

KONVERTERING AV BERGSILO TILL VÄRMELAGER

Converting of rock caverns from coal storage to hot water storage

Mehdi Bagheri, ÅF Infrastructure AB

Kjell Windelhed, ÅF Infrastructure AB

Sammanfattaning

I denna artikel redovisas en undersökning av konvertering av bergsilo till värmelager som har utförts m.h.a. känslighetsanalys genom numerisk modellering för tre olika fall. Resultaten visar att konvertering är genomförbart från bergteknisk synvinkel. Den största deformationen sker som hävning p.g.a. värmeexpansion. Deformationen varierar från 2,6 cm till 7 cm för olika fall. Fall 1 med hög konduktivitet och hög utvidgningskoefficient resulterar i högsta deformationen. Konduktivitet har mindre påverkan på deformation än utvidgningskoefficient. Vidare undersökning med laboratorieförsök för att bestämma utvidgningskoefficient kan vara värdefull. För att bibehålla storskalig stabilitet begränsa de vertikala deformationer som uppstår p.g.a. värmeexpansion. Åtgärderna kan vara bultning (aktiv), avlastning av berget (passiv) eller en kombination av dessa.

Abstract

In this article, a study of the conversion of rock silo to a heat storage has been performed with help of sensitivity analysis by numerical modeling. The results show that the conversion is possible from rock engineering point of view. The greatest deformation occurs due to thermal expansion. The deformation varies from 2.6 cm to 7 cm for various cases. Case 1 with high conductivity and high coefficient of expansion resulting in maximum deformation. Conductivity has less impact on the deformation than the coefficient of thermal expansion. Further investigation with laboratory tests to determine the coefficient of thermal expansion can be valuable. The measures shall be designed to maintain the large-scale stability. The actions may be bolting (active), unloading of the rock (passive) or a combination to limit the vertical deformation due thermal expansion.

1 Inledning

Två befintliga bergsilos planeras att konverters till varmvattenlager. Syftet med konverteringen är att lagra varmt vatten med temperaturer upp mot 97° C i dessa anläggningar.

I denna artikel utreda bergtekniska och termiska konsekvenserna för att kunna utvärdera anläggningens storskaliga stabilitet och påverkan på arbetsmiljön i omgivande berganläggningar.

1.1 Avgränsningar för beräkningarna

Med hänsyn till utredningens karaktär är ingångsparametrarna baserade på erfarenhetsvärden från facklitteraturen samt ett antal teoretiska överväganden. Vid de numeriska beräkningarna har det antagits en homogen och isotrop bergmassa. De termiska parametrarna är satta med tanke på utläckande vatten i bergets diskontinuiteter. Vid numeriska beräkningar har beräkningsprogrammet FLAC 7.0 -2D (Itasca, 2015) använts.

2 Metodik

Syftet med de numeriska beräkningarna är att få en övergripande bild av de termiska konsekvenserna och dess inverkan på anläggningens storskaliga stabilitet.

3 Förutsättningar

I detta avsnitt beskrivs geometriska, geologiska och bergtekniska förutsättningar samt parametrar som ingår i numeriska beräkningar.

3.1 Geometriska förutsättningar

De tidigare kollager som ska konverteras utgörs av två vertikala bergrum med max diameter på 30 m och ca 70 m i höjd. Bergrummen har formen av en flaska och lagringskapaciteten är ca 50 000 m³ per silo. Geometrin förenklades i föreliggande utredning från flaskform till rak form. I silornas botten modelleras två betongpluggar.

3.2 Geologiska förutsättningar

Det aktuella anläggningsområdet består huvudsakligen av granatådergnejs med inslag av pegmatitisk granit och diabas. Förekomsten av grafit har en stor betydelse vid bedömningar, även om påverkansområdet är lokalt. I arkivmaterialet har en grov bergklassfördelning gjorts som redovisas nedan:

- | | |
|-------------------|------|
| • Bra berg | 25 % |
| • Mindre bra berg | 50 % |
| • Dåligt berg | 25 % |

Med tanke på uppskattningens karaktär tolkas den aktuella bergmassan ha en RMR_{bas} ca 50. Detta bekräftas av ett annat dokument som gör en renodlad RMR-prognos.

Utförda vattenförlustmätningar visar att zoner med relativt hög vattenförlust förekommer. Vid byggandet av bergrummen hade man problem med vattenläckage endast vid passage av förkastningszonen. Bedömning av bergets genomsläpplighet är osäker.

