

R-04-47

Flerfasflöde i geosfären kring ett förvar för utbränt kärnbränsle

Inventering av kunskapsläget

Bengt Åhlén, Bergab

Oktober 2004

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00

+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19

+46 8 661 57 19



Flerfasflöde i geosfären kring ett förvar för utbränt kärnbränsle

Inventering av kunskapsläget

Bengt Åhlén, Bergab

Oktober 2004

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se

Innehåll

1	Inledning	5
2	Målsättning	7
3	Metodik	9
3.1	EC/NEA rapport	9
3.2	Litteratursökning	9
4	Problemställningar	11
4.1	Övertryck i tekniska barriärer eller berget	11
4.2	Strålning och explosionsrisk vid markytan	11
4.3	Gasens påverkan på kontaminerat vattenflöde	11
4.4	Transport av föroreningar genom vidhäftning eller inneslutning vid gastransport	11
5	Genererade gasmängder	13
6	Konceptuella modeller för flöde i geosfären	15
6.1	Skillnader mellan närområdet och fjärrområdet	15
6.2	Allmänt	15
6.3	Gastransport som bubblor	16
6.4	Stabilitet hos gasflödesvägar	17
6.5	Gasutsläpp vid markytan	17
7	Datormodeller	19
7.1	Kontinuummodeller	19
7.2	Diskreta sprick-modeller, spricknätverk	20
7.3	Diskreta sprick-modeller, enskilda sprickor	20
7.4	Transport av radioaktiva spårgaser i gasfasen	20
7.5	Gasbubbelflöde	21
8	Potentiell påverkan på förvarets funktion	23
9	Slutsatser i GMR	25
9.1	Gasbildning	25
9.2	Övertryck som följd av gasmigration i fjärrområdet	25
9.3	Risker från gastransport till biosfären	25
9.4	Effekter av gastransport på transport av vatten och radioaktiva ämnen	25
9.5	Status för konceptuella modeller och datormodeller	25
10	Kommentarer till slutsatser	27
	Referenser	29

1 Inledning

I underjordiska förvar för radioaktivt avfall kan betydande mängder gas komma att bildas. Gasen kan bl a bildas genom att:

- metaller som ingår i konstruktionen korroderar,
- vatten och vissa organiska material sönderdelas genom s k radiolys,
- organiskt material bryts ned mikrobiologiskt.

Den sista punkten gäller framförallt förvar för låg till medelaktivt avfall som kan innehålla större mängder organiskt material. För djupförvar av använt kärnbränsle är det i första hand den första punkten som kan komma ifråga.

Den bildade gasen skulle kunna transportera radioaktiva ämnen genom bufferten och geosfären till biosfären eller på annat sätt påverka förvarets funktion och därmed innebära en risk.

Denna rapport utgör en genomgång av kunskapsläget beträffande tvåfasflöde i samband med djupförvar av kärnbränsle.

2 Målsättning

Målsättningen med detta arbete har varit att identifiera eventuella brister i det nuvarande kunskapsläget och i så fall föreslå inriktning för fortsatt forskning och utveckling.

3 Metodik

För att uppnå målsättningen har arbete indelats i två huvudmoment:

1. Studie av EC/NEA rapport /Rodwell et al. 1999b/)
2. Litteratursökning

Följande begränsningar har ansatts:

- Endast djupförvar av högaktivt kärnbränsle beaktas.
- Endast kristallina sprickiga bergarter enligt det svenska konceptet för djupförvar beaktas.
- Endast flöde av gas och vatten i initialt vattenmättade sprickor i geosfären beaktas (gasflöde i buffert och återfyllning behandlas ej).

3.1 EC/NEA rapport

På uppdrag av EU och ett konsortium av nationella organisationer som är aktiva inom kärnbränslehantering har /Rodwell et al. 1999b/ tagit fram en rapport med titeln: "Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste". Rapporten utgör basen för detta arbete och refereras därför flitigt till i denna text. Rapporten kommer fortsättningsvis att förkortas GMR.

3.2 Litteratursökning

Litteratursökning har utförts i Litteraturlatabaser (Engineering village 2, Compendex) och elektroniska tidsskrifter. Som sökord användes phase, flow, crystalline, fractured och rock i olika kombinationer. Efter granskning av sammanfattningar valdes 11 artiklar som ansågs vara relevanta ut. Dessa har studerats och refereras i texten.

