

Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper

Komplettering PSU – Hydrogeologi
Kompletteringsfråga 7

Flödet genom 2BMA anges vara känsligt för parametreringen av zonerna som den skärs av (SKB TR-13-98 avsnitt 7.6). SSM noterar att basfallet för 2BMA förefaller att motsvara fallet med lågt flöde (SKB TR-13-08 figur 7-27). SSM önskar att SKB förtydligar hur SKB har hanterat känsligheten för parametreringen av zonerna som skär 2BMA i beräkningarna i SR-PSU. I svaret bör SKB beakta påverkan av de olika tillstånden för betongdegradering och parameteriseringen av zonerna på flödet genom avfallet.

1 Förtydligande av hantering rörande känslighet för bergets parametrering

1.1 Högt flöde i berget

Inom SR-PSU hanteras osäkerheter relaterade till parametreringen av bergets hydrauliska egenskaper genom *scenariot med högt flöde i berggrunden* (SKB 2015a, avsnitt 7.6.2). Effekterna tydliggörs i beräkningsfallet CCL_FH (SKB 2015a, avsnitt 8.4.2). I den regionala hydrogeologiska modelleringen har 17 bergmodeller inkluderats med olika parametreringar av deformationszoner och spricknätverk (Tabell 1-1, Odén et al. 2014, tabell 4-4). Bergmodell 1 har valts för huvudscenariot. I *scenariot med högt flöde i berggrunden* används hydrogeologiska data för bergmodellen med högt flöde (bergmodell 11) för beräkningarna av radionuklidtransport i geosfären. För förvarsutrymmena har vattenflöden skalats upp relativt huvudscenariot. Skalfaktorn för respektive förvarsutrymme är den maximala kvoten mellan vattenflöden i alla 17 bergmodeller och vattenflöden i huvudscenariot, för alla tidpunkter \geq år 2500 e Kr.

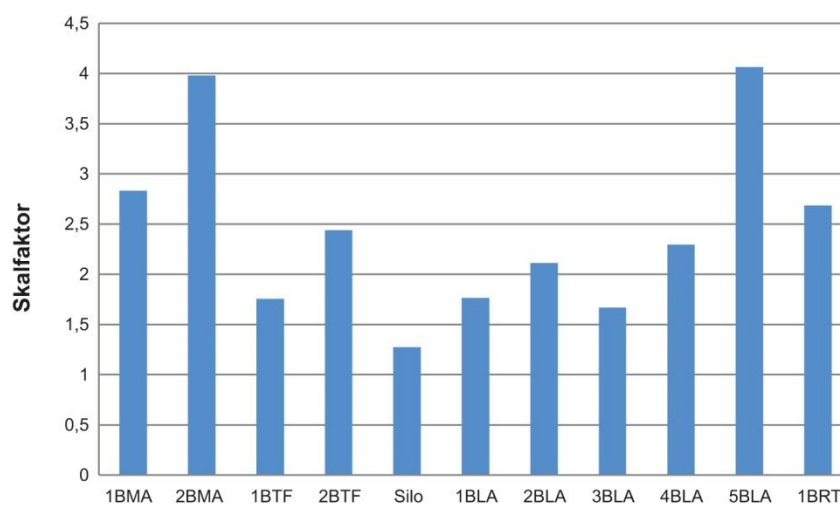
Tabell 1-1 visar alla framräknade skalfaktorer för 2BMA. Bergmodell 11 uppvisar de högsta flödena genom 2BMA för alla tidpunkter med undantag för 2500 e Kr, då bergmodell 12 ger något högre värde. Skalfaktorn för bergmodell 12 vid 2500 e Kr väljs därmed för att skala flödet genom bergsalen såväl som genom avfallet i 2BMA, för alla tidpunkter. Motivet för detta förfarande är att inte underskatta utsläpp från något förvarsutrymme, även om detta lett till en ofysikalisk uppsättning indata.

Skalfaktorer för övriga förvarsutrymmen beräknas med samma förfarande. Resultaten sammanfattas i avsnitt 7.6.2 av SKB 2015a och visas även i Figur 1-1.

Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper

Tabell 1-1. Beräknade skalfaktorer för 2BMA.

