

KBS **TEKNISK** **RAPPORT**

92

**Termisk utvidgning hos granitoida
bergarter**

Ove Stephansson

Högskolan i Luleå april 1978

**KÄRN -
BRÄNSLE -
SÄKERHET**

POSTADRESS: Kärnbränslesäkerhet, Fack. 102 40 Stockholm. Telefon 08-67 95 40

TERMISK UTVIDGNING HOS GRANITOIDA BERGARTER

Ove Stephansson
Högskolan i Luleå april 1978

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

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

1977-08-22

TERMISK FÖRÄDNING HOS GRANITOIDA BERGARTER

Ove Ståhlsson
Avd för bergmekanik
Högskolan i Luleå
951 87 LULEÅ

ABSTRACT

The thermal expansion of rocks is strongly controlled by the thermal expansion of the minerals. The theoretical thermal expansion of the Stripa Granite is found to be $21 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$ at 25 $^{\circ}\text{C}$ and $38 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$ at 400 $^{\circ}\text{C}$.

The difference in expansion for the rock forming minerals causes micro cracking at heating. The expansion due to micro cracks is found to be of the same order as the mineral expansion. Most of the micro cracks will close at pressures of the order of 10 - 20 MPa.

The thermal expansion of a rock mass including the effect of joints is determined in the pilot heater test in the Stripa Mine.

INNEHALL	Sid
SAMMANFATTNING	
INTRODUKTION	1
TEORI	2
MINERALENS TERMISKA UTVIDGNING	4
EXPERIMENTELL BESTÄMNING AV TERMISKA UT- VIDGNINGEN HOS GRANITOIDA BERGARTER	7
TEORETISK BESTÄMNING AV TERMISKA UTVIDG- NINGEN HOS GRANITOIDA BERGARTER	11
MIKROSPRICKORNAS BETYDELSE FÖR DEN TERMISKA UTVIDGNINGEN	13
EFFEKTERNA AV UPPREPAD VÄRMNING OCH AVKYLNING	16
TRYCKETS INVERKAN PÅ TERMISKA EXPANSIONEN	18
BERGMASSANS TERMISKA UTVIDGNING	20
REFERENSER	21

SAMMANFATTNING

Den termiska utvidgningen hos bergarter är bestämd av de bergartsbildande mineralens termiska expansionsegenskaper. Kvarts har en hög volymutvidgningskoefficient, α_v , jämfört med andra mineral. En hög kvartshalt i bergarten innebär en stor volymexpansion. Experimentell bestämning av termala expansionen hos granitoida bergarter visar en icke-linjär ökning av volymutvidgningskoefficienten, α_v , vid ökad temperatur, från $23 \cdot 10^{-6} [\text{°C}]^{-1}$ vid 25°C till $73 \cdot 10^{-6} [\text{°C}]^{-1}$ vid 400°C . En teoretisk bestämning av utvidgningskoefficienten kan göras om bergartens mineralsammansättning och de ingående mineralens elastiska egenskaper är kända. Jämförelser mellan experimentella och teoretisk bestämda värden på α_v vid rumstemperatur visar en mycket god överensstämmelse. Den teoretiska volymutvidgningskoefficienten för Stripagraniten har bestämts till $21 \cdot 10^{-6} [\text{°C}]^{-1}$ vid 25°C och $38 \cdot 10^{-6} [\text{°C}]^{-1}$ vid 400°C .

Den differentiella utvidgningen hos mineralen i en bergart orsakar mikrosprickbildning vid uppvärmningen. För graniter är volymexpansionen genom mikrosprickor ungefär lika stor som mineralens expansion vid 400°C . Detta förhållande gäller för både isotropa och anisotropa bergarter. Den största termala expansionen hos en anisotrop bergart sammanfaller med riktningen på den minsta linjära sprickporositeten.

En cyklisk värmning och avsvälning av bergarten leder till mikrosprickbildning och en kvarstående töjning, ϵ_0 . Så snart bergarten upphettats till den spricktemperaturen, T_s , så tilldelas den en permanent töjning samtidigt som α_v minskar vid fortsatt uppvärmning. Spricktemperaturen för granit har bestämts till ca 280°C vilket motsvarar en permanent töjning $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^{-4}$.

Tryckets inverkan på sammanpressningen av mikrosprickor har studerats för bergartsprover som utsatts för termisk cykling. Resultaten visar att den största andelen mikrosprickor sluter sig vid trycket 10-20 MPa.

Bergmassans termiska utvidgning diskuteras i rapporten. Sprickorna som finns i bergmassan gör att bergblocken som begränsas av sprickytorna kan röra sig relativt varandra och en ofullständig sprickfyllnad tillåter en expansion av bergblocken vid uppvärmningen. Värmeförsöket i Stripagruvan avser belysa bergmassans termiska utvidgning.

Tillämpning av resultaten på problemet med lagring av kärnbränsleavfall i urberget kan sammanfattas:

- volymexpansionen hos bergarten är starkt beroende av kvartshalten och α_v är icke linjärt temperaturberoende
- den differentiella utvidgningen hos mineralen i en bergart orsakar mikrosprickbildning vid sidan av volymutvidgningen i samband med uppvärmningen
- vid cyklisk värmning och avsvälning fås en kvarstående töjning i bergarten
- mikrosprickbildningen för granit är störst vid temperaturer högre än 280°C
- den största andelen mikrosprickor sluter sig vid trycket 10-20 MPa
- genom att utnyttja de primära bergspänningar vid bergrums- och lagringsutförandet kan mikrosprickbildningen från uppvärmningen förhindras
- värmeförsöket i Stripagruvan har till uppgift att belysa bergmassans termiska utvidgning

INTRODUKTION

Termisk utvidgning hos mineral och bergarter har inte studerats speciellt ingående trots ämnets stora betydelse för en lång rad tekniska och vetenskapliga tillämpningar.

Undersökningsresultaten som publicerats före sextiotalets mitt är många gånger motsägande och föga tillförlitliga. I samband med de amerikanska rymdfärderna och månlandningarna ökade intresset för bergarternas termiska egenskaper. Sedan mer än tio år tillbaka har prof G Simmons och hans medarbetare vid Department of Earth and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA drivit en målmedveten forskning kring bergarternas termiska utvidgning och därvid beaktat effekterna av varierande uppvärmnings- och avsvlningshastighet, upprepade cyklisk uppvärmning, mineralsammansättning, kornstorlek och mikrostrukturer, främst mikrosprickor. De viktigaste av dessa faktorerers inverkan på termiska volymutvidgningen kommer att behandlas i denna rapport. Vidare kommer den teoretiska volymutvidgningen att bestämmas för Stripagraniten med kännedom om bergartens mineralinnehåll. Professor Simmons och hans medarbetare kommer också att i laboratorium bestämma den termiska volymutvidgningen vid olika temperatur (25-200°C) samt utföra differentiell töjningsanalys för karaktärisering av mikrosprickornas egenskaper hos tre prover från Stripagruvan. Dessa resultat beräknas vara oss tillhanda under oktober månad 1977.

Alla de provningsresultat som beskrivs i denna rapport gäller för små bergartsprover. Vår nuvarande kunskap om bergmassans - d v s bergarten med alla dess sprickor och slag - termiska utvidgning är idag obefintlig. Det värmeförsök som nu startar i Stripagruvan syftar bl a till att bestämma bergmassans termiska utvidgning in situ.

Innehållet i denna rapport grundar sig till stora delar på publicerade tidskriftsartiklar och opublicerade manuskript av professor J Simmons och hans medarbetare vid MIT samt upplysningar från professor Simmons i samband med mitt besök vid MIT i augusti 1977.

TEORI

Längdutvidgningskoefficienten α är i allmänhet en andra ordningens symmetrisk tensor med formen

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial T} \quad (1)$$

där ϵ_{ij} är töjningen och T temperaturen. Det krävs sex oberoende kvantiteter för att karaktärisera en fullständig tensor. Denna tensor kan uttryckas med formen

$$\alpha_1 x^2 + \alpha_2 y^2 + \alpha_3 z^2 = 1 \quad (2)$$

där α_1 , α_2 och α_3 är koefficienterna längs huvudaxlarna x , y och z . Längdutvidgningskoefficienten i en godtycklig riktning i ett material är således bestämt av sambandet

$$\alpha = \alpha_1 l^2 + \alpha_2 m^2 + \alpha_3 n^2 \quad (3)$$

där l , m och n är riktningscosinerna med hänsyn till huvudaxlarna.