4 Problemställningar

Följande problemställningar har identifierats i GMR:

- Övertryck i tekniska barriärer eller berget.
- Strålning och explosionsrisk (förbränning av gaser) vid markytan.
- Gasens påverkan på kontaminerat vattenflöde (bildning av gaskudde i förvaret).
- Transport av föroreningar genom vidhäftning eller inneslutning vid gastransport.

4.1 Övertryck i tekniska barriärer eller berget

Om gasen inte kan lämna förvaret i samma takt som den bildas kommer trycket att öka. Om trycket stiger så mycket att det bildas sprickor i den tekniska barriären eller i berget skulle detta kunna öppna upp flödesvägar i vilka radionuklider kan transporteras snabbare än i det intakta systemet. Ett förvar satt under övertryck skulle även kunna innebära en risk för s k "blow out" (en okontrollerad utströmning av gas ur ett borrhål när det hydrostatiska trycket inte är tillräckligt för att hålla emot gstrycket) om borrhåll sker ner i förvaret.

4.2 Strålning och explosionsrisk vid markytan

En del av den gas som kan komma att produceras i ett förvar för radioaktivt avfall kan vara radioaktiv. Bland de radioaktiva ämnen som kan finnas i gasen kan nämnas ^{14}C , ^3H , ^{222}Rn , ^{85}Kr eller ^{129}I . Dessa gaser kan transporteras i mindre mängder (spårgaser) tillsammans med större mängder icke radioaktiv gas. Det finns även möjligheten att den genererade gasen skulle kunna utgöra ett medium för transport av i berget naturligt förekommande radon.

Eftersom den största mängden producerad gas sannolikt skulle utgöras av metan och vätgas bör även risken för antändning vid markytan beaktas.

4.3 Gasens påverkan på kontaminerat vattenflöde

Kontaminerat grundvatten skulle kunna förträngas ut ur förvaret genom att en s k gaskudde bildas i förvaret eller i närområdet. Detta skulle alltså kunna ske utan att den genererade gasen transporteras vidare upp mot markytan.

4.4 Transport av föroreningar genom vidhäftning eller inneslutning vid gastransport

Kontaminerat grundvatten skulle även kunna transporteras mot markytan genom inneslutning i strömmar av gasbubblor eller genom att vatten strömmar in i utrymmen som tidigare innehållit mobil gas. Den senare mekanismen bygger på att gasflödesvägar hela tiden kollapsar och återbildas. I fallet med strömmar av gasbubblor innebär dessa även att radioaktiva partiklar kan transporteras med gasbubblorna genom att de fäster eller koncentreras vid gränsskiktet mellan gas och vatten.

5 Genererade gasmängder

I ett djupförvar för utbränt kärnbränsle kan man anta att 1 Mol H_2 genereras per kapsel och år /Sellin, 2002/. I GMR anges gasproduktionen för kopparkapslar till 1 Nm^3 /år och kapsel (1 Mol = $24.3 \times 10^{-3} Nm^3$).

6 Konceptuella modeller för flöde i geosfären

Den första uppgiften man ställs inför när man skall skapa en konceptuell modell för gasflöde genom geosfären, bör vara att uppskatta om det är möjligt för den genererade gasen att lösas upp i grundvattnet eller inte (i den störda zonen kring deponeringsutrymmet). Om detta är möjligt kan all gas transporteras bort från förvaret i lösning genom antingen diffusion, advektion eller en kombination av dessa utan att någon fri gasfas bildas.

Vid diffusion och advektion bestäms kapaciteten av den effektiva diffusionskoefficienten för den aktuella gasen, grundvattenflödet genom/förbi anläggningen samt gasens löslighet i grundvattnet. I GMR redovisas att den maximala transportkapaciteten har beräknats av bl a /Wikramaratna et al. 1993/. Beräkningarna visar att en fri gasfas kan bildas (med given gasproduktion).

6.1 Skillnader mellan närområdet och fjärrområdet

I GMR identifieras två möjliga problem som kan uppkomma som följd av att fri gas förekommer i närområdet.

1. Gas kan ansamlas i den störda zonen och bilda en gaskudde som i sin tur kan påverka spänningsförhållandena i berget.
2. Gas kan föra med sig vatten (som kan innehålla radionuklider) från förvaret /Wiborgh et al. 1986/.

För det första problemet redovisar GMR en betraktelse med möjliga kapillärtryck och ”kudd”-höjder för ett kristallint sprickigt berg med sprickvidder i storleksordningen 10^{-5} – 10^{-4} m. Man drar slutsatsen att de av gaskudden genererade aktuella kapillärtrycken är försumbara i jämförelse med de hydrostatiska tryck som är aktuella för ett djupförvar (ca 5 MPa vid 500 m djup).

