tabell 3-8. Temperatur på kopparhöljet och på buffertens inneryta för olika initiala bergtemperaturer och deponeringstider beräknade med den analytiska handboksmodellen.**

T <sub>berg</sub>	3 år (°C)		7 år (°C)		17 år (°C)		27 år (°C)	
	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert
Min	84,2	70,4	79,1	66,0	68,9	57,4	60,6	50,5
Normal	84,9	71,1	79,8	66,7	69,5	58,1	61,2	51,2
Max	86,4	72,7	81,3	68,3	71,1	59,7	62,8	52,8

### 3.1.6 Kopparens emissivitet

Kapselkomponenternas emissivitet påverkar värmeöverföringen över eventuella spalter genom värme-strålning. En låg emissivitet på kopparhöljets insida medför en förhöjd temperatur i insatsen men påverkar inte kopparens temperatur. Emissiviteten på kopparhöljets utsida påverkar kopparhöljets och insatsens temperatur men inte buffertens och bergets temperatur.

Den analytiska handboksmodellen har använts till att beräkna temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta för tre olika emissiviter på kopparhöljets utsida enligt tabell 3-9. Spalten mellan kopparhöljet och bufferten är 10 mm. Resultaten i tabell 3-10 visar att kopparterperaturen efter 3 års deponering kan skilja nästan 10 °C mellan lägsta och högsta emissivitet medan bufferttemperaturen inte påverkas alls av emissiviteten.

**Tabell 3-9. Kopparemissiviteter på kopparhöljets utsida som temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta beräknats för.**

Värde	ε	Referens
Min	0,1	bearbetad, polerad – Ikonen (2020, s 16),
Normal	0,3	delvis oxiderad, använd av Ikonen (2020, s 16)
Max	0,6	oxiderad – Ikonen (2020, s 16)

**Tabell 3-10. Temperatur på kopparhöljet och på buffertens inneryta för olika kopparemissiviteter och deponeringstider beräknade med den analytiska handboksmodellen.**

ε	3 år (°C)		7 år (°C)		17 år (°C)		27 år (°C)	
	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert
min	90,9	71,1	85,3	66,7	74,1	58,1	65,1	51,2
normal	84,9	71,1	79,8	66,7	69,5	58,1	61,2	51,2
max	81,0	71,1	76,1	66,7	66,4	58,1	58,6	51,2

### 3.1.7 Resteffekt

Som visas i bilaga 2 är resteffektens variation med tiden så långsam att temperaturen nära kapseln för en given tidpunkt några år efter deponering kan beräknas kvasi-stationärt. Resteffektnivån påverkar härvid bufferttemperaturen så tillvida att ett linjärt beroende råder mellan resteffektnivå och skillnaden mellan bufferttemperatur och initial bergtemperatur om man bortser från temperaturberoende material-egenskaper i buffert och berg. Även kopparhöljets temperatur kan antas ha samma beroende av rest-effektnivån, även om värmeöverföringen genom värmestrålning över eventuella spalter gör att ett sådant samband överskattar denna temperatur något.

Inga beräkningar har gjorts specifikt för olika resteffektnivåer utöver dem som presenteras i avsnitt 3.1.2 till 3.1.6 och 3.1.9. Deponeringstiderna som valts i dessa beräkningar motsvarar punkter i tabell 2-2, där deponeringstiden 0 definieras som 33 år efter bränslets tagande ur drift och deponeringstiden 7 år följaktligen är 40 år efter tagande ur drift och så vidare. Temperaturen för mellanliggande tidpunkter kan beräknas med interpolering.

### 3.1.8 Modellparametern $\Phi$

Modellparametern  $\Phi$ , kvoten mellan det lokala värmeflödet radiellt över kapselytan i mittplanet och det genomsnittliga värmeflödet räknat över den totala kapselytan (avsnitt 2.3), kan enligt Hökmark et al. (2009, avsnitt 3.2.2) och Hedström (2020, avsnitt 2.1.2) antas variera mellan cirka 0,74 och 0,92 med 0,87 som ett relevant normalvärde. En luftfylld utvändig spalt tenderar att ge lägre värden i intervallet.

Modellparametern  $\Phi$  multipliceras i beräkningsmodellerna med resteffektvärdet och därför beror den beräknade temperaturen i kopparhöljet och bufferten på samma sätt av  $\Phi$  som av resteffekten enligt avsnitt 3.1.7.

### 3.1.9 Den mest ogynnsamma parameteruppsättningen

Den analytiska handboksmodellen har använts till att beräkna temperaturen på kopparhöljet och buffertens inneryta för en hypotetisk parameteruppsättning med de mest ogynnsamma värdena sammantagna enligt tabell 3-11. Parameteruppsättningen kan sägas representera ett torrt deponeringshåll på 600 m djup i Forsmark med en utvändig luftfylld spalt som är den bredast tillåtna, en icke-korroderad utvändig kapselyta, i ett berg med den lägsta uppmätta värmeledningsförmågan. Modellparametern  $\Phi$  har inte valts till sitt maximala värde utan till sitt normala, vilket sannolikt ändå är rimligt pessimistiskt eftersom en luftfylld utvändig spalt tenderar att ge lägre värden i dess värdeintervall (Hedström 2020, avsnitt 2.1.2).

Resultaten visas i tabell 3-12.

Det kan noteras att temperaturen på kopparhöljet efter tre års deponering beräknas till 103,1 °C, det vill säga överstigande konstruktionsförutsättningarnas maximalt tillåtna temperatur 100 °C (SKB 2010a, s 25). Värdet kan, såsom kommenterats i avsnitt 3.1.1, dock förväntas vara en överskattning med åtminstone ett par, tre grader jämfört med noggrannare resultat från en transient finita elementberäkning på grund av den analytiska handboksmodellens kvasi-statiska natur. Men en excentrisk placering av insatsen i kapseln kan enligt Ikonen (2020, s 100) och Ikonen et al. (2018, s 87) ge en ytterligare något högre maxtemperatur på kopparhöljet. I siffror uppskattas det justerade värdet till:

$$103,1 \text{ °C} - 3 \text{ °C (överskattning analytiska handboksmodellen)} + \\ + 2 \text{ °C (excentrisk placering av insats)} = 102,1 \text{ °C}$$

Om slutförvarets djup i Formarks berggrund väljs till 500 m istället för 600 m erhålls 1,2 °C lägre temperatur, det vill säga 100,9 °C maxtemperatur på kopparhöljet. En excentrisk placering av kapseln i buffertblocken, vilket får anses som sannolikt, ger ytterligare någon grads lägre maxtemperatur.

Det kan också noteras att även om temperaturen på kopparen efter tre års deponering är över 100 °C så beräknas ändå inte bufferten på sin inneryta som är exponerad mot kopparen bli varmare än dryga 80 °C (temperaturerna avser beräknade maximala värden på det cylindriska kopparhöljet eftersom de förenklade beräkningsmodellerna inte på ett enkelt sätt kan hantera variationer i omkrets- och axialled).