Volymutvidgningskoefficienten α_v definieras som

$$\alpha_v = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial T} \quad (4)$$

där ϵ_v är den volymetriska töjningen eller dilatansen. Eftersom följande samband gäller för töjningarna

$$\epsilon_v = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} \quad (5)$$

gäller följande invarianta samband

$$\alpha_v = \alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33} \quad (6)$$

Av dessa följer att mätningen av α_{ii} i tre orthogonala riktningar i vilken som helst punkt eller riktning är tillräckligt

för att bestämma materialets volymutvidgningskoefficient, α_v . Volymutvidgningskoefficienten bestäms ofta i laboratoriet som funktion av längdutvidgningen

$$\alpha_v = \frac{3 \Delta l}{\Delta T l_0} \quad (7)$$

där Δl är längdändringen från den ursprungliga längden l_0 vid temperaturändringen ΔT räknat från en bestämd referenstemperatur.

MINERALENS TERMISKA UTVIDGNING

Den termiska utvidningen hos bergarterna är helt kontrollerad av de bergartsbildande mineralens termiska egenskaper. Detta illustreras i Fig 1 som visar volymutvidningen i procent som funktion av temperaturen för några vanligt förekommande mineral. Volymutvidningen har här satts till noll vid rumstemperatur. Vi kan notera att expansionen hos kvarts är mycket större än för andra mineral speciellt i temperaturområdet lägre än 573°C där kvarts genomgår en fasomvandling. För högre temperatur än 573°C är expansionen negativ, d v s mineralet uppvisar kontraktion. Den totala expansionen av kvarts från 20°C till 600°C är 4.6 %, vilket skall jämföras med 1 till 2 % för de flesta andra mineral som ingår i magmatiska bergarter. Volymutvidningskoefficienten α_v för mineral vid temperaturen 25° till 400°C framgår av Fig 2. Detta visar igen kvartsens stora termiska utvidning. Av detta kan vi dra slutsatsen att kvartshalten hos bergarten har stor inverkan på utvidningen och att termospänningarna kommer att bli störst kring kvartskornen vilket också leder till mikrosprickbildningen i bergarten.

Mineral som har kubisk kristallstruktur har en isotrop termisk expansion. Alla andra mineral har anisotropa termiska egenskaper, med olika expansion i de olika kristallografiska axlarnas riktning. För kvarts, som har en hexagonal kristallstruktur, är den termiska expansionen från 20° till 600°C 1.75 % vinkelrätt kristallografiska c-axeln och 1.02 % parallellt med c-axeln, jämför volymexpansionen ovan. För tekniska tillämpningar är det fullt tillräckligt att beakta volymexpansionen.

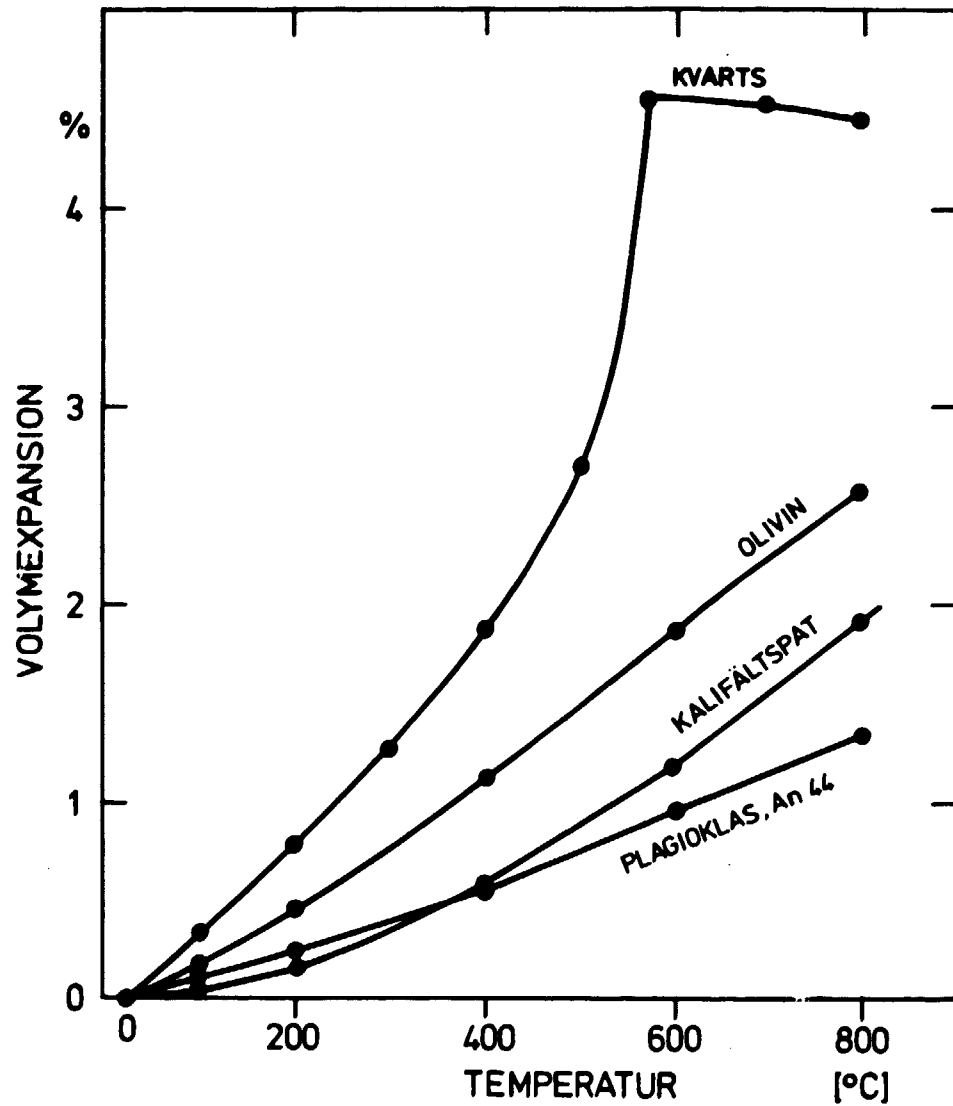


Fig 1 Volymexpansionen som funktion av temperaturen för några vanliga bergsbyggande mineral, data från Skinner, 1960.