För problem två innebär uppdelningen i närområdet och fjärrområdet inte någon principiell skillnad för en konceptuell modell. Problemet behandlas därför nedan tillsammans med resterande problemställningar enligt kapitel 4.

6.2 Allmänt

Den förhärskande konceptuella modellen för migration genom vattenmättade sprickor i kristallint berg utgår ifrån att gas strömmar genom det nätverk av sprickor som står för huvuddelen av bergets permeabilitet. Porstorleken i den ospruckna delen av berget (matrix eller bergmatrisen) antas vara så liten att kapillärtrycket förhindrar gasen att tränga in i denna (vattenvätande bergarter). Löst gas kan diffundera in i porutrymmet i bergmatrisen men porositeten antas vara så låg att denna mängd är försumbar.

I GMR påpekas att experiment visar att flöden i nätverk av sprickor oftast koncentreras till flödeskanaler /se Pyrak et al. 1985; Moreno and Neretnieks, 1988a; Neretnieks, 1987; Abelin et al. 1987; Bourke, 1987; Braney et al. 1991; Keller et al. 2000/ och /Chen and Kinzelbach, 2002/. Det är dock oklart hur och var dessa kanaler bildas. Vissa författare

förespråkar synpunkten att kanalerna i huvudsak bildas där sprickplanen möts medan andra gör gällande att kanalerna bildas i sprickplanen.

Innan en kontinuerlig flödesväg för en fri gasfas har nått markytan, och ett fortfarighets-tillstånd uppträtt, kan tvåfasflödet beskrivas som en gasfas som förtränger vattenfasen. Vid ett förträngningsförlopp i ett poröst medium styrs frontens stabilitet av mobilitetskvoten för de två faserna (en funktion av respektive fas relativa permeabilitet och viskositet). Om den förträngande fasen har högre mobilitet (relativ permeabilitet delat med viskositet) än den förträngda fasen kan stabilitetsförändringar i form utav ”tungbildning” och/eller s k ”fingering” uppstå. Hur dessa processer fungerar i sprickigt berg är inte helt klarlagt. I GMR påpekas att denna typ av instabilitet kan accelerera bildandet av kontinuerliga gasflödesvägar till markytan, vilket i sin tur leder till en minskad potential för tryckuppbyggnad i berget.

Även de initiella betingelserna i och kring förvaret vid starten av gasproduktionen kan påverka det fortsatta förloppet. Två extrema scenarier kan urskiljas:

1. Förvaret är fullständigt vattenmättat och i jämvikt med det lokala hydrostatiska trycket.
2. Förvaret är endast delvis vattenmättat och den befintliga gasen befinner sig vid atmosfärstryck.

I det senare fallet strömmar naturligtvis vatten in i förvaret och det hydrostatiska trycket kring förvaret är reducerat. Det minskade trycket kan leda till att gas går ur lösning och därmed minskar den relativa permeabiliteten för vattnet och inflödet i förvaret. /Jarsjö och Gale, 2001/ drar slutsatsen att detta endast är en trolig förklaring till ett minskat inflöde i en tunnel om redan utlöst gas återgår i lösning relativt långsamt när trycket åter stiger som följd av det ökade flödesmotståndet. För punkt två ovan innebär gasbildningen enligt GMR en minskad risk för tryckuppbyggnad i berget som följd av gasens högre kompressibilitet.

Gas kan föra med sig förorenat vatten från närområdet och genom fjärrområdet på två olika sätt: Transport av gasbubblor och genom effekter av gasflödesvägarnas stabilitet.

6.3 Gastransport som bubblor

Vid observationer av vissa kemiska ämnens mycket snabba transport upp mot markytan har en möjlig förklaring antagits vara att dessa transporteras tillsammans med gasbubblor. De kemiska ämnena antas inneslutna i eller fästa vid bubblornas yta. På djupet förmodas bubblorna vara så små att de kan ta sig igenom det porösa mediets porhalsar. Närmare markytan har större bubblor som lämnar sprickor i marken iakttagits. Fenomenet och dess betydelse för kärnbränsleförvar har behandlats av /Hermansson et al. 1991; Sjöblom et al. 1995/ och /Goodfield and Rodwell, 1998/. /Neretnieks och Erntson, 1997/ diskuterar transport med gasbubblor av radioaktiva ämnen som bundits vid aggregat av montmorilonit. Montmorilonit är ett lermineral som förekommer i riklig mängd i bentonit.

