
KBS TEKNISK RAPPORT

66

Några synpunkter på mekanisk säkerhet hos kapsel för kärnbränsleavfall

Fred Nilsson

Kung. Tekn. Högskolan Stockholm februari 1978

NÅGRA SYNPUNKTER PÅ MEKANISK SÄKERHET
HOS KAPSEL FÖR KÄRNBRÄNSLEAVFALL

Fred Nilsson
Kungl Tekniska Högskolan
Stockholm februari 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.

NÅGRA SYNPUNKTER PÅ MEKANISK SÄKERHET HOS KAPSEL FÖR
KÄRNBRÄNSLEAVFALL

Fred Nilsson

Inst för hållfasthetslära
Kungl Tekniska Högskolan
Stockholm

Summary

Three different concepts for encapsulation of used nuclear fuel are discussed with respect to their mechanical safety.

In the first concept the burnt out fuel elements are encapsulated into a copper capsule. The material properties of copper are discussed especially with reference to toughness and creep. A simple fracture mechanical analysis shows that the risk for direct fracture is negligible at the actual stress levels. The loads on the capsule are studied and are found to be normally less than 40 MPa (residual stresses). Transient loads that might arise in the handling of the capsule might however be dangerous to its integrity.

The next concept is encapsulation of the fuel elements into a sintered aluminium oxide capsule. A fracture probability analysis based on Weibull's statistical fracture theory gives fracture probabilities that are acceptable. Extended studies of this concept, especially of the risk for delayed fracture, is recommended.

The last concept is a Pb-Ti capsule for glassed refined fuel. An analysis of the relaxation of internal stresses is performed. The critical point of these capsules appears to be the welds on the titanium shell where the risk for a direct fracture is not negligible.

Sammanfattning

Tre olika koncept för kapsling av utbränt kärnbränsle diskuteras med avseende på den mekaniska säkerheten.

Det första konceptet innebär att de utbrända bränslestavarna innesluts i en kopparkapsel. Materialegenskaperna hos koppar diskuteras, speciellt seghets- och krypegenskaper. En enkel brottmekanisk analys visar att någon risk för direkt brott ej föreligger vid de aktuella spänningsnivåerna. Belastningar på kapseln studeras och därvid finner man att spänningarna normalt inte torde överstiga 40 MPa (restspänningar). Dynamiska laster vid missgrepp i hanteringen kan däremot vara farliga för kapselns integritet.

Nästa koncept är inneslutning av utbrända element i en sintrad aluminiumoxidkapsel. En brottriskbedömning med utgångspunkt från Weibulls statistiska brotteori genomförs som resulterar i godtagbara brottrisknivåer. Utvidgade studier av detta koncept, speciellt av risken för s k fördröjt brott, rekommenderas.

Det sista konceptet är en bly-titan kapsel för inglasat upparbetat avfall. En analys genomförs av hur snabbt inre spänningar, som uppstår vid tillverkningen, relaxeras. Den kritiska punkten på dessa kapslar tycks vara svetsar i det yttre titanskalet, där risken för direkt brott ej är försumbar.

1. Inledning

En av de mest diskuterade frågorna inom kärnkraftteknologien är hur den slutliga deponeringen av utbränt reaktorbränsle skall utföras. Som bekant har regeringen i villkorslagen krävt att betryggande dokumentation om denna frågas lösning skall föreligga innan tillstånd för nya byggen av kärnkraftverk ges. Ett antal olika koncept har framlagts och diskuterats. I den allmänna debatten har problemet beträffande korrosionsbeständigheten främst belysts. Även andra aspekter är givetvis av betydelse och i denna rapport skall några synpunkter på den mekaniska hållfastheten hos bränslekapslar ges.

Allmänt kan sägas att målet för en analys av denna typ är att söka bestämma sannolikheten för händelser som kan medföra icke önskade konsekvenser. Emellertid är goda uppskattningar av sådana sannolikheter för konstruktioner på planeringsstadiet oftast mycket svåra att genomföra. Detta är fallet med de aktuella koncepten. Avsikten med denna undersökning är därför främst att kartlägga möjliga mekanismer som kan leda till läckage från en bränslekapsel innan den slutliga deponeringen i berggrund gjorts. Där så är möjligt kommer enkla brottriskuppskattningar att göras.

Vi skall här diskutera tre olika koncept. Dessa är inkapsling av utbrända bränslestavar i cylindrer av koppar alternativt sintrad aluminiumoxid samt bly-titan kapsling av inglasat avfall.

2. Kopparkapsling

2.1 Allmänt

Utbrända bränslestavar innesluts efter ca tio år i kopparcylindrar med utseende enligt figur 1. Dessa förvaras i ett antal år (ca 30) ovan jord innan slutlig deponering i berg görs. Följande skeden av betydelse för kopparkapselns mekaniska integritet kan urskiljas.

- A) Gjutning och mekanisk bearbetning av cylinder och tillhörande lock och botten.
- B) Införande av bränslestavar och försegling av kapsel. Denna utförs så att lock och botten intrycks för att trycktätning skall erhållas. Därefter elektronstrålesvetsas lock och botten under utvändigt vacuum.
- C) Tillfällig förvaring ovan jord.
- D) Slutlig förvaring i berg.

Emellan dessa stadier tillkommer hantering av kapseln.

Vi skall i efterföljande avsnitt söka bedöma vilka belastningar kapseln utsätts för under dessa olika skeden och diskutera möjliga risker för läckage eller totalt haveri.

2.2 Mekaniska egenskaper hos koppar

När vi i det följande talar om koppar avses någon tekniskt "ren" kvalité som är lämpad både för gjutning och svetsning, exempelvis SIS 5015. De mekaniska egenskaperna torde ej skilja sig nämnvärt mellan olika kopparkvaliteter. Emellertid kan svetsbarheten påverkas starkt av mindre mängder av föroreningar som syre.

Koppar är en utpräglad duktil metall och saknar egentlig sträckgräns. För gjuten och glödgad koppar anges följande på de konventionella hållfasthetsegenskaperna (ref [1]).

Elasticitetsmodul	$E = 118000 \text{ MN/m}^2$
Sträckgräns	$\sigma_{0.2} = 40 \text{ MN/m}^2$
Brottgräns	$\sigma_B = 216 \text{ MN/m}^2$
Förlängning	$\delta_5 = 50 \%$

Den plastiska töjningen beskrivs ofta med en relation av typen

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_p^n \quad (2.1)$$

Insättning av värden på $\sigma_{0.2}$, σ_B och δ_5 ger då

$$\sigma = 267 \epsilon_p^{0.305} \quad (2.2)$$

En typisk egenskap hos koppar är att kryphållfastheten är låg. Koppar kryper redan vid rumstemperatur. Tapsell [2] anger en kryphastighet vid 20 °C och 10^{-5} per timme vid en spänning av 145 MN/m^2 . Vid högre temperatur accelereras kryphastigheten avsevärt. Vid 190 °C gäller (ref [3]) att kryphastigheten $\dot{\epsilon}_c$

$$\dot{\epsilon}_c = 10^{-7} \left(\frac{\sigma}{22} \right)^5$$

En spänning på 44 MN/m^2 ger således upphov till en kryptöjningshastighet av $3.2 \cdot 10^{-6}$ per timme eller 0.028 per år.