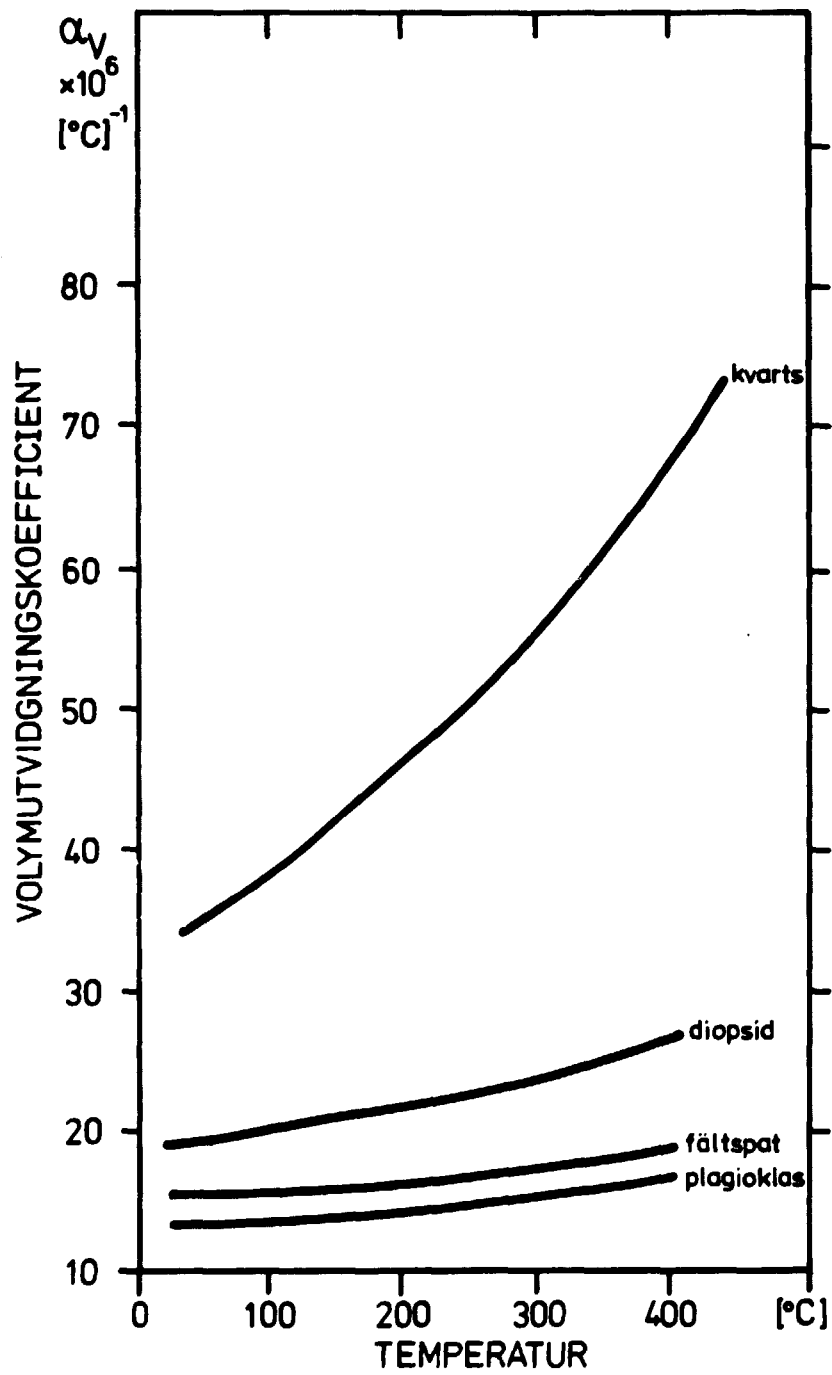


Fig 2 Volymutvidgningskoefficientens temperaturberoende för några vanliga mineral. Data efter Skinner, 1966.

EXPERIMENTELL BESTÄMNING AV TERMISKA UTVIDGNINGEN HOS GRANITOIDA BERGARTER

En rad olika metoder och provstorlekar har använts vid bestämning av termiska utvidgningen hos bergarter. I denna rapport har valts att endast behandla de experimentella undersökningar som utförts av prof Simmons och hans medarbetare vid MIT. Detta garanterar åtminstone att alla mätningar utförts med en och samma provutrustning, en modifierad Brinkman TD-IX differentialdilatometer, Richter och Simmons (1974). Identisk preparering och samma testförfarande (maximal uppvärmning och avsvälning $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$) är viktigt eftersom termiska data är starkt beroende av provets historia.

Uppmätta värden på volymutvidgningskoefficienten, α_v , som funktion av temperaturen, T , från 25° till 400°C vid en uppvärmning för olika magmatiska bergarter från den amerikanska kontinenten visas i Fig 3, Cooper o Simmons (1977). I samma diagram anges också koefficienten för några av de viktigaste mineralen. Den modala sammansättningen hos bergarterna, antal mätpunkter för modalanalysen, kornstorlek, densitet samt referensen till den petrografiska beskrivningen av de amerikanska bergarterna och Stripagraniten framgår av Tabell I.

Värdena för Stripagraniten har ännu icke bestämts i laboratorium. För de fem amerikanska bergarterna som innehåller en hög kvartshalt finner vi att α_v snabbt ökar när temperaturen ökar. Flera av proverna uppvisar värden som är större än kvartsens volymsutvidgning. Denna extra expansion kan tillskrivas mikrosprickbildningen som i sin tur orsakas av en differentiell expansion av de olika mineralkomponenterna på grund av deras olika volymutvidgningskoefficienter.

Trots en betydande olikhet i mineralogisk sammansättning hos de amerikanska proverna finner vi att de uppvisar en obetydlig spridning av α_v som funktion av T , se de fem översta kurvorna i Fig 3. Vi kan således förvänta oss att även Stripagraniten ansluter sig till denna kurvskara.

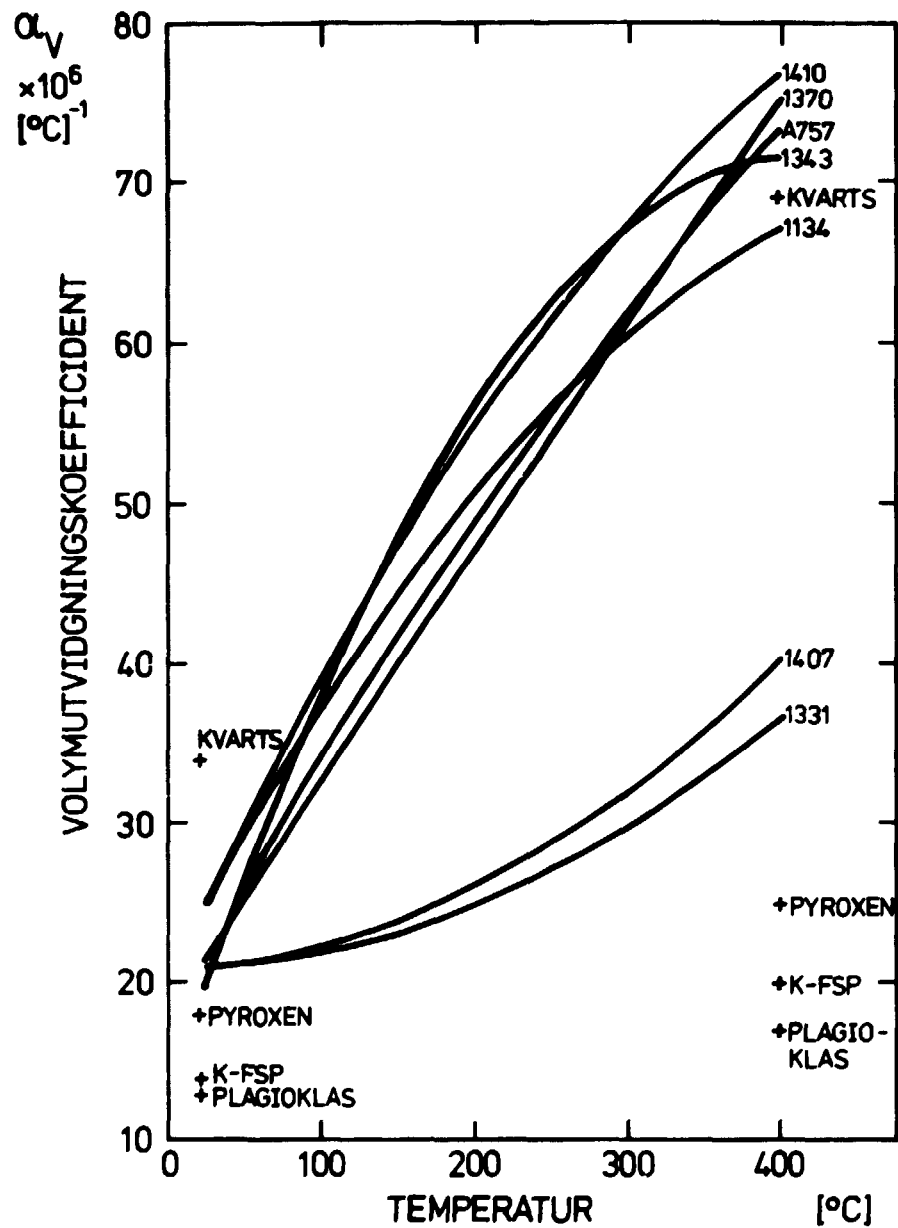


Fig 3 Volymutvidgningskoefficienten, α_v , som funktion av temperaturen, T , för amerikanska bergarter. De översta kurvorna gäller för granitoida bergarter. Efter Cooper & Simmons, 1977.