Ett bubbelflöde skulle även kunna föra med sig grundvatten mot markytan /Rodwell and Nash, 1992a, b; Nash et al. 1997; Wikramaratna et al. 1997/.

Huruvida det är möjligt att all genererad gas skulle kunna transporteras till markytan som bubblor är oklart.

6.4 Stabilitet hos gasflödesvägar

Gas kan stängas inne i ”fällor” bestående av lokala förträngningar hos den transporterande sprickan. Detta kan leda till att den kontinuerliga transportvägen för gasfasen bryts sönder i osammanhängande delar. När sedan en flödesväg till markytan återskapas, kan gasen strömma mot markytan och sprickan återfyllas med grundvatten som därigenom transporteras uppåt.

Det ovan beskrivna fenomenets existens styrks av resultaten av numeriska beräkningar för gasmigration i nätverk av linjära kanaler. När gasfronten rör sig uppåt i nätverket av kanaler och når ytan, uppstår en förändring av tryckfördelningen i kanalerna som möjliggör för vatten att tränga in och bryta kontinuerliga segment av kanalnätverket /Thunvik och Braester, 1990; Nash et al. 1999/. När gasgenereringen fortsätter kan gasen återigen tränga undan vattnet i flödeskanalen och på så sätt skapa en mekanism för återkommande grundvattenflöde mot markytan. Fenomenet har även observerats vid laboratorieförsök av tvåfasflöde i enskilda sprickor /Persoff och Pruess, 1995/.

6.5 Gasutsläpp vid markytan

Gas som når markytan kan innehålla radioaktiva ämnen såsom $^{14}\text{CH}_4$, $^{14}\text{CO}_2$, ^3HH och ^{222}Rn . Dessa kan utgöra en radioaktiv riskkälla även om koncentrationerna i gasen som når markytan är låga. Gasens huvudbeståndsdelar antas utgöras av vätgas och metangas. Eftersom dessa gaser är brännbara föreligger även risker för explosion och brand.

Valet av konceptuell modell för att värdera dessa risker är mycket betydelsefullt eftersom migrationsmekanismer kan påverka hur utspritt ett utsläpp blir vid markytan och hur radioaktiviteten avklingar i geosfären innan gasen når markytan.

Trots att ett stort intresse för detektering av markgas i samband med prospektering har funnits sedan en lång tid tillbaka, är enligt GMR sambanden mellan markgasanomalier, gasmigrationsmekanismer och geologiska strukturer inte speciellt väl kända.

Fältförsök /Lineham et al. 1996/ har väckt frågan om hur migration över längre sträckor i sidled kan ske. Även för denna mekanism finns paralleller för kolvätemigration från källbergarter till reservoarbergarter. Ej heller för detta kunskapsområde råder odelad enighet om hur denna migration går till.

7 Datormodeller

7.1 Kontinuummodeller

Flerfas kontinuummodeller har enligt GMR hittills varit det vanligaste sättet att modellera gasflöde från förvarsanläggningar, även för anläggningar i sprickigt berg. Detta trots att angreppssättet ofta ifrågasätts vid modellering för sådana förhållanden. Anledningen till detta är framförallt skillnaderna i längdskalan för sprickorna och flödet i dem jämfört med skalan för medelvärdesbildning som underförstått antagits vid utvecklingen av de matematiska och numeriska modeller som används i kontinuummodeller. Enligt GMR är emellertid kontinuummodeller det enda praktiskt användbara verktyget för att utföra beräkningar på fältskalenivå. Jämförelser mellan alternativa angreppssätt för modellering i sprickigt berg har gjorts av bl a /Selroos et al. 2002/ och /Indraratna et al. 1999/. För flerfasflöde görs en jämförelse av /Wanfang et al. 1997/.

Med kontinuummodeller kan man koppla ett antal mekanismer, t ex, bergmekanik och gasflöde, gaskompressibilitet och löslighet i vatten. Det är även möjligt att geometriskt representera både geologi och själva anläggningen.

De data som krävs för att utföra numeriska beräkningar av gasflöde i fältskala är vätske- och gasegenskaper, de egenskaper hos berget som styr flödet, en geometrisk beskrivning av flödesdomänen samt väl avgränsade randvillkor.

