

**Slutförvaring av aktiverade stråldetaljer
i betong**

Lars Rombén
Kyösti Tuutti

Cement- och Betonginstitutet 1978-07-14

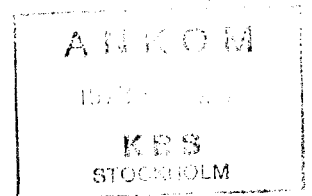
SLUTFÖRVARING AV AKTIVERADE
STÅLDETALJER I BETONG

Lars Rombén
Kyösti Tuutti

Cement- och Betonginstitutet 1978-07-14

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.



Rapport nr 7853

1978-07-14

SLUTFÖRVARING AV AKTIVERADE STÅLDETALJER I BETONG

Lars Rombén
Civilingenjör

Kyösti Tuutti
Civilingenjör

CEMENT- OCH BETONGINSTITUTET
Uppdragsfunktionen

SUMMARY

A part of the medium-level nuclear waste problem is the disposal of metal parts which have been activated during use in nuclear reactors. Some alloys contain Ni-59 with a half -life of 75000 years. A proposed method for final disposal consists in storing the waste in rock tunnels at a depth of 300-500 m inside containers which are surrounded by a buffer consisting of compacted quartz-bentonite mixture. This paper deals with the possibilities to use containers made of concrete and designed as cubic boxes enclosing the waste material cast and incorporated into cement mortar matrix. Special regard is given to the containment problem in relation to the mechanical and chemical processes that are operating. A calculation of the rate of release of Ni-59 through the walls of a container has given a figure of about 10^{-5} kg Ni per year for undeteriorated container walls.

SLUTFÖRVARING AV AKTIVERADE STÅLDETALJER I BETONG

1 INLEDNING

Kärnbränslet i kärnkraftverken aktiverar de delar som är i kontakt med bränslet. Några av de ämnen som på detta sätt aktiveras har långa halveringstider, vilket medför ett behov att efter användningen lagra dessa ämnen under mycket lång tid. Ämnen som på detta sätt blir aktiverade är bl a rostfritt stål av olika kvaliteter, SIS 2333, Inconel och Zircaloy . Dessa legeringar innehåller olika grundämnen i varierande kvantiteter. Mest riskabelt i detta sammanhang är Inconel, som har en hög nickelhalt, ca 79%, eftersom halveringstiden för Ni-59 är 75 000 år.

Projektgruppen KBS "Kärnbränslesäkerhet" har därför uppdragit åt Cement- och betonginstitutet att utreda korrosionshastigheten för de rostfria stålerna om de ingjutes i betong s k kokiller samt även hur lång tid det därvid kan dröja innan nickelföreningar börjar läcka ut ur kokillen antingen p g a transport genom kokillväggarna eller p g a att behållaren blir förstörd. I utredningen måste då även betongens egenskaper under ifrågavarande tidsperiod beräknas.

2 PROBLEMIORIENTERING

Filosofin i beräkningar av lagringssäkerheten för radioaktiva skadliga ämnen har varit uppbyggandet av flera olika barriärer. Därefter kan man beräkna varje barriärs minsta skyddande effekt. På detta sätt kan man teoretiskt uppskatta händelseförloppet om en eller flera barriärer ej får avsedd funktion.

KBS har i detta fall föreslagit att metallerna skall ingjutas i betongkokiller med kubisk form (1,6 m kantlängd och 30 resp 40 cm vägg tjocklek) och där- efter placeras i bergrum med omgivande sand- och bentonitfyllning. Första barriär är då metallernas beständighet. Betongkokillerna är den andra barriären och skall dels fungera som strålskydd under den första förvaringstiden dels fungera som barriär för inträngande oxiderande ämnen samt för utträngande upplösta ämnen. Bentonitfyllningen skall på samma sätt som betongen fungera som diffusionsbarrär för olika ämnen men också ha låg permeabilitet för vattenströmning också efter mindre rörelser i berg- grunden. Omgivande berg utgör den fjärde och sista barriären. Lagringen sker på 300-500 meters djup.

Metalldelarna, som är radioaktiva, kan sönderdela betongen om strålningen blir för stark. Detta gäller speciellt γ -strålningen.

Metallernas korrosionshastighet beror av en mängd olika faktorer såsom elektrodpotential, pH-värde, metall, tillförsel av oxiderande, reducerande och korrosionsinitierande ämnen. Generellt gäller att metallernas passivitetsegenskaper icke kan tillgodo- räknas för tidsperioder över 100-1000 år utan korro- sionshastigheten måste räknas som den maximala med hänsyn till inträngande ämnen. Termodynamisk immu- nitet kan dock tillgodoräknas i beräkningarna.

Kombinationen betong-bentonit kan medföra att ben- tonitens svällegenskaper minskar om den är i kon- takt med kalk. Dessutom finns risk för att bento- niten i den alkaliska miljön omvandlas till analcim. Vidare försämras betongens hållfasthet och täthet om kalken urlakas ur betongen. Således måste ur- lakningshastigheten beräknas för uppskattning av bentonitens resp betongens förstöring.

3 METALLENS KORROSION

3.1 Allmänt om korrosion av rostfritt stål

Korrosionshårdigheten för stål kan avsevärt ökas genom inlegering av olika metaller såsom Cr och Ni. De förbättrade korrosionsegenskaperna beror på att metallytan överdras av en tunn mycket tät skyddande oxid, dvs stålet passiveras. Passivering förutsätter emellertid oxiderande miljö. I reducerande miljö uppnås aktivt tillstånd med betydligt sämre korrosionshårdighet jämfört med passivt tillstånd.

Enligt uppgift från Korrosionsinstitutet har man lokalt uppmätt korrosionsdjup av 20 mm i rostfritt stål på ett år. Denna mycket extrema korrosionshastighet hade uppmätts på rostfria rör som genomströmdes av havsvatten, dvs mycket god syretillgång. Å andra sidan finns det uppgifter på mycket små angrepp vid atmosfärisk korrosion av rostfritt stål nämligen $0,01 \text{ mg/cm}^2$ på 10 år vilket motsvarar $\approx 100 \text{ \AA/10 år}$.

Stål med hög nickelhalt ger mycket god korrosionsresistens i alkaliska omgivningar. Korrosionshårdigheten ökar med ökande nickelmängd se FIG 1 och TABELL 1.

TABELL 1. Korrosion av Ni-stål, gjutjärn och kolstål i Na(OH)-lösningar. Shreir /1976/.

Metall	Korrosionshastighet mm/år	
	14% Na(OH) (88°C)	74% Na(OH) (127°C)
gjutjärn	0,2	1,93
kolstål	0,2	0,38
5% Ni	0,07	-
15% Ni	-	0,15
30% Ni	-	0,06

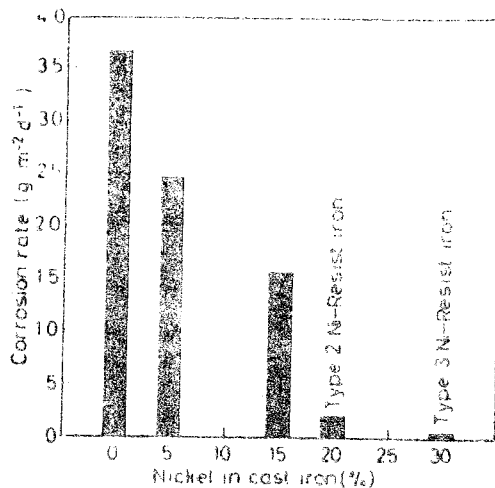


FIG 1. Nickelmängdens betydelse på korrosionshastigheten av gjutjärn i alkalisk miljö. Shreir /1976/.

Beständigheten för dessa hög-nickellegerade stål är således mycket god i betong där man erhåller pH-värden 12,6-14. Från passiverande och andra korrosionshämmande förhållanden bortses emellertid i beräkningar som följer. Alla ämnen som kan tänkas oxidera metallen antas bli förbrukade och därmed medföra korrosion när de kommer i kontakt med metallen. Förhållandena i verkligheten blir naturligtvis icke sådana men man erhåller på detta sätt de maximala angrepp som är möjliga enligt termodynamisk betraktelse.

Praktiska och teoretiska undersökningar har visat att korrosionsprodukterna för metallen Fe upptar minst den dubbla ursprungliga metallvolymen. Volymökningens storlek sammanhänger med syretillgången och ökar med ökande syremängd. Troligen föreligger samma förhållande för nickel.

3.2 Korrosion av aktiva metalledelar

Metallerna kan tänkas angripas genom ett flertal olika mekanismer, nämligen

- Oxidation p g a att syre eller sulfatjoner tillförs metallen genom transport från den omgivande miljön. Syret kan dessutom här- röra från radiolys av vattnet.
- Vätgasutvecklande korrosion p g a reaktion med svavelväte eller vatten. Svavelväte till- förs genom transport utifrån men vid reaktio- nen med vatten bestäms reaktionshastigheten av borttransporten av det bildade vätet.

Eftersom samtliga mekanismer utom radiolys är trans- portstyrda redovisas utförda korrosionsberäkningar med hänsyn härtill.

3.2.1 Korrosion orsakad av transportstyrda reaktioner

Beräkningarna är utförda med de koncentrationer av olika ämnen som angetts i rapport av Rennerfeldt 1978. Maximalvärde har använts, se BILAGA 1. Beräk- ningarna finns genomförda i BILAGA 2.

Man finner att huvudmotståndet mot transporten ut- görs av kokillväggarna. De beräknade värdena gäller därför under så lång tidrymd som dessa är i huvudsak intakta. Allteftersom väggarna förstörs p g a kalk- urlakning vilket enl punkt 5.2 nedan tar några hundra tusen år kommer motståndet att minska tills bara filmmotståndet återstår. Detta innebär att tillför- seln herefter kan bli omkring en tiopotens högre.

Det framgår härav att vätgasutvecklande korrosion för rent nickel är mycket långsam men möjlighet att beräkna denna hastighet även för legeringarna för- utsätter tillgång till termodynamiska data. Sådana har inte påträffats varför någon beräkning inte kan göras utöver vad som framkommit under punkt 3.1.

För övriga reaktioner erhålls det största värdet på korrosionshastigheten vid oxidation med sulfatjoner. För total reaktion av 100 kg metall skulle krävas

ca 600 000 år om kokillväggarna vore intakta och omkring 80 000 år om bara filmmotståndet räknas. Eftersom betong har förmåga att i viss utsträckning ta upp sulfatjoner är det osäkert hur lång tid det tar innan dessa når in till metalledelarna och korrosionshastigheten kan i så fall komma att bestämmas av andra reaktioner som ger ännu större livslängd.

Om det bedöms vara av intresse att förlänga metallskedet kan man överväga möjligheten att förnickla metalledelarna före ingjutningen så att porlösningen förhindras att komma i kontakt med annat än rent nickel. Förslaget förutsätter att beläggningen blir tät och att den blir så tjock att den inte förbrukas p g a oxidation av syre som bildats vid radiolys av vatten.

3.2.2 Korrosion orsakad av syre som bildats genom radiolys av vatten

Den från metallavfallet kommande strålningen kan påverka inneslutningen i olika avseenden. Strålningen kan tänkas ge upphov till radiolys av vatten med bildning av syrgas och angrepp på metallskrotet som följd. Den utvecklade gasvolymen kan ge upphov till ett inre tryck som kan spränga kokillen. Detta fall behandlas under punkt 5.4. Frågan om direkta strålskador på betongen behandlas under punkt 5.3.