Tabell I

Data om amerikanska bergarter och Stripagraniten

Namn	Chelmsford granit	Westerly granit	Mellen gabbro	Wausau granit	Red River kvarts- monsonit	Middlebrook felsit	Graniteville granit	Stripa- granit rödlätt typ
Nummer	A757	1134	1331	1343	1370	1407	1410	1
<u>Sammansättning</u>								
kvarts	30.1	22.5		39.1	28.5	6.7	32.8	43.6
kalifältspat	34.8	30.7			25.7		39.3	12.0
plagioklas	28.5	39.2	53.6	10.1	33.7	0.3	26.9	39.2
perthit				49.6				
pyroxen			30.1		0.9			
epidot					0.6	12.1		
muskovit	2.9	0.7			0.1		0.1	2.0
biotit	2.1	5.0		0.2	9.5			
opaka	0.1	0.9	3.1		0.7		0.2	
klorit	0.1	0.4	12.2	0.8	0.3	1.0	0.5	3.2
övriga	1.3	0.6	1.1	0.3		79.9	0.2	
Total	99.9	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Antal mät- punkter	2730	1000	1002	1200	1000	1000	1200	1390
Medelkorn- storlek (mm)	1.5	0.8	0.6	2.2	0.8	< 0.1	0.9	3.0
Densitet	2.65	2.64	3.02	2.63	2.66	2.65	2.60	2.65
Referens för petrografisk beskrivning	Dale (1923)	Fairbanks <i>et al</i> (1951)	Richter o Simmons (1977)	Richter o Simmons (1977)	Richter o Simmons (1977)	Richter o Simmons (1977)	Richter o Simmons (1977)	Olkiewicz (1977)

Den basiska bergarten Mellen gabbro saknar kvarts så dess termala expansion bör vara lägre än de kvartsförande bergarterna. Även här finner vi att bergartens α_v är större än huvudmineralens volytvidgningskoefficient vilken även här antas bero på mikrosprickbildning i samband med uppvärmningen av provet.

TEORETISK BESTÄMNING AV TERMISKA UTVIDGNINGEN HOS GRANITOIDA BERGARTER

Den termiska utvidgningen hos ett aggregat, i vårt fall en bergart, kan bestämmas med hjälp av Turners ekvation som har formen

$$\alpha_v = \frac{\sum \alpha_i E_i V_i}{\sum E_i V_i}$$

där α_v är bergartens volymutvidgningskoefficient och α_i koefficienten för det i :te mineralet. E_i är elasticitetsmodulen och V_i volymsandelen av mineralet i . En tillämpning av Turners ekvation förutsätter a) en isotropisk fördelning av mineralen, b) att mineralens expansion är oberoende av kornens storlek och form, c) att inga störningar i form av sprickor och dylikt finns och slutligen d) att elasticitetsmodulerna hos de ingående mineralen är av samma storleksordning. De teoretiskt bestämda volymutvidgningskoefficienterna vid 25^o och 400^oC för de amerikanska bergarterna, Cooper & Simmons (1977), samt Stripagraniten framgår av Tabell II. Resultaten visar en mycket god överensstämmelse mellan teoretisk beräkning och experimentellt uppmätt expansion vid 25^oC. Motsvarande jämförelse vid 400^oC visar en avvikelse med en faktor 2, vilket igen kan tillskrivas mikrosprickbildningen. Tillväxten av mikrosprickor per temperaturintervall ökar när temperaturen ökar, vilket är i överensstämmelse med förhållandet att skillnaden mellan experimentellt och beräknat α_v ökar när temperaturen ökar. Detta gäller dock bara för en första, långsam uppvärmning. Vid cyklisk värmning och avkylning har α_v ett annat förlopp.

Prov	Nummer	$\alpha_v(25^{\circ}\text{C}) \times 10^{-6}$			$\alpha_v(400^{\circ}\text{C}) \times 10^{-6}$		
		Referens, se ovan		Egna beräkn	Referens, se ovan		Egna beräkn
		Experimentellt	Teori		Experimentellt	Teori	
Stripagranit rödlätt typ	-	-	26.6	23.4	-	44.2	41.9
Chelmsford granit	A757	21.5	25.3	21.2	73.3	37.5	36.3
Westerly granit	1134	24.8	22.6	19.6	67.0	32.9	32.1
Wausau granit	1343	19.9	27.2	23.4	71.5	41.0	41.8
Granitville granit	1410	25.1	25.5	21.5	76.8	38.1	37.4
Red River kvartsmonzonit	1370	21.2	25.0	21.0	75.0	37.0	35.5

Jämförelse mellan uppmätta och beräknade termiska
volymutvidningskoefficienter, efter Cooper & Simmons, 1977

Tabell II

MIKROSPRICKORNAS BETYDELSE FÖR DEN TERMISKA UTVIDGNINGEN

Vi har redan konstaterat mikrosprickornas stora betydelse för den termiska utvidgningen. Här måste vi skilja mellan de sprickor som finns primärt i bergarten och vilka som kan ha ett rent tektoniskt ursprung samt de mikrosprickor som bildas genom den differentiella expansionen hos de ingående mineralkomponenterna. En bergart som har en anisotropi, exempelvis i form av en skiffrighet har en större frekvens av mikrosprickor vinkelrätt mot skiffrighetsplanet. Denna bergart får därmed också olika temperaturutvidgningskoefficienter i olika riktningar. Anisotropi vid termal utvidgning har uppmätts för Chelmsford och Westerly graniterna av Cooper o Simmon (1977). Vid 25⁰C registrerades förhållandet 0.6 mellan minsta och största volymutvidgningskoefficienten, Fig 4. Genom att bestämma den linjära sprickporositeten med differentiell töjningsanalys (DSA) har man också kunnat visa att riktningen för den största termala expansionen sammanfaller i stort med riktningen på den minsta linjära sprickporositeten vid rumstemperatur. Om temperaturen ökar kommer α_v att påverkas av de nya mikrosprickor som bildas men dessa behöver inte alltid ha samma orientering som de ursprungliga sprickorna. Effekten blir dock att den ursprungliga anisotropin hos α_v kvarstår under uppvärmningen. Den termiska volymutvidgningskoefficientens ändring vid ökad temperatur och den därmed sammanhängande mikrosprickbildningen för fallet med en isotrop respektive anisotrop bergart illustreras i Fig 5.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att α_v beror av volymutvidgningskoefficienten hos de enskilda mineralen i bergarten samt mikrosprickbildning, och att mikrosprickbildningen beror på den differentiella expansionen hos de ingående mineralen. Detta förhållande gäller både isotropa och anisotropa bergarter. Den största termala expansionen hos en anisotrop bergart sammanfaller med riktningen på den minsta linjära sprickporositeten.