En annan egenskap av intresse är segheten. Trots att en relativt omfattande litteratursökning har gjorts har icke några brottseghetsdata för koppar hittats. Detta sammanhänger med att den stora duktiliteten hos koppar gör det svårt att genomföra brottseghetsbestämningar och att haveri genom spricktillväxt är sällan förekommande. Det närmaste vi lyckats komma en regelrät brottseghetsmätning är en undersökning utförd av Radhakrisnan [4]. Han genomför en serie experiment på provstavar enligt figur 2. Anvisningens längd varierar från 1 mm till 6 mm och rotradien är initiiellt 0.5 mm. Provstaven utsätts för enaxlig belastning och den nominella töjningen över de i figuren angivna punkterna mäts vid brott. En enkel teori baserad på töjningskoncentrationen vid en sprickspets appliceras och ger som slutresultat följande ekvation för det fall då sprickspetsen är skarp. ϵ_f är här den nominella töjningen vid brott och a är spricklängden i mm.

$$\epsilon_f = 0.301 (a)^{-1/2} \quad (2.4)$$

Giltigheten hos en analys av denna typ är tveksam, men vi får nöja oss med den i brist på bättre. Insättning i ekv (2.2) ger då brottspänningen

$$\sigma_f = 185 a^{-0.1525} \quad (2.5)$$

Man bör då hålla i minnet att den egentligen endast gäller för provstavskonfigurationen i figur 2. I figur 3 visas erforderlig brottspänning som funktion av halva spricklängden a . Vi ser att brottspänningen vid sprickstorleken noll är 185 MN/m^2 vilket är något högre än σ_B . Denna diskrepans är sannolikt beroende av den grova modell som använts. Vid t ex $\sigma_{0.2}$ -gränsen är det kritiska värdet mycket stort, förmodligen långt utanför modellens giltighetsområde.

2.3 Brottmekaniska försök på koppar

Som framgår ovan är brottseghetsegenskaperna hos koppar mycket dåligt undersökta. Det beslöts därför att en mindre undersökning skulle utföras.

Provningen utfördes på kallbearbetade stänger av SIS 5010-04. Detta material skiljer sig något från det man avser att använda i kapslarna (fosfordesoxiderad koppar SIS 5015). I vad gäller brottseghetsegenskaperna torde denna skillnad vara försumbar.

Den använda provstaven är en s k trepunkts böjprovstav (figur 4) vilken lämpar sig väl för den icke-linjära provning det här blir fråga om. Provning utfördes enligt s k J_{IC} -provning [5]. Härvid belastas provstaven enligt figur 5 och lasten P registreras som funktion av nedböjningen δ . Det utförda arbetet beräknas med hjälp av numerisk integration enligt

$$U = \int_0^{\delta} P \, d\delta \quad (2.6)$$

I många undersökningar (se t ex [5]) har man funnit att J -mättet kan bestämmas ur

$$J = \frac{2U}{b(w-a)} \quad (2.7)$$

där b är provstavstjockleken, w provstavshöjden och a spricklängden.

Det kritiska värdet på J är det värde på denna storhet vid

vilket spricktillväxt begynner. Detta värde betecknas J_{IC} . Det visade sig emellertid svårt att med hjälp av sedvanliga elektriska metoder avgöra när spricktillväxt sker i koppar. Vi valde därför att utvärdera J_{IC} vid den förskjutning som svarar mot maximal last P_m på provstaven. Vid studium av brottytorna befanns att detta svarade mot en tillväxt av storleksordningen 0.5 mm, vilket i detta sammanhang kan tas som en praktisk definition av spricktillväxtinittiering. Ur de så erhållna J_{IC} -värdena kan materialets brottseghet K_{IC} beräknas ur relationen

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} K_{IC}^2 \quad (2.8)$$

där ν är Poisson's konstant och E elasticitetsmodulen.

Fem försök utfördes vid rumstemperatur och resultaten framgår av tabell 1.

Tabell 1

Prov nr	J_{IC} MN/m	K_{IC} MN/m ^{3/2}
1	0.424	238
2	0.343	214
3	0.450	245
4	0.337	212
5	0.408	233
Medelvärde	0.392	228
Standardavvikelse	0.050	14.7

Brottseghetsvärdena är höga vilket framgår av följande räkneexempel. För en genomgående spricka i en plan plåt gäller

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (2.9)$$

där a är halva spricklängden.

Sätter vi in $\sigma_{0.2}$ -gränsen för det aktuella materialet fås en kritisk sprickstorlek $a_c = 10$ m. Denna betraktelse är naturligtvis inte rigorös men visar att kritiska sprickstorlekar i koppar blir mycket stora vid de spänningsnivåer som kan antas förekomma. En spricktillväxt torde alltså inte kunna ske med mindre än att kapseln påtvingas en avsevärd deformation. Eftersom belastningarna på kapselmaterialet huvudsakligen är egen-spänningar till följd av svetsning och eventuella termiska spänningar (se nedan), kan vi sluta oss till att spricktillväxt av kritisk natur är ytterligt osannolik. Denna slutsats drogs ovan och resultatet av den här gjorda experimentella undersökningen är i överensstämmelse med detta resultat.

2.4 Svetsning av koppar

Här skall lämnas några synpunkter på svetsning av koppar vilka framkommit vid diskussion med personal vid ASEA, där man har erfarenhet av svetsning av kopparrör.

Vid elektronstrålesvetsning finns följande feltyper.

- a) Prover på grund av inneslutningar i gjutgodset
- b) Porer i avslutningen
- c) Porer på grund av dålig rengöring
- d) Bindfel på grund av operatörsfel
- e) Varmsprickor omkring 10-15 mm.

Av dessa fel beräknas felen a) och b) uppstå i ca 5 % av svetsarna och felen c) - e) i mindre än 1 %.

Allmänt kan sägas att svetsning av koppar är svår att genomföra. Svårigheterna är tekniskt överkomliga men risken för t ex mänskligt felhandlande måste beaktas. De angivna siffrorna på frekvens av fel är betänkliga speciellt som oförstörande provning är svår att genomföra. Radiografering är på grund av strålningen omöjlig att genomföra. Ultraljudsprovning på koppar ger också mycket dåliga resultat förmodligen beroende på den höga materialdämpningen. Återstår provning av typ penetrerande vätska men med denna kan endast ytdefekter upptäckas. Felen enligt e) torde i allmänhet vara av sådan karaktär att provning

med penetrant har förutsättningar att lyckas.

Egenspänningar efter svetsningen är i nivå med $\sigma_{0.2}$ -gränsen.

Från ASEA framfördes några förslag. Om kapsel tål att utsättas för uppvärmning till $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan diffusionssvetsning övervägas. Friktionssvetsning är också teoretiskt tänkbar, men utvecklingsarbetet är kostsamt.

2.5 Belastningar under olika skeden

Vid avsvälningen från gjutningen kan vissa restspänningar uppstå liksom även vid den mekaniska bearbetningen. Behållaren torde väl dock glödgas efter gjutningen varför de kvarstående restspänningarna kommer att vara måttliga. Ett brott på kapseln i detta skede får inte heller några besvärliga konsekvenser.

Man kan i detta sammanhang diskutera huruvida en provtryckning bör göras. Genom att lägga trycket tillräckligt högt kan vi försäkra oss om att alla befintliga defekter understiger en given nivå. Vidare erhålls en kontroll av att underkritiska sprickor som har sådan belägenhet att läckage kan uppstå ej finns. Därutöver har en provtryckning utjämnande effekter på ett eventuellt restspänningstillstånd.