Utöver de data som krävs för enfasflöde krävs för flerfasflöde även samband mellan mättnadsgrad och relativ permeabilitet för vatten och gas samt motsvarande samband för kapillärtryck (förkortas ofta K-S-P, där bokstäverna står för de engelska beteckningarna för permeabilitet [K], vattenmättnad [S] och kapillärtryck [P]). Här ligger en av svårigheterna med att modellera sprickigt berg i kontinuummodeller eftersom det är svårt att få fram representativa data som beskriver K-S-P-funktioner. Inom oljeindustrin görs detta rutinmässigt antingen genom laborieförsök eller genom s k ”history matching” (inversmodellering inom hydrogeologi). Laborieförsök är inte praktiskt genomförbara för den skala som krävs för att få ett representativt prov av ett sprickigt berg /t ex Jouanna, 1993/. Även inversmodellering ter sig svårt med tanke på att detta kräver fullskalförsök av effekter som är svåra att mäta.

Ett vanligt sätt att representera en kapillärtryckskurva är genom passning av labdata till en funktion. De två vanligaste metoderna är /Brooks och Corey, 1964/ och /van Genuchten, 1980/. Den anpassade funktionen används sedan för att beräkna mättnadsgrad och relativ permeabilitet för aktuellt tryck i den numeriska modellen. Även om passningsparametrarna valts för att beskriva en viss typ av geologiskt medium krävs alltid passning av en materialoberoende parameter för ett optimalt resultat. Bestämning av de materialberoende parametrarna kräver kännedom om porstorleksfördelningen (eller kornstorleksfördelningen om dessa kan korreleras). /Jarsjö och Gale, 2001/ presenterar en liknande metod anpassad för sprickiga medium. Som ”passningsparametrar” används här väntevärdet och standardavvikelsen för en log-normalfördelad funktion som beskriver sprickvidden för det aktuella berget. Författarna framhåller att fördelen med denna metod består i att robusta tekniker tagits fram för att mäta dessa egenskaper både i fält och på laboratorium. /Indraratna och Ranjith, 2001/ presenterar laborieförsök gjorda i en speciellt framtagen utrustning för mätning av tvåfasparametrar i sprickor i en triaxialcell.

Den residuala gasmättningen (irreducible gas saturation) som angivits för en relativ permeabilitetsfunktion påverkar mycket starkt den mängd gas som förutspås bli kvar i ”fällor” i sprickformationen och tiden som det tar innan gasen blir mobil.

7.2 Diskreta sprick-modeller, spricknätverk

Den enklaste formen av diskreta sprickmodeller är den där gasmigrationen genom ett vattenmättat berg beskrivs som förträngning av vatten i set av parallella sprickor eller sprickkanaler. Nästa steg är att bilda enkla set av korsande sprickplan i två dimensioner. /Thunvik och Braester, 1990/ har med denna typ av modell visat resultat som tyder på att instabilitet hos de gasfyllda kanalerna kan förekomma. Instabiliteten inträffar när gas lämnar modellen vid ”markytan”. Mekanismen innebär att det genererade pulserande gasflödet även får vattnet att röra sig. Principen påminner om funktionen hos en s.k mammutpump.

7.3 Diskreta sprick-modeller, enskilda sprickor

/Murphy och Thomson, 1993/ har tagit fram en modell för tvåfasflöde i råa, enskilda sprickor. När gränsskiktet mellan gas och vatten rör sig i modellen bestäms dess läge i beräkningsceller i ett finit differensnät. Olika varianter på denna modell har använts för att öka förståelsen för gasmigration från förvar av radioaktivt avfall /McCarthy och Rodwell, 1998/.

/Keller et al. 2000/ har tagit fram en numerisk modell som kan användas för att ta fram samband för Kapillärtryck-mättnad-relativ permeabilitet utifrån en given sprickviddsfördelning.

/Zhou, 2001/ har tagit fram en liknande modell och studerar effekter av sprickviddsfördelning, mobilitetskvot och sprickorientering på förträngningsprocesser.

Analytiska betraktelser av tvåfasflöde i enskilda sprickor har utförts av /Jarsjö och Destouni, 1998/. Syftet var att undersöka vilken effekt gasutlösning har på relativa permeabiliteten för vatten när gas blir kvar i sprickan. En modell för hur mycket gas som skulle ”fastna” i sprickan (residual gasmättnad) togs fram genom att betrakta sprickviddsfördelningen och den hydrauliska tryckgradienten.

7.4 Transport av radioaktiva spårgaser i gasfasen

Det allra enklaste antagandet om transporttider för radioaktiva spårgaser är att dessa strömmar ut vid markytan så snart de blivit en del av en fri gasfas i förvarsanläggningen. Ett sådant betraktelsesätt kan vara motiverat om koncentrationerna är så små att de inte utgör någon skadlig risk vid utsläppet i biosfären. Om så inte är fallet kan nästa angreppssätt vara att anta att spårgaserna beter sig precis som bulkgasen (den dominerande andelen gas som inte innehåller radionuklider), dvs transporteras med samma hastighet och löses upp i vattnet i samma omfattning.