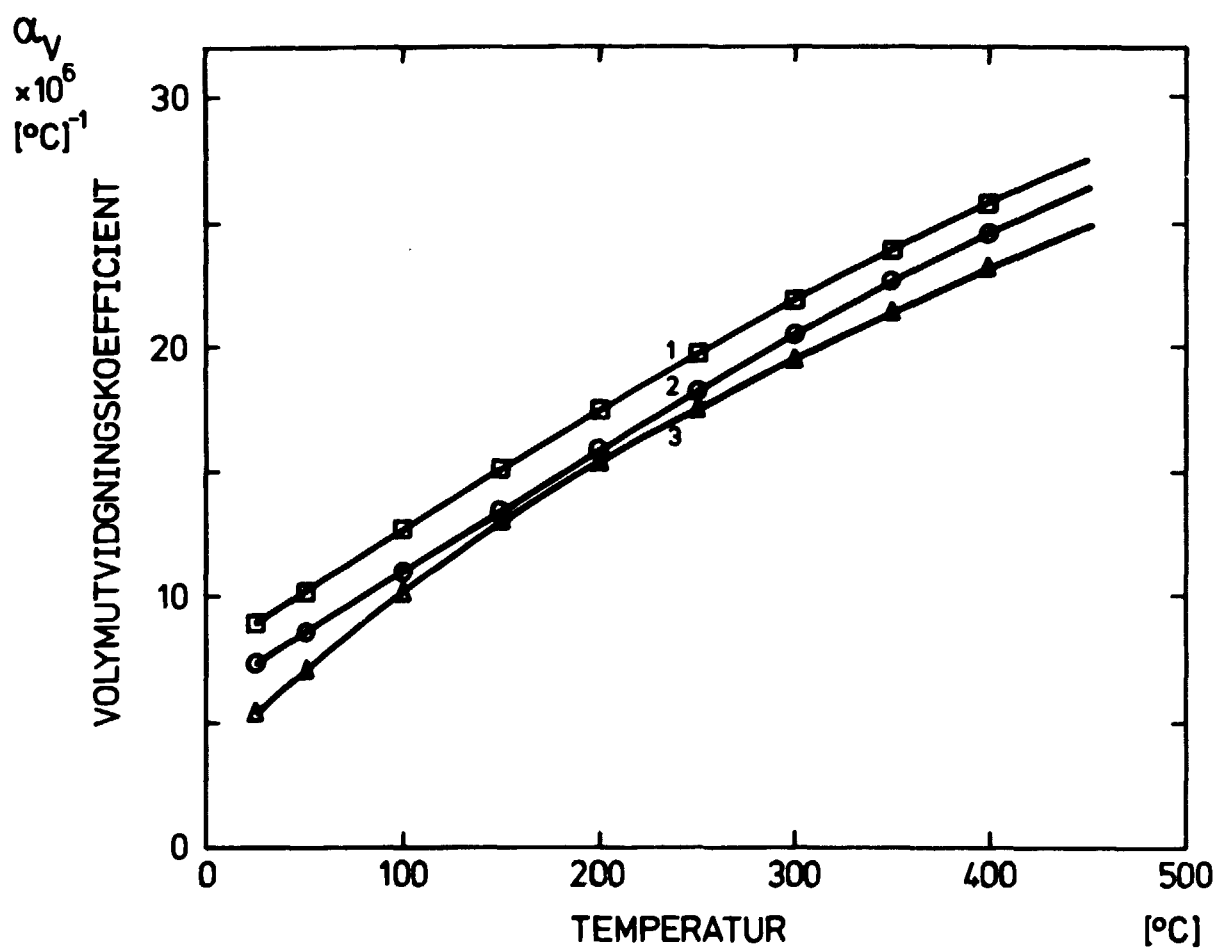


Fig 4 Anisotropins inverkan på volymutvidningen för Chelmsford granit. Mätningen utförd i tre olika orthogonala riktningar. Efter Cooper o Simmons, 1977.

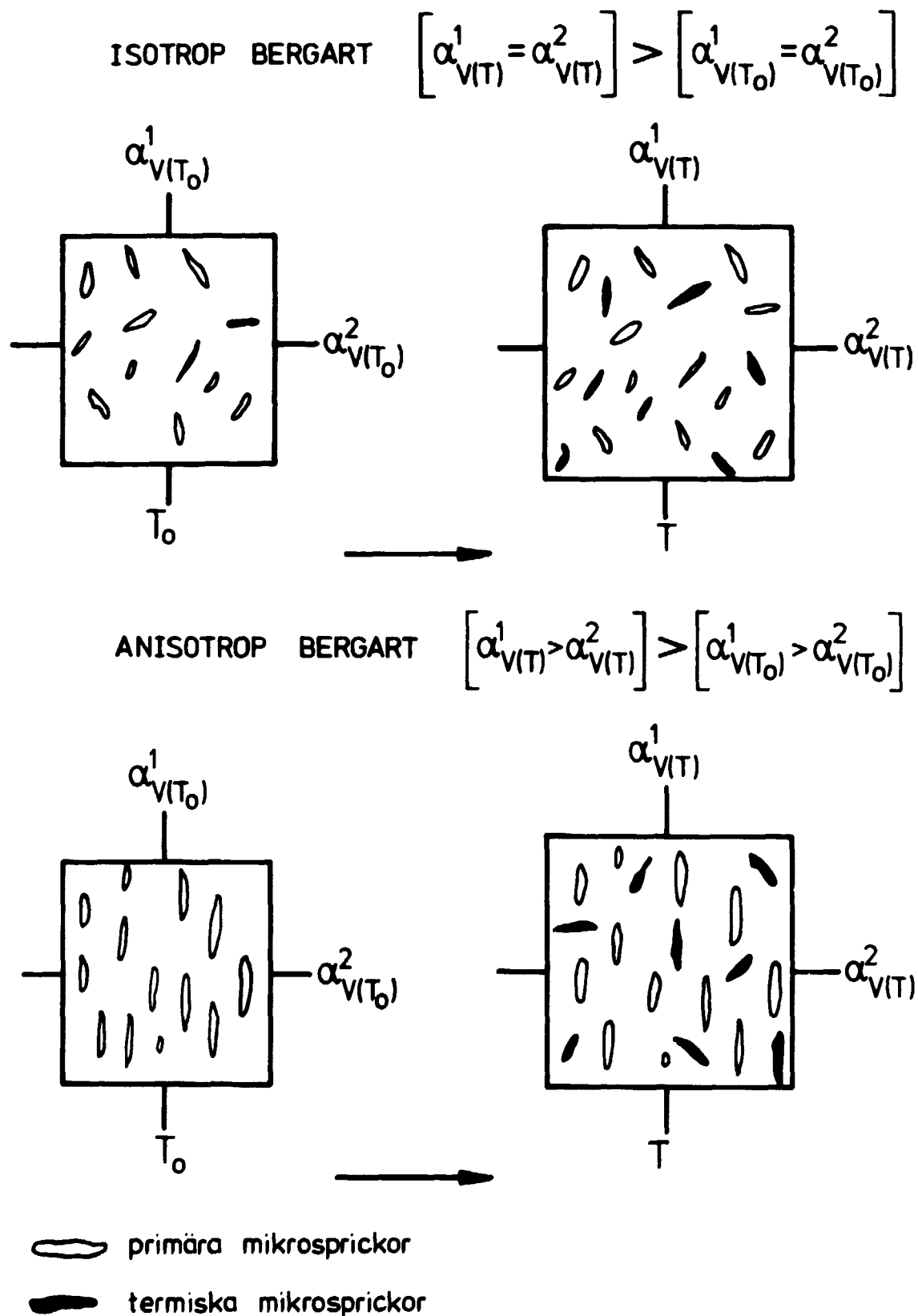


Fig 5 Mikrosprickornas bildning och volymutvidgningskoefficientens variation med ökad temperatur för isotrop och anisotrop bergart

EFFEKTERNA AV UPPREPAD VÄRMNING OCH AVKYLNING

Richter och Simmons (1974) har undersökt effekterna av upprepad värmning (intervallet 220° till 500°C) och avkylning till rumstemperatur för bl a Westerly granite. För varje cykel med uppvärmning till temperaturen, T_{max} , registrerades den kvarstående töjningen, ϵ_0 , i provet. I Tabell III återges de uppmätta värdena på α_v och ϵ_0 för olika temperaturer T_{max} . Vi finner att α_v först ökar tills vi når en temperatur T_s , spricktemperaturen, för att sedan åter minska vid ökad temperatur. Resultaten av den cykliska uppvärmningen måste tolkas så att den termiska utvidgningen hos en bergart är omvänt proportionell mot porositeten från mikrosprickor. Så snart en bergart har upphettats till den punkt (T_s) att den differentiella termiska expansionen hos de bergartsbildande mineralen har introducerat mer än $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ permanent töjning så reduceras den termiska expansionen. För Westerly granit har denna spricktemperatur bestämts till ett värde inom intervallet 260° - 300°C .

Genom att cykliskt värma och kyla bergarten introducerar vi ett antal mikrosprickor som ger upphov till en konstant töjning ϵ_0 . Den uppmätta volymutvidgningskoefficienten för en given temperatur bör därför ge det rena tillskottet i α_v från de ingående mineralen. Väljer vi att studera Westerly granit vid temperaturen $T_{\text{max}} = 400^{\circ}\text{C}$ har α_v bestämts till $33.0 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$ enligt Tabell III. Detta värde skall jämföras med det teoretiskt bestämda värdet $32.9 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$, enligt Tabell II, vilket ger en mycket god överensstämmelse.