Information om den i metallskrotet förekommande aktiviteten har per telefon erhållits från civ ing Finné, KBS och från Bengt Lönnerberg och Klas Lundgren, ASEA-ATOM. Aktiviteten uppgår efter 40 år till 7200 Ci och härrör i huvudsak från Ni-63 (β halveringstid 85 år) och Co-60 (γ , halveringstid 5,3 år). Strålningen avklingar snabbt och har under tidsrymden 40-1000 år gått ned i proportionen 200:3.

Klas Lundgren har uppgivit att huvudbidraget av strålningen vid längre tider härrör från Ni-59 (β) och Nb-94 (γ) och han har även tagit fram datorberäknade värden för den integrerade γ -dosen efter olika tider. Dessa beräkningar har gjorts för en typ betongkokiller som innehåller detaljer från BWR-bränsle. Närmare data om innehållet med avseende på materialtyper, nuklidsammansättning och källstyrkor återfinns enligt uppgift i KBS Teknisk Rapport nr 39 "Konstruktionsstudier, direktdeponering", speciellt bilagorna RF 78-222 och RF 78-48. I dessa källor återfinns även data för övriga BWR-kokill-typer men det saknas en del uppgifter för PWR-kokillen. Det har i ett sent skede meddelats att vissa av dessa innehåller 4 ggr mer Nb+Ta än vad den BWR-kokilltyp innehåller vars data utgjort underlag för beräkningarna av den integrerade γ -dosen. Detta innebär eventuellt att PWR-kokillen kan ge ett ca 4 ggr så stort långtidsbidrag. Räkningarna på doser och radiolys i det följande är därför att uppfatta som exempel för en viss kokilltyp och inte som maximi-värden.

Med utgångspunkt från γ -dosvärdena har Hilbert Christensen, AB Atomenergi, uppskattat storleken hos radiolysen i vattenfasen, se BILAGA 6. Vid telefonkontakt har han meddelat att uppskattningen är att anse som mycket konservativ och att en noggrannare beräkning med hänsyn till recombination av väte och syre skulle kunna ge väsentligt lägre värden men kräva större räkneinsats. Följande värden anges för den genom radiolys av vattenfasen bildade syrgasmängden:

Efter	100 år	1,8 mol	O_2 /kokill
	500 "	3,4 "	"
	1000 "	5,4 "	"
	5000 "	21 "	"
	10 000 "	36 "	"

Den bildade vätgasmängden är dubbelt så stor som syrgasmängden. Huvudbidraget härrör från γ -strålningen från Nb-94 som finns i Inconeldelen och som bildats genom neutroninfångning av Nb-93. Bidraget från tiden efter 10 000 år kan uppskattas då man känner halveringstiden för Nb-94 som är 20 000 år motsvarande en sönderfallskonstant $\lambda = \ln 2 / 20\,000$ år⁻¹. Den totala stråldosen efter en viss tidpunkt är lika med den som erhöles efter tiden $\frac{1}{\lambda}$ om strålningsintensiteten varit konstant. Radiolysintensiteten under tiden 5000-10 000 år per kokill 36-21 = 15 mol O₂ på 5000 år och hastigheten efter 10 000 år är alltså 0,003 mol O₂/år. Totala radiolysbidraget från tiden efter 10 000 år blir därför $0,003 \cdot \frac{20\,000}{\ln 2} = 87$ mol O₂/kokill och sammanlagt erhålles 36+87=123 mol O₂/kokill.

Om man antar att all syre som bildats genom radiolys reagerar med metalldelarna och bildar oxid eller hydroxid så räcker de angivna mängderna på 36 och 123 mol O₂ per kokill som utvecklas efter 10 000 år resp utvecklas totalt till för att oxidera 4,2 resp 14,5 kg metall räknat som nickel. Som jämförelse kan nämnas att den maximala Ni-mängden i kokillen uppgår till ca 100 kg och den totala metallmängden till ca 500 kg.

3.2.3 Slutsats

Sammanfattningsvis kan alltså sägas att korrosionshastigheten vid angivna betingelser för metalldelarna p g a reaktioner med SO₄²⁻, H₂S och löst syre blir mycket låg och erforderlig tidpunkt för total reaktion av enbart dessa orsaker blir av storleksordningen 100 000 år. Av dessa radiolysberäkningar som gjorts utan hänsyn till rekombination framgår att en avsevärd del av nickelmängden skulle kunna oxideras p g a radiolys. Den verkliga mängden bedöms

emellertid vara liten. Korrosion med vätgasbildning genom reaktion med vatten är för rent nickel i den alkaliska miljön extremt långsam men för de aktuella legeringarna kan man inte utsluta att denna reaktion förlöper snabbt. Hur snabbt har inte kunnat utredas.

4 TRANSPORT AV LÖSTA NICKELFÖRENINGAR GENOM KOKILLVÄGGEN

För att någon aktivitet skall läcka ut av kokillen räcker det inte med att metallskrotet överförs till hydroxid eller sulfid eftersom den bildade föreningen även måste transporteras ut genom kokillväggarna. Det är därvid av intresse att veta dels hur länge det dröjer innan Ni-59 diffunderat genom kokillväggen så att denna blir aktiv på utsidan, dels hur mycket nickel som per tidsenhet vid stationärt tillstånd kan transporteras ut ur kokillen. Det enda transportsätt som här kan förekomma om kokillen är oskadad är diffusion genom kokillväggarnas porsystem.

Dessa båda problem behandlas i BILAGA 2 och 3. Sammanfattningsvis kan sägas att aktiviteten på kokillernas ytterytor når ett maximalt värde efter 200-300 år motsvarande <4 nCi/g betong för 30 cm och <2 nCi/g för 40 cm kokiller. När så småningom ett stationärt diffusionsflöde av nickel har utbildats blir transportkapaciteten för en oskadad kokill av storleksordningen 10^{-5} kg Ni-59 per år och kokill (eller mindre om det yttre diffusionsmotståndet blir av betydelse). För tiden över 1000 år motsvaras detta av en utläkningshastighet på $\frac{3}{200} \cdot 7200 \cdot \frac{1}{100} \cdot 10^{-5} = 1,08 \cdot 10^{-5}$ Ci/år, kokill eller ca 10 μ Ci/år kokill. När kokillväggen genombrutits återstår filmmotståndet och hastigheten blir då omkring en tiopotens större. Med de gjorda antagandena finner man

uttransporten av nickeljoner sker långsammare än tillförseln av oxidanter.

5 RISKEN FÖR KOKILLFÖRSTÖRING

5.1 Översikt

Kokillerna kan när de befinner sig i slutförvaret förstöras eller skadas så att dom inte förmår fylla sin avsedda funktion som barriär. Dessa skador kan ha olika orsaker och här behandlas fyra tänkbara skadaorsaker nämligen eventuell

- a) förstöring av kokillväggarna genom kalkurlakning
- b) förstöring av betongen p g a strålning
- c) sprängning av kokillen p g a inre överttryck från gaser (väte och syre) som bildats vid radiolys av vattnet samt
- d) implosion av kokillerna p g a yttre grundvattentryck.

5.2 Förstöring av kokillväggen p g a kalkurlakning

Betongkokillerna är placerade i rader om 3x2 st i bergtunnlar som fyllts med bentonit i Na-form. Den senare kan byta ut natrium mot kalcium och förmår alltså att ta kalcium från betongen som härigenom så småningom blir förstörd. Samtidigt minskas bentonitens svällningsförmåga och plasticitet. Beräkningar av detta transportförlopp återfinns i BILAGA 4. Det framgår härav att tidsbehovet för ett genombrott av kokillväggarna under de angivna förutsättningarna blir av storleksordningen 200 000 år.

5.3 Bestrålningseffekter på betong

Strålskador på betong börjar uppträda vid en dos av 10^{10} - 10^{11} rad vid γ -strålning (Hilsdorf 1976).

Uppgivna värden på radiolys av vatten - se punkt 3.2.2 - kan enligt uppgift från H Christensen omräknas till stråldos i rad genom multiplikation av antalet bildade mol O_2 med en faktor 10^7 och man finner då att vattenfasen totalt absorberar ca 10^9 rad. Då man kan anta att betongens absorption är av samma storleksordning som vattnets, alltså 10^9 rad kan man sluta sig till att ingen risk föreligger att betongen blir strålskadad. Viss reservation måste dock göras för de PWR-kokiller för vilka definitiva data inte föreligger.

5.4 Risk för sprängning p g a inre övertryck från gaser som bildats genom radiolys och från korrosionsprodukter

Det p g a radiolysgaserna uppkomna innertrycket har uppskattats i BILAGA 5. Det för BWR-kokillen erhållna värdet på ca 0,2 MPa tryck är inte farligt med hänsyn till kokillväggarnas dimensioner. Dessutom torde det yttre vattentrycket vara större då lagret ligger på 300-500 m djup. Detta argument hänger dock på frågan om grundvattennivåns eventuella framtida förändringar.

Risk för sprängning föreligger även p g a eventuell bildning av korrosionsprodukter vilka uppta minst den dubbla metallvolymen. Ett motsvarande expansionsutrymme bör därför finnas tillgängligt.

5.5 Yttre tryckpåverkan av grundvattnet

Kokillerna kommer att utsättas för ett yttre vattentryck motsvarande 300-500 mvp. Om kokillerna inte är helt utfyllda kan detta innebära risk för att kokillskalet kollapsar. Då kokillväggarna inte är helt vattentäta kommer en tryckutjämning med tiden att äga rum varför den verkliga påkänningen

beror på hur fort vattentrycket stiger efter det att förvaret stängts. Detta är inte känt. 30- och 40-cm kokillerna uppskattas tåla ett yttertryck av grovt räknat 4 resp 9 kp/cm² motsvarande 40 resp 90 mvp. Dessa värden har erhållits då kokill-locket beräknats som fritt upplagd platta med jämt fördelad last. Böjdragsbrotts-spänningar har approximerats till 20 kp/cm². Lockets dimensioner 1100 x 1100 x 240 mm resp. 900 x 900 x 300 mm. Inflödet i kokillen

$$S = 4\pi K \cdot \frac{r_y \cdot r_i}{r_y - r_i} \cdot \Delta p$$

blir vid dessa yttertryck med ett lågt antaget K-värde på 10^{-12} m/s samt $r_y = 0,8$ m och $r_i = 0,5$ resp 0,4 m för resp kokiller 21 och 29 l/kokill, år. Det antas som räkneexempel att kokillens innehåll av luft från början är ≈ 60 l motsvarande 500 kg metall. Vid resp övertryck har denna tryckts ihop till 12 resp 6 l, alltså minskat med 48 resp 54 l vilket motsvarar inpressad vätskevolym. Detta skulle grovt räknat kräva 2,3 resp 1,9 år. Grundvattennivån i förvaret får alltså i exemplet inte stiga snabbare än resp $\frac{40}{2,3} = 17$ och $\frac{90}{1,9} = 48$ m/år för att erforderlig tryckutjämning skall hinna komma till stånd. Om grundvattennivån väntas stiga snabbare är det gynnsamt ur denna synpunkt att kokillen fylls helt så att ingen luftvolym blir kvar. En sådan är å andra sidan motiverad som expansionsutrymme för eventuella korrosionsprodukter. En lösning vore att ha expansionsutrymmet vattenfyllt från början.

6 FÖRSLAG TILL UTFORMNING

Med hänsyn till att både bentonit och betong nedbryts vid kontakt med varandra föreslås att materia- len åtskiljs eller att enbart ett av materialen används.

Eftersom avfallet transporteras och delförvaras i betongkokiller är det lämpligt att bergrummen utfylls med betong.

