

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

Sammanfattning

I ansökan enligt miljöbalken och enligt kärntekniklagen om utökad verksamhet vid SFR beskrivs en konceptuell utformning av betongkonstruktionen i förvarsutrymmet 2BMA. Den konceptuella utformningen av betongkonstruktionen har efter inlämnad ansökan utvecklats för att hantera den sammantagna lastsituationen i förvarsutrymmet för olika skeden. En mer detaljerad beskrivning av den utvecklade utformningen ges i denna rapport. För att säkerställa en robust konstruktion, som inte är beroende av bärande samverkan med avfallskollin och kringgjutningsbruk för sin strukturella integritet, har innerväggar införts i betongkonstruktionen. Innerväggarna formar ett rutnät i betongkonstruktionen, och avfallsbehållarna staplas på varandra i fack likt i silon i befintligt SFR. Innerväggarna avlastar betongkonstruktionens ytterväggar, lock och golv och reducerar spännvidderna. Dimensioneringen av ytterväggar, lock och golv anpassas utifrån den förändrade lastsituationen. Vid dimensioneringen beaktas också utvecklingen av betongens egenskaper över tid.

Kringgjutning av avfallsbehållarna är inte nödvändigt ur mekanisk synvinkel, men möjligheten att kringgjuta bibehålls. En utvecklad gasavlastningsutformning baserad på redan kända och använda material har introducerats, som säkerställer gasavlastning vid små övertryck. Den utvecklade utformningen säkerställer att betongkonstruktionens flödesbegränsande egenskaper och förmåga att kvarhålla radionuklider upprätthålls med beaktande av de laster – yttre och inre – som konstruktionen utsätts för under förvarets olika skeden.

Rapporten redovisar dimensionerande lastfall för 2BMA och utvecklar beskrivningen av identifierade laster. Rapporten ger vidare en konceptuell beskrivning av den utvecklade utformningen för betongkonstruktionen i 2BMA, inklusive förvarsutrymmets funktion efter förslutning och hur identifierade lastfall för tiden efter förslutning omhändertas. Förnyade flödes- och radionuklidtransportberäkningar redovisas för att illustrera den utvecklade gasavlastningsutformningens påverkan på advektiva vattenflöden och utsläpp av radionuklider.

En förnyad jämförelse görs mellan den ansökta utformningen och en silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär. Underlaget rörande alternativens strålsäkerhetsmässiga konsekvenser efter förslutning och kostnader har utvecklats. Motiven till vald utformning redovisas.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Innehållsförteckning	2
1 Inledning	3
1.1 Bakgrund	3
1.2 Syfte	3
1.3 Metodik för teknikutveckling i utbyggnadsprojektet	3
1.4 Referensutformningen av 2BMA i ansökan	3
1.5 Rapportens struktur	4
2 Konstruktionsstyrande förutsättningar	4
2.1 Konstruktionsstyrande fall ur säkerhetsanalysen SR-PSU	4
2.2 Lastförutsättningar	5
3 Utvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA	8
3.1 Översikt	8
3.2 Detaljerad beskrivning	9
3.3 Uppförande	12
3.4 Förslutning	13
3.5 Kvarstående frågor	13
4 Säkerhet efter förslutning	13
4.1 Förvarets funktion efter förslutning	13
4.2 Modellering av närzonshydrologi och radionuklidtransport	14
4.3 Indata och beräkningsfall	16
4.3.1 Geometri	16
4.3.2 Transportegenskaper för material	16
4.3.3 Hydrologiska randvillkor	17
4.3.4 Beräkningsfall	18
4.4 Resultat – närzonshydrologi	18
4.4.1 Flöde genom bergssalen	18
4.4.2 Flöde genom avfallet	19
4.4.3 Gasavlastningskanalernas orientering relativt bergssalen	20
4.4.4 Flöden över kontrollvolym	21
4.5 Resultat – radionuklidtransport och dosberäkningar	21
4.5.1 Radiotoxicitetsutsläpp	21
4.5.2 Doser	23
4.6 Slutsatser	25
5 Alternativjämförelse och val	25
5.1 Alternativa utformningar	25
5.2 Utvärdering av strålsäkerheten efter förslutning	25
5.3 Utvärdering av kostnader	26
5.4 Motivering till valt alternativ	26
Referenser	27

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) i Forsmark slutförvaras låg- och medelaktivt driftavfall från de svenska kärntekniska anläggningarna. Anläggningen ägs av Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, och har varit i drift sedan 1988. Förvaret är inrymt i försvarsutrymmen 60 m under Östersjöns botten och har kapaciteten att slutförvara driftavfall från svenska kärnkraftverk såväl som radioaktivt avfall från andra avfallsproducenter såsom industri, sjukvård och forskning.

Då kärnkraftsindustrin i Sverige ansvarar för att omhänderta allt radioaktivt avfall från sina anläggningar, både drift- och rivningsavfall, finns idag behov av förvar för rivningsavfall. SKB driver därför arbetet med en ansökan om att få bygga ut SFR till en anläggning för slutförvar av både drift- och rivningsavfall.

Utbyggnaden av SFR är ett kärntekniskt anläggningsprojekt vars huvudmål är att driftsätta en utbyggd anläggning så att rivningsavfallet från de svenska kärnkraftverken kan slutligt omhändertas. Projektet är indelat i ett antal projektskeden och delprojekt, där denna rapport behandlar arbetet som bedrivits inom delprojekt Teknikutveckling med fokus på barriärutformning för försvarsutrymme för medelaktivt avfall i det utbyggda SFR.