Det kritiska skedet i kapselns historia ovan jord är förseglingsoperationen. Efter det att bränslestavarna införts skall som nämnts ovan locket inpressas. Greppet bör härvid vara så stort att locket hålls kvar när rummet utanför kapseln evakueras. Tryckkraften från det inre atmosfärtrycket uppgår till ca 7000 N. Om vi räknar med en friktionskoefficient på 0.2 och en tvåfaldig säkerhet fås en erforderlig radiell kraft på locket av $7 \cdot 10^4$ N. Yttrycket bör vidare vara så stort att förbandet blir trycktätt. Hur stort kontakttryck som erfordras beror starkt på ytbeskaffenheten. Som ett rimligt värde på kontakttrycket använder vi $\sigma_{0.2}$ -gränsen eftersom trycktätningen förutsätter att ytorna plasticeras lokalt. Detta ger en total radiell klämkraft av ca $2.5 \cdot 10^6$ N om ett tryck på 40 MN/m^2 skall upprätthållas över den inre delen av locket.

Vi kan nu göra en uppskattning av de böjspänningar detta tryck ger upphov till. Kraften per längdenhet omkrets är $2.65 \cdot 10^3$ N. Enligt Roark [8] fås följande maximala böjspänning vid rörets ände.

$$\sigma_{\text{böj}} = \frac{2F_0}{h} \lambda r_m \quad (2.10)$$

där F_0 är skjuvkraften per längdenhet, h skaltjockleken, r_m medelradien och λ ges av

$$\lambda = \left(\frac{3(1-\nu)^2}{r_m^2 h^2} \right)^{1/4} \quad (2.11)$$

Insättning av aktuella värden ger $\sigma_{\text{böj}}$ till 76 MN/m^2 . Vi kan således räkna med att en viss lokal plastisk deformation uppstår. Vi ser enligt figur 3 att denna spänning inte kan ge upphov till brott om inte förekommande defekter är mycket stora ($a > 100 \text{ mm}$).

Spänningar uppstår också på grund av det inre atmosfärtrycket. Dessa är emellertid mycket begränsade. Maximal ringspänning uppgår till 0.14 MN/mm^2 och kan i detta sammanhang försummas.

Fastsvetsningen av locket är den mest kritiska operationen. Det är svårt att analysera spänningsförloppet utan närmare kännedom om hur svetsningen utförs. Vi gör här inte något försök till analys utan nöjer oss med att en sådan analys bör göras. Som nämnts får denna göras med numeriska metoder och torde vara relativt kostsam och komplicerad. Enligt min uppfattning behöver man dock knappast befara någon risk för brott på grund av kopparens stora duktilitet speciellt som temperaturhöjningen medför en snabb relaxation av spänningarna.

Efter avsvälningen kvarstår eventuella restspänningar. Dessa är från brottsynpunkt ej allvarliga. Vidare erhålles en termisk spänning på grund av det utvecklade värmets från bränslestavarna. Totalvärmeeffekt kan vid denna tidpunkt uppskattas till omkring 1 kW för en hel kapsel. Ett överslag på temperaturgradienten ger vid handen att temperaturskillnaden mellan inner- och ytterdiameter uppgår till $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$, vilket från spänningssynpunkt kan

försummas.

Som tidigare antytts kan belastningar uppstå vid hanteringen av kapseln. Vi betraktar ett fall enligt figur 6. Kapseln antages falla axiellt mot ett stelt underlag från höjden l . Stötspänningen för detta fall är

$$\sigma = \sqrt{2glE\rho} \quad (2.12)$$

där g är tyngdkraftsacceleration och ρ materialets täthet. Vid en fallhöjd av två meter erhålles en spänning på 203 MN/m^2 . Stötförlopp kan således ge upphov till spänningar som är farliga för kapselns integritet.

2.6 Diskussion

Av vad som framkommit av ovanstående diskussion torde ett direkt brott på kapseln endast kunna uppkomma till följd av tillbud vid hanteringen.

Vad som kan vara aktuellt i detta fall är alltså snarare risken att sprickor uppkommer som ger upphov till läckage men ej till brott. Sådana sprickor (defekter) kan uppkomma vid svetsningen. Det finns också möjlighet att sådana sprickor kan tillväxa genom långsam spricktillväxt, s k fördröjt brott. Denna typ av spricktillväxt beskrivs oftast med ekvationer av typen

$$\frac{da}{dt} = f(K) \quad (2.13)$$

där $\frac{da}{dt}$ är spricktillväxthastigheten, f någon funktion av spänningsintensitetsfaktorn K . Någon bestämning av parametrar för sådan spricktillväxt i koppar har ej stått att finna i tillgänglig litteratur. Man kan emellertid förmoda att fenomenet existerar i koppar till följd av denna metalls benägenhet till krypdeformation. Det är av vikt vid en fortsatt undersökning att detta problem studeras noga, eftersom restspänningar från svetsprocessen kan fungera som drivande kraft på en långsam tillväxt.

Till följd av kopparens krypbenägenhet är det väsentligt att man försäkrar sig om att inga yttre belastningar påverkar kapseln vid den slutliga deponeringen i berg. Under de mycket långa tidrymder det är fråga om kommer även en låg yttre spänning förr eller senare att förorsaka brott på grund av krypdeformation. Inre spänningar av typ restspänningar och temperaturspänningar är från denna synpunkt ej farliga emedan de relaxeras av krypdeformationen.

3. Aluminiumoxidkapsel

3.1 Allmänt

Gången vid framställning av Al_2O_3 -kapsel är i princip densamma som för kopparkapsel. Moment A) utgörs av sintring av kapseln genom varm isostatisk kompaktering. Vidare ersätts moment B) av en motsvarande förseglingsprocedur.

ASEA bedriver en omfattande analys- och provningsverksamhet beträffande kapslar av detta material. Bland annat skall brottseghetsbestämningar utföras och också provning för att bestämma sprickpropageringshastigheten vid sk fördröjt brott. Spänningsberäkningar för olika skeden av kapselns historia pågår och i några fall föreligger färdiga resultat.

Jag finner det knappast meningsfullt att på spekulativ väg föregripa ASEAs undersökningar om detta koncept, utan nöjer mig med att studera en speciell aspekt där data för en brottriskbedömning finns.

3.2 Brottrisk vid förseglingen

Den färdiga kapseln är en rak cylinder med sfäriska gavlarna (total höjd 2760 mm), innerdiameter 300 mm och ytterdiameter 510 mm inklusive ett 5 mm tjockt stålhölje). Vid förseglingen upphettas den aktuella gaveln till $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Strax under gaveln omges cylindern av ett 300 mm brett isoleringsskikt. Temperaturen nedanför detta isoleringsskikt hos omgivning är maximalt $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Man strävar efter att optimera uppvärmningsförloppet

så att en gynnsam spänningsfördelning erhålles.

Den situation under processen som ger de svåraste mekaniska påkänningarna är strax efter det att tryckavlastningen utförs. I figur 7 visas böjspänningsfördelningen vid denna tidpunkt för två olika tillverkningsbetingelser som kan anses utgöra extremfall.

I figur 8 visas på motsvarande sätt den böjspänningsfördelning (restspänning) som kan antas råda lång tid efter avsvälningen. Vi skall genomföra en brottriskbedömning för dessa fyra fall.

Vi skall på grundval av dessa spänningsfördelningar genomföra en brottriskanalys enligt Weibulls statistiska brotteori.

För enaxligt men i kroppen varierande spänningstillstånd leder Weibulls grundantaganden till följande ekvation för brottsannolikheten

$$P_f = 1 - e^{-\int_V k \sigma^m dV} \quad (3.1)$$

där k och m är materialkonstanter och V är kroppens volym.