Från effekterna av en upprepad värmning och avkylning av en granitisk bergart kan vi dra följande praktiska slutsatser:

- a/ en långsam uppvärmning till en temperatur lägre än T_s (ca 250°C) innebär en ökning av α_v , som nästan helt kan tillskrivas volymexpansionen hos de ingående mineralen
- b/ vid en cyklisk uppvärmning till en temperatur högre än T_s får bergarten en permanent töjning, ϵ_0 , och α_v får ett värde som svarar mot volymutvidgningen hos de ingående mineralen

Tabell III

Effekterna av upprepad termisk cykling för Westerly granit*

T_{\max} [°C]	$\alpha_v^{25-200} \times 10^{-6}$ [°C] ⁻¹	$\epsilon_0 \times 10^{-4}$
220	33.6	1.5
260	35.6	2.0
T_s	-	3.0
300	33,2	4.0
310	32.9	4.1
330	32.2	6.8
400	33.0	8.5
450	32.4	12.0
500	28.1	21.0

* Efter Richter o Simmons, 1974

TRYCKETS INVERKAN PÅ TERMISKA EXPANSIONEN

Vår nuvarande kännedom om tryckets inverkan på termala expansionen hos mineral och bergarter är dålig. För några alkalimetaller och enkla kubiska kristaller har vi tillgång till Bridgmans data. Dessa visar bland annat att en tryckökning från 1 atm till 50 kbar reducerar volymexpansionen med ca hälften, Skinner (1966). Dessa undersökningar antyder trenden att den termiska expansionen avtar med ökat tryck.

Simmons o Cooper (1977) har studerat tryckets inverkan på sammanpressningen av mikrosprickor i bl a Westerly granite efter det att bergarten utsatts för en termisk cykling. De fann att mikrosprickorna som bildas vid en cyklisk uppvärmning och avkylning av bergarten sluter sig då de utsätts för ett visst hydrostatiskt tryck. För att utföra dessa mätningar lät Simmons och Cooper heta upp bergarten vid en långsam hastighet, $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Hoppressningen av sprickorna studerades med hjälp av den tidigare omtalade differentiella töjningsmetoden (DSA), där provets volymtöjning registreras i en högtryckscell vid olika hydrostatiska tryck. Resultaten framgår av Fig 6, där vi finner att den största andelen mikrosprickor sluter sig vid trycket 10-20 MPa.

Dessa resultat har en stor praktisk betydelse för lagringen av varma behållare med radioaktivt avfall i tunnlar eller bergrum. Om dessa utrymmen placeras på tillräckligt stort djup och orienteras gynnsamt med hänsyn till rådande bergspänningar når de sekundära spänningarna kring öppningarna de belopp som krävs för att förhindra mikrosprickbildning och eventuellt grundvattenläckage i berggrunden. För att detta skall uppnås krävs skonsamma bergavverkningsmetoder, exempelvis fullortsborrning.

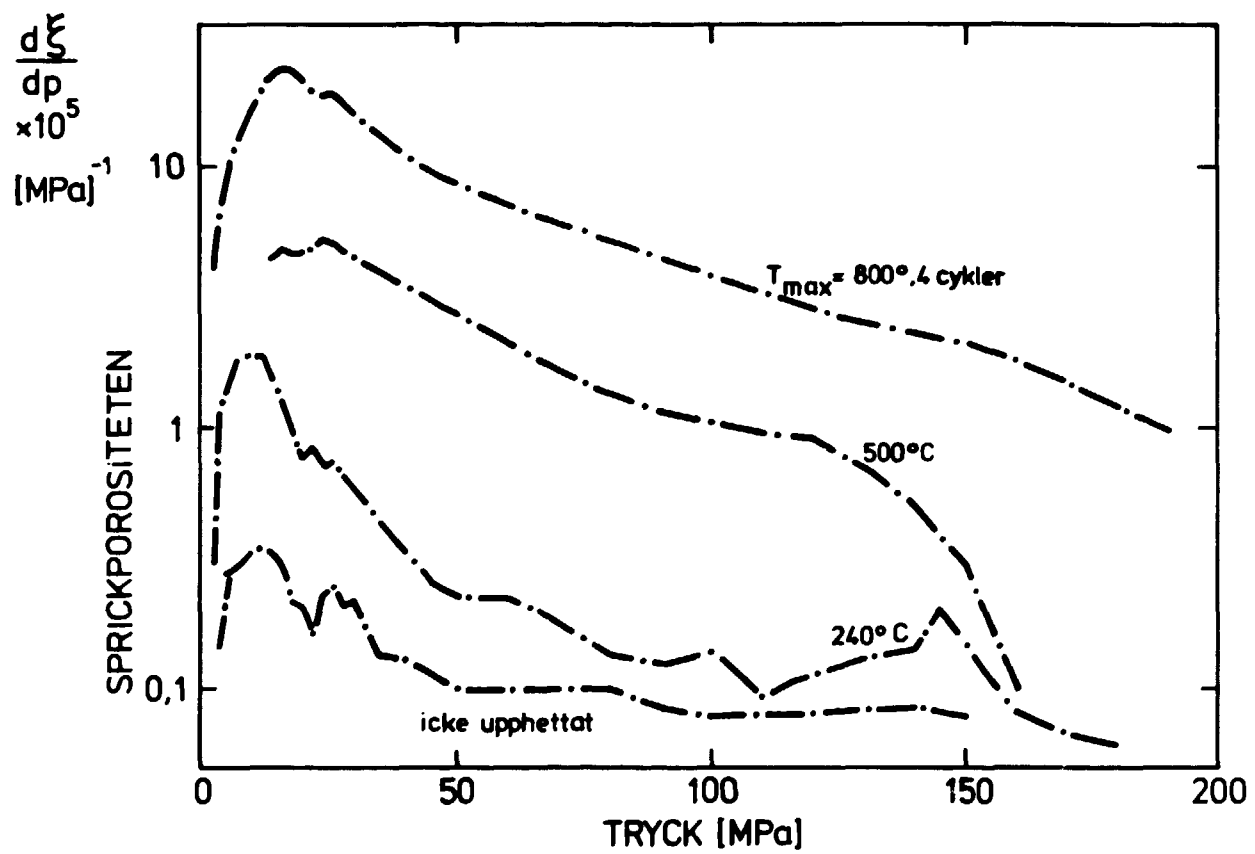


Fig 6 Sprickporositeten som funktion av allsidiga trycket för cykliskt uppvärmd Westerly granit. Mikrosprickorna från uppvärmningen sluter sig vid ca 20 MPa.

BERGMASSANS TERMISKA UTVIDGNING

Vi har hittills behandlat mineralens och bergarternas termala expansion. Nästa steg i volymskalan är bergmassan, d v s bergarten med dess geologiska strukturer, som exempelvis bandning, bankning, förkiffring, slag, sprickor, skölar och förkastningar. Vi har i tidigare avsnitt behandlat anisotropins inverkan på volymutvidgningskoefficienten, α_v . Således finner vi att α_v är större i en riktning parallellt med skiffrigheten än vinkelrätt däremot. Ett liknande resonemang kan också tillämpas på en bergmassa med en eller flera uthålliga sprickgrupper, d v s ett antal inbördes parallella sprickor. Om bergmassan korsas av strukturer som skjuvzoner, skölar eller förkastningar måste deras dimensioner och termala expansion beaktas vid en analys av termospänningarna.

Karaktäristiskt för bergmassan i Stripagruvan är en i det närmaste regellös uppsprickning hos graniten med i genomsnitt 7-10 sprickor pr m². Sprickorna är tunna och täta och har en beläggning av biotit och klorit. Sprickbeläggningen har en volym som torde kunna försummas vid bestämning av bergmassans medelsammansättning. Halten biotit och klorit påverkar således inte den termala expansionen hos bergmassan. De mycket tunna sprickfyllningarna gör det inte heller befogat att betrakta bergmassan som ett kompositmaterial med graniten och sprickfyllnaden som de två elementen.