För mer noggranna beräkningar med radon inblandat (korta halveringstider) har enkla modeller tagits fram /Baker et al. 1997; Rodwell et al. 1999a/. I dessa modelleras gasflödesvägarna som parallella sprickor eller likformiga kapillärer beroende på om

bergartens permeabilitet i huvudsak finns i ett spricknätverk eller i porer mellan kornen i matrix. Modellen förutsätter att ett fortfarighetstillstånd med gasflöde till markytan inträtt. Radonet försvinner från gasen dels genom avklingning och dels genom lösning i vatten som står i kontakt med gasen. Radon som finns naturligt i berget kan också tillföras gasen. Fördelningen av radon mellan gasen och grundvattnet styrs av radonets löslighet, och av avklingningen och diffusionen i matrixporvattnet som omger flödeskanalerna.

7.5 Gasbubbelflöde

En enkel modell för numerisk analys av gasbubbelflöde har tagits fram av /Kostakis och Harrison, 1999/. En procedur för uppskattning av bubbelstorleken har tagits fram. Denna används som indata i en tvådimensionell finit differens modell i vilken flödesekvationer löses. De numeriska beräkningarna har kontrollerats mot en enkel analytisk lösning för gasflöde mellan släta parallella plattor. Modellen visade sig ha god överensstämmelse med de analytiska beräkningarna men författarna påpekar vikten av att den numeriska modellen även verifieras mot experimentella resultat.

8 Potentiell påverkan på förvarets funktion

I GMR gör man i punktform följande sammanfattning av behandlingen av gasmigrationsfrågor i de funktionsanalyser som utförts för förvar i kristallint berg.

- Även om permeabiliteten i kristallint berg är förhållandevis låg jämfört med många andra bergarter, är den förhållandevis hög jämfört med de bergarter som är aktuella för djupförvar av radioaktivt avfall. Den höga permeabiliteten innebär att gastransport i fjärrområdet normalt inte anses vara något problem med avseende på tryckuppbyggnad i kristallint berg. Detta gäller även låg- och medelaktivt avfall som genererar stora mängder gas.
- En brasklapp för föregående punkt är den betydande osäkerhet som råder angående vilka samband mellan mätnad, kapillärtryck och relativ permeabilitet som skall användas vid beräkningar av gasmigration i vattenmättade spricknätverk.
- De förhållandevis stora poröppningarna i kristallint berg gör att inträngningstrycket blir lågt. Detta medför att bildning av gaskuddar inte antas utgöra något stort problem. Därmed skulle bortträngande av kontaminerat vatten i förvarstunnlarna också kunna undvikas.
- Med undantag för punkten ovan har frågor rörande gasmigrationens inverkan på transport av kontaminerat grundvatten ej behandlats i några publicerade funktionsanalyser.
- Inga fullskaleexperiment eller plats specifika experiment har legat till grund för de slutsatser som dras i hittills utförda funktionsanalyser.

9 Slutsatser i GMR

I GMR presenteras en tabell över olika frågeställningars status för respektive koncept som idag föreligger för förvar av kärnbränsleavfall. I tabellen har varje förvaringskoncept fått en egen kolumn och varje frågeställning en egen rad. Texten i kolumnen för ”Använt kärnbränsle i sprickigt berg” återges nedan uppdelat med ett avsnitt för varje frågeställning som berör flöden i geosfären.

9.1 Gasbildning

Med kopparkapslar är källan för gasgenerering i huvudsak kapslarnas innehåll. Gasgenerering sker då vatten tränger in i defekta kapslar.

9.2 Övertryck som följd av gasmigration i fjärrområdet

De sprickiga bergarter som är aktuella för förvar av låg- till högaktivt kärnbränsleavfall förväntas ha en kapacitet att släppa igenom gasen utan att övertryck bildas som följd av kapillära barriärer eller låg permeabilitet. I vissa fall kan dock övertryck uppstå. För högaktivt avfall/använt kärnbränsle är säkerheten större på grund av den låga gasgenereringstakten.

9.3 Risker från gastransport till biosfären

Behandlas inte för använt bränsle i sprickigt berg. Man markerar en viss osäkerhet genom att formulera anledningen som en fråga. Anses gasmängderna vara för små för att detta skall vara ett problem? Att detta är oklart är i såfall en anledning till att det bör utredas.