Låt oss betrakta en rak balk med bredden b , höjden h och längden L . Spänningsfördelningen är

$$\sigma = \frac{12My}{bh^3} \quad (3.2)$$

där M är böjmomentet. Vi gör nu antagandet att brottrisken för tryckspänningar är noll. Om σ_{\max} betecknar maximal böjspänning i ett tvärsnitt erhålles efter insättning i (3.1)

$$P_f = 1 - e^{-\frac{k h b}{2(m+1)} \int_0^L \sigma_{\max}^m(x) dx} \quad (3.3)$$

Om vi nu speciellt studerar det aktuella trepunkts böjprovet och betecknar balkens längd med $2L$ fås

$$P_f = 1 - e^{-\frac{k b h L}{(m+1)^2} \sigma_0^m} \quad (3.4)$$

där σ_0 är maximal böjspänning i mest påkända punkt.

Sätt

$$c_1 = \frac{k b h L}{(m+1)^2} \quad (3.5)$$

Medelvärde för σ_0 kan nu beräknas och man erhåller

$$\bar{\sigma}_0 = c_1^{-1/m} \Gamma(1/m+1) \quad (3.6)$$

där Γ betecknar gammafunktionen.

Vidare kan standardavvikelsen beräknas

$$s_{\sigma_0} = c_1^{-2/m} \sqrt{\Gamma(2/m+1) - [\Gamma(1/m+1)]^2} \quad (3.7)$$

Med hjälp av de observerade värdena på medelvärde och standardavvikelse kan nu en skattning av m och k genomföras.

ASEA strävar efter att optimera och för den hittills bästa varianten gäller $\bar{\sigma}_0 = 529 \text{ MN/m}^2$ och en Weibull-modul $m = 21.2$. Det bör påpekas att dessa data är framtagna vid rumstemperatur. Brottdata vid de aktuella temperaturerna saknas varför brott-sannolikhetsberäkningen får tas med viss reservation.

Vi kan nu på helt analogt sätt härleda motsvarigheten till ekv. (3.3) för ett cylindriskt skal. h betecknar nu skaltjocklek och r_m medelradie.

$$P_f = 1 - e^{-\frac{k\pi h r_m L}{m+1} \int \sigma_{\max}^m(x) dx} \quad (3.8)$$

Numerisk integration ger följande brottsannolikhetsvärden.

Vid tryckavlastning	1	$6.5 \cdot 10^{-17}$
	2	$7.0 \cdot 10^{-8}$
Restspänning	1	$4.0 \cdot 10^{-15}$
	2	$1.2 \cdot 10^{-17}$

De erhållna värdena är helt acceptabla, men att räkna med lågtemperaturdata för tryckavlastningsfallet är förmodligen icke-konservativt.

3.3 Diskussion

Som framgår av ovan gjorda beräkning är problemen med Al_2O_3 -kapseln av något annorlunda karaktär än för kopparkapslingen. Då Al_2O_3 är ett sprött material finns en betydande risk för ett direkt brott om kapslingen behandlas olämpligt. Speciellt är denna kapsling känslig för stötpåkänningar.

I jämförelse med kopparkapslingen har Al_2O_3 -kapseln fördelen att oförstörande provning är enkel att genomföra. Ultraljud fungerar bra och även akustisk emission kan tillämpas.

Liksom för kopparkapseln finns här också problemet med s k fördröjt brott. ASEA bedriver provning för att fastställa brottrisken till följd av sådan spricktillväxt. Några allmänna synpunkter på detta ges i [7].

4. Bly-titankapsel

För detta koncept förutsätts att upparbetning av avfallet har skett och att det föreligger i form av en glaskropp skyddad av ett tunt hölje av rostfritt stål. Denna kropp innesluts sedan i en tjock blykapsel med ett relativt tunt hölje av ren titan. Detta kan ske på i princip två sätt.

A) Blybehållaren gjuts inuti titankapseln. Maskinbearbetning sker och därefter placeras glaskroppen inuti hålrummet. Den därvid erhållna spalten fylls därefter med flytande bly, som också får bilda ett lock. Det hela förseglas genom påsvetsning av en titanplatta.

B) En blybehållare extruderas och glaskropp placeras i detta och alltihop ställs i Ti-kapseln. Det hela värms successivt till en temperatur något under blyets smälttemperatur. Genom krypning förväntas då blyet utfylla befintliga spalter. Slutförsegling som A).

De spänningar som här kan förekomma är termiska spänningar på grund av olika värmeutvidgningskoefficienter hos bly och titan samt restspänningar vid Ti-svetsarna.

Vi skall göra en enkel överslagsberäkning för att uppskatta storleksordningen hos de termiska spänningarna. Härvid räknas både bly- och titancyklindern enligt tunnväggsteori vilket naturligtvis är en approximation.

Antag att vid referenstillståndet blycylindern passar perfekt i titankapseln (figur 9).

Låt nu temperaturen hos hela konstruktionen höjas momentant till T_0 . Vi antar att Ti-skalet deformeras rent elastiskt medan blykapseln kan undergå krypdeformation. Låt σ_1 och σ_2 vara ringspänningarna i bly respektive Ti räknade positiva som tryckspänningar. Följande konstitutiva samband antas gälla.

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} + \alpha_2 T \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} + \varepsilon_1^c + \alpha_1 T \quad (4.2)$$

$$\dot{\varepsilon}_1^c = k \sigma_1^n \quad (4.3)$$

Här är α_1 , α_2 längdutvidgningskoefficienter, E_1 , E_2 elasticitetsmoduler. k och n är materialkonstanter i kryplagen. Det är en smula oegentligt att använda en lag för stationär krypning för ett transient fall av denna typ, men man torde därigenom underskatta kryphastigheter och därmed överskatta relaxations-tider.

Jämviktsvillkoret kan skrivas

$$\sigma_1 h_1 = - \sigma_2 h_2 \quad (4.4)$$

samt förskjutningsvillkoret

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (4.5)$$

Derivering av (4.1) och (4.2) samt elimination av mellanvariabler ger följande differentialekvation för σ_1 .

$$\dot{\sigma}_1 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{1}{E_2} \right) = - k \sigma_1^n \quad (4.6)$$

Integration och beaktande av begynnelsevillkoret ger följande lösning

$$\sigma_1 = \left[\frac{kE_1(n-1)t}{C} + \left(\frac{\Delta\alpha TE_1}{C} \right)^{1-n} \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (4.7)$$

där

$$C = 1 + \frac{h_1}{h_2} \frac{E_1}{E_2} \quad (4.8)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (4.9)$$

Dragspänning σ i titankapseln blir sålunda

$$\sigma = -\sigma_2 = \frac{h_1}{h_2} \sigma_1 \quad (4.10)$$

För materialen gäller följande numeriska värden

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.006 \text{ m} \\ h_2 &= 0.100 \text{ m} \\ \alpha_1 &= 29 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{C}^\circ \\ \alpha_2 &= 8.8 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{C}^\circ \\ E_1 &= 16 \cdot 10^3 \text{ MN/m}^2 \\ E_2 &= 100 \cdot 10^3 \text{ MN/m}^2 \\ k &= 11.9 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{ samt } n = 2.7 \text{ om kryphastigheten mätes} \end{aligned}$$

i töjning/timme och spänning i MN/m^2 . Dessa data gäller för handelsbly vid 60°C . Om vi räknar med en momentan temperaturhöjning av 80°C fås följande spänningshistoria i Ti-kapseln.

tid i timmar	spänning MN/m^2
0	118
10	59
100	18
1000	4.8

Som synes relaxeras spänningen snabbt och vid gradvis uppvärmning (tidsomfång av storleksordningen 100 timmar) torde dessa

spänningar kunna försummas. De är dessutom endast aktuella för tillverkning enligt A). I fall B) kommer några dragspänningar i Ti-skalet inte finnas om temperaturen understiger den som är aktuell vid tillverknings-skedet (150-200 °C). Här får man däremot problemet att en spalt troligtvis kommer att uppstå mellan Ti-skalet och blykapseln, vilket kan vara av betydelse vid slutdeponeringen då ett yttre övertryck ges kapseln.