**Tabell 3-11. Hypotetisk parameteruppsättning med de mest ogynnsamma värdena i samverkan.**

Parameter	Min/Max	Värde
Yttre spalt	Max	11,1 mm, kapseln koncentriskt placerad i buffertblocken
$k_{\text{eff}}$ buffert	Min	0,68
$k_{\text{berg}}$	Min	2,55 W/mK
$T_{\text{berg}}$	Max	12,8 °C
$\epsilon$	Min	0,1
Resteffekt	-	Enligt tabell 2-2
$\Phi$	Normal	0,87

**Tabell 3-12. Temperatur på kopparhöljet och på buffertens inneryta för den mest ogynnsamma parameteruppsättningen beräknad med den analytiska handboksmodellen för olika deponeringstider. Observera att temperaturbidraget från omgivande kapslar inte inkluderas i beräkningsmodellerna.**

Parameter-uppsättning	3 år (°C)		7 år (°C)		17 år (°C)		27 år (°C)	
	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert	Koppar	Buffert
Ogynnsam	103,1	82,3	96,8	77,2	84,2	67,2	73,9	59,2
Nominell	84,9	71,1	79,8	66,7	69,5	58,1	61,2	51,2

## 3.2 Inkapslingsanläggningen

Inkapslingsanläggningen är i skrivande stund under utveckling och det har inte bedömts meningsfullt att utföra termiska beräkningar av kapslarna inom ramen för det aktuella uppdraget innan mer är känt om vilka förutsättningar som gäller för denna. För att kunna beräkna varje temperaturkritisk fas i inkapslingsprocessen skulle man åtminstone behöva specificera:

- Vilka termiska krav som gäller, t ex maximalt tillåten temperatur internt i kapseln, på kapselytan och/eller, möjligen som följdkrav, maximalt tillåten omgivningstemperatur och inkapslad resteffekt.
- Egenskaper hos kapselns omedelbara omgivning, såsom geometrier, mått, material och begynnelse-temperaturer i anläggningens verktygsdetaljer.
- Tillförd och bortförd effekt, t ex värmning, svetsning eller kylning.
- Tidsrymder under vilka ovanstående förutsättningar gäller.

För att undvika överdimensionering av anläggningen bör man specificera olika kravnivåer för olika typer av händelser såsom t ex ”Normal drift”, ”Exceptionell last” och ”Olyckslast”.

Med ovanstående förutsättningar kända skulle man kunna bygga vidare på de förenklade modeller som redovisas i föreliggande rapport eller utveckla nya mer noggranna beräkningsmodeller utifrån dessa. Man kan även tänka sig att koppla temperaturresultat till strukturella termiska expansioner för att t ex säkerställa att fastställda tillverkningstoleranser uppfylls.

Förhållandena i inkapslingsanläggningen skiljer sig beräkningsmässigt från dem i slutförvaret på några punkter:

- Randvillkoren kan förväntas inkludera värmeöverföring via en strömmande fluid, såsom fri eller påtvingad konvektion i luft. Dessa kan beräknas med analytiska handboksmodeller eller, om så bedöms nödvändigt, med CFD (Computational Fluid Dynamics, datorstödd strömningssimulering). I slutförvaret är konvektionen av underordnad betydelse (Ikonen 2020, avsnitt 7.5).
- Värmeöverföring via värmestrålning kan förväntas vara betydligt mer komplicerad eftersom geometrin hos kapselns omgivande luftvolym över vilka värmestrålning sker kan förväntas vara mer komplicerad.
- Geometrin hos kapselns omgivning kan generellt sett förväntas vara mer komplicerad.
- En fördel med förhållandena i inkapslingsanläggningen är dock att förutsättningarna, framför allt materialegenskaperna, sannolikt kan specificeras mer exakt än i slutförvaret.

### 3.3 Transportbehållaren

Transportbehållaren är i likhet med inkapslingsanläggningen under utveckling och det som skrivs i avsnitt 3.2 kan sägas gälla för dem båda. Möjligen kan transportbehållaren beräkningsmässigt utgöra en omgivning som mer påminner om slutförvaret i form av närvaro av tunna utvändiga gasspalter och en enklare mer rotationssymmetrisk geometri. Dessutom kan det tidsspann som kapseln tillbringar inuti transportbehållaren förväntas vara betydligt längre än motsvarande tidsrymder i de flesta av inkapslingsanläggningens olika stationer, vilket kan motivera förenklade kvasi-stationära betraktelser i analogi med avsnitt 2.1.

Transportbehållaren kan förväntas bestå av någon typ av cylindrisk behållare tillverkad av metalliskt material med en viss godstjocklek och med någon typ av kylande utvändig struktur, t ex i form av kylflänsar. En sådan konstruktion skulle i sin helhet kunna beräknas termiskt i en parameterstudie av t ex av godstjocklekar och kylflänsalternativ.

## 4 Resultatsammanfattning

Resonemangen i avsnitt 2.1 visar att temperaturutvecklingen kring en ensam kapsel i slutförvaret kan karakteriseras av två olika tidsskalor; en kort av storleksordningen veckor för stabilisering av temperaturskillnader mellan närbelägna punkter i kapseln, bufferten och det närmaste berget, och en lång av storleksordningen åtskilliga år för stabilisering av de absoluta temperaturnivåerna i samma områden. Resteffekten avklingar relativt dessa tidsskalor tillräckligt långsamt för att förenklade kvasi-stationära beräkningar av temperaturen i kapsel och buffert med god approximation ska kunna göras efter mindre än tio års deponering och framåt.

Resultaten från beräkningarna i kapitel 3 sammanfattas nedan.

Den koncentriska vidden hos den inre spalten mellan insatsen och kopparhöljet påverkar insatsens temperatur men knappast koppar- och bufferttemperaturen (tabell 3-1, figur 3-1 och figur 3-2). Dock visar Ikonen (2020, s 100) att en excentrisk placerad insats i kapseln kan ge upp till 2 °C högre koppartemperatur. En 1,5 mm inre spalt, vilket är något mindre än största tillåtna radiella vidd 1,75 mm vid koncentrisk placering av insatsen i kopparhöljet enligt konstruktionsförutsättningarna (SKB 2010a), ger efter tre års deponering en insatstemperatur som är knappt 6 °C högre än om spalten vore sluten. Excentrisk placering kan förväntas ge en något lägre maxtemperatur på insatsen (Ikonen 2020, s 100). Vacuum inuti kapseln ger en dramatiskt högre insatstemperatur, men är i skrivande stund inte ett konstruktionsalternativ.

Den studerade parameter som inom sitt realistiska variationsintervall beräknas ha störst inverkan på koppartemperaturen för en given resteffekt är den yttre spaltvidden. Om vidden är 11,1 mm, vilket är största möjliga radiella vidd vid koncentrisk placering av kapseln i buffertblocken enligt konstruktionsförutsättningarna (SKB 2010a), beräknas den efter 3 års deponering kunna ge nästan 15 °C högre koppartemperatur jämfört med om den är som minst, 0 mm (se kurvorna ”outer gap...” för 10 och 0 mm i figur 4-1 respektive figur 4-2). I praktiken kommer skillnaden vara ännu större eftersom spaltvidden 0 mm gäller vid vattenmättade förhållanden då buffertkonduktiviteten är som högst. För torra buffertblock är minsta möjliga radiella vidd vid koncentrisk placering 8,9 mm.