Denna lösning har många fördelar jämfört med bentonitförslaget nämligen

- den betydligt större kalkmängden vid betongalternativet medför en avsevärt ökad tid innan det icke alkaliska grundvattnet når metallskrotet
- risk för sprängning p g a inre gastryck och svällande korrosionsprodukter är obefintlig
- risken för kollaps av kokillskalet p g a yttre vattentryck minskar betydligt, för övrigt spelar en kollaps vid denna utformning ingen roll.

Vissa nackdelar föreligger dock med betongalternativet:

- Tektoniska rörelser i berget kan medföra sprickor i betongen, vilket medför strömningsskanaler för grundvattnet. Risken för sådana sprickor kan minskas om ett tätt och plastiskt glidskikt appliceras mellan betong och berg.

Beträffande cementsorten bör man med hänsyn till uppvärmningen med åtföljande risk för sprickbildning välja ett cement med låg värmeutveckling - alltså ett LH-cement. Det bör emellertid framhållas att om det därvid inte blir fråga om portlandcement utan om slaggcement kommer porvattnet p g a detta cements höga halt av sulfider - omkring 0,7% - att få en väsentligt högre sulfidhalt än vad som förutsattes i avsnitt 3.2.1.

Detta kommer att minska metallstadiets varaktighet i förhållande till gjorda beräkningar. Det bör därvid påpekas att lösligheten för nickelsulfid är vä-

sentligt lägre än för nickelhydroxid över större delen av det aktuella pH-området (Neretnieks et al, 1978, diagram 1) och att man därför kan räkna med en troligen väsentligt lägre utdiffusion från förvaret så länge som sulfidhalten är hög i porvattnet. Skulle det osannolika inträffa att det uppstår oxiderande betingelser i förvaret kan sulfider komma att oxideras till sulfat men någon sänkning av pH kan ändå inte komma till stånd p g a den stora mängden kalk i betongen. Det är därför svårt att se att närvaro av sulfider skulle utgöra någon olägenhet, i synnerhet som problemet med metallstadiets varaktighet inte kunnat besvaras (annat än för rent nickel) p g a ovissheten om hastigheten hos den vätgasutdrivande korrosionen hos legeringarna.

7 SAMMANFATTNING

En konservativ beräkning av korrosionshastigheten har utförts för aktiverade metalldelar som ingjuttits i betong och omges av kvarts/bentonitblandning i ett bergförvar på 3-500 meters djup. I rapporten behandlas utlösningen av aktiva beståndsdelar ur kokillen, om denna är intakt. Betongens beständighet mot förekommande strålning har undersökts.

Vidare har försök att bedöma kokillens tillstånd med hänsyn till kalkurlakning och eventuell inre gasutveckling utförts.

Resultaten visar

- att hastigheten för metalldelarnas nedbrytning är låg, c:a $2 \cdot 10^{-4}$ kg Ni per år och kokill, såvida inte vätgasutdrivande korrosion uppstår
- att den maximala aktiviteten på ytterytan uppgår till mindre än 4 nCi/g för 30 cm och mindre än 2 nCi/g för 40 cm kokiller.

- att transporten av nickelföreningar genom en oskadad kokillvägg uppgår till ca 10^{-5} kg metall per år och kokill vilket för tider över 1000 år motsvarar ett aktivitetsläckage på ca 10 μ Ci/år, kokill

Beträffande kokillens beständighet:

- förekommande strålning från metallskro- tet medför inga skador på betongen
- tiden för en väggenomträngning p g a kalkurlakning blir ca 200 000 år
- att sprängningsrisken av kokill p g a ut- vecklade radiolytgaser knappast förelig- ger
- att ingen risk för kokillförstöring p g a yttre tryck från grundvattnet behöver fö- religga om antingen expansionsutrymmet i kokillen är vattenfyllt från början eller om grundvattennivån inte tillåts stiga för snabbt.

Slutligen framförs ett alternativt förslag som går ut på att bentonit/kvartsbehandlingen ersätts med betong. För- och nackdelar med detta förslag berörs i korthet.

Stockholm den 14 juli 1978

CEMENT- OCH BETONGINSTITUTET

Lars Rombén
Lars Rombén

Kyösti Tuutti
Kyösti Tuutti

vidi: *Nils Petersens*
Nils Petersens

REFERENSER

- d'Ans. Lax. "Taschenbuch für Chemiker und Physiker".
BdI. Dritte Auflage Springer-Verlag Berlin 1967.
- Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. "Transport
Phenomena". §17.5. John Wiley & Sons Inc. New York
1960.
- Crank J. "The Mathematics of Diffusion". Second
edition, sid 49-50, formel 4.22. Clarendon Press
Oxford 1975.
- Hilsdorf H K, Kropp J, Koch H-J. "Deutscher Ausschuss
für Stahlbeton. Heft 261 (1976).
- Hodgman C D et al (eds). "Handbook of Chemistry
and Physics". 38th ed. Chemical Rubber Publishing
Co 1956-57.
- Matsuzura H, Ito A. Annals of Nuclear Energy 4
(1977) 465.
- Neretnieks I. "Transport of Oxidants and Radionuclides
through a Clay Barrier". Kemisk Apparatteknik KTH.
1978-02-20.
- Neretnieks I, Andersson K, Henstam L. "Utläckning av
Ni-59 från ett bergförvar". Kemisk Apparatteknik,
KTH. 1978-04-24.
- Rennerfelt J, Jacks G. "Sannolik sammansättning av
grundvatten i ett urberg på större djup". Stockholm
7 mars 1978.
- Shreir L L. "Corrosion". Vol 1 Newness-Butterworth
London-Boston 1976.
- Taylor H F W. J. Chem. Soc. 1950, 3682; se även
Greenberg S A, Chang T N. J. Phys. Chem. 69 (1965)
182.
- Ushiyama H, Goto S. The VI Int. Congr. Chemistry of
Cement, Moscow Sept 1974.
- Wranglén G. "Metallens korrosion och ytskydd".
Almqvist & Wiksell, Stockholm 1967.

GRUNDTVATTNETS SAMMANSÄTTNING

Följande tabellvärden är hämtade från J Rennerfelt, G Jacks "Sannolik sammansättning av grundvatten i urberg på större djup". Stockholm 7 mars 1978.

Analys	Sort	Sannolikt Intervall	Minivärde ^{x)}	Maxvärde ^{x)}
Ledningsförmåga	µS/cm	400-600		1100
pH		7,2-8,5		9,0
KMnO ₄ -föbr.	mg/l	20-40		50
COD _{Mn}	"	5-10		12,5
Ca ²⁺	"	25-50	10	60
Mg ²⁺	"	5-20		30
Na ⁺	"	10-100		100
K ⁺	"	1-5		10
Fe-tot	"	1-20		30
Fe ²⁺	"	0,5-15		30
Mn ²⁺	"	0,1-0,5		3
HCO ₃	"	60-400		500
CO ₂	"	0-25		35
Cl ⁻	"	5-50		100
SO ₄ ²⁻	"	1-15		50
NO ₃ ⁻	"	0,1-0,5		2
PO ₄ ³⁻	"	0,01-0,1		0,5
F ⁻	"	0,5-2		8
SiO ₂	"	5-30		40
HS ⁻	"	<0,1-1		5
NH ₄	"	0,1-0,4		2
NO ₂	"	<0,01-0,1		0,5
O ₂	"	<0,01-0,07		0,1

x) Uppskattad sannolikhet för att minivärdet ej skall underskridas resp. maxvärdet ej överskridas är 95%.

UPPSKATTNING AV HASTIGHETER FÖR TRANSPORTSTYRDA
REAKTIONER

Beräkningar har gjorts för en placering av kokillerna i rader om 3 x 2 enl Fig B2-1 och avser dels tillförsel via vattenflödet av SO_4^{2-} , HS^- och ev O_2 genom bentoniten fram till kokillytan dels transport genom kokillväggen. Dessutom beräknas motsvarande uttransport för eventuellt bildat väte samt för nickeljoner som gått i lösning. Motståndet R_{bent} i bentoniten beräknas som "filmmotstånd" och motståndet R_{betong} i kokillen som ett rent diffusionsmotstånd. Totala motståndet $R = R_{\text{bent}} + R_{\text{betong}}$ och diffusionsflödet blir = totala koncentrationsdifferensen/R.

Uppskattning av filmmotståndet i bentoniten

Vätskeströmningen i berget antas fortsätta in i bentoniten och passera kokillraden varvid det uppstår ett materiebbyte p g a ett koncentrationsfall som sträcker sig från kokillväggen ett stycke ut i bentoniten. Detta avstånd - filmtjockleken - bestäms av hur snabbt vätskan förnyas ovanför kokillytan och beror alltså på dennas lineära strömningshastighet. Beräkningen av filmmotståndet sker enl Bird el. al. (Jmf även Neretniecks "Transport ...")

$$\Delta C_{\text{film}} = R_{\text{bent}} \cdot \text{transporthastigheten}$$

där
$$R_{\text{bent}} = \left(\text{arean} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{D}{t}} \right)^{-1}$$

$$t = \frac{\text{ytans längd i strömningsriktningen}}{u_p}$$

$$u_p = \frac{\text{strömningsflödet}}{\text{porositeten}}$$

$$D = \text{diffusionskoefficienten}$$

och
$$\Delta C_{\text{film}} = \text{koncentrationsfallet över filmen}$$

Följande värden har använts

- 1) Arean. Vid den angivna kokillplaceringen kommer av sex kokiller 10 kokillytor att exponeras utåt. Medelarean per kokill blir alltså $10 \times 1,6^2 / 6 = 4,27 \text{m}^2 / \text{kokill}$.
- 2) Ytans längd i strömningsriktningen. Minsta värde $= 2 \times 1,6 = 3,2 \text{m}$
- 3) Vätskeflödet. Detta är i berget $0,2 \text{l/m}^2, \text{år}$. Strömningen i bentoniten bestäms av förhållandet mellan dennas och bergets permeabiliteter. Uppgivna resultat från laboriemätningar visar att packad bentonit kan vara mycket tätare än berg men osäkerheter som är förknippade dels med de praktiska möjligheterna att packa bentoniten på platsen dels med bentonitens volymbeständighet och kemiska beständighet vid kontakten med den alkaliska kalciumhydroxidlösningen som avges från betongen har gjort att de båda permeabiliteterna i det följande har antagits vara lika. Därmed kan även strömningsflödet i bentoniten sättas lika med den i berget d v s $0,2 \text{l/m}^2, \text{år}$. I verkligheten torde emellertid flödet i bentoniten bli något lägre av den anledningen att strömningen i berget enbart äger rum i sprickor. Härigenom får flödet i bentoniten ett reducerat tvärsnitt nära sitt ut- och inlopp vilket ökar motståndet. Om sprickavståndet är litet jämfört med tunnelns diameter är emellertid denna effekt marginell. En stark minskning av flödet i bentoniten skulle emellertid erhållas om sprickorna fylls med bentonit.
- 4) Porositeten. Denna avser en kvartssand - bentonitblandning vars totala porositet har uppgivits vara omkring 40 %. Porositetsvärdet behövs för att översätta volymflödet till lineär hastighet och

det är därför väsentligt att i räkningarna använda bara den del av porositeten som är tillgänglig för vätskeströmning. Denna är inte känd och det ansätts därför ett värde på 10 % d v s på 0,1 för denna porositet.

- 5) Diffusionskonstanterna. Diffusionskonstanterna i bentonit och berg har satts till $\frac{1}{10}$ av motsvarande värden i vatten.