Vi kan sålunda sluta oss till att de enda spänningar av betydelse för kapselns mekaniska säkerhet före slutdeponeringen är de som uppkommer vid svetsningen av locket på Ti-kapseln samt eventuella hanteringspåkänningar. Man torde beträffande restspänningar i svetsen räkna med att de uppgår till materialets sträckgräns som är ca 400 MN/m².

Medan ett mycket stort antal undersökningar utförts beträffande brottsegheten hos titanlegeringar är ren Ti mera sparsamt behandlat. Wanhill [8] har genomfört sprickpropageringsstudier på 2 mm tjock plåt av ren Ti med såväl låg som hög syrehalt. Ur dessa data kan ett hyfsat värde på brottsegheten K_C uppskattas (undre gräns).

$$\text{Låg syrehalt} \quad K_C = 71 \text{ MN/m}^{3/2}$$

$$\text{Hög syrehalt} \quad K_C = 69 \text{ MN/m}^{3/2}$$

I svetsarna får vi räkna med ett något lägre värde. Reduktionen är förmodligen inte så stor emedan materialet är olegerat. Ett rimligt värde torde vara ca 50 MN/m^{3/2}. Låt oss nu se vad det svarar mot för kritisk defektstorlek vid en spänningsnivå som är lika med sträckgränsen. Enligt ekv. (2.9) erhålles $a_c = 5$ mm, dvs en total sprickstorlek av storleksordningen 10 mm. I jämförelse med koppar är Ti avsevärt mer benäget för sprödbrott. Jag anser att det för närvarande föreliggande materialet ej ger tillräckligt underlag för en kvantitativ uppskattning av brott-risken, men den här gjorda överslagsberäkningen ger anledning att förmoda att den ej är helt försumbar. Stora krav ställs på möjligheterna att med oförstörande materialprovningmetoder kontrollera defektförekomsten.

När det gäller själva blykapseln kan något haveri till följd av spricktillväxt ej uppstå. Den enda haverimekanism som här är av betydelse är risken för krypning. Under skedet fram till slutdeponeringen torde detta ej ha någon betydelse.

Jag vill också peka på möjligheten av långsam spricktillväxt i Ti (s k fördröjt brott). Detta behandlas i en rapport av Petterson [9].

Kommentarer

Som nämnts ovan är det för närvarande icke möjligt att genomföra en kvantitativ brottsannolikhetsbedömning av de föreslagna koncepten. Vi kan emellertid konstatera att risken för haveri av sprödbrottsnatur är helt försumbar för koppar- och blykapslarna. Däremot bör Ti-skalet undersökas noggrant i detta avseende liksom givetvis aluminiumoxidkapseln.

Samtliga material utom bly kan antas ha en viss benägenhet för s k fördröjt brott. För tidsperioden före slutlig deponering är denna fråga ej kritisk, men är givetvis av stor betydelse för de långa tider som gäller efter bergdeponeringen.

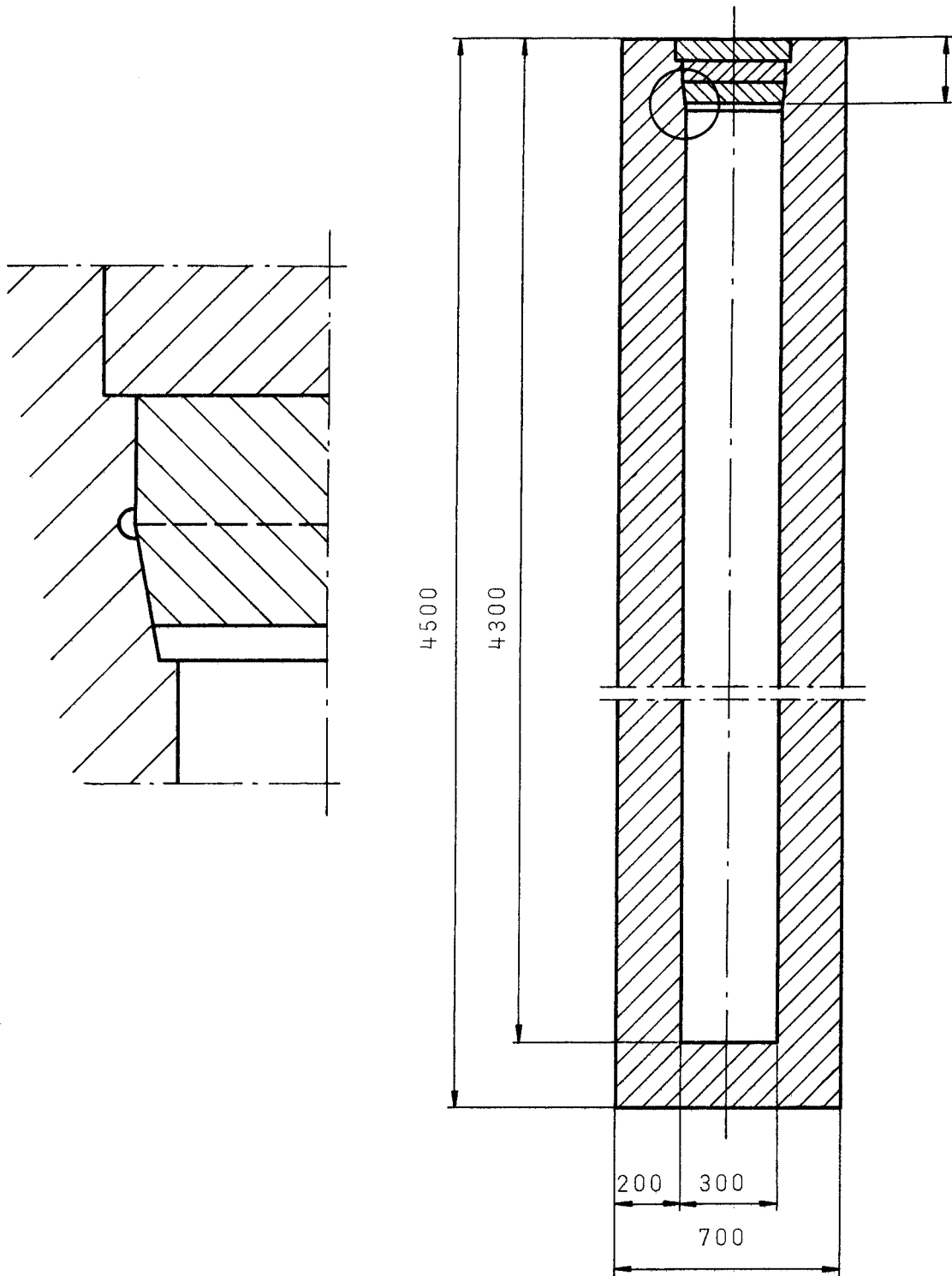
Den främsta orsaken till risk för läckage är sannolikt möjligheten att defekter uppstår i tillverkningsprocessen (svetsning, gjutning). I detta fall är bly minst känsligt eftersom det finns en möjlighet för "självläkning" till följd av krypprocesser.