3.3 Bergtekniska förutsättningar och egenskaper

Baserat på RMR-värdet bedömdes mekaniska egenskaper enligt Tabell 1. Elasticitetsmodulen hos gnejs ökar med temperaturen under 120 °C, (Raymond och Wai, 1982). Föreliggande utredning tar inte hänsyn till påverkan av värme på E-modul och det är på den säkra sidan.

Termiska egenskaper bestäms från litteratur för liknande bergarter ur olika källor enligt Tabell 2.

Tabell 1 Mekaniska egenskaper för berg

E (GPa)	15
Y	0,25

3.4 Termiska parametrar

Termiska parametrar, värmekonduktivitet, utvidgningskoefficient och specifik värmekapacitet har valts för vått berg baserat på litteraturuppgifter.

3.4.1 Värmekonduktivitet

Enligt Fouriers lag är värmeflödet J (mängden värmeenergi som passerar på en tidsenhet) genom en stav eller en plåt proportionellt mot tvärsnittsarea S och mot temperaturskillnaden mellan den kalla och den varma sidan ΔT och omvänt proportionellt mot stavens längd (eller plåtens tjocklek) Δx :

$$J = k \frac{S \times \Delta T}{\Delta x} \quad \text{Ek. 1}$$

I denna formel är k värmekonduktivitet. Den mäts i SI-enheten $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (watt per meter och Kelvin).

Torr gnejs har en värmekonduktivitet mellan 2,7 och 3,1 (Sharma, 2002). Detta stämmer väl med Andolfsson, 2013 som utfört laborieförsök för skandinaviskt berg.

Värmekonduktiviteten hos vått berg är högre än det hos torrt berg (E Sipio m.fl. 2013). Det högsta rapporterade värde är 3,9 (Sipio m. fl. 2013)

3.4.2 Specifik värmekapacitet

Specifik värmekapacitet är en fysikalisk storhet som anger ett ämnes förmåga att magasinera termisk energi, det vill säga ett ämnes termiska tröghet. I SI anges den i Joule per kilogram för att uppnå en temperaturdifferens av en grad Kelvin [K] med enheten $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$. Gnejs har specifik värmekapacitet ca 1000 (J/kg.K) enligt ETB, 2011.

3.4.3 Utvidgningskoefficient

Utvidgningskoefficienten anger hur mycket ett föremåls storlek ändras för en viss temperaturändring hos föremålet. Gnejs har utvidgningskoefficienten av $8 \cdot 10^{-6}$ (1/K)

(Kjoholt, 1992) men det beror på vilka mineral gnejsen innehåller. Min-värde av $3,8 \times 10^{-6}$ rapporterades för gnejs (Jumikis, 1983).

3.4.4 Valda termiska egenskaper

Vatten har inte modellerats direkt men bergets termiska egenskaper har valts för att representera vårt förhållande.

Tabell 2 Termiska egenskaper för berg och betong

<i>Parameter</i>	<i>Berg</i>	<i>Betong</i>
<i>Termisk konduktivitet (W/mK)</i>	<i>4 och 2,7</i>	<i>2,92</i>
<i>Specifik värmekapacitet (J/kgK)</i>	<i>1000</i>	<i>750</i>
<i>Utvidgningskoefficient (1/K)</i>	<i>9×10^{-6} och 4×10^{-6}</i>	<i>14×10^{-6}</i>

3.5 Initiala spänningar

En av de viktigaste parametrarna i dimensionering av bergrum och stabilitetsberäkningar är det primära spänningstillståndet. Initiala spänningar är en benämning på spänningarna som finns i bergmassan. Detta påverkar spänningsfördelningen runt bergrummet och deformationer. Initiala spänningar har tagits från projektet Förbifart Stockholm som ligger geografisk relativt nära.

4 Numeriska beräkningar

Känslighetsanalys har utförts med avseende på variation i bergets termiska egenskaper, värmekonduktivitet, specifik värmekapacitet och utvidgningskoefficient enligt Tabell 3.