För väte är detta $3,81 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ vid 20°C (d'Ans-Lax. 1967, sid 1-1443) och för övriga är värdet omkring $2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Härav erhålls $D_{\text{H}_2} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ och $D_{\text{övriga}} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Insättning av ovanstående värden ger

$$\text{för } \text{SO}_4^{4-}, \text{HS}^-, \text{O}_2 \text{ och } \text{Ni}^{2+} \quad R_{\text{bent}} = 105 \text{ år/m}^3$$

$$\text{för } \text{H}_2 \quad " = 74 "$$

Uppskattning av diffusionsmotståndet i kokillväggen

Kokillen approximeras med en sfär vars inner- och ytterdiametrar $2r_i$ och $2r_y$ sätts lika med kokillernas inner- resp yttermått. Man får att koncentrationsfallet $\Delta C_{\text{vägg}} = R_{\text{betong}}$. diffusionsflödet

$$\text{där} \quad R_{\text{betong}} = \frac{1}{4\pi D} \cdot \frac{r_y - r_i}{r_y r_i}$$

och där D är diffusionskonstanten. När kokillerna är anordnade i rader om 3×2 kan man bortse från utflödet från mellanrummen mellan angränsande kokiller. Då i en rad bara 10 av totalt 36 ytor exponeras utåt blir motståndet $\frac{36}{10}$ av ovanstående värde

Erforderliga värden:

$$2r_y = 1,6 \text{ m}$$

$$2r_i = 1,0 \text{ m} \quad (30 \text{ cm kokiller})$$

D. Värden på diffusionskonstanter i betong är sällsynta men för cementpasta har Ushiyama 1974 för natriumjoners diffusion erhållit värden på $(1,7 \dots 2,95) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ vid försök under stationära betingelser. Dessa värden är omkring 3 tiopotenser lägre än värdena i rent vatten. Diffusion av flervärda joner är i regel långsammare. I det följande användes ett schablonvärde på $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ för samtliga diffunderande ämnen utom H_2 som ges värdet $2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Insättning ger

$$\text{för } \text{SO}_4^{2-}, \text{HS}^-, \text{O}_2 \text{ och } \text{Ni}^{2+} \quad R_{\text{betong}} = 680 \text{ år/m}^3$$

$$\text{för } \text{H}_2 \quad " = 340 \quad "$$

Totala motståndet och transportmängderna

$$\begin{array}{l} \text{Totala motståndet } R = R_{\text{bent}} + R_{\text{betong}} \text{ blir för} \\ \text{för } \text{SO}_4^{2-}, \text{HS}^-, \text{O}_2 \text{ och } \text{Ni}^{2+} = 105 + 680 = 785 \text{ år/m}^3 \\ \text{för } \text{H}_2 \quad \quad \quad \quad \quad \quad 74 + 340 = 414 \quad " \end{array}$$

Tydligen ligger huvuddelen av motståndet i kokillväggen.

Koncentrationer. Här har följande värden använts:

för sulfatjoner	50 mg SO_4^{2-} /l	enl Rennerfelt 1978
svavelväte (som HS^-)	5 mg HS^- /l	" " "
syre (reducerande miljö)	0,1 mg O_2 /l	" " "
syre (oxiderande miljö)	8,8 mg O_2 /l	motsvarande luftmättad lösning
vätgas (utdiffusion)	0,29 H_2 /l	se not på sid 6 "vätgaskoncentration vid.."
nickeljoner	10 mg Ni^{2+} /l	enl Neretniecks et al "Utläckning "

För omräkning till korroderad mängd metall har följande reaktioner använts



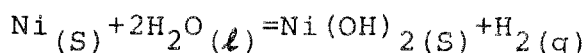
Följande värden på materialtransporterna per kokill erhålles:

SO_4^{2-}	inflöde	$6,4 \cdot 10^{-5}$ kg SO_4^{2-} /år	motsv	$1,6 \cdot 10^{-4}$ kg Ni per
HS^-	"	$6,4 \cdot 10^{-6}$ kg S^- /år	"	$1,1 \cdot 10^{-5}$ "
O_2 (red)	"	$1,3 \cdot 10^{-7}$ kg O_2 /år	"	$4,7 \cdot 10^{-7}$ "
O_2 (ox)	"	$1,1 \cdot 10^{-5}$ "	"	$4,1 \cdot 10^{-5}$ "
H_2	utflöde	$7 \cdot 10^{-10}$ kg H_2 /år	"	$2 \cdot 10^{-8}$ "
Ni^{2+}	"	-	"	$1,3 \cdot 10^{-5}$ "

Not.

Vätgaskoncentration vid vätgasutvecklande korrosion av rent nickel.

Enligt Pourbaix-diagrammet är rent nickel immunt mot vätgaskorrosion vid pH-värden över 6 (Wranglén 1967), se FIG B2-2. Linjerna i detta diagram gäller emellertid för vissa antagna koncentrationer i vattenlösningen varför en separat beräkning görs för den speciella reaktionen



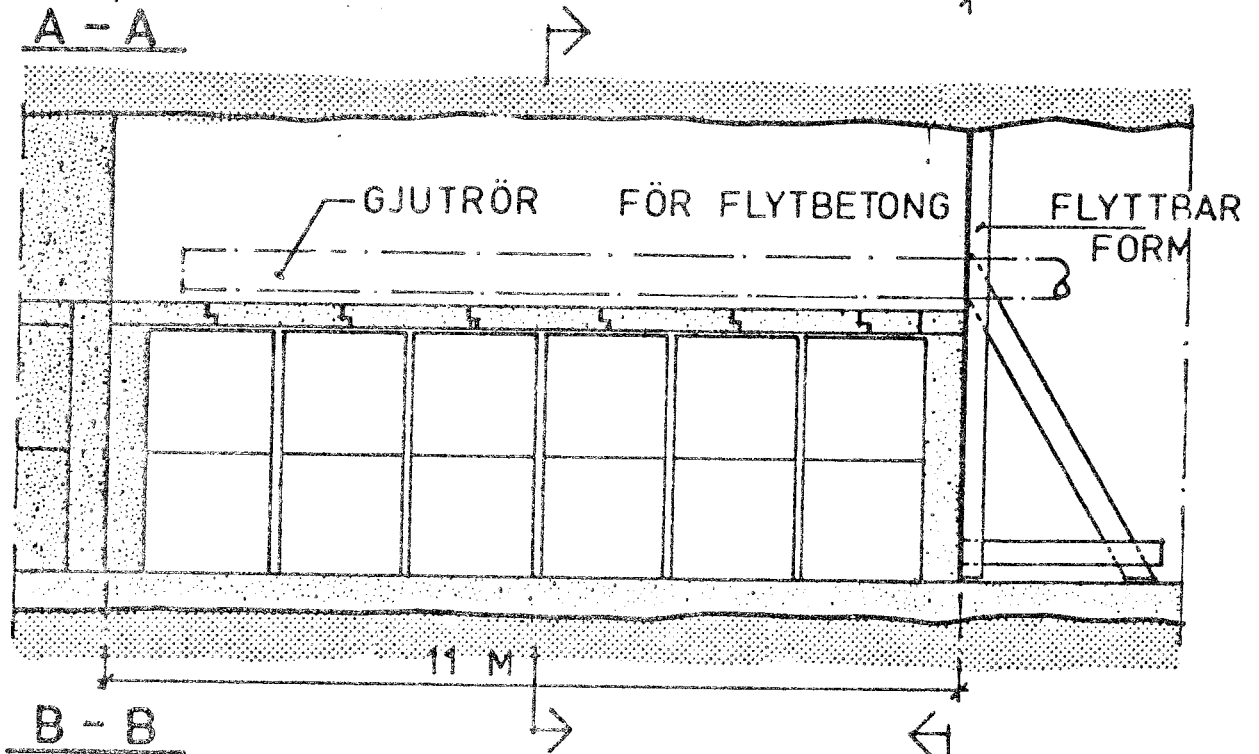
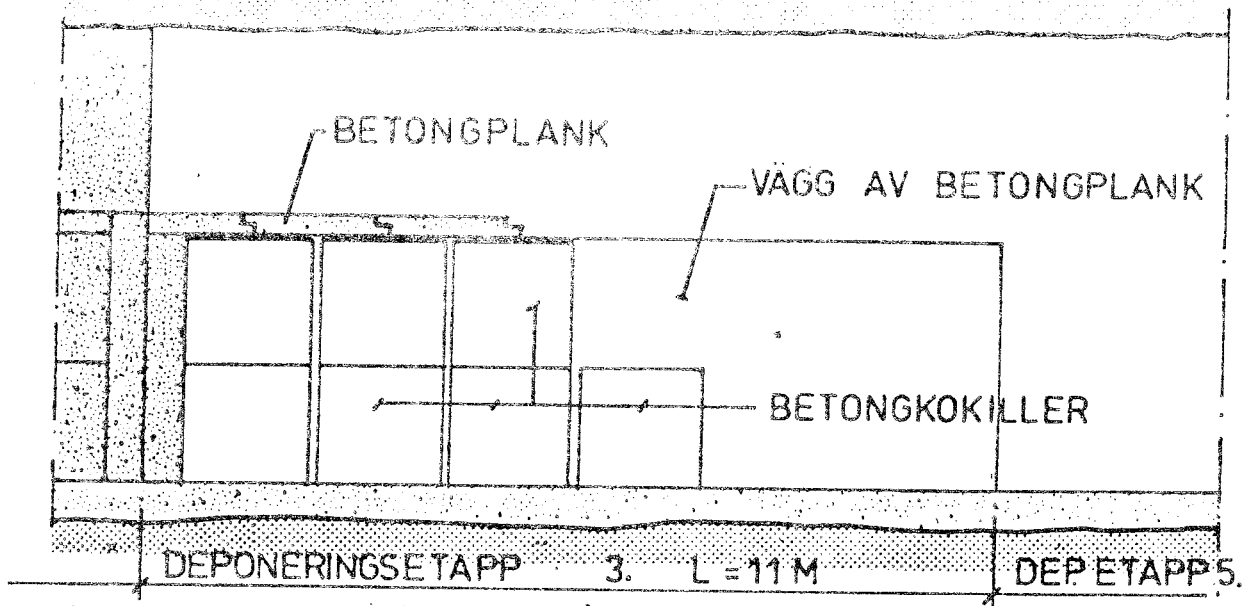
Enligt Handbook of Chemistry and Physics är de fria bildningsenergierna för vatten -56,69 och för $\text{Ni(OH)}_2 \text{ (s)}$ -108,3 kcal/g-mol. Vidare är fria energin för vätgas med trycket $p_{\text{H}_2} \text{ atm} = RT \ln p_{\text{H}_2}$. För reaktion blir alltså $\Delta G = -108,3 + RT \cdot \ln p_{\text{H}_2} - 2 \times (-56,69) - 0$.

Vid 25°C blir vid jämvikt $p_{\text{H}_2} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ atm}$.

Är alltså vätgasen löst i vattnet till en mängd motsvarande ett högre tryck kan en vätgasutvecklande reaktion inte äga rum. Är vätgasens halt lägre kan reaktionen ske men dess hastighet begränsas då av hur snabb vätgasen kan transporteras bort från metallytan.