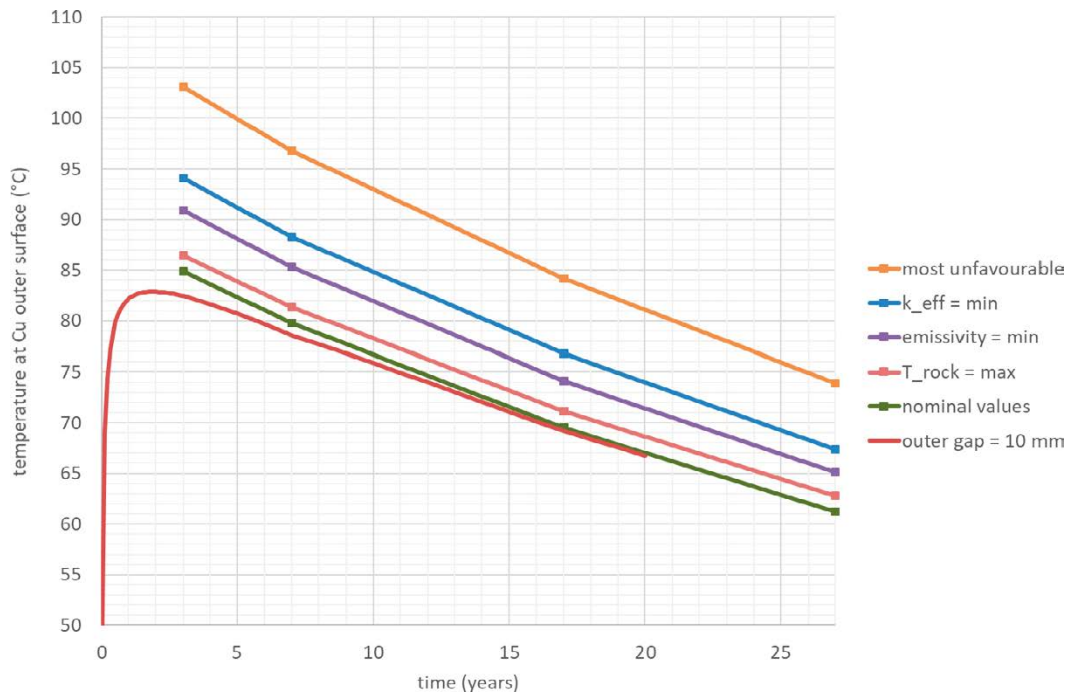
De förenklade beräkningsmodellerna i denna rapport hanterar endast koncentriskt placerade insatser, kapslar och buffertblock, men en excentrisk placering av kapseln i buffertblocken, vilket får anses som sannolik i det verkliga fallet, kan förväntas ge någon enstaka grads lägre maxtemperatur på kopparhöljet (Ikonen et al. 2018, s 87).

Buffertens konduktivitet har nästan lika stor inverkan som den yttre spaltvidden, knappt 14 °C högre koppartemperatur med en effektiv buffertkonduktivitet på 0,68 W/(mK) jämfört med 1,30 W/(mK).

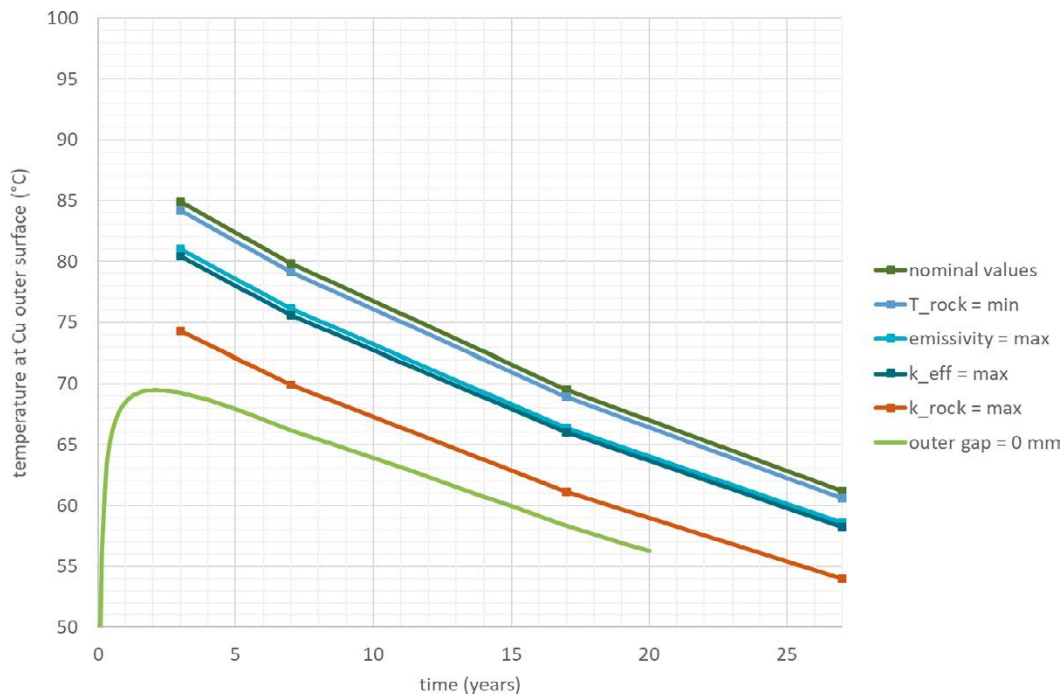
Bergets lägsta konduktivitet på 2,55 W/(mK) ger drygt 10 °C högre koppartemperatur än dess högsta, 3,57 W/(mK). Emissiviten på kopparhöljets utsida har ungefär samma inverkan, cirka 10 °C högre koppartemperatur med emissiviteten 0,1 jämfört med 0,6.

I figur 4-1 representerar kurvan ”outer gap = 10 mm” Ikonens (2020, avsnitt 6.1) resultat för en ensam kapsel i slutförvaret men beräknad med finita element-modellen beskriven i avsnitt 2.4. Kurvan ”nominal values” är resultaten för samma parameteruppsättning beräknad med den analytiska handboksmodellen och är inlagd som referens i figur 4-1 till figur 4-4. Om samtliga studerade parametrar antar sina mest ogynnsamma värden erhålls kurvan ”most unfavourable” med en temperatur på kopparytan som är omkring 17 °C högre än Ikonens (2020, avsnitt 6.1) resultat, vilket riskerar att ge en maxtemperatur över 100 °C efter ett par års deponering. Efter 17 års deponering, då kapselns resteffektnivå är lägre, men då dess temperatur på grund av omgivande kapslar kan förväntas vara nära sitt maximala värde, är skillnaden drygt 13 °C. Ett större kapselavstånd än vad som antas i Ikonen (2020, s 84) krävs då för att hålla kapseltemperaturen på en acceptabel nivå under 100 °C.

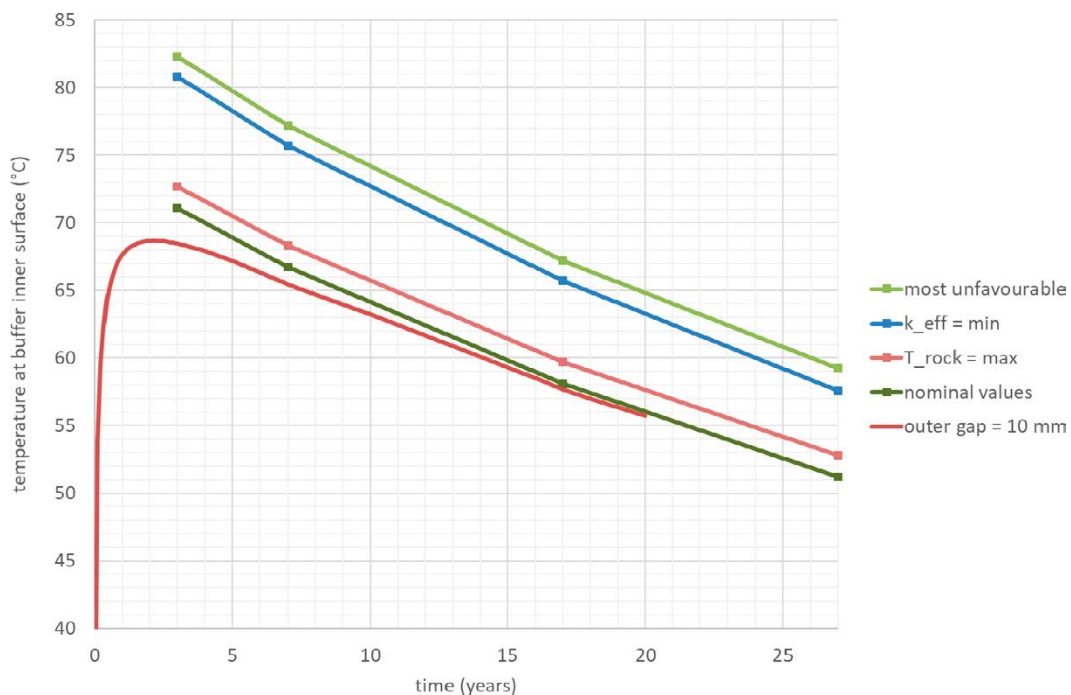
Temperaturen på buffertens inneryta påverkas varken av de koncentriska spaltvidderna vid kopparhöljet eller av kopparemissiviteten. Variationen av övriga studerade parametrar ger samma temperaturskillnader på buffertytan som på kopparhöljet, obetydligt ökade med det icke-linjära bidraget från värmestrålning över en eventuell spalt (figur 4-3 och figur 4-4).