Referenser

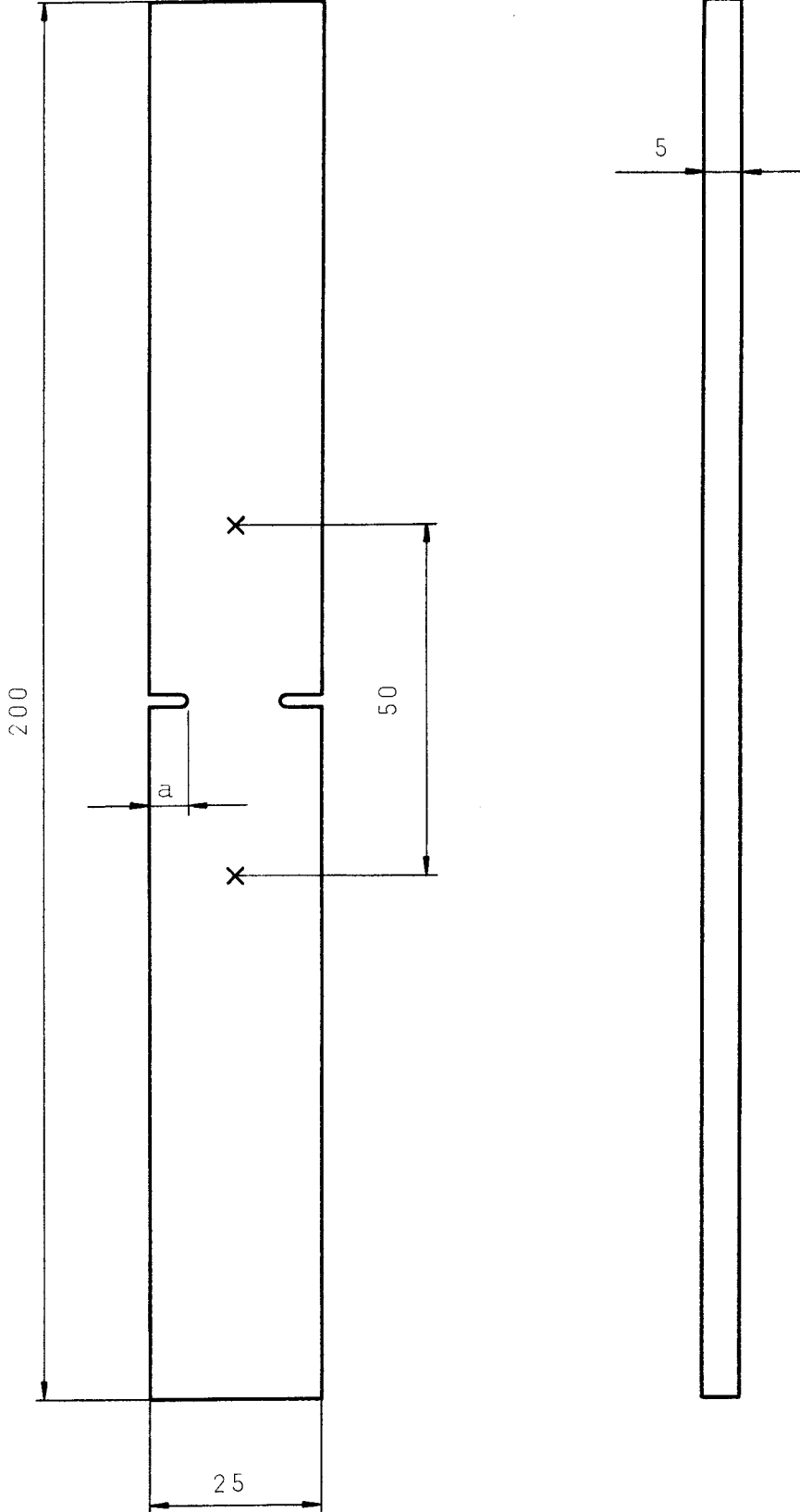
- [1] "Tekniska data, koppar, mässing och brons", Broschyr, Svenska Metallverken, 1958.
- [2] H.J. Tapsell, "Creep of Metals", Oxford University Press, 1931.
- [3] F.K.G. Odqvist, "Mathematical theory of creep and creep rupture", Oxford, at the Clarendon Press, 1966.

- [4] V.M. Radhakrishnan, "The effect of notch on ductile fracture", Scripta Metallurgica, vol. 5, pp. 379-382, 1971.
- [5] F. Nilsson, B. Östensson, "The statistical variation of J_{Ic} -fracture toughness of a pressure vessel steel", SKI projekt P58, 1976.
- [6] R.J. Roark, "Formulas for stress and strain", McGraw Hill, 1865.
- [7] T. Dahle, "Fördröjda brott i keramiska material", Teknisk rapport ASEA KYDP-7101, 1977.
- [8] R.J.H. Wanhill, "Environmental Fatigue Crack Propagation in Medium Strength Titanium Sheet Alloys", Eng. Fract. Mech. vol. 6, pp. 681-697, 1974.
- [9] K. Petterson, "Bedömning av risken för fördröjt brott i titan", AE-MZ-82, 1977.

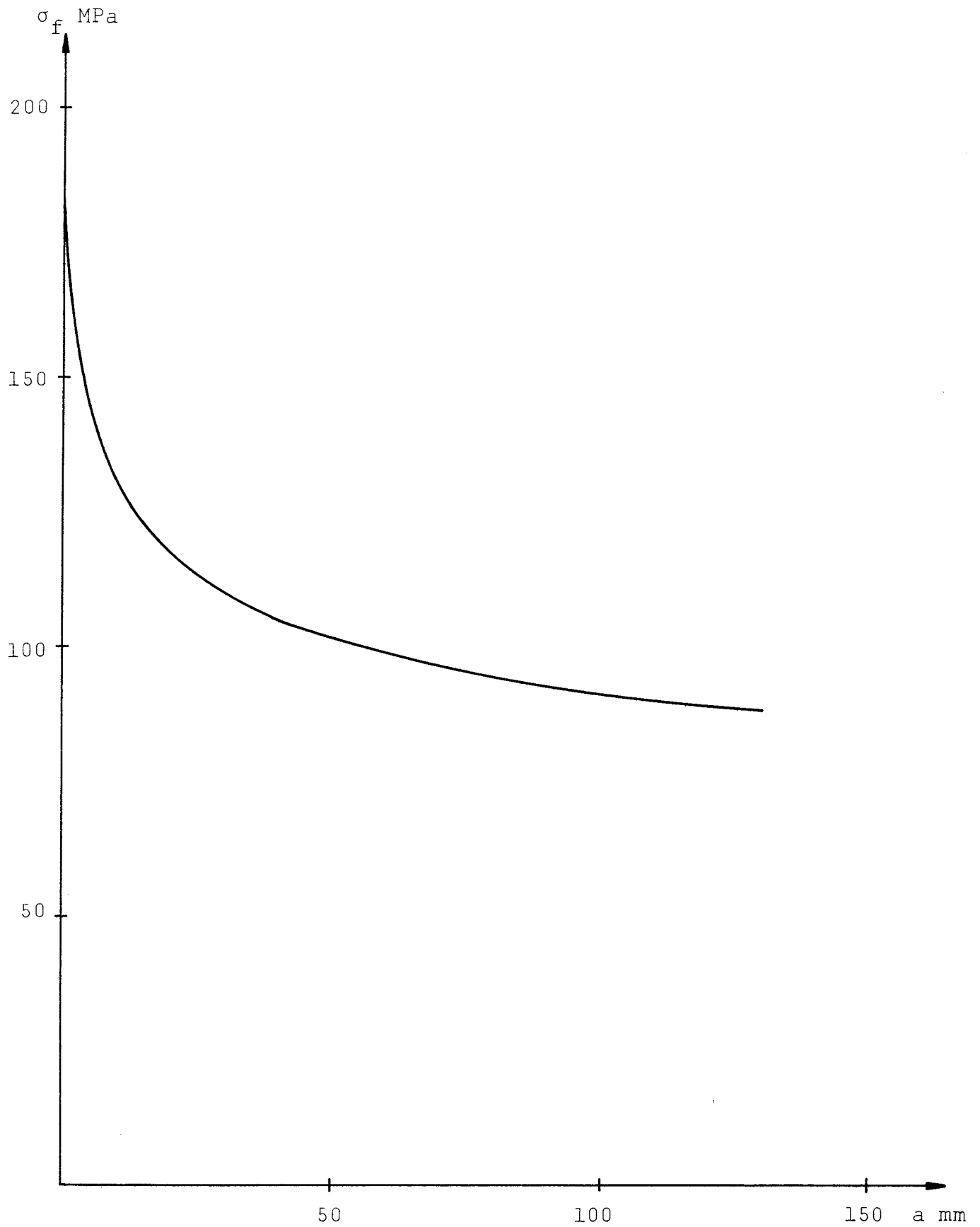
Figur 1. Kopparkapsel.