Koncentrationen motsvaras av den koncentration av i vattnet löst vätgas som står i jämvikt med det ovan beräknade trycket. Enligt Handbook of Chemistry and Physics är vätgasens löslighet i vatten vid 25°C = 0,0001535 g per 100 ml vatten när totala gastrycket (vätgas+vattenånga) är 760 mm Hg. Vid ovan uträknade tryck löses om Henry's lag gäller

$$C = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0001535 \cdot \frac{1000}{100} = 0,29 \text{ } \mu\text{g H}_2/\ell$$



A-A = FÖRVAR VID DEPONERING

B-B = FÖRVAR EFTER DEP

1 ST FÖRVAR INNEHÅLLER

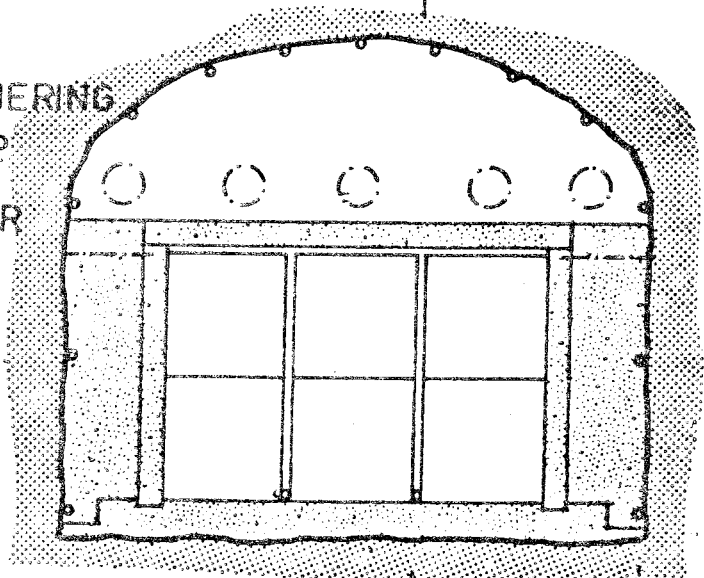
36 BETONGKOKILLER,

DETTA MOTSVARAR

3/4 ÅRS BEHOV.

FÖR 30 ÅRS FÖRVARING

BEHÖVS 40 FÖRVAR.



C-C

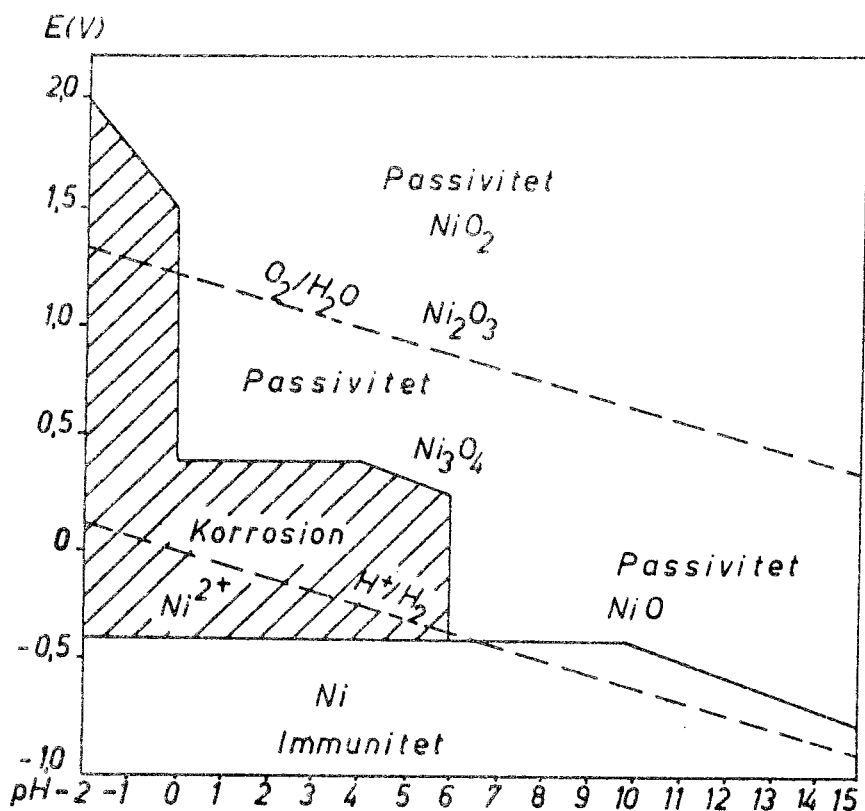


FIG B2.2. Ur Wranglén G. Metaller's korrosion och ytskydd.

UPPSKATTNING AV TIDRYMD INNAN KOKILLYTAN BLIR
AKTIV

Aktiviteten i metallerna går i lösning i porvätskan och transporteras genom kokillväggarna fram till dessas ytteryta.

Huvudsakliga transportsättet är i detta fall diffusion men en konvektiv transport kan äga rum om kokillen får torka. Efter placering i förvaret antas ingen uttorkning äga rum.

Beräkningarna skall egentligen omfatta samtliga aktiva nuklider som finns i avfallet. Detta skulle innebära ett mycket omfattande arbete och uppgiften har därför begränsats till aktiviteten från Ni-delen. Bidraget från Co-60 kan försummas på grund av dess korta halveringstid (5,3 år). Reservation för PWR-kokillen gäller även för detta avsnitt.

Beräkningsmetod

Aktivitetens spridning från kokillväggens insida till dess utsida beräknas som ett diffusionsfall. Kokillens utseende framgår av fig B3-1. Det antas att porlösningens koncentration på väggens insida är konstant = C_{in} motsvarande den aktuella aktiviteten hos mättad lösning av $Ni(OH)_2$. För väggens yttersida antas att diffusionsflödet = 0 vilket är ett konservativt valt randvillkor. Kokillväggens tjocklek betecknas med a , x är en löpande koordinat $0 \leq x \leq a$, t är tiden och $C=C(x,t)$ är aktivitetens koncentration i porlösningen. Man får förutom diffusionsekvationen följande

Begynnelsevillkor : $C(x,0)=0$

Randvillkor, utsidan $x=0$. Snabbaste koncentrationsökningen erhålles i fallet med helt isolerad ytteryta:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

insidan $x=a$ $C = C_{in}$

Detta problem löses lättast för fall med symmetrisk dubbelvägg - $a \leq x \leq a$ och $C = C_{in}$ för $x = \pm a$. Lösningen finns

hos Crank 1975, sid 49, punkt 4.3.3. Man får enligt formel (4.22) med Crank's beteckningar:

$$C_0 = 0 \quad ; \quad C_1 \text{ och } C_2 = C_{in} \text{ och } l = 2a \text{ att}$$

$$C(0,t) = C_{in} \cdot \left[1 - \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{2m+1} \cdot e^{-D \cdot (2m+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot t / (2a)^2} \right]$$

Detta är alltså sambandet mellan aktivitetens koncentration i ytterytan $C(0,t)$ och tiden. Ingen hänsyn har därvid tagits till aktivitetens avklingande men detta kan göras genom tillfogande av en faktor som motsvarar aktivitetensnedgången.

Erforderliga siffervärden

D

Inget värde för nickels diffusionskonstant i betong är känt men den är med största sannolikhet mindre än för alkalijoner vilkas diffusionskonstant i cementpasta bestämts under stationära försöksbetingelser till $1,7-2,95 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Ushiyama 1974).

I det följande väljes värdet $3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (jmf för övrigt BILAGA 4 där värdet $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ använts för kalcium, bentonit och i kalkurlakad betong, jmf även Neretniecks et al 1978). Nämnas kan att man för det kemiskt närbesläktade grundämnet kobolt angivit värden på $10^{-12}-10^{-9} \text{ cm}^2/\text{dygn} = 10^{-21} \dots 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$ för lakningskoefficienten (citerat av Matsuzuru 1977). Ett så lågt värde beror på att Co absorberas i cementpastan och detta värde kunde därför inte användas vid beräkningen av det stationära fallet i bilaga 2 men det kan anses ha viss relevans för bedömning av marginalen vid beräkningen av hur snabbt kokillytan blir aktiv.

a

Vägg tjockleken är 30 resp 40 cm.

C_{in}

För innerlösningens koncentration C_{in} antages en aktivitet motsvarande mätningvärdet för $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Det är dock inte troligt att porlösningen blir mättade under tidrymder på ≈ 100 år varför detta val är konservativt.

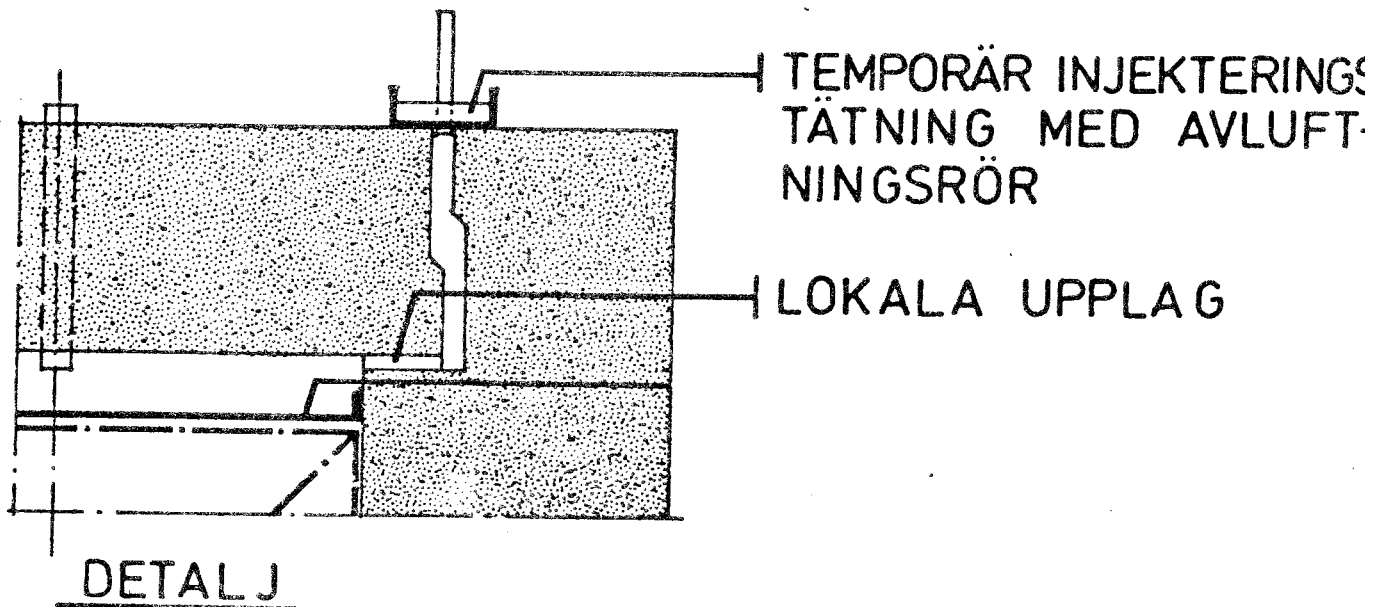
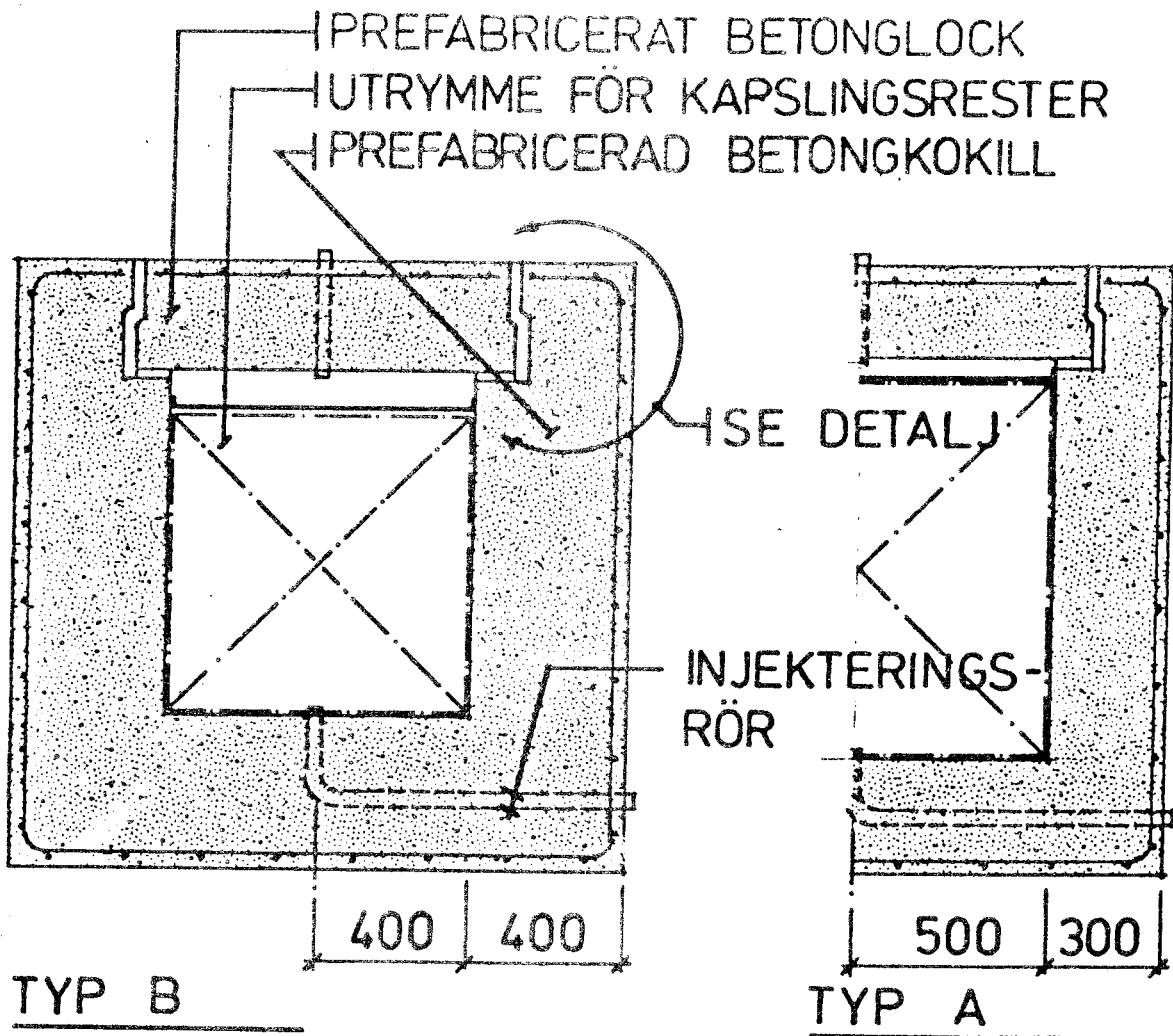
Lösligheten för $\text{Ni}(\text{OH})_2$ i oskadad betong med pH-område på 12,6-14 är 0,1-10 mg/l (Neretniecks et al 1978). Lösligheten kan vara högre om komplexbildande substanser finns i vattnet. Dessa finns dock inte inuti kokillen och som övre gräns sätts därför = 10 mg Ni/ = 10^{-2} kg Ni/m³.