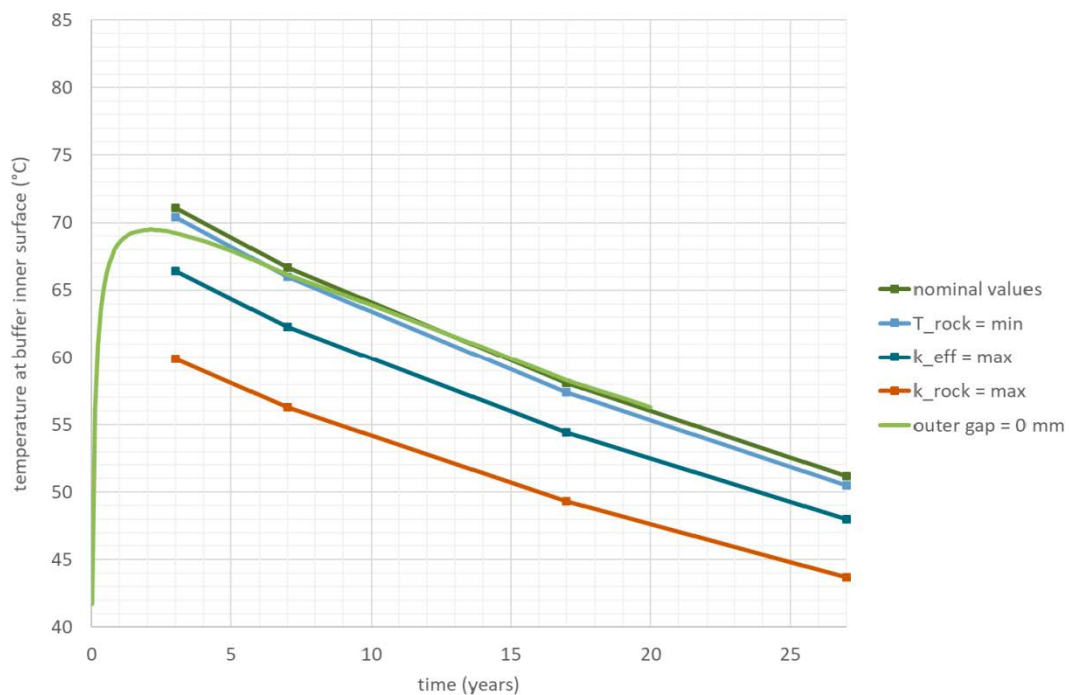
**Figur 4-1.** Temperatur på kopparhöljets utsida som funktion av tid efter deponering för varje studerad parameters mest ogynnsamma värde samt för samtliga dessa värden i samverkan. Som jämförelse visas temperaturen beräknad för parametrarnas normalvärden.



**Figur 4-2.** Temperatur på kopparhöljets utsida som funktion av tid efter deponering för varje studerad parameters mest gynnsamma värde. Som jämförelse visas temperaturen beräknad för parametrarnas normalvärden.



**Figur 4-3.** Temperatur på buffertens inneryta som funktion av tid efter deponering för varje studerad parameters mest ogynnsamma värde samt för samliga dessa värden i samverkan. Som jämförelse visas temperaturen beräknad för parametrarnas normalvärden.



**Figur 4-4.** Temperatur på buffertens inneryta som funktion av tid efter deponering för varje studerad parameters mest gynnsamma värde. Som jämförelse visas temperaturen beräknad för parametrarnas normalvärden.



## 5 Diskussion

Ikonen et al. (2018, kapitel 6) framhåller, bortsett från resteffekten, bergets konduktivitet som den parameter som påverkar kapsel- och bentonittemperaturerna mest. I föreliggande rapport menas att yttre spalten mellan kopparhöljet och bentoniten samt bentonitens konduktivitet är de viktigaste parametrarna som påverkar dessa temperaturer. Denna skenbara brist på samsyn beror förmodligen på att Ikonen et al. (2018) varierar varje parameter med  $\pm 10\%$  från normalvärdet medan föreliggande rapport istället formulerar ett tänkbart variationsintervall för varje parameter. Till exempel varierar bergkonduktiviteten i föreliggande rapport från 2,55 W/(mK) till 3,57 W/(mK) vilket kan sägas utgöra en maximal ökning på 40 % medan bentonitkonduktiviteten varierar från 0,68 W/(mK) till 1,30 W/(mK) motsvarande 91 % ökning. För att undvika en överdrivet pessimistisk dimensionering borde man möjligen även väga in sannolikhetsfördelningar i känslighetsresonemangen för att få en mer rättvisande bild. Till exempel förefaller förekomsten av berg i Forsmark med den låga konduktiviteten 2,55 W/(mK) väldigt sparsam jämfört med berg med genomsnittskonduktiviteten 3,57 W/(mK) (Hökmark et al. 2010, figur 4-8). Å andra sidan kan bentoniten i Forsmarks torra bergmiljö hålla en låg konduktivitet en lång tid efter deponering.

Beräkningarna i kapitel 3 visar i likhet med Ikonen et al. (2018, s 65) att termiska parametrar närmare kapseln, bortsett från resteffekten, inte påverkar temperaturen längre ifrån densamma. Detta beror fysikaliskt sett på att temperaturrendevillkoret i det avlägsna berget bestämmer den absoluta temperaturnivån medan storleken på det radiella värmeflödet inifrån kapseln och utåt bestämmer de relativa temperaturskillnaderna mellan punkter på olika radier från kapselcentrum. Till exempel påverkas inte temperaturen i bufferten nämnvärt av kopparemissiviteter eller spaltvidder vid kopparhöljet (figur 3-1, tabell 3-10). En slutsats man kan dra av detta är att om kopparhöljets maxtemperatur är en kritisk faktor behöver man, bortsett från resteffekten, inte lägga vikt vid termiska parametrar som befinner sig radiellt innanför kopparytan, såsom intern spaltvidd och kapselintern värmeöverföringsförmåga, utan istället fokusera på utvändigt spalt, värmeöverföringsförmåga i buffert och berg samt kapselavståndet. Relaterat till beräkningarna i Ikonen (2020) skulle dessa för Forsmarks del främst behöva justeras med hänsyn till den mest pessimistiska värmeledningsförmågan hos bufferten, eftersom skillnaden i både koppar- och bufferttemperatur mellan Ikonens värmeledningstal ( $k_{eff} = 1,0$  W/(mK)) och det mest pessimistiska ( $k_{eff} = 0,68$  W/(mK)) beräknas till cirka 8 °C (tabell 3-4) efter 13 års deponering vilket skulle ge en koppartemperatur på en bit över 100 °C. Den utvändiga spaltvidden ger endast en skillnad på cirka en halv grad (avsnitt 3.1.2) mellan Ikonens värde (10 mm) och det mest pessimistiska (11,1 mm) så den differensen kan i stort sett bortses från. Däremot har Ikonen (2020) redan räknat med den mest pessimistiska bergkonduktiviteten (2,55 W/(mK)) vilket jämfört med medelvärdet i Forsmark (3,57 W/(mK)) beräknas ge omkring 8 °C högre koppartemperatur efter 13 års deponering (tabell 3-6). Detta skulle i viss mån kunna kompensera för den pessimistiska buffertkonduktiviteten, men det är svårt att uttala sig om utan räkna transient och ta hänsyn till skillnaderna i termisk diffusivitet.