#	Bergmodell	2500 e Kr	3000 e Kr	3500 e Kr	5000 e Kr	9000 e Kr
1	BASE_CASE1_DFN_R85	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	BASE_CASE1_DFN_R18	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8
3	BASE_CASE2_DFN_R85	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4	nc_DEP_HOM_DFN_R03	1,8	2,0	2,4	2,4	2,4
5	nc_DEP_HOM_DFN_R85	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
6	nc_NoD_HOM_DFN_R85	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2
7	CD_DEP_R01_DFN_R85	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
8	nc_DEP_R01_DFN_R85	2,6	2,8	3,0	3,0	3,0
9	nc_DEP_R01_DFN_R18	2,7	2,6	2,8	2,8	2,9
10	CD_DEP_R07_DFN_R85	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1
11	nc_DEP_R07_DFN_R85	3,9	3,0	3,2	3,2	3,2
12	nc_DEP_R07_DFN_R18	4,0	2,7	2,9	3,0	3,1
13	nc_NoD_R01_DFN_R03	1,5	1,9	2,3	2,3	2,3
14	nc_NoD_R01_DFN_R85	1,2	1,5	1,6	1,6	1,6
15	nc_NoD_R01_DFN_R18	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3
16	nc_NoD_R07_DFN_R85	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6
17	nc_NoD_R07_DFN_R03	1,7	1,9	2,4	2,4	2,5



Figur 1-1. Skalfaktorer för flöden i närzonen angivet per förvarsutrymme (SKB 2015a, figur 7-13).

1.2 Påverkan av salsflöde på betongens degraderingstillstånd

De degraderingsprocesser som påverkar transportegenskaper i betongbarriären i 2BMA över tiden beskrivs i Höglund (2014, tabell 9-1) och sammanfattas nedan:

- 0-100 år efter förslutning. Processer drivna av vattenmättnadsfasen påverkar betongen under de första hundra åren. Lakning av alkalihydroxider medför en pH-sänkning från >13 till 12.5 (portlanditjämvikt).
- 100-20 000 år efter förslutning. Lakning av portlandit är den centrala process som påverkar betongens egenskaper under denna period.

Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper

- 20 000-50 000 år efter förslutning. Lakning av kalcium ur CSH-gelen följer på lakning av portlandit. Inväxt av thaumasit och ettringit kan potentiellt orsaka sprickbildning.
- 50 000-100 000 år efter förslutning. Betongen har väsentligen lakats ut på cementhydrater. Reaktionsfronter av ettringit, thaumasit och monokarboaluminat har passerat genom betongen. Kalcit har fällts ut.

1.2.1 Perioden upp till 20 000 år efter förslutning

Under de första 100 åren efter förslutning antas de hydrauliska egenskaperna hos betongbarriären i 2BMA vara desamma som vid initialtillståndet. Betongen har en genomsnittlig hydraulisk konduktivitet på $K_{\text{betong}}=8,3 \cdot 10^{-10}$ m/s och en effektiv diffusivitet på $D_e=3,5 \cdot 10^{-12}$ m²/s (SKB 2014a). Därefter antas betongen vara måttligt degraderad med en genomsnittlig konduktivitet på $K_{\text{betong}}=10^{-7}$ m/s och en effektiv diffusivitet på $D_e=5 \cdot 10^{-12}$ m²/s (SKB 2014a).

Den huvudprocess som påverkar betongens utveckling under perioden är lakning av portlandit. Lakningshastigheten beror av mekanismerna för masstransport. Tabell 1-2 visar medelhastigheter för grundvatten i betongbarriären, utvärderade från simulering av närzonshydrologi för 2000 e Kr, 3000 e Kr och 5000 e Kr (Abarca et al. 2013). De hydrauliska egenskaperna i berget ges av bergmodell 1 och bergmodell 11. Från 5000 AD och framåt råder fullt utbildade landförhållanden över förvaret. De hydrogeologiska förhållanden som råder då antas vara representativa även för framtida tempererade förhållanden under analysperioden (SKB 2015a). Under periglaciala förhållanden minskar flödet av grundvatten genom förvaret.

Tabell 1-2 redovisar även beräknade Péclets tal som relaterar masstransport genom diffusion till advektiv transport, enligt

$$Pe = \frac{uL}{D_e}$$

där u är grundvattnets hastighet genom betongbarriären (m/s) och L är barriärens tjocklek (0,5 m för 2BMA). Alla beräknade Péclets tal är mindre än 1 både för bergmodell 1 (huvudscenario) och bergmodell 11 (högt flöde). Det indikerar att diffusiv masstransport dominerar över advektiv transport genom betongbarriären och därmed att diffusion styr lakningen av portlandit.

Tabell 1-2. Flödes hastighet och Péclets tal i betongbarriären i 2BMA.

Tidpunkt (e Kr)	Bergmodell	Flödes hastighet i betongbarriär (m/s)	Péclets tal (-)
2000	1	$1,8 \cdot 10^{-16}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
3000	1	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
5000 och framåt	1	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
2000	11	$2,4 \cdot 10^{-16}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
3000	11	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$
5000 och framåt	11	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$

Flödet utanför och längs med betongbarriären kan påverka drivkraften för den diffusivt kontrollerade lakningen genom inverkan på gränsskiktets koncentrationen av lakningsprodukter. Effekten av flödes hastigheten i återfyllnaden i 2BMA på lakningsdjupet (h_y) kan utvärderas med följande analytiska uttryck (Höglund 2014, ekvation 5-13).

Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper

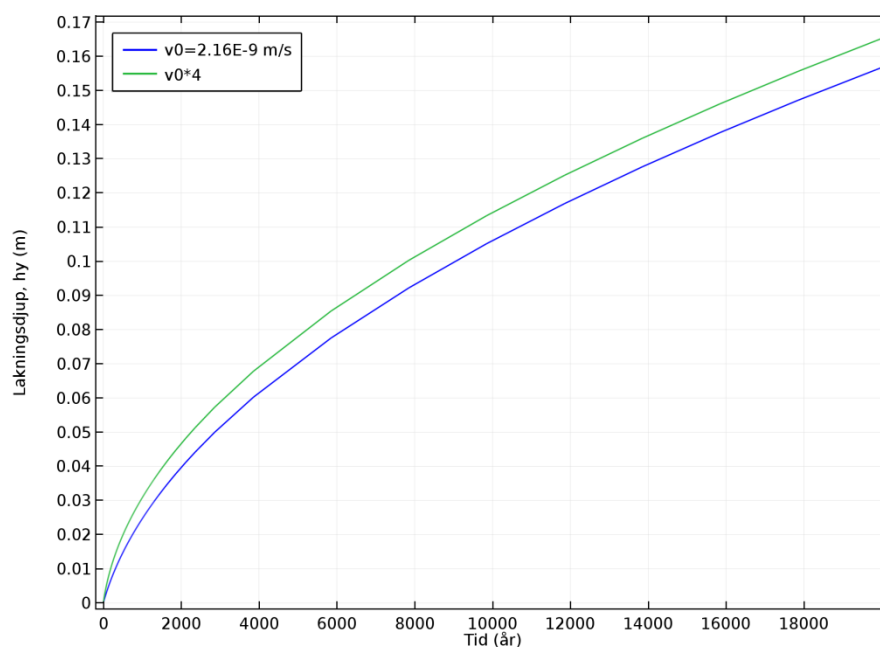
$$h_y = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{e,dc} \cdot t \cdot \left(c_{sol}^{CH} + \frac{\pi \cdot D_{e,dc} \cdot L \cdot q_0^{CH}}{16 \cdot D_{e,m} \cdot v_0 \cdot t} - \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot D_{e,dc} \cdot L \cdot q_0^{CH}}{16 \cdot D_{e,m} \cdot v_0 \cdot t} \right)^2 + \frac{\pi \cdot D_{e,dc} \cdot L \cdot q_0^{CH}}{8 \cdot D_{e,m} \cdot v_0 \cdot t} c_{sol}^{CH}} \right)}{q_0^{CH}}}$$

Ekvationens parametrar sammanfattas i Tabell 1-3.

Tabell 1-3. Parametervärden för utvärdering av portlanditlakning i betong.

Parameter	Värde	Beskrivning	Referens
$D_{e,dc}$	$5 \cdot 10^{-12}$ (m ² /s)	Effektiv diffusivitet i lakad betong, 100-20 000 år	SKB 2014a
$D_{e,m}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$ (m ² /s)	Effektiv diffusivitet i återfyllnad	Höglund 2014
c_{sol}^{CH}	$5 \cdot 10^{-3}$ (kmol/m ³)	Lösligheten hos portlandit	Höglund 2014
q_0^{CH}	1,04 (kmol/m ³)	Initial mängd portlandit	Höglund 2014
L	16,2+8,4 (m)	Påverkad längd av betong	SKB 2014b
v_0	$2,2 \cdot 10^{-9}$ (m/s)	Grundvattnets medelhastighet i återfyllnaden (Bergmodell 1, 5000 e Kr)	Abarca et al. 2013

Figur 1-2 visar lakningsdjupet h_y (m) för portlandit över tid. Den blå kurvan är resultatet för beräkningar med en flödes hastighet i återfyllnaden utvärderad från simulering av närzonshydrologi, med bergmodell 1 vid 5000 e Kr (Abarca et al. 2013). Resultatet av en fyra gånger högre grundvattenhastighet i återfyllnaden visas av den gröna kurvan. Detta svarar mot den maximala skillnad i flöde i förvarsutrymmet som beräknats för 2BMA sett över alla bergmodeller (se Tabell 1-1). Det beräknade lakningsdjupet ökar något, från cirka 16 till 17 cm sett över 20 000 år. Är lakningen av portlandit i betongbarriären kontrollerad av diffusion är kopplingen mellan flödet i förvarsutrymmet och betongdegraderingen således begränsad.