Existensen av sprickor i bergmassan gör att bergblocken som begränsas av sprickytorna kan röra sig relativt varandra och en ofullständig sprickfyllnad tillåter en expansion av bergblocken vid uppvärmning. En del av töjningarna från blockens expansion kan komma att absorberas av sprickorna och bergmassan erhåller därvid en lägre volymutvidgningskoefficient än bergarten. Denna möjlighet till expansion kan emellertid inte vara speciellt stor, eftersom de enskilda bergblocken idag överför de primära bergspänningarna som uppgår till storleksordningen 10-20 MPa för testplatsen i Stripagruvan.

Är det då någon skillnad mellan bergartens och bergmassans termala utvidgning? Idag saknar vi undersökningar som kan ge oss några upplysningar om detta och vi måste därför invänta resultaten av värmeförsöken in situ i Stripagruvan innan frågan kan besvaras.

REFERENSER

Cooper, H W o Simmons G. 1977. The effect of cracks on the thermal expansion of rocks, Earth and Planetary Science Letters. (in press)

Dale, T N. 1923. The commercial granites of Nev. England, U.S.G.S. Bull. 738

Fairbairn, H W; Schlecht, W; Stevens, R E; Dennen, W; Ahrens, L; o Chayes, F. 1951. A Cooperative investigation of precision and accuracy in chemical, spectrochemical, and modal analysis of silicate rocks. U.S.G.S. Bull 980

Richter, D o Simmons, G. 1974. Thermal expansion behavior of igneous rocks. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech. Abstract, v 11, 403-411

Richter, D o Simmons G. 1977. Microcracks in crustal igneous rocks: Microscopy, i, the Earth Crust: Its nature and physical properties, Geophys Monographs. Ser 20 (in press)

Simmons, G o Cooper, H W. 1977. Thermal cycling cracks in three igneous rocks. Int J Rock Mech Min Sci (in press)

Skinner, B J. 1966. Thermal expansion. in Handbook of Physical Constants. Rev Ed by S P Clark, Jr. Geol Soc Amer, Memoir 97, 75-96

FÖRTECKNING ÖVER KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 01 Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN
Nils Kjellbert
AB Atomenergi 77-04-05
- 02 PM angående värmeledningstal hos jordmaterial
Sven Knutsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-04-15
- 03 Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-05-27
- 04 Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-01
- 05 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall, Rapport 1
Roland Blomqvist
AB Atomenergi 77-03-17
- 06 Groundwater movements around a repository, Phase I, State of the art and detailed study plan
Ulf Lindblom
Hagconsult AB 77-02-28
- 07 Resteffekt studier för KBS
Del 1 Litteraturgenomgång
Del 2 Beräkningar
Kim Ekberg
Nils Kjellbert
Göran Olsson
AB Atomenergi 77-04-19
- 08 Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 77-05-20

- 09 Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium
Hans Häggblom
AB Atomenergi 77- 3-24
- 10 Translation and development of the BNWL-Geosphere Model
Bertil Grundfelt
Kemakta Konsult AB 77-02-05
- 11 Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall
Sture Henriksson
AB Atomenergi 77-04-18
- 12 Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg
Sven G Bergström
Göran Fagerlund
Lars Rombén
Cement- och Betonginstitutet 77-06-22
- 13 Urlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering
Ragnar Gelin
AB Atomenergi 77-06-08
- 14 Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-20
- 15 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
Rapport 2
Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-05-17
- 16 Översikt av utländska riskanalyser samt planer och projekt rörande slutförvaring
Åke Hultgren
AB Atomenergi augusti 1977
- 17 The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements
Arne Bjerhammar
Stockholm augusti 1977
- 18 Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden
Nils-Axel Mörner
Stockholms Universitet augusti 1977
- 19 Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, flygbildsgenomgång och geofysisk tolkning av recenta förkastningar
Robert Lagerbäck
Herbert Henkel
Sveriges Geologiska Undersökning september 1977

- 20 Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne
Kennert Röshoff
Erik Lagerlund
Lunds Universitet och Högskolan Luleå september 1977
- 21 Earthquakes of Sweden 1891 - 1957, 1963 - 1972
Ota Kulhánek
Rutger Wahlström
Uppsala Universitet september 1977
- 22 The influence of rock movement on the stress/strain
situation in tunnels or bore holes with radioactive con-
sistors embedded in a bentonite/quartz buffer mass
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 23 Water uptake in a bentonite buffer mass
A model study
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 24 Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och akti-
nider från en cylinder av franskt glas
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 1977-07-27
- 25 Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi
Ingemar Larsson KTH
Tom Lundgren SGI
Ulf Wiklander SGU
Stockholm, augusti 1977
- 26 Bedömning av risken för fördröjt brott i titan
Kjell Pettersson
AB Atomenergi 1977-08-25
- 27 A short review of the formation, stability and cementing
properties of natural zeolites
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå 1977-10-03
- 28 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-09-20
- 29 Deformationer i sprickigt berg
Ove Stephansson
Högskolan i Luleå 1977-09-28
- 30 Retardation of escaping nuclides from a final depository
Ivars Neretnieks
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14
- 31 Bedömning av korrosionsbeständigheten hos material avsedda
för kapsling av kärnbränsleavfall. Lägesrapport 1977-09-27
samt kompletterande yttranden.
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

- 32 Long term mineralogical properties of bentonite/quartz
buffer substance
Preliminär rapport november 1977
Slutrapport februari 1978
Roland Pusch
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå
- 33 Required physical and mechanical properties of buffer masses
Roland Pusch
Högskolan Luleå 1977-10-19
- 34 Tillverkning av bly-titan kapsel
Folke Sandelin AB
VBB
ASEA-Kabel
Institutet för metallforskning
Stockholm november 1977
- 35 Project for the handling and storage of vitrified high-level
waste
Saint Gobain Techniques Nouvelles October, 1977
- 36 Sammansättning av grundvatten på större djup i granitisk
berggrund
Jan Rennerfelt
Orrje & Co, Stockholm 1977-11-07
- 37 Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts
Hans Fagerström, VBB
Björn Lundahl, Stabilator
Stockholm oktober 1977
- 38 Utformning av bergrumsanläggningar
Arne Finné, KBS
Alf Engelbrektson, VBB
Stockholm december 1977
- 39 Konstruktionsstudier, direktdeponering
ASEA-ATOM
VBB
Västerås
- 40 Ekologisk transport och stråldoser från grundvattenburna
radioaktiva ämnen
Ronny Bergman
Ulla Bergström
Sverker Evans
AB Atomenergi
- 41 Säkerhet och strålskydd inom kärnkraftområdet.
Lagar, normer och bedömningsgrunder
Christina Gyllander
Siegfried F. Johnson
Stig Rolandson
AB Atomenergi och ASEA-ATOM

- 42 Säkerhet vid hantering, lagring och transport av använt kärnbränsle och förglasat högaktivt avfall
Ann Margret Ericsson
Kemakta november 1977
- 43 Transport av radioaktiva ämnen med grundvatten från ett bergförvar
Bertil Grundfelt
Kemakta november 1977
- 44 Beständighet hos borsilikatglas
Tibor Lakatos
Glasteknisk Utveckling AB
- 45 Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar i berg för förglasat radioaktivt avfall Rapport 3
Roland Blomquist
AB Atomenergi 1977-10-19
- 46 Temperaturberäkningar för använt bränsle
Taivo Tarandi
VBB
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser
Preliminär rapport oktober 1977
Slutrapport februari 1978
Lars Y Nilsson
John Stokes
Roger Thunvik
Inst för kulturteknik KTH
- 48 The mechanical properties of the rocks in Stripa, Kråkemåla, Finnsjön and Blekinge
Graham Swan
Högskolan i Luleå 1977-09-14
- 49 Bergspänningsmätningar i Stripa gruva
Hans Carlsson
Högskolan i Luleå 1977-08-29
- 50 Lakningsförsök med högaktivt franskt glas i Studsvik
Göran Blomqvist
AB Atomenergi november 1977
- 51 Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock
F Ringdal
H Gjüstdal
E S Hysebye
Royal Norwegian Council for scientific and industrial research
- 52 Calculations of nuclide migration in rock and porous media, penetrated by water
H Häggholm
AB Atomenergi 1977-09-14