Föreliggande rapport behandlar specialfallet en ensam kapsel placerad i slutförvaret. Parameterstudierna i kapitel 3 skulle emellertid kunna utvidgas till att omfatta inverkan från övriga kapslar i förvaret genom att i en linjär approximation superponera temperaturbidraget från dessa (understa kurvan i figur 2-4 eller i Ikonen et al. 2018, figur 15). Omgivande kapslars temperaturinverkan varierar ungefär i samma tidsskala (år snarare än veckor, se avsnitt 2.1) som resteffekten för en ensam kapsel vilket gör att enkla kvasi-stationära betraktelser skulle kunna användas initialt.





## Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer). SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till [dokument@skb.se](mailto:dokument@skb.se).

**Hedström M, 2020.** Boundary conditions for canister temperature evaluation. SKBdoc 1682687 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Hökmark H, Lönnqvist M, Kristensson O, Sundberg J, Hellström G, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the forsmark and laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Ikonen K, 2009.** Thermal dimensioning of spent fuel repository. Posiva Working Report 2009-69, Posiva Oy, Finland.

**Ikonen K, Kuuti J, Raiko H, 2018.** Thermal dimensioning for the Olkiluoto repository – 2018 update. Posiva Working Report 2018-26, Posiva Oy, Finland.

**Ikonen K, 2020.** Temperatures inside SKB and Posiva disposal canisters for spent fuel. Posiva SKB Report 12, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Incropera F, DeWitt D, Bergman T L, Lavine A S, 2006.** Fundamentals of heat and mass transfer. 6. uppl. New York: Wiley.

**Renström P, 2020.** Numerical study of the influence from deposited gamma radiation energy on canister temperature in the Spent Fuel Repository. SKB R-19-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010a.** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010b.** Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010c.** Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.



## Utskrift av analytisk handboksmodell

### CALCULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A CYLINDRICAL 2D SLAB OF A CANISTER IN A SPHERICAL DEEP REPOSITORY (QA FOR FEM)

#### Assumptions

Steady-state one-dimensional cylindrical/spherical conditions

#### Thermal input

$Q := 1703.2 \cdot \text{W}$	heat power of one single canister
$T_{\text{amb}} := 11.2 \cdot \text{°C}$	ambient rock temperature
$\Phi := 0.87$	radial heat flux at mid / average h fl over all can. surf. (R-09-04)

#### Geometry

$L_{\text{heat}} := 3.68 \cdot \text{m}$	length of heat producing part of canister
$L_{\text{can}} := 4.83 \cdot \text{m}$	length of canister
$r_{\text{o\_iron}} := 474.5 \cdot \text{mm}$	outer radius of insert
$t_{\text{canister}} := 49 \cdot \text{mm}$	copper canister thickness
$r_{\text{i\_Cu}} := r_{\text{o\_iron}} + d_{\text{igap}} = 476 \cdot \text{mm}$	inner radius of copper canister
$r_{\text{o\_Cu}} := r_{\text{i\_Cu}} + t_{\text{canister}} = 525 \cdot \text{mm}$	outer radius of copper canister
$r_{\text{i\_bentonite}} := r_{\text{o\_Cu}} + d_{\text{ogap}} = 535 \cdot \text{mm}$	inner radius of bentonite
$r_{\text{o\_bentonite}} := 875 \cdot \text{mm}$	outer radius of bentonite
$A_{\text{can}} := 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{o\_Cu}} \cdot (r_{\text{o\_Cu}} + L_{\text{can}}) = 17.664 \text{ m}^2$	canister total surface
$\Rightarrow$ equivalent heat length for reduced heat flux:	$L := \frac{A_{\text{can}} \cdot L_{\text{heat}}}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{o\_Cu}} \cdot L_{\text{heat}} \cdot \Phi} = 6.155 \text{ m}$

#### Physical properties

$\epsilon_{\text{o\_iron}} := 0.6$	emissivity for outer insert surface
$k_{\text{argon}} := 0.022 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	thermal conductivity for argon
$k_{\text{igap}} := k_{\text{argon}}$	thermal conductivity at inner gap
$\epsilon_{\text{i\_Cu}} := 0.1$	emissivity for inner copper shell surface
$k_{\text{Cu}} := 390 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	thermal conductivity for copper
$\epsilon_{\text{o\_Cu}} := 0.3$	emissivity for outer copper shell surface
$k_{\text{air}} := 0.03 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	thermal conductivity for air
$k_{\text{ogap}} := k_{\text{air}}$	thermal conductivity at outer gap
$\epsilon_{\text{i\_bentonite}} := 0.8$	emissivity for bentonite
$k_{\text{bentonite}} := 1 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	thermal conductivity for bentonite
$k_{\text{rock}} := 2.55 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	thermal conductivity for rock
$\sigma_{\text{SB}} := 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	Stefan-Boltzmann's constant

### Calculation parameters

$r_{amb} := 600\text{-m}$	outer radius of ambient rock
$r_{c\_to\_s} := 3600\text{-mm}$	radius of transition from cylinder to sphere
$t_{cyl} := 10\text{-mm}$	thickness of cylindrical slab at canister mid section
$\varphi_{cyl} := 1^\circ$	angle of cylindrical cake piece
$\theta_{sph} := \text{atan}\left(0.5 \cdot t_{cyl} \cdot r_{c\_to\_s}^{-1}\right) = 0.080^\circ$	half angle of spherical piece

### Heat rate

$$q := \frac{Q}{L} \cdot \frac{\varphi_{cyl}}{2 \cdot \pi} \cdot t_{cyl} = 7.695\text{-mW} \quad \text{heat rate through cylindrical/spherical pieces}$$

$$\frac{q}{r_{o\_Cu} \cdot \varphi_{cyl} \cdot t_{cyl}} = 83.984\text{-W}\cdot\text{m}^{-2} \quad \text{heat flux over canister surface through cyl piece at mid}$$

$$q_{fl.c\_to\_s} := \frac{q}{t_{c\_to\_s} \cdot \varphi_{cyl} \cdot t_{cyl}} = 12.2\text{-W}\cdot\text{m}^{-2} \quad \text{heat flux over transition area}$$

which for the spherical part equals a fictitious  $Q_{sph} := q_{fl.c\_to\_s} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_{c\_to\_s}^2 = 2 \times 10^3\text{ W}$

### Rock, from ambient to transition of sphere to cylinder

$$T_{c\_to\_s} := T_{amb} + \left( \frac{1}{r_{c\_to\_s}} - \frac{1}{r_{amb}} \right) \cdot \frac{Q_{sph}}{4 \cdot \pi \cdot k_{rock}} = 28.4^\circ\text{C}$$

### Rock, from transition of sphere to cylinder to bentonite

$$T_{o\_bentonite} := T_{c\_to\_s} + Q \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_{c\_to\_s}}{r_{o\_bentonite}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{rock}} = 52.8^\circ\text{C}$$

### Bentonite, from outer end to gap against copper

$$T_{i\_bentonite} := T_{o\_bentonite} + Q \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_{o\_bentonite}}{r_{i\_bentonite}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{bentonite}} = 74.5^\circ\text{C}$$

### Outer gap from bentonite to copper

Guess:  $T_{o\_Cu} := 100^\circ\text{C}$        $Q_{rad} := 1000\text{-W}$        $Q_{cond} := 700\text{-W}$