Tabell 3 Olika analyserade fall

Fall	Värme-konduktivitet (W/mK)	Specifik värmekapacitet (J/kgK)	Utvidgningskoefficient (1/K)
1	4	1000	9×10^{-6}
2	2,7	1000	9×10^{-6}
3	2,7	1000	4×10^{-6}

Numeriska beräkningarna har utförts i följande steg:

1. Jämvikt av initiala spänningsfältet
2. Utschaktning av bergum och körning av modellen till jämvikt (nuläget)
3. Nollsättning av deformationer i modellen
4. Fyll bergrummet med 97°C ($370,15\text{ K}$) varmt vatten
5. Kör bara termiska beräkningar för en viss tidsperiod t.ex. en vecka
6. Byte till mekanisk analys och släckning av termisk analys. Körning av modellen tills man uppnår mekanisk jämvikt
7. Upprepning av steg 5 och 6 för en annan tidsperiod t.ex. 5 år.

4.1 Randvillkor

Modellen har en storlek på 500 m (X-led) \times 240 m (Y-led) för termo-mekanisk analys.

Randvillkor definieras för termiska samt mekaniska beräkningar. Beräkningarna har utförts för ett tätt nät med storlek $1\text{ m} \times 1\text{ m}$.

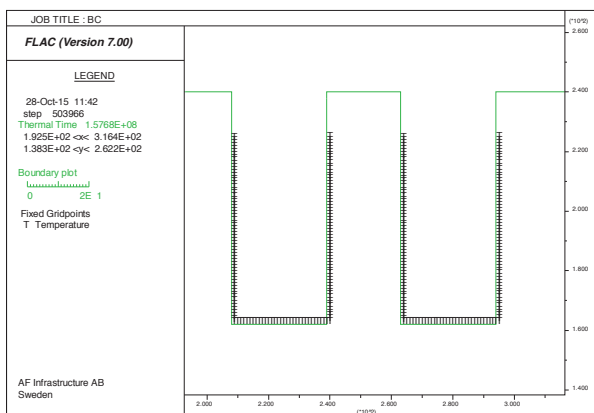
4.1.1 Mekaniskt randvillkor

Undre randen förhindras att röra sig i både X- och Y-led medan sidoränderna förhindras i X-led. Övre randen, bergytan, simulerades som en fri yta.

4.1.2 Termiska randvillkor

Initial bergtemperatur har satts till $280,15\text{ K}$ (7°C). Sidoränder samt nedre randen sätts till 7 grader (årsmedeltemperatur). Övre randen har ett konvektivt förhållande med värmeöverföringskoefficient på 10 W/m^2 , fri konvektiv värmeöverförings-koefficient för luft. Detta användes för liknande beräkning för Lyckebo i Uppsala (Park m. fl., 2013).

Silornas interna ränder sätts till vattnets temperatur, $370,15\text{ K}$ (97°C) från ca 15 m under bergytan. Temperatur för silornas botten har satts till $370,15\text{ K}$ (97°C) Figur 1. I verklig drift kommer kallare vatten samlas (ca. 40°C) i botten och varmt vatten i toppen. Därför är analysen konservativ med tanke på alla interna ränder med 97°C .



Figur 1 Termiskt internt randvillkor

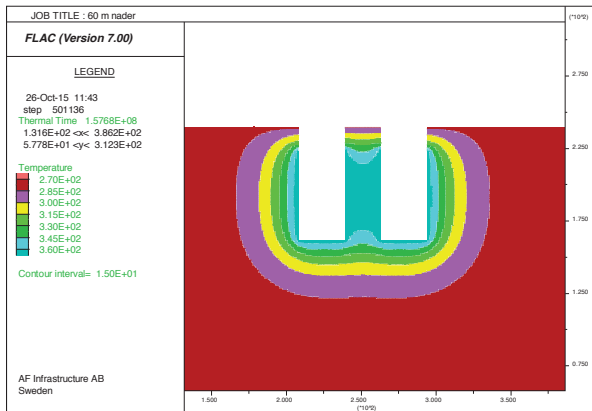
5 Utvärdering av beräkningsresultat

I föreliggande kapitel redovisas resultaten av Fall 1, som är för värsta fall med hög konduktivitet och hög utvidgningskoefficient för en tidperiod av 5 år.

Figur 2 visar värmespridning under 5 år. Thermal time i denna bild är 5 år (i enheten sekund). Observera att temperatur är i Kelvin. Området i pelaren får värme från båda silos, varför den blir varmest. De flesta delarna av pelaren har en temperatur mellan 97 och 87 °C (mer än 360 K). Temperaturutbredning sammanfattas efter 5 år i Tabell 4.