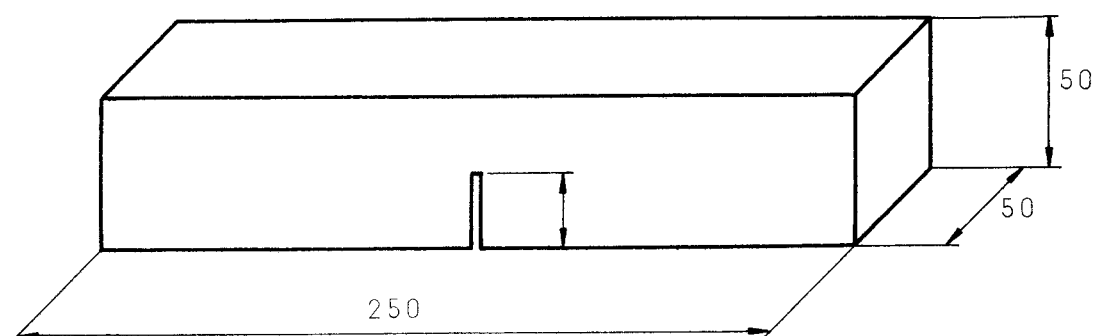
Figur 2. Provstav använd i ref.4



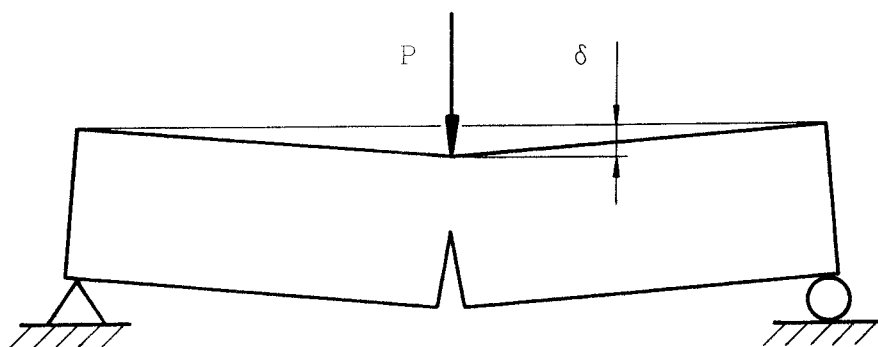
Figur 3. Brottspänning som funktion av sprickstorlek.



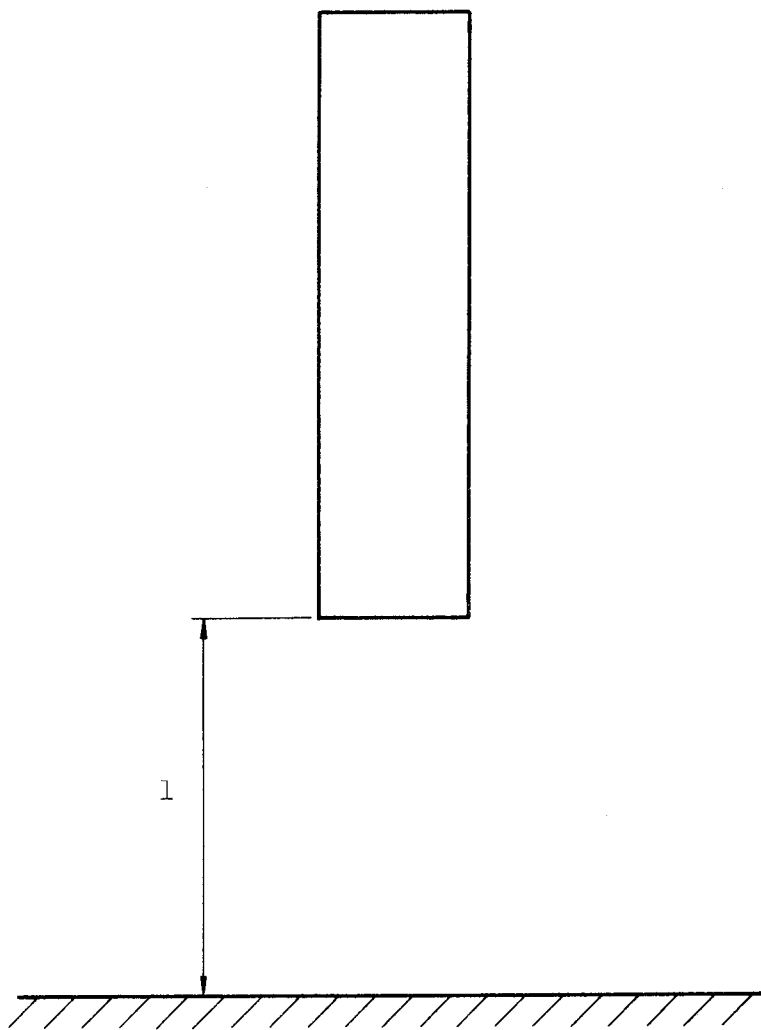
Figur 4. Provstav använd vid den brottmekaniska provningen