Figur 1-2. Lakat djup av portlandit (m) i betongkonstruktionen i 2BMA som funktion av tid (år). Blå kurva svarar mot inverkan av flödes hastigheten i återfyllnaden utvärderad från simulering av närzonshydrologi, med bergmodell 1 vid 5000 e Kr (Abarca et al. 2013). Inverkan av en fyra gånger högre grundvattenhastighet i återfyllnaden visas av grön kurva.

Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper

1.2.2 Perioden 20 000-50 000 år efter förslutning

Under perioden 20 000-50 000 år efter förslutning sker upplösning av CSH-faser i betongen. Beskrivningen av degraderingstillståndet tar hänsyn till att inväxt av thaumasit och ettringit potentiellt kan leda till spricktillväxt i betongen. Uppkomsten av genomgående sprickor i betongbarriären påverkar vattenflödet genom avfallet och transporten av radionuklider ut ur förvaret. Avsnitt 1.3 beskriver hur detta hanteras i modelleringen av radionuklidtransport.

Då vatten leds genom sprickor sker lakning av betong vid sprickornas ytor. Lakningsprocessen är liksom tidigare styrd av diffusionen i betongen, påverkad av koncentrationen av lakningsprodukter lösta i vattnet och av hastigheten med vilken vattnet rör sig i sprickan.

Den lokala lakningen av CSH-faser ur betong genomlöpt av en spricka kan beskrivas enligt (Höglund 2014, ekvation 5-25):

$$d_m(x, t) = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{e,dc} \cdot c_{sol}^{CSH} \cdot t}{q_0^{CSH}}} - \frac{2 \cdot D_{e,dc} \cdot x}{v_0 \cdot d}$$

Relevanta parametrar för ekvationen ges i Tabell 1-4.

Tabell 1-4. Parametervärden för utvärdering av lakning av CSH-faser i en spricka.

Parameter	Värde	Beskrivning	Referens
$D_{e,dc}$	$1 \cdot 10^{-11}$ (m ² /s)	Effektiv diffusivitet i lakad betong, 20 000-50 000 år	SKB 2014a
c_{sol}^{CSH}	$2,3 \cdot 10^{-3}$ (kmol/m ³)	Lösligheten hos CSH	Höglund 2014
q_0^{CSH}	1,23 (kmol/m ³)	Initial mängd CSH	Höglund 2014
v_0	$2,2 \cdot 10^{-9}$ (m/s)	Grundvattnets medelhastighet i återfyllnaden (Bergmodell 1, 5000 e Kr)	Abarca et al. 2013
d	5 (m)	Avstånd mellan sprickor i betongen	
x	0,25 (m)	Avstånd från spricköppning till en punkt mitt i betongväggen i 2BMA	

Med hjälp av uttrycket ovan kan påverkan på lakningsprocessen av ett ökat flöde i 2BMA uppskattas. Det beräknade lakningsdjupet d_m i en spricka, i en punkt mitt i betongväggen i 2BMA, utvärderat över ett 1000-års intervall, blir cirka 1 % större om vattenflödet genom förvarssalen är 4 gånger högre än det som beräknats för huvudscenariot. Utvärderat över ett tidsintervall på 10 000-tals år blir skillnaden mindre än 1 %. Exemplet visar att kopplingen mellan flödet i 2BMA och betongdegraderingen är begränsad.

1.2.3 Perioden 50 000-100 000 år efter förslutning

Under perioden 50 000-100 000 år efter förslutning lakas betongen ut på återstående cementhydrater. Betong antas bli fullständigt degraderad och påverkas inte ytterligare av grundvattenflödet.

Sammanfattningsvis förväntas de degraderingstillstånd som beskrivs för 2BMA i SR-PSU ha en begränsad koppling till parametreringen av bergmodellen.

1.3 Påverkan på flöde genom avfallet och radionuklidtransport

Scenariot högt flöde i berggrunden motsvaras av beräkningsfallet CCL_FH i radionuklidtransportberäkningarna. Vattenflöden genom förvarsutrymmen har här skalats upp relativt huvudscenariot, såsom beskrivits i avsnitt 1.1. Skalfaktorn för 2BMA är 4.

Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper

Modellering av radionuklidtransport tar hänsyn till sprickbildning i betongbarriärerna i 2BMA. För huvudberäkningsfallet global uppvärmning antas sprickor vara närvarande 20 000 år efter förslutning (se Tabell 4-1 och Appendix D i SKB 2015b). Detsamma gäller för beräkningsfallet högt flöde i berget (CCM_FH).

2 Referenser

Abarca E, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Moliero J, von Schenk H, 2013. Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Höglund L O, 2014. The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Odén M, Follin S, Öhman J, Vidstrand P, 2014. SR-PSU Bedrock hydrogeology. Groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-13-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2015a. Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU. Skbdoc 1469109 ver. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2015b. Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-09, Revised edition, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2014a. Data report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2014b. Initial state report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.