9.4 Effekter av gastransport på transport av vatten och radioaktiva ämnen

Identifieras som ett möjligt problem men av sekundär betydelse på grund av den låga gasgenereringstakten.

9.5 Status för konceptuella modeller och datormodeller

Man ser endast ett behov av att utveckla konceptuella modeller och datormodeller för gasmigration genom bentonit.

10 Kommentarer till slutsatser

Eftersom det är oklart om de genererade gasmängderna i ett djupförvar för använt kärnbränsle är för små för att detta skall vara ett problem bör detta utredas.

Om de genererade mängderna är tillräckligt stora för att generera en fri gasfas behövs bättre och framförallt experimentellt verifierade modeller för bubbelflöde.

För att kunna modellera gasflöde behövs bättre metoder att ta fram representativa K-S-P-funktioner.

Referenser

- Abelin H, L Birgersson J, Gidlund L, Moreno I, Neretnieks H, Widén, Ågren T, 1987.** 3D Migration Experiment – Report 3, Part 1, Performed Experiments, Results and Evaluation, Stripa Project Technical Report 87-21, Stockholm.
- Baker A J, Lever D A, Rees J H, Thome M C, Tweed C J, Wikramaratna R S, 1997.** Nirex 97: An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield. Volume 4: The Gas Pathway, Nirex Science Report S/97/0 12.
- Bourke P J, 1987.** Channelling of Flow Through Fractures in Rock, in Proceedings of GEOVAL- 87, International Symposium, Stockholm, Sweden, 7–9 April, pp 167–177.
- Braney M C, Cliffe K A, Gilling D, Jefferies N L, Lineham T R, 1991.** Laboratory Studies of Flow and Transport in Single Fractures. 1. Artificial Fracture and Granite Block Experiments, Nirex Report NSS/R269.
- Brooks R H, Corey A T, 1964.** Hydraulic Properties of Porous Media, Colorado State University, Hydrogeology Papers, Fort Collins, Colorado.
- Chen Q, Kinzelbach W, 2002.** An NMR study of single- and two-phase flow in fault gouge filled fractures, *Journal of Hydrology* 259, pp 236–245.
- Goodfield M, Rodwell W R, 1998.** ”Geogas” Microbubbles: a Literature Review with Reference to their Potential to Contribute to the transport of Contaminants from a Radioactive Waste Repository, Nirex Science Report S/98/016.
- Hermansson H-P, Åkerblom G, Chyssler J, Linden A, 1991.** Geogas – a Carrier or a Tracer?, SKN Report 51.
- Indraratna B, Ranjith P G, Gale W, 1999.** Single phase flow through rock fractures, *Geotechnical and Geological Engineering* 17, pp 211–240.
- Indraratna B, Ranjith P G, 2001.** Laboratory Measurement of Two-Phase Flow Parameters In Rock Joints Based on High Pressure Triaxial Testing, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Jarsjö J, Destouni G, 1998.** Groundwater Degassing in Fractured Rock: Modelling and Data Comparison, SKB TR-98-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jarsjö J, Gale J, 2001.** Groundwater degassing and two-phase flow in fractured rock, SKB TR-01-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jouanna P, 1993.** A summary of field test methods in fractured rocks, In Bear J, Tsang C-F, Marsily G. (Eds.) *Flow and contaminant transport in fractured rock*, Academic Press Inc., San Diego, CA, pp 437–543.
- Keller A A, Blunt M J, Roberts P V, 2000.** Behavior of Nonaqueous Phase in Fractured Porous Media under Two-Phase Flow Conditions, *Transport in Porous Media* 38: 189–203.
- Kostakis K, Harrison J P, 1999.** Numerical analysis of gas-bubble flow in water-filled natural fractures, *Computers and Geotechnics* 24, 3–28.