Kokillen har efter ingjutningen en aktivitet av 7200 Ci som huvudsakligen härrör från Ni-63 (β , halveringstid 85 år) och från Co-60 (γ , halv.tid 5,3 år).

Aktiviteten har efter 1000 år gått ner till $\frac{3}{200} \cdot 7200 = 108$ Ci som huvudsakligen härrör från Ni-59 (β , halvtid 75 000 år). Då Ni-59 inte ändras nämnvärt på 1000 år kan man anta att denna även vid ingjutningen var 108 Ci och att återstoden 7092 Ci bestod av Ni-63. Denna aktivitetsmängd finns i ca 100 kg Ni. Porlösningens aktivitetskoncentration blir alltså 0,0108 Ci Ni-59/m³ och 0,7092 Ci Ni-63/m³. Antager man att betongen innehåller 400 kg cement/m³ och har vct 0,5 blir porlösningens volymen 200 l/m³ varför aktivitetskoncentrationen blir 0,00108 Ci Ni-59 och 0,07092 Ci Ni-63 per ton betong eller 1,08 resp 70,92 n Ci/g. C_{in} blir alltså om avklingningen inkluderas

$$1,08 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{75000} t} + 70,92 e^{-\frac{\ln 2}{85} t} \quad \text{n Ci/g. (t i år)}$$

Kokillytans aktivitet återges i Fig B3-2 för 30- och 40-cm kokiller. Här återges även de individuella bidragen från Ni-59 och Ni-63. Som jämförelse har inlagts nivån 2 n Ci/g vilket utgör IAEA:s definition av begreppet "radioactive material" (Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, 1973 Revised Edition, IAEA, Vienna 1973, punkt 134). Som synes kommer 30-cm kokillernas yta att i denna mening vara aktiv mellan 100 och 400 år och aldrig att överskrida gränsvärdet med mer än en faktor 2. 40-cm kokillernas ytor når aldrig upp till gränsvärdet.



TYP	ANT.	VIKT ^{*)}	ANM.
A	445	7,4t	BWR - BOXAR
B	715	8,6t	ÖVRIGT

^{*)} (tom kokill)

BETONGKOKILLER FÖR KAPSLINGSRESTER

Ni - aktiviteten på kokillytan vid olika tider

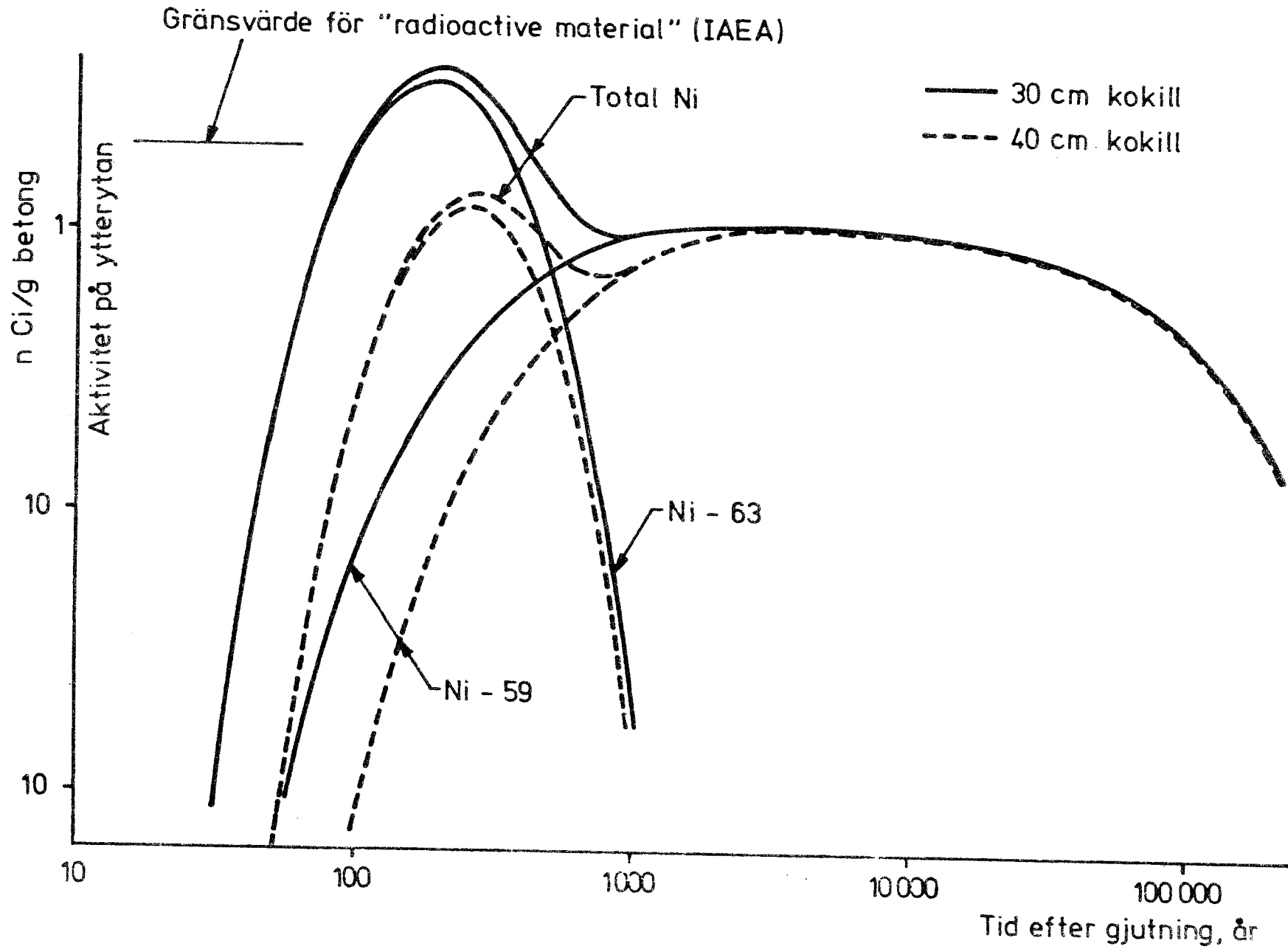


FIG B3-2

DIFFUSION AV KALK UR BETONGKOKILLER OMGIVNA AV BENTONIT

1. Beräkningsmetod

Problemet behandlas som 1-dimensionellt, 2-dimensionellt cylindersymmetriskt och som 3-dimensionellt sfäriskt symmetriskt fall.

En fullständig matematisk behandling av diffusionsfallet genomförs inte utan istället görs en approximation som går ut på att man betraktat fallet som kvasi-stationärt dvs man antar att koncentrationsprofilen i varje ögonblick är densamma som den vore i ett stationärt fall med fasta ränder. Detta är en god approximation i det fall när mängden av det diffunderande ämnet i lösning är liten jämfört med motsvarande mängd i bunden form. Så är fallet eftersom porlösningens Ca-koncentration är låg jämfört med koncentrationen av Ca i betong och i kalkmättad bentonit.

- a) Först behandlas fallet med stationärt flöde mellan två fixa n-dimensionella "sfärer" ($n=1,2,3$) med radierna r_0 och r och med randkoncentrationerna c_0 och c mol $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{cm}^3$

$$\text{Fick's lag} \quad q = -D \frac{\partial c}{\partial r}$$

där c =konc. av $\text{Ca}(\text{OH})_2$, r =radien, D =diffusionskoefficienten och q =diffusionsflödet i mol $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per m^2 tvärsnittsarea och sekund.

$$S = -\omega_n r^{n-1} \cdot D \frac{\partial c}{\partial r} \quad \text{mol Ca(OH)}_2 \text{ s}^{-1}$$

där $\omega_n r^{n-1}$ är ytan av den n-dimensionella sfären
($\omega_1=2$, $\omega_2=2\pi$ och $\omega_3=4\pi$)

$$\text{Integration ger } S = -\omega_n D \cdot \frac{c_1 - c_0}{\Phi_n(r)}$$

$$\text{där } \Phi_n(r) = \int_{r_0}^r \frac{dr}{r^{n-1}} = \frac{1}{n-2} \left[r_0^{-(n-2)} - r^{-(n-2)} \right]$$

$$\text{för } n \neq 2 \text{ och } = \ln \frac{r}{r_0} \text{ för } n = 2$$

- b) Här betraktas fallet med diffusionstransport av kalk från en betongsfär vars ursprungsradie varit r_0 men som vid tiden t har radien $r_1 (< r_0)$ genom betongrestskiktet och genom Ca^{2+} -mättad bentonitmassa fram till en radie r_2 där kalken tänks absorberas av ännu oangripen bentonit. Vid tiden 0 är $r_2 = r_0$.