Given

$$Q_{rad} = \frac{\sigma_{SB} \cdot (T_{o\_Cu}^4 - T_{i\_bentonite}^4) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{o\_Cu} \cdot L}{\frac{1}{\epsilon_{o\_Cu}} + \frac{1 - \epsilon_{i\_bentonite}}{\epsilon_{i\_bentonite}} \cdot \left( \frac{r_{o\_Cu}}{r_{i\_bentonite}} \right)}$$

$$Q_{cond} = \frac{(T_{o\_Cu} - T_{i\_bentonite}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{ogap}}{\ln\left(\frac{r_{i\_bentonite}}{r_{o\_Cu}}\right)}$$

$$Q = Q_{rad} + Q_{cond}$$

$$x := \text{Find}\left(\frac{T_{o\_Cu}}{K}, \frac{Q_{rad}}{W}, \frac{Q_{cond}}{W}\right) = \begin{pmatrix} 362 \\ 824 \\ 881 \end{pmatrix}$$

$$T_{o\_Cu} := x_0 \cdot K = 88.9^\circ\text{C}$$

## Copper

$$T_{i\_Cu} := T_{o\_Cu} + \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_{o\_Cu}}{r_{i\_Cu}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{Cu}} = 88.7 \cdot ^\circ\text{C}$$

## Inner gap from copper to insert

Guess:  $T_{o\_iron} := 95 \cdot ^\circ\text{C}$      $Q_{rad} := 1000 \cdot \text{W}$      $Q_{cond} := 0 \cdot \text{W}$

Given

$$Q_{rad} = \frac{\sigma_{SB} \cdot (T_{o\_iron}^4 - T_{i\_Cu}^4) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{o\_iron} \cdot L}{\frac{1}{\varepsilon_{o\_iron}} + \frac{1 - \varepsilon_{i\_Cu}}{\varepsilon_{i\_Cu}} \cdot \left(\frac{r_{o\_iron}}{r_{i\_Cu}}\right)}$$

$$Q_{cond} = \frac{(T_{o\_iron} - T_{i\_Cu}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{igap}}{\ln\left(\frac{r_{i\_Cu}}{r_{o\_iron}}\right)}$$

$$Q = Q_{rad} + Q_{cond}$$

$$x := \text{Find}\left(\frac{T_{o\_iron}}{\text{K}}, \frac{Q_{rad}}{\text{W}}, \frac{Q_{cond}}{\text{W}}\right) = \begin{pmatrix} 368 \\ 112 \\ 1593 \end{pmatrix}$$

$$T_{o\_iron} := x_0 \cdot \text{K} = 94.6 \cdot ^\circ\text{C}$$

---

## RESULTS

$d_{igap} = 1.5 \cdot \text{mm}$                       inner gap, between insert and copper

$d_{ogap} = 10 \cdot \text{mm}$                       outer gap, between copper and bentonite

Temperature drop over inner gap:     $T_{i\_Cu} - T_{o\_iron} = -5.9 \cdot \Delta^\circ\text{C}$

Temperature drop over outer gap:     $T_{i\_bentonite} - T_{o\_Cu} = -14.3 \cdot \Delta^\circ\text{C}$

$T_{o\_iron} = 94.6 \cdot ^\circ\text{C}$

$T_{i\_Cu} = 88.7 \cdot ^\circ\text{C}$

$T_{o\_Cu} = 88.7 \cdot ^\circ\text{C}$

$T_{i\_bentonite} = 74.4 \cdot ^\circ\text{C}$

$T_{o\_bentonite} = 52.7 \cdot ^\circ\text{C}$

$T_{amb} = 11.2 \cdot ^\circ\text{C}$



## Jämförelser finita element- och analytisk handboksmodell

För belysa resonemanget i avsnitt 2.1 och för att jämföra och verifiera finita element-modellen beskriven i avsnitt 2.4 mot den analytiska handboksmodellen beskriven i avsnitt 2.5 har fyra fiktiva beräkningsfall konstruerats enligt tabell B2-1. Beräkningsfallen har mått enligt avsnitt 2.4 med inre och yttre spalter vid kopparhöljet på 1,5 respektive 10 mm och nominella materialegenskaper enligt avsnitt 2.2. Fall 1 har tidsberoende resteffekt enligt avsnitt 2.3 medan Fall 2 och 3 har konstant effekt motsvarande 1 705,2 W för en kapsel. Fall 4 har konstanta resteffekter men räknade vid de olika tidpunkterna 0, 7, 17 och 27 år efter deponering i slutförvaret, det vill säga 33, 40, 50 och 60 år efter drift. Initialtemperaturerna för de två transienta fallen, Fall 1 och 2, är enligt avsnitt 2.4.

**Tabell B2-1. Beräkningsfall för jämförelse och verifiering.**

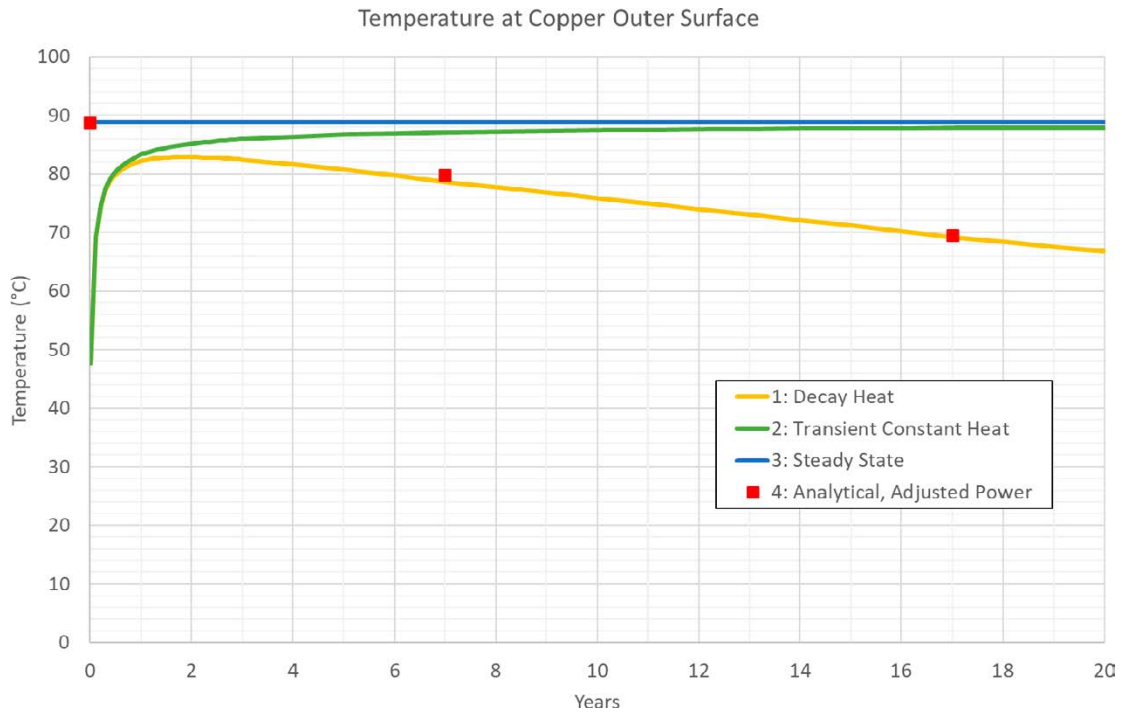
Nr	Beräkningmodell	Stationär/transient	Resteffekt konstant/tidsberoende
1	Finita element-modellen	transient	tidsberoende
2	Finita element-modellen	transient	konstant
3	Finita element-modellen	stationär	konstant
4	Analytiska handboksmodellen	stationär	konstant, men justerad per tidpunkt

Temperaturen på kapselytan som funktion av tiden för de fyra beräkningsfallen visas i figur B2-1 och figur B2-2.