Tabell 4 Temperaturutbredning efter 5 år

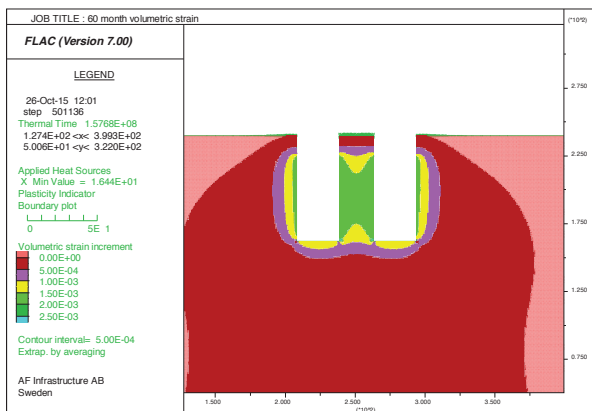
Avstånd från silos vägg (m)	Temperatur (°C)
0 -7,3	97-72
7,3 -17,8	72-42
17,8 -25,5	42-27
25,5 -40,7	27-15



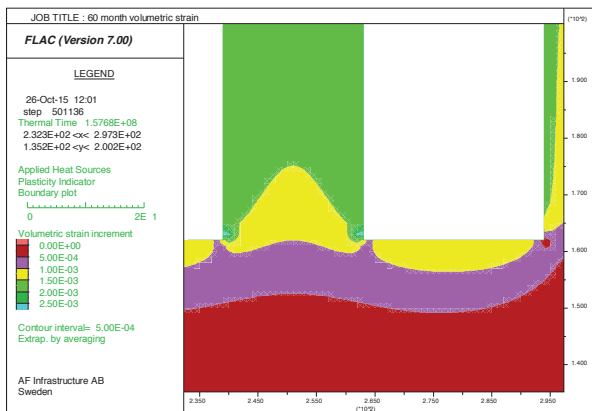
Figur 2 Värmspridning under 5 års tidsperiod i Kelvin enhet

5.1 Volymutvidgning och deformation

Volymökning av berget sker p.g.a. temperaturhöjningen och detta visas i Figur 3 i volymtöjning. Volymtöjning för betong är högre än den för berget. Figur 4 visar en detalj av nedre delen av silona där betongpluggar finns. Volymtöjning är beroende på volymutvidgningskoefficient som är tre gånger högre än utvidgningskoefficienten.

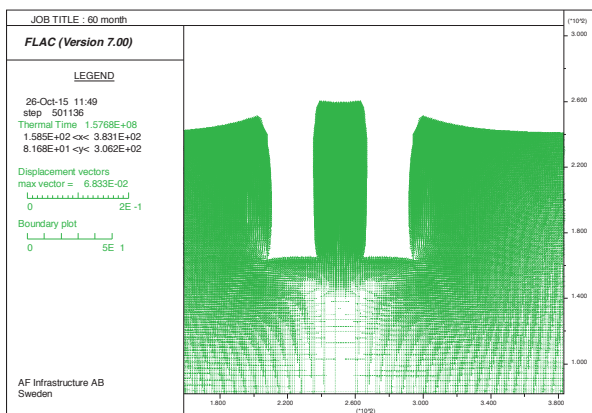


Figur 3 Volymtöjning efter 5 år

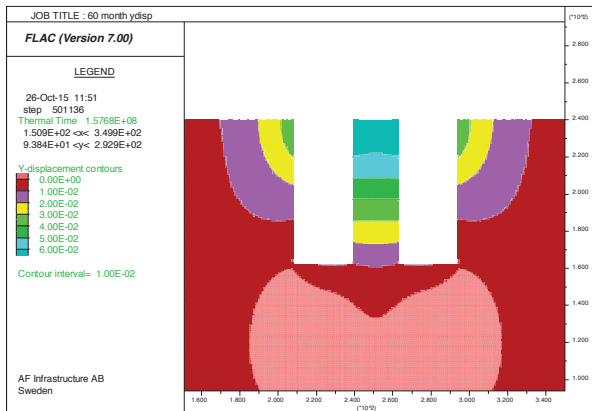


Figur 4 Volymtöjning för betong i silos nedre del

Figur 5 visar deformationen i berg, ca 7 cm, efter 5 år. Det mesta av deformationerna sker i Y-led, hävning, Figur 6.