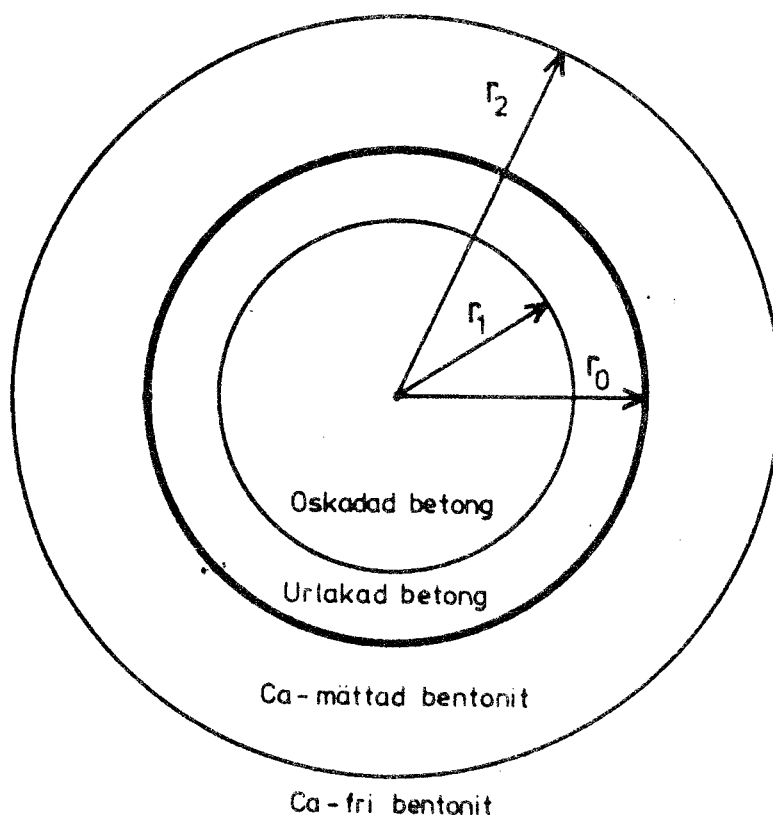


FIG B4-1

Man får följande ekvationer om man antar att flödena kan approximeras ur de stationära värdena enligt 1.

$$\text{Flödet från } r \text{ till } r_2: S = -\omega_n D_1 \frac{c_1 - c_0}{\phi_n(r_1)} = -\omega_n D_2 \frac{c_2 - c_0}{\phi_n(r_2)}$$

där D_1 och D_2 är diffusionskoefficienterna i urlakad betong resp i kalkmättad bentonit.

$$\text{Fronthastigheterna bestäms av } S = -C_1 \omega_n r_1^{n-1} \frac{dr_1}{dt} = C_2 \omega_n r_2^{n-1} \frac{dr_2}{dt}$$

där c_1 är betongens halt av urlakningsbar Ca^{2+} och c_2 är bentonitens absorptionskapacitet för Ca^{2+} .

$$\text{Man får att } S = -\omega_n \frac{c_1 - c_2}{\phi_n(r_1)/D_1 - \phi_n(r_2)/D_2} =$$

$$-C_1 \omega_n r_1^{n-1} \frac{dr_1}{dt} = C_2 \omega_n r_2^{n-1} \frac{dr_2}{dt}$$

$$\text{eller } \frac{C_1}{D_1} \int_{r_0}^{r_1} \phi_n(r_1) r_1^{n-1} dr_1 + \frac{C_2}{D_2} \int_{r_0}^{r_2} \phi_n(r_2) r_2^{n-1} dr_2 =$$

$$= (c_1 - c_2) \cdot t$$

$$\text{Sättes } \psi_n(r) = \int_{r_0}^r \phi_n(\rho) \rho^{n-1} d\rho = \frac{1}{n} r^{n-1}.$$

$$\phi_n(r) = \frac{1}{2n} (r^2 - r_0^2) \quad \text{så får man}$$

$$\frac{C_1}{D_1} \psi_n(r_1) + \frac{C_2}{D_2} \psi_n(r_2) = (c_1 - c_2) \cdot t$$

$$\text{Vidare får man } C_1 (r_1^n - r_0^n) + C_2 (r_2^n - r_0^n) = 0$$

(1) och (2) bestämmer sambandet mellan r_1 , r_2 och t .

2. Antagna utgångsdata

c_1 är den Ca^{2+} -koncentration som är i jämvikt med betongen. Här kunde man använda för den fria kalciumhydroxidens löslighet 0,02 mol/l men då den fria kalken utgör bara omkring 10-15% av cementvikten torde det vara riktigare att sätta in ett värde motsvarande lösligheten av kalciumsilikathydraterna dvs 0,002 mol/l $c_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kmol Ca(OH)}_2/\text{m}^3$ (Taylor 1950).

- c_2 är Ca^{2+} -koncentrationen i jämvikt med Na-bentonit/Ca-bentonit och antas vara = 0.
- C_1 är betongens halt av Ca^{2+} (exklusive kalciumhydroxid).
Antag att det finns 400 kg cement/ m^3 betong med 65 % CaO i cementet. Det finns alltså
- $$400 \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{85 \cdot 90}{100} \approx 220 \text{ kg CaO/m}^3 \text{ betong}$$
- $$= 4,0 \text{ kmol silikat- och aluminatbunden Ca}^{2+}/\text{m}^3 \text{ betong.}$$
- C_2 Bentonitblandningen består till 90 % av kvartssand och till 10 % av bentonit med en utbyteskapacitet av ca 1 mekv/g. 1 cm^3 bentonitblandning som torde väga omkring 1,6 g, innehåller $\frac{10}{100} \cdot 1,6 = 0,16$ g bentonit som kan ta upp $10^{-3} \cdot 0,16 \text{ ekv Ca} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3}$.
 $0,16 \text{ mol Ca}^{2+}$. $\therefore C_2 = 0,08 \text{ kmol Ca/m}^3$ bentonitblandning.
- D_1, D_2 Diffusionskonstanterna för $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i kalkurlakad betong respektive i kalkmättad bentonitblandning antas båda vara $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.
- r_0 Kokilldimensionerna är
- | | | | | | | |
|--------------|---|-----|-----|-----|-----|---|
| Yttermått | : | 2 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | m |
| Godstjocklek | : | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | m |

Då de placeras i parallella rader om 3x2 kokiller kan man anse att radien vid denna placering motsvaras av halva minsta radkantlängden d v s av yttre kokillmättet.

Erforderlig tid i år för olika angreppsdjup

Diameter	2 x 2 m			2 x 1,6 m		
	1	2	3	1	2	3
Lakn.djup 20 cm	320 000	100 000	60 000	320 000	90 000	50 000
30 "	700 000	180 000	95 000	700 000	160 000	80 000
40 "	1 300 000	260 000	130 000	1 300 000	230 000	110 000
60 "	3 000 000	440 000	200 000	3 000 000	370 000	160 000

Då kokillerna ordnas i rader torde det tvådimensionella fallet komma sanningen närmast och motsvara en väggombrytning på omkring 300 000 år.

Vid dessa räkningar har ingen hänsyn tagits till vätskeflödet i bentoniten. En beräkning av ett filmmotstånd i bentoniten där effekten av kalciumjonabsorption i bentoniten försummats gav för 30 cm kokillen 190 000 och för 40 cm 250 000 år. Dessa båda värden är av samma storleksordning som de som erhållits enligt diffusions-absorptionsmodellen.

För ändstående kokiller är det 3-dimensionella fallet troligen mer realistiskt och värdet blir här omkring hälften. Eventuellt kan man undvika denna svårighet genom att placera inaktiva kokiller i radändarna.

INNERTRYCK I KOKILLEN SOM FÖLJD AV GASBILDNING VID
RADIOLYS

De under punkt 3.2.2 angivna värdena på gasutvecklingen är som nämnts beräknat utan hänsyn till rekombinationsreaktioner och är med största sannolikhet för höga. Följande beräkningar utgår emellertid från dessa värden och är därför såtillvida på säkra sidan.

På grund av osäkerheten med PWR-kokillen bör det följande dock hava uppfattas som räkneexempel.

De bildade gasernas volym kan beräknas ur de på sid 7 angivna molten. Efter 10 000 år utvecklas 36 mol O_2 + 2•36 mol H_2 som vid NTP intar en volym på 2,4 m³. Totalt utvecklas 8,3 m³. På ett djup av 300 m under grundvattennivån skulle motsvarande volymer bli 80 resp 275 l. Om en fri volym av denna storlek finns tillgänglig i kokillen sker ingen tryckökning men om så inte är fallet eller om avståndet till grundvattennivån skulle bli mindre måste man räkna med att få ett alltmer ökande tryckfall över kokillväggen. Denna tryckstegring motverkas emellertid av att gaserna på g a sitt tryck kan pressa ut en del av porlösningen ur kokillerna om det hydrostatiska trycket utanför är lägre och sedan i gasform passera kokillväggen om trycket blir högre än väggens s k "bubbling pressure". Värdet på detta är emellertid inte känt. Gaserna kan dessutom genom att lösa sig i porvattnet diffundera genom kokillväggen. Om man ansätter rimliga värden på diffusionskoefficienterna kan man uppskatta storleksordningen av det tryck som kan uppstå inuti kokillen.

Beräkningar för tiden fram till 100 år

Om metallerna oxideras kräver de bildade produkterna ett expansionsutrymme för att inte kokillen skall spricka. Detta utrymme antas i det följande ha en

volym som åtminstone motsvarar metallernas sammanlagda volym som är maximalt c:a 60 l räknat på 500 kg metall. Den utvecklade gasmängden för tiden 40-100 år är 1,8 mol O_2 + 2 1,8 mol H_2 d v s 5,4 mol gas motsvarande ungefär 120 l vid normalt tryck och temperatur.

Om man antar att expansionsutrymmet är vätskefyllt från början vilket kan vara motiverat med hänsyn till risken för implosion i samband med att förrådet vattenfylls bestäms innertrycket av hur fort vätskefasen kan pressas ut genom väggarna. Uppskattning av hastigheten hos detta förlopp har beräknats ur uttrycket för vätskeflödet $\phi = 4\pi K \frac{r_y \cdot r_i}{r_y - r_i} \cdot (P_i - P_y)$ som gäller om kokillen approximeras med ett sfäriskt skal (P_i = innertryck, P_y = yttre tryck) samt ur gaslagen $P_i \cdot V = n \cdot R \cdot T$ Vid stationärt förlopp är den per tidsenhet utpressade vätskevolymen $\phi = \frac{dV}{dt}$. Insättning ger

$$P_i \cdot 4\pi K \cdot \frac{r_y \cdot r_i}{r_y - r_i} \cdot (P_i - P_y) = \frac{dn}{dt} \cdot RT$$

Vid lågt värde på $K = 10^{-12}$ m/S och $r_y = 0,8$, $r_i = 0,4$ m samt $\frac{dn}{dt} = \frac{3 \cdot 1,8}{60}$ mol/år får man vid $P_y = 1$ atm $P_i - P_y =$

0,5 atm och vid $P_y = 300$ mvp = 30 atm att $P_i - P_y = 0,02$ atm.

Om man i stället antar att expansionsutrymmet är luftfyllt från början blir tryckökningen om det då blir någon radiolys = 2 atm. Om förrådet efter 100 år ännu inte vattenfyllts blir det ett övertryck i kokillen på 2 atm vilket kokillen anses tåla. Givetvis finns möjlighet att få mindre övertryck genom att använda större expansionsutrymme. Är förrådet vattenfyllt föreligger givetvis inget inre övertryck.

Beräkningar för tiden efter 100 år

Här antas att gasen transporteras genom diffusion ut genom kokillväggen och hastigheten för detta uppskattas på följande sätt.