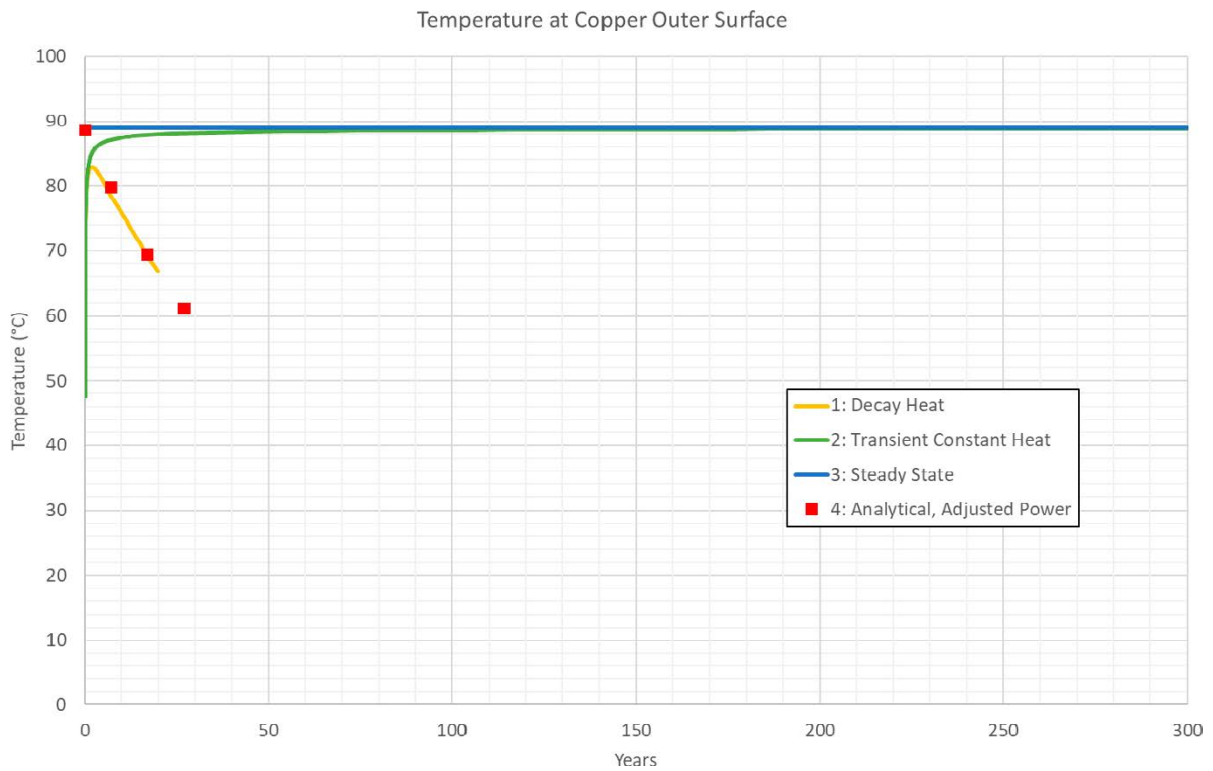
Överensstämmelsen mellan den stationära finita element-beräkningen, Fall 3, och den analytiska handboksmodellen, Fall 4, vid tiden 0 år är god. Relationen mellan den transienta och stationära finita element-beräkningen med konstant effekt, Fall 2 och 3, åskådliggör att uppskattningen i avsnitt 2.1 att kapselytans temperatur närmar sig det stationära värdet minus en grad efter storleksordningen 40 år stämmer ganska bra. Intressantare är att temperaturen på kapselytan beräknad med den analytiska handboksmodellen, Fall 4, relativt snabbt, redan efter kanske 5 år efter deponering, skiljer sig från värdet beräknat med den transienta finita element-modellen, Fall 1, med maximalt en grad (punkterna för 7 och 17 år i figur B2-1 och figur B2-2).

I figur B2-3 visas temperaturdifferenserna över de inre och yttre spalterna vid kopparhöljet. Figuren kan ses bekräfta resonemanget i avsnitt 2.1 om temperaturskillnader mellan närbelägna punkter. Skillnaden mellan temperaturdifferensen beräknad med den transienta finita element-modellen, Fall 1, och den analytiska handboksmodellen, Fall 4, är närmast obefintlig i stort sett direkt efter deponering.

Sammantaget visar resultaten från de jämförande beräkningsfallen att lokala temperaturskillnader, men också absoluta temperaturer vid kapseln ett antal år efter deponering, med acceptabel noggrannhet bör kunna beräknas med förenklade kvasi-stationära modeller för en ensam kapsel.

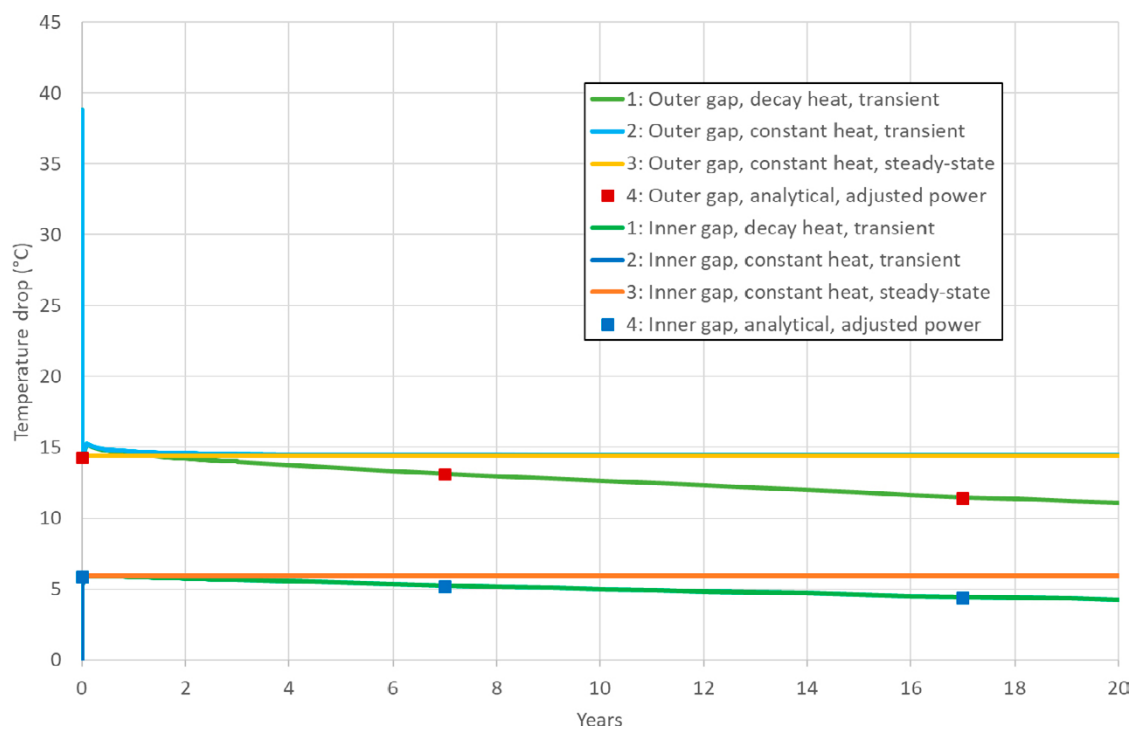


**Figur B2-1.** Temperaturen på kapselytan som funktion av tiden för de fyra beräkningsfallen definierade i tabell B2-1, 0 till 20 år efter deponering.



**Figur B2-2.** Temperaturen på kapselytan som funktion av tiden för de fyra beräkningsfallen definierade i tabell B2-1, 0 till 300 år efter deponering.





**Figur B2-3.** Temperaturdifferenser över de inre och yttre spalterna vid kopparhöljet för de fyra beräkningsfallen definierade i tabell B2-1, 0 till 20 år efter deponering. Kurvorna för Fall 2 och 3 sammanfaller mer eller mindre.



## Resonemang kring beräkningsmodellernas mått

Finita element-modellen (avsnitt 2.4) och den analytiska hanboksmodellen (avsnitt 2.5, bilaga 1) har en övergång mellan cylindrisk och sfärisk geometri vid en radie på 3 600 mm som valts efter passningsräkning enligt avsnitt 2.4. Med denna radie reproduceras Ikonens (2020, avsnitt 6.1) stationära och transienta temperatur på och strax utanför kapselytan (figur 2-5, figur 2-4). Dock ger den ett något för högt värmefflöde i det sfäriska fjärrfältet (motsvarande 1 995 W total kapsleffekt, inte 1 705,2 W, figur B3-1).