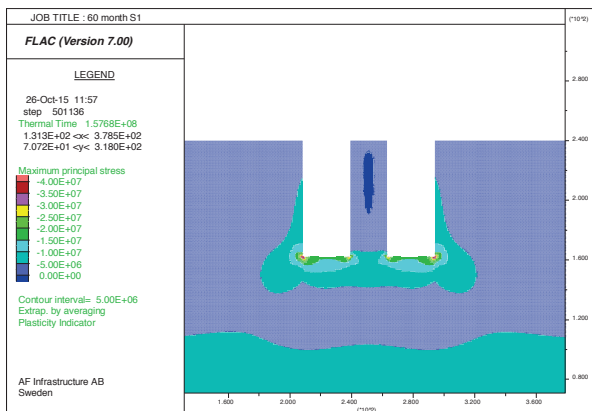
Figur 5 Total deformation (m) efter 5 års termisk belastning



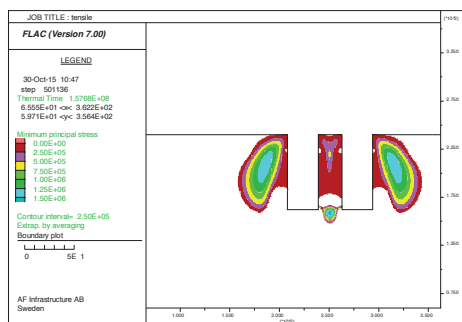
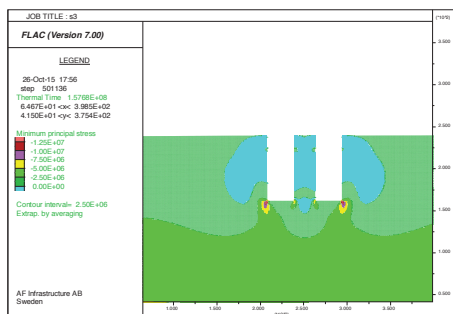
Figur 6 Y-deformation (m) efter 5 års termisk belastning

5.2 Spänning

Termisk belastning resulterar i spänning i berget som visas i Figur 7. Tryckspänning visas med negativt värde och dragspänning visas med positivt värde. I nedre delen av pelaren mellan silorna uppträder en dragspänning på ca 1,5 MPa p.g.a. utvidgning, Figur 8. Detta kan kompenseras med förstärkningselement i form av bult och sprutbetong. Betongpluggen får tryckspänning ca 20-25 MPa vilket är nära dess tryckhållfasthet.



Figur 7. Maximal huvudspänning (Pa) orsakad av termisk belastning



Figur 8. Dragspänning (Pa) p.g.a. bergets utvidgning a) Huvudspänningar b) Dragspänningar

6 Sammanställning av numeriska modeller

Tabell 5 sammanställer deformationer från de olika analyserade fallen. Deformationen varierar från 2,6 cm till 7 cm för olika fall. Fall 1 med hög konduktivitet och hög utvidgningskoefficient resulterar i högsta deformationen. Konduktivitet har mindre påverkan på deformation än utvidgningskoefficient. Vidare undersökning med laboratorieförsök för att bestämma utvidgningskoefficient kan vara värdefullt. Detta kan resultera i en bättre uppskattning av deformation och bergmekaniska åtgärder.

Tabell 5 Sammanställning av analyser

Fall	Deformation (cm)
1	7
2	6
3	2,6

7 Referenser

Andolfsson T. 2013, Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses by use of thermal conductivity scanner: A study of thermal properties in Scandinavian rock types, Ms.c. thesis, Lund university.

The engineering toolbox, http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html. ETB.

Itasca Consulting Group, Inc. (Itasca), 2015, FLAC User's Manual, Minneapolis, Minnesota.

Jumikis, A.R. 1983. Rock Mechanics, Second Edition. Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany: Trans Tech Publications. 613 p.

Kjorholt, H. 1992. Thermal properties of rock. Helsinki, Finland: Teollisuuden Voima Oy. 15 p. 4 appendices. Site investigation, Work report 92-56.

Park D. Kim H. Ryu D. Choi B. Sunwoo C. Han K. 2013, The effect of aspect ratio on the thermal stratification and heat loss in rock caverns for underground thermal energy storage, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences (64), 201-209

Raymond S. C. Wai, K, 1982 Temperature effects on strength and deformation behavior of rocks in Southern Ontario, Canadian Geotechnical Journal 19(3) 307-319

Sharma PV (2002) Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press, Cambridge

Sipio E., et. Al. 2013, Rock thermal conductivity as key parameter for geothermal numerical models, Energy Procedia 40, 87-94