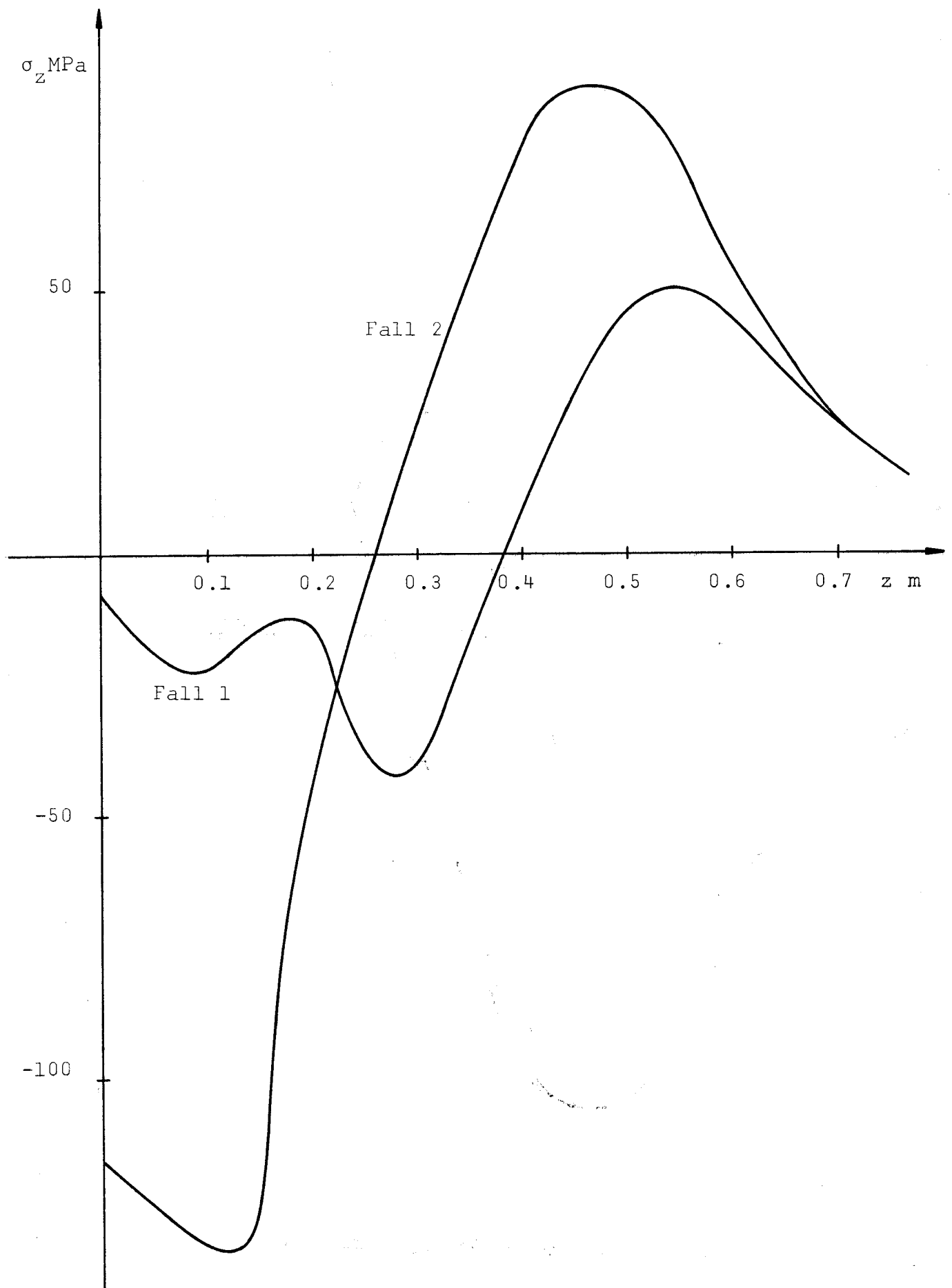
Figur 5. Belastningsgeometri.



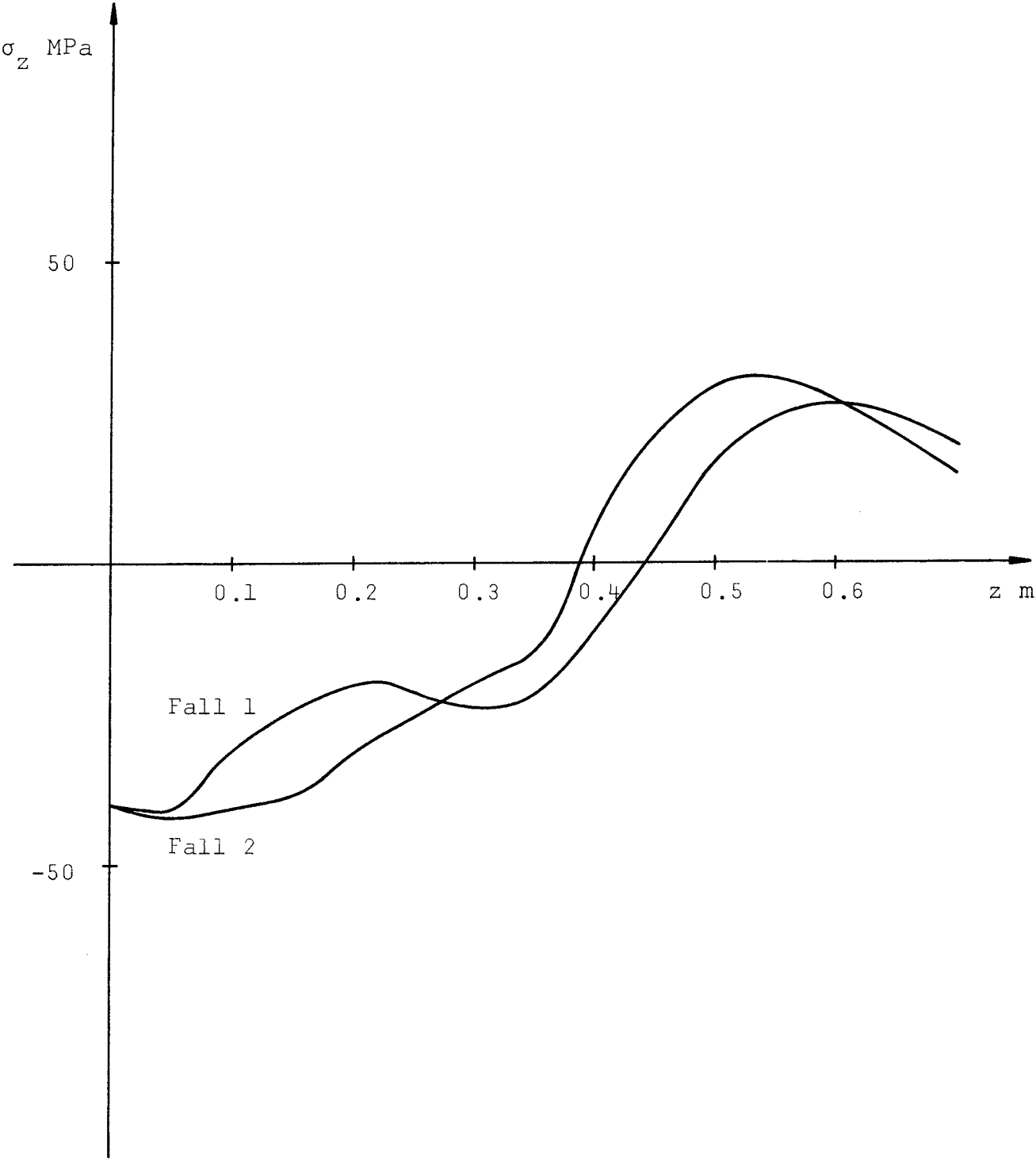
Figur 6. Kapseln faller mot stelt underlag.



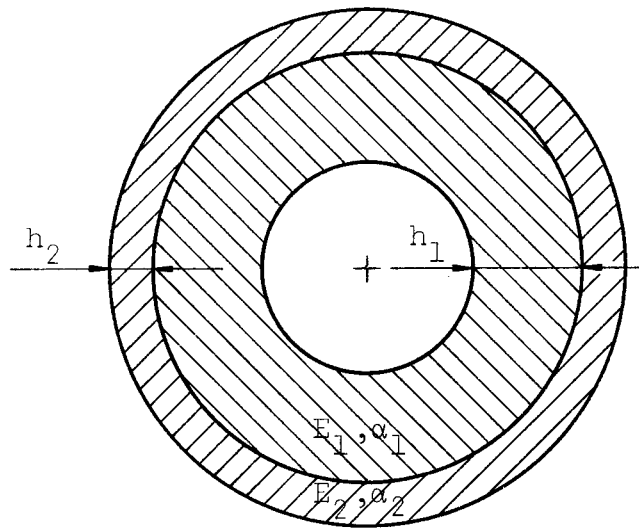
Figur 7. Böjspänningsfördelning strax efter tryckavlastning.



Figur 8. Böjspänningsfördelning efter lång tid.



Figur 9. Antagen geometri för relaxationsberäkning.



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 tunnlår 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 1, 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 77-03-24
- 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 Läckningsförsök 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 Gjöystdal
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 Häggblom
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