En naturligare övergångsradie bör vara att välja den radie där värmefflödet är lika stort för den cylindriska och sfäriska geometrin, i detta fall 3 078 mm, vilket ger motsvarande 1 705,2 W total kapsleffekt och ett korrekt värmefflöde i det sfäriska fjärrfältet. Notera att ingen passningsräkning mot Ikonens (2020, avsnitt 6.1) modell då krävs, utan att den enda parameter som ansatts förutom mått och rena materialdata är  $\Phi$ , det vill säga relationen mellan värmefflödet i kapselns mittplan och dess medelvärde över kapselytan.

### Heat rate

$$q := \frac{Q}{L} \cdot \frac{\varphi_{\text{cyl}}}{2 \cdot \pi} \cdot t_{\text{cyl}} = 7.695 \cdot \text{mW} \quad \text{heat rate through cylindrical/spherical pieces}$$

$$\frac{q}{r_{\text{o\_Cu}} \cdot \varphi_{\text{cyl}} \cdot t_{\text{cyl}}} = 83.984 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{heat flux over canister surface through cyl piece at mid}$$

$$q_{\text{fl.c\_to\_s}} := \frac{q}{r_{\text{c\_to\_s}} \cdot \varphi_{\text{cyl}} \cdot t_{\text{cyl}}} = 12.2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{heat flux over transition area}$$

$$\text{which for the spherical part equals a fictitious } Q_{\text{sph}} := q_{\text{fl.c\_to\_s}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_{\text{c\_to\_s}}^2 = 1995 \text{ W}$$

*Figur B3-1. Övergångsradien 3 600 mm ger något för hög effekt i det sfäriska fjärrfältet.*

### Heat rate

$$q := \frac{Q}{L} \cdot \frac{\varphi_{\text{cyl}}}{2 \cdot \pi} \cdot t_{\text{cyl}} = 7.695 \cdot \text{mW} \quad \text{heat rate through cylindrical/spherical pieces}$$

$$\frac{q}{r_{\text{o\_Cu}} \cdot \varphi_{\text{cyl}} \cdot t_{\text{cyl}}} = 83.984 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{heat flux over canister surface through cyl piece at mid}$$

$$q_{\text{fl.c\_to\_s}} := \frac{q}{r_{\text{c\_to\_s}} \cdot \varphi_{\text{cyl}} \cdot t_{\text{cyl}}} = 14.3 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{heat flux over transition area}$$

$$\text{which for the spherical part equals a fictitious } Q_{\text{sph}} := q_{\text{fl.c\_to\_s}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_{\text{c\_to\_s}}^2 = 1705.2 \text{ W}$$

*Figur B3-2. Övergångsradien 3 078 mm ger korrekt effekt i det sfäriska fjärrfältet.*

Värdet på övergångsradien spelar liten roll för temperaturdifferenser nära kapseln, t ex över bentoniten och i spalterna, eftersom värmeflödet i den cylindriska delen är detsamma. Däremot ger övergångsradien 3 078 mm något lägre absoluta temperaturer än övergångsradien 3 600 mm eftersom värmemotståndet i den sfäriska delen blir något lägre (figur B3-3 och figur B3-4).

I avsnitt 2.1 resoneras kring Fouriers tal och det termiska motståndets gränsvärde på stora avstånd från origo. Finita element-modellen har sin yttre rand på radien 230 m vilket enligt resonemanget där bör vara tillräckligt för transienta beräkningar av temperaturen nära kapseln. I stationära beräkningar däremot visar den analytiska handboksmodellen att gränsvärdet inte riktigt är nått; en yttre rand på storleksordningen 10 000 m krävs för att temperaturen nära kapseln ska fixeras på en tiondels grad när (figur B3-5).

## RESULTS

$d_{i\_gap} \equiv 1.5\text{-mm}$	inner gap, between insert and copper
$d_{o\_gap} \equiv 10\text{-mm}$	outer gap, between copper and bentonite
Temperature drop over inner gap:	$T_{i\_Cu} - T_{o\_iron} = -5.9 \cdot \Delta^{\circ}\text{C}$
Temperature drop over outer gap:	$T_{i\_bentonite} - T_{o\_Cu} = -14.3 \cdot \Delta^{\circ}\text{C}$
$T_{o\_iron} = 94.6^{\circ}\text{C}$	$r_{amb} = 230\text{ m}$
$T_{i\_Cu} = 88.7^{\circ}\text{C}$	$r_{c\_to\_s} = 3600\text{ mm}$
$T_{o\_Cu} = 88.7^{\circ}\text{C}$	$Q = 1705.2\text{ W}$
$T_{i\_bentonite} = 74.4^{\circ}\text{C}$	$Q_{sph} = 1995\text{ W}$
$T_{o\_bentonite} = 52.7^{\circ}\text{C}$	
$T_{amb} = 11.2^{\circ}\text{C}$	

*Figur B3-3. Resultat med övergångsradien 3 600 mm.*

## RESULTS

$d_{i\_gap} \equiv 1.5\text{-mm}$	inner gap, between insert and copper
$d_{o\_gap} \equiv 10\text{-mm}$	outer gap, between copper and bentonite
Temperature drop over inner gap:	$T_{i\_Cu} - T_{o\_iron} = -5.9 \cdot \Delta^{\circ}\text{C}$
Temperature drop over outer gap:	$T_{i\_bentonite} - T_{o\_Cu} = -14.5 \cdot \Delta^{\circ}\text{C}$
$T_{o\_iron} = 92.1^{\circ}\text{C}$	$r_{amb} = 230\text{ m}$
$T_{i\_Cu} = 86.2^{\circ}\text{C}$	$r_{c\_to\_s} = 3078\text{ mm}$
$T_{o\_Cu} = 86.2^{\circ}\text{C}$	$Q = 1705.2\text{ W}$
$T_{i\_bentonite} = 71.7^{\circ}\text{C}$	$Q_{sph} = 1705.2\text{ W}$
$T_{o\_bentonite} = 50^{\circ}\text{C}$	
$T_{amb} = 11.2^{\circ}\text{C}$	

*Figur B3-4. Resultat med övergångsradien 3 078 mm.*

## RESULTS

$d_{i\text{gap}} \equiv 1.5\text{-mm}$	inner gap, between insert and copper
$d_{o\text{gap}} \equiv 10\text{-mm}$	outer gap, between copper and bentonite
Temperature drop over inner gap:	$T_{i\_Cu} - T_{o\_iron} = -5.9 \cdot \Delta^\circ\text{C}$
Temperature drop over outer gap:	$T_{i\_bentonite} - T_{o\_Cu} = -14.3 \cdot \Delta^\circ\text{C}$
$T_{o\_iron} = 94.9 \cdot ^\circ\text{C}$	$r_{\text{amb}} = 10000\text{ m}$
$T_{i\_Cu} = 89 \cdot ^\circ\text{C}$	$r_{\text{c\_to\_s}} = 3600\text{ mm}$
$T_{o\_Cu} = 89 \cdot ^\circ\text{C}$	$Q = 1705.2\text{ W}$
$T_{i\_bentonite} = 74.6 \cdot ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{sph}} = 1995\text{ W}$
$T_{o\_bentonite} = 52.9 \cdot ^\circ\text{C}$	
$T_{\text{amb}} = 11.2 \cdot ^\circ\text{C}$	

**Figur B3-5.** Resultat med övergångsradien 3 600 mm och yttre randen på 10 000 m att jämföra med figur B3-3 där yttre randen ligger på 230 m.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

**skb.se**