- 53 Mätning av diffusionshastighet för silver i lera-sand-blandning
Bert Allard
Heino Kipatsi
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15
- 54 Groundwater movements around a repository
- 54:01 Geological and geotechnical conditions
Håkan Stille
Anthony Burgess
Ulf E Lindblom
Hagconsult AB september 1977
- 54:02 Thermal analyses
Part 1 Conduction heat transfer
Part 2 Advective heat transfer
Joe L Ratigan
Hagconsult AB september 1977
- 54:03 Regional groundwater flow analyses
Part 1 Initial conditions
Part 2 Long term residual conditions
Anthony Burgess
Hagconsult AB oktober 1977
- 54:04 Rock mechanics analyses
Joe L Ratigan
Hagconsult AB september 1977
- 54:05 Repository domain groundwater flow analyses
Part 1 Permeability perturbations
Part 2 Inflow to repository
Part 3 Thermally induced flow
Joe L Ratigan
Anthony S Burgess
Edward L Skiba
Robin Charlwood
- 54:06 Final report
Ulf Lindblom et al
Hagconsult AB oktober 1977
- 55 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg
Del 1 Bestämning av fördelningskoefficienter
Del 2 Litteraturgenomgång
Bert Allard
Heino Kipatsi
Jan Rydberg
Chalmers tekniska högskola 1977-10-10
- 56 Radiolys av utfyllnadsmaterial
Bert Allard
Heino Kipatsi
Jan Rydberg
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15

- 57 Stråldoser vid haveri under sjötransport av kärnbränsle
Anders Appelgren
Ulla Bergström
Lennart Devell
AB Atomenergi 1978-01-09
- 58 Strålrisker och högsta tillåtliga stråldoser för människan
Gunnar Walinder
FOA 4 november 1977
- 59 Tectonic lineaments in the Baltic from Gävle to Simrishamn
Tom Flodén
Stockholms Universitet 1977-12-15
- 60 Förarbeten för platsval, berggrundsundersökningar
Sören Scherman
- Berggrundvattenförhållande i Finnsjöområdets nordöstra del
Carl-Erik Klockars
Ove Persson
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 61 Permeabilitetsbestämningar
Anders Hult
Gunnar Gidlund
Ulf Thoregren
- Geofysisk borrhålsmätning
Kurt-Åke Magnusson
Oscar Duran
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 62 Analyser och åldersbestämningar av grundvatten på stora djup
Gunnar Gidlund
Sveriges Geologiska Undersökning 1978-02-14
- 63 Geologisk och hydrogeologisk grunddokumentation av
Stripa försöksstation
Andrei Olkiewicz
Kenth Hansson
Karl-Erik Almén
Gunnar Gidlund
Sveriges Geologiska Undersökning februari 1978
- 64 Spänningsmätningar i Skandinavisk berggrund - förutsättningar,
resultat och tolkning
Sten G A Bergman
Stockholm november 1977
- 65 Säkerhetsanalys av inkapslingsprocesser
Göran Carleson
AB Atomenergi 1978-01-27
- 66 Några synpunkter på mekanisk säkerhet hos kapsel för
kärnbränsleavfall
Fred Nilsson
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm februari 1978

- 67 Mätning av galvanisk korrosion mellan titan och bly samt mätning av titans korrosionspotential under γ -bestrålning.
3 st tekniska PM.
Sture Henrikson
Stefan Poturaj
Maths Åsberg
Derek Lewis
AB Atomenergi januari-februari 1978
- 68 Degraderingsmekanismer vid bassänglagring och hantering av utbränt kraftreaktorbränsle
Gunnar Vesterlund
Torsten Olsson
ASEA-ATOM 1978-01-18
- 69 A three-dimensional method for calculating the hydraulic gradient in porous and cracked media
Hans Häggblom
AB Atomenergi 1978-01-26
- 70 Lakning av bestrålat UO_2 -bränsle
Ulla-Britt Eklund
Ronald Forsyth
AB Atomenergi 1978-02-24
- 71 Bergspricktätning med bentonit
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-11-16
- 72 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av kompakterad bentonit
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-11-18
- 73 Self-injection of highly compacted bentonite into rock joints
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-02-25
- 74 Highly compacted Na bentonite as buffer substance
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-02-25
- 75 Small-scale bentonite injection test on rock
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-03-02
- 76 Experimental determination of the stress/strain situation in a sheared tunnel model with canister
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-03-02
- 77 Nuklidvandring från ett bergförvar för utbränt bränsle
Bertil Grundfelt
Kemakta konsult AB, Stockholm
- 78 Bedömning av radiolys i grundvatten
Hilbert Christenssen
AB Atomenergi 1978-02-17

- 79 Transport of oxidants and radionuclides through a clay barrier
Ivars Neretnieks
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-02-20
- 80 Utdiffusion av svårösliga nuklider ur kapsel efter kapselgenombrott
Karin Andersson
Ivars Neretnieks
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-03-07
- 81 Tillverkning av kopparkapsel
Kåre Hannerz
Stefan Sehlstedt
Bengt Lönnberg
Liberth Karlson
Gunnar Nilsson
ASEA, ASEA-ATOM
- 82 Hantering och slutförvaring av aktiva metalldelar
Bengt Lönnberg
Alf Engelbrektsson
Ivars Neretnieks
ASEA-ATOM, VBB, KTH
- 83 Hantering av kapslar med använt bränsle i slutförvaret
Alf Engelbrektsson
VBB Stockholm april 1978
- 84 Tillverkning och hantering av bentonitblock
Alf Engelbrektsson
Ulf Odebo
ASEA, VBB
- 85 Beräkning av kryphastigheten hos ett blyhölje innehållande en glaskropp under inverkan av tyngdkraften
Anders Samuelsson
- Förändring av krypegenskaperna hos ett blyhölje som följd av en mekanisk skada
Göran Eklund
Institutet för Metallforskning september 1977 - april 1978
- 86 Diffusivitetmätningar av metan och väte i våt lera
Ivars Neretnieks
Christina Skagius
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-01-09
- 87 Diffusivitetmätningar i våt lera Na-lignosulfonat, Sr^{2+} , Cs^{+}
Ivars Neretnieks
Christina Skagius
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-03-16
- 88 Ground water chemistry at depth in granites and gneisses
Gunnar Jacks
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm april 1978

- 89 Inverkan av glaciation på en deponeringsanläggning
belägen i urberg 500 m under markytan
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-03-16
- 90 Koppar som kapslingsmaterial för icke upparbetat
kärnbränsleavfall - bedömning ur korrosionssynpunkt
Lägesrapport 1978-03-31
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp
- 91 Korttidsvariationer i grundvattnets trycknivå
Lars Y Nilsson
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm september 1977
- 92 Terøisk utvidgning hos granitoida bergarter
Ove Stephansson
Högskolan i Luleå april 1978
- 93 Preliminary corrosion studies of glass ceramic
code 9617 and a sealing frit for nuclear waste
canisters
I D Sundquist
Corning Glass Works 78-03-14
- 94 Avfallsströmmar i upparbetningsprocessen
Birgitta Andersson
Ann-Margret Ericsson
Kemakta mars 1978
- 95 Separering av C-14 vid upparbetningsprocessen
Sven Brandberg
Ann-Margret Ericsson
Kemakta mars 1978
- 96 Korrosionsprovning av olegerat titan i simulerade
deponeringsmiljöer för upparbetat kärnbränsleavfall
Sture Henrikson
Marian de Pourbaix
AB Atomenergi 1978-04-24
- 97 Colloid chemical aspects of the "confined bentonite
concept"
Jean C Le Bell
Ytkemiska Institutet 1978-03-07
- 98 Sorption av långlivade radionuklider i lera och
berg Del 2
Bert Allard
Heino Kipatsi
Börje Torstenfelt
Chalmers Tekniska Högskola 1978-04-20