Man får att vid en koncentrationsdifferens över ytan

$$= c \text{ blir utflödet } S = 4\pi D \frac{r_y \cdot r_i}{r_y - r_i} \cdot \Delta c. \quad \text{Antar man att}$$

Henry's lag gäller $\Delta c = K \cdot \Delta p$ får man

$$\text{härur att } \Delta p = \frac{S}{4\pi D K} \cdot \frac{r_y - r_i}{r_y \cdot r_i} = \text{tryckfallet över kokilluäggen}$$

$$\text{För gasblandning } \Delta p = \sum \Delta p_n = \left(\sum \frac{S_n}{D_n K_n} \right) \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{r_y - r_i}{r_y \cdot r_i}$$

Antagna utgångsdata:

K-värden: (Handbook of Chemistry and Physics, sid 1606)

H_2 : $K = 0,000135 / 2 \cdot 100 \text{ mol } H_2 / g \text{ } H_2O, \text{ atm } (25^\circ C)$

O_2 : $K = 0,003931 / 32 \cdot 100 \text{ mol } O_2 / g \text{ } H_2O, \text{ atm}$

D-värden: (d'Ans-Lax, sid 1-1443).

I vatten: $H_2, 21^\circ C$: $3,81 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

$O_2, 21^\circ C$: $2,33 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

I betong ansätts värden som är $\frac{1}{100}$ av ovanstående värden för vatten.

S-värden: $S_{H_2} = 2 S_{O_2}$ erhålles ur radiolysdata

För tiden mellan 100 och 500 år anges att det utvecklas $3,4 - 1,8 = 1,6 \text{ mol } O_2$ eller $0,0040 \text{ mol } O_2 / \text{år}$.

Under denna tid erhålls inget bidrag från Co-60.

($T_{1/2} = 5,3 \text{ år}$)

$S_{O_2} = 0,0040 \text{ mol } O_2 / \text{år}$.

Radien: För första kokillen sätts $2r_y=1,6$ m, $2r_i=0,8$ m.

Insättning av dessa data i formeln ger

$$\Delta p=1,4 \text{ atm.}$$

Trycket kommer att ligga på detta läge under lång tid framöver då det orsakas av Nb-94 vars halveringstid är ca 20 000 år.

Sammanfattningsvis kan sägas att trycket på kokillernas insida orsakat av radiolytgaser i BWR-fallet blir av storleksordningen 0,2 MPa vilket kokillen bör tåla.

Studsvik Arbetsrapport - Technical Report

Projektidentifikation - Project identification	Datum - Date 78-10-10	Org enh och nr - Report No. E2-78/24
Titel och författare - Title and author Gasutveckling vid radiolys av betong innehållande aktiverat metallskrot Hilbert Christensen		
Distribution		
Godkänd av - Approved by <i>Lennart Jansson</i>	Kontonr 5216705	Rapporten skall förhandsviseras - Internal notes <input type="checkbox"/>
<p>1. INLEDNING</p> <p>Avfall i form av metallskrot framkommer t ex vid upparbetning av kärnbränsle. Skrotet avses förvaras efter ingjutning i betongkuber. På uppdrag av Lars Romben, Cement och Betonginstitutet, har jag tidigare gjort en uppskattning av den maximalt tänkbara gasproduktionen genom radiolys av det vatten som finns i betongen. Här nedan redogörs för förutsättningarna och resultaten.</p> <p>2. FÖRUTSÄTTNINGAR</p> <p>Betongkuber (0.8 m³) med totalvikten 1500 kg innehåller 500 kg skrot och 100 kg vatten.</p> <p>Strålningen kommer i huvudsak från ⁶⁰Co (γ) (i början), ⁹⁴Nb (γ), ⁶³Ni (β) och ⁵⁹Ni (e-capture). Integrerade doser till olika tider har beräknats av K Lundgren, se Tabell 1.</p>		

BL 4848 A

1978-10-10

P g a β -strålningens låga energi (<0.07 MeV) är dosen till vatten försumbar från ^{63}Ni . Detsamma gäller för dosen från ^{59}Ni . Det maximalt tänkbara G-värdet för syreproduktion i neutralt vatten sätts lika med summan av oxiderande ämnen, som bildas primärt vid vattnets radiolys, dvs $g(\text{O}_2) = 1$ (mot-svarar fyra oxidationsekvivalenter). Jag har här negligerat rekombinationsreaktioner, som annars skulle minska syrebildningen. En ekvivalent mängd väte antas bildas, dvs $g(\text{H}_2) = 2$.

3. RESULTAT

Resultaten redovisas i Tabell 1.

1978-10-10

Tabell 1

Integrerade doser och gasutveckling i betong innehållande metallskrot.

Förvaringstid, år	100	500	1000	5000	10000
Integrerad γ -dos, 10^7 rad	1.8	3.4	5.4	21	36
Integrerad β -dos, 10^9 ws	1.2	3.2	3.4	3.7	3.9
O ₂ -konc (mM)	18	34	54	210	360
H ₂ -konc (mM)	36	68	108	420	720
Mol O ₂ per kokill	1.8	3.4	5.4	21	36
Mol H ₂ per kokill	3.6	6.8	10.8	42	72
Total gasmängd, l(NTP)* per kokill	120	230	360	1400	2400

* Liter vid 0°C, 760 mm från en kokill med 500 kg metallskrot, totalvikt 1500 kg.

/Eli

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 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-
sisters 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 Egenskaper hos bentonitbaserat buffertmaterial
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-06-10
- 33 Required physical and mechanical properties of buffer masses
Roland Pusch
Högskolan i 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
Alf Engelbrektson, VBB
Arne Finné, KBS
Stockholm december 1977
- 39 Konstruktionsstudier, direktdeponering
ASEA-ATOM
Västerås
- 40 Ekologisk transport och stråldoser från grundvattenburna radioaktiva ämnen
Ronny Bergman
Ulla Bergström
Sverker Evans
AB Atomenergi 1977-12-20
- 41 Säkerhet och strålskydd inom kärnkraftområdet.
Lagar, normer och bedömningsgrunder
Christina Gyllander
Siegfried F Johnson
Stig Rolandson
AB Atomenergi och ASEA-ATOM 1977-10-13

- 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 slutförvar för använt bränsle
Taivo Tarandi
Vattenbyggnadsbyrån Stockholm 1978
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser
John Stokes
Roger Thunvik
Inst för kulturteknik KTH maj 1978
- 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 Gjöystdal
E S Husebye
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 dissolutionshastighet för silver i lera-sandblandning
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
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 bassänlagring 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
Roland 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 1978-08-31
- 78 Bedömning av radiolys i grundvatten
Hilbert Christenssen
AB Atomenergi 1978-02-17
- 79 Transport of oxidants and radionuclides through a clay barrier
Ivar Neretnieks
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-02-20

- 80 Utdiffusion av svårslösliga nuklider ur kapsel efter kapselgenombrott
Karin Andersson
Ivars Neretnieks
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-03-07
- 81 Tillverkning av kopparkapsel för slutförvaring av använt bränsle
Jan Bergström
Lennart Gillander
Kåre Hannerz
Liberth Karlsson
Bengt Lönnerberg
Gunnar Nilsson
Sven Olsson
Stefan Sehlstedt
ASEA, ASEA-ATOM juni 1978
- 82 Hantering och slutförvaring av aktiva metalldelar
Bengt Lönnerberg
Alf Engelbrectsson
Ivars Neretnieks
ASEA-ATOM, VBB, KTH Juni 1978
- 83 Hantering av kapslar med använt bränsle i slutförvaret
Alf Engelbrectsson
VBB Stockholm april 1978
- 84 Tillverkning och hantering av bentonitblock
VBB
ASEA
ASEA-ATOM
Gränges Mineralprocesser
Juni 1978
- 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 Invetkan av glaciation på en deponeringsanläggning belägen i
 urberg 500 m under markytan
 Roland Pasch
 Högskolan i Luleå 1978-03-16
- 90 Koppor som bindningsmaterial för icke upparbetat kärn-
 bränsleavfall - 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 Termisk 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
 Yrkemiska Institutet 1978-05-07
- 98 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg
 Del 2
 Bert Allard
 Heino Kipatai
 Börje Forstenfelt
 Chalmers Tekniska Högskola 1978-04-20
- 99 Lakning av högaktivt franskt glas
 Lägesrapport 1978-06-01
 Göran Blomqvist
 AB Atomenergi 1978-06-19

- 100 Dos och dosinteckning från grundvattenburna radioaktiva ämnen vid slutförvaring av använt kärnbränsle
Ronny Bergman
Ulla Bergström
Sverker Evans
AB Atomenergi
- 101 Utläckning av Ni-59 från ett bergförvar
Ivars Neretnieks
Karin Andersson
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-04-24
- 102 Metod att bocka bestrålade bränslestavar
Torsten Olsson
ASEA-ATOM 1978-03-29
- 103 Some aspects on colloids as a means for transporting radio nuclides
Ivars Neretnieks
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-08-08
- 104 Finit elementanalys av bentonitfyllt bergförvar
Ove Stephansson
Kenneth Mäki
Tommy Groth
Per Johansson
Högskolan i Luleå
- 105 Neutroninducerad aktivitet i bränsleelementdetaljer
Nils Kjellbert
AB Atomenergi 1978-03-30
- 106 Strålningsnivå och till vatten deponerad strålningsenergi utanför kapslar i slutförvaret
Klas Lundgren
ASEA-ATOM 1978-05-29
- 107 Blyinfodrad titankapsel för upparbetat och glasat kärnbränsleavfall - Bedömning ur korrosionssynpunkt
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp. Slutrapport
1978-05-25
- 108 Criticality in a spent fuel repository in wet crystalline rock
Peter Behrenz
Kåre Hannerz
ASEA-ATOM 1978-05-30
- 109 Lakningsbar spaltaktivitet
Lennart Devell
Rolf Hesböl
AB Atomenergi

- 110 In situ experiments on nuclide migration in fractured crystalline rocks
Ove Landström
Carl-Erik Klockars
Karl-Erik Holmberg
Stefan Westerberg
Studsvik Energiteknik and
The Geological Survey of Sweden juli 1978
- 111 Nuklidhalter i använt LWR-bränsle och i högaktivt avfall från återcykling av plutonium i PWR
Nils Kjellbert
Studsvik Energiteknik AB 1978-07-26
- 112 Säkerhetsanalys av hanteringsförfarandet vid inkapsling av utbränt bränsle i kopparkapsel
Erik Nordesjö
ASEA-ATOM 1978-03-20
- 113 Studier av keramiska material för inkapsling av högaktivt avfall
Lennart Hydén et al
ASEA-ATOM september 1978
- 114 γ -radiolysis of organic compounds and α -radiolysis of water
Hilbert Christensen
Studsvik Energiteknik AB 1978-09-07
- 115 Accelererad utlösning av uran från α -aktivt UO_2
Gösta Nilsson
Studsvik Energiteknik AB 1978-04-27
- 116 Lakning av Al_2O_3 under simulerande deponeringsbetingelser
Britt-Marie Svensson
Lennart Dahl
Studsvik Energiteknik AB 1978-06-02
- 117 Lakning av Al_2O_3 i dubbeldestillerat vatten
Britt-Marie Svensson
Göran Blomqvist
Studsvik Energiteknik AB 1978-05-29
- 118 Slutrapport Al_2O_3 kapsel
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp
- 119 Slutförvaring av aktiverade ståldetaljer i betong
Lars Rombén
Kyösti Tuutti
Cement- och Betonginstitutet 1978-07-14
- 120 Some notes in connection with the KBS studies of final disposal of spent fuel
Ivars Neretnieks
Kungl Tekniska Högskolan september 1978