- Lineham T R, Nash P J, Rodwell W R, Grainger P, Heath M J, Merefield J R, 1996.** Gas Migration in Fractured Rock: Results and Modelling of a Helium Injection Experiment at the Reskajeage Farm Test Site, S.W. England, United Kingdom, *Journal of Contaminant Hydrology*, 21, 101–113.
- McCarthy R F, Rodwell W R, 1998.** Simulation of gas migration in single rough fractures and comparison of results with data from positron emission tomography experiments. In proceedings of the PROGRESS-PEGASUS Workshop, Mol, Belgium, 27–28 May, 1997, European Commission Report EUR 18167 EN, pp 77–104.
- Moreno L, Neretnieks I, 1988a.** Channelling in Fracture Zones and Its Potential impact on the Transport of Radionuclides, in *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XI*, Berlin, 10–13 October, 1987 (eds. M.J. Apted and R.E. Westerman), MRS Symposia Proceedings Volume 112, Materials Research Society, Pittsburgh.
- Murphy J R, Thomson N R, 1993.** Two-phase Flow in a Variable Aperture Fracture, *Water Resour. Res.*, 29(10), 3 453–3 476.
- Nash P J, Cox I C S, Rodwell W R, 1997.** Gas-water Interactions in Gas Migration from a Deep Repository in Fractured Hard Rock, Nirex Report NSS/R251.
- Nash P J, Goodfield M, Sullivan N A, Rodwell W R, 1999.** Conceptual Studies of the Evolution of Gas Pathways from a Radioactive Waste Repository in Fractured Rock, Nirex.
- Neretnieks I, 1987.** Channelling Effects in Flow and Transport in Fractured Rocks – Some recent Observations and Models, in *Proceedings of GEOVAL-87*, International Symposium, Stockholm, Sweden, pp 315–335.
- Neretnieks I, Ernstson M-L, 1997.** A Note on Radionuclide Transport by Gas Bubbles, in *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX*, 2–6 December (eds. W J Gray and I R Triay), MRS Symposium Proceedings Volume 465, Materials Research Society, Warrendale, Pennsylvania, pp 855–862.
- Persoff P, Pruess K, 1995.** Two-phase Flow Visualisation and Relative Permeability Measurement in Natural Rough-walled Rock Fractures, *Water Resour. Res.*, 31(5), 1 173–1 186.
- Pyrak L R, Myer L R, Cook N G W, 1985.** Determination of Fracture Void Geometry and Contact Area at Different Effective Stress, *EOS Trans. AGU (Abstract)*, 66 (46), November.
- Rodwell W R, Nash P J, 1992a.** Mechanisms and Modelling of Gas Migration from Deep Radioactive Waste Repositories, Nirex Report NSS/R250.
- Rodwell W R, Nash P J, 1992b.** Modelling of Far-Field Gas Migration from a Deep Radioactive Waste Repository, in *Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories*, Proceedings of an NEA/OECD Workshop, Aix-en-Provence, France, 23–26 September, 1991, NEA/OECD, Paris, pp 391–403.
- Rodwell W R, Lineham T R, Gardiner M P, 1999a.** Gas Migration in the Geosphere: Review of the Work Undertaken by the Nirex Safety Assessment Research Programme, Nirex Science Report.
- Rodwell W R, Harris A W, Horseman S T, Lalieux P, Müller W, Ortiz Amaya L, Pruess K, 1999b.** Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste, A Joint EC/NEA Status Report, European Communities.

Sellin P, 2002. Personlig kommunikation.

Selroos J-O, Walker D D, Ström A, Gylling B, Follin S, 2002. Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock, *Journal of Hydrology*, pp 174–188.

Sjöblom R, Hermansson H-P, Åkerblom G, 1995. Geogas in Crystalline Bedrock and its Potential Significance for Disposal of Nuclear Waste, in *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII Kyoto, Japan, 23–27 October, 1994*, (eds. T Murakami and R C Ewing), MRS Symposia Proceedings Volume 353, Materials Research Society, Pittsburgh, pp 477–482.

Thunvik R, Braester C, 1990. Gas Migration in Discrete Fracture Networks, *Water Resour. Res.*, 26(10), 2 425–2 434.

van Genuchten M Th, 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892–898.

Wanfang Z, Wheeler H S, Johnston P M, 1997. State of the art of modelling two-phase flow in fractured rock, *Environmental Geology* 31.

Wiborgh M, Høglund L O, Pers K, 1986. Gas Formation in a L/IL W Repository and Gas Transport through the Host Rock, *Nagra Technical Report NTB 85-17*, Wetingen, Switzerland.

Wikramaratna R S, Goodfield M, Rodwell W R, Nash P J, Agg P J, 1993. A Preliminary Assessment of Gas Migration from the Copper/Steel Canister, SKB TR-93-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wikramaratna R S, Goodfield M, Ayres D M, 1997. Transport of Dissolved Contaminants Resulting from Bubble-driven flow of Groundwater in Fractures, *Nirex Report NSS/R373*.

Zhou W, 2001. Numerical simulation of two-phase flow in conceptualized fractures, *Environmental Geology*, 40, pp 797–808.