1.2 Syfte

I ansökan enligt miljöbalken och kärntekniklagen om utökad verksamhet vid SFR beskrivs en konceptuell utformning av betongkonstruktionen i försvarsutrymmet 2BMA. Syftet med föreliggande rapport är att beskriva den vidareutvecklade utformning som har studerats för 2BMA.

1.3 Metodik för teknikutveckling i utbyggnadsprojektet

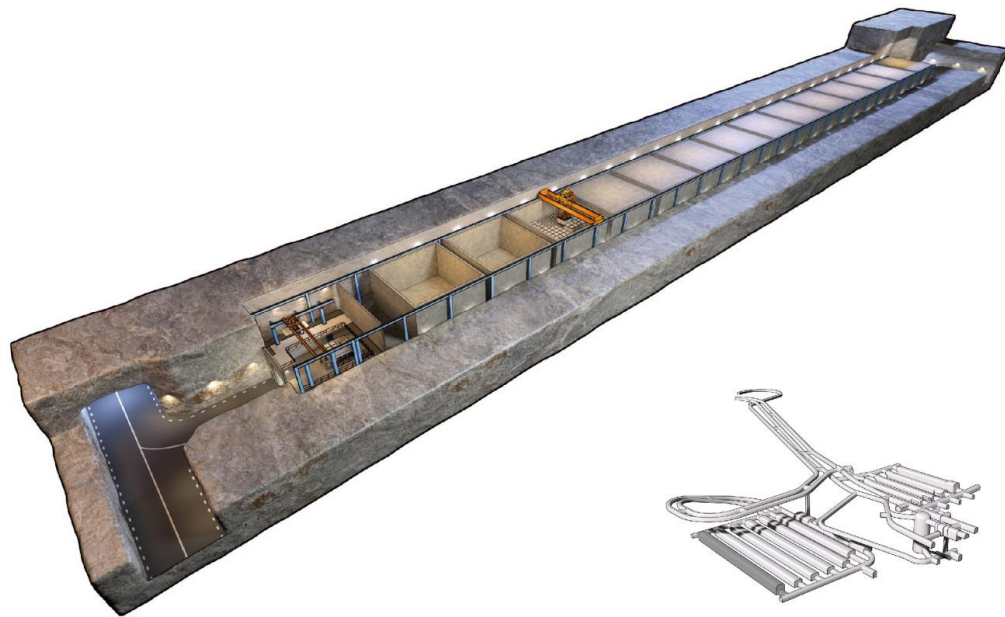
Inför ansökan för utbyggnad av SFR har teknikutveckling bedrivits i syfte att ta fram en referensutformning för de tekniska barriärerna i utbyggnaden samt leverera underlag till systemprojektering och till analysen av säkerheten efter förslutning. Teknikutvecklingen har därför främst varit fokuserad på utformning, beskrivning och val av tekniska barriärer i den utbyggda delen av SFR samt beskrivning av förslutningen av hela anläggningen.

Teknikutvecklingen är en process som bedrivs stegvis under samtliga projektskeden och i samverkan med övrig projektering och säkerhetsanalysarbete. I nuvarande skede utvecklas den konceptuella utformningen från ansökan, verifierande tester och analyser av föreslagna utformningar utförs och förslag på produktionsmetoder utarbetas. Resultatet utgör av en uppdaterad systemhandling, specificerade funktionskrav och krav på material, tillverkning och uppförande. Under nästa skede – detaljprojekteringen – kommer utformningen att vidareutvecklas till ett underlag för upphandling av entreprenaderna.

Det stegvisa teknikutvecklingsarbetet görs i syfte att fastställa de detaljerade kraven på konstruktionens ingående delar, genom att verifiera vald konstruktion och utförandeteknik.

1.4 Referensutformningen av 2BMA i ansökan

Referensutformningen av 2BMA som presenterades i ansökan utgörs av ett konventionellt utsprängt bergrum med fristående kvadratiska betongkonstruktioner, även benämnda *kassuner* (Figur 1-1). Kassunerna har 500 millimeter tjocka väggar, bottenplatta och lock av oarmerad betong, och grundläggs på en bädd av packat friktionsmaterial. Avfallet placeras i kvadratiska enheter om 2 400 millimeter (2 × 2 kokiller) med ett inbördes avstånd på 100 millimeter (150 millimeter mellan avfallskollin och kassunvägg) för att möjliggöra kringgjutning av avfallet innan förslutning.



Figur 1-1. Illustration av 2BMA i utbyggd del av SFR.

Deponeringstraversen går till skillnad mot det befintliga 1BMA på en fristående bana och belastar således inte betongkonstruktionerna.

1.5 Rapportens struktur

Kapitel 2 redovisar dimensionerande lastfall och utvecklar beskrivningen av identifierade laster, deras storlek, utveckling över tid etc.

Kapitel 3 ger en konceptuell beskrivning av den utvecklade utformningen för betongkonstruktionen i 2BMA. Vidare ges mer detaljerad information om konstruktionens utformning, uppförande och förslutning.

Kapitel 4 redovisar förvarsutrymmets funktion efter förslutning och hur identifierade lastfall för tiden efter förslutning omhändertas. Vidare redovisas de förnyade flödes- och radionuklidtransportberäkningar som genomförts för att illustrera den utvecklade gasavlastningsutformningens påverkan på vattenflöden och utsläpp av radionuklider.

Kapitel 5 förnyar jämförelsen mellan den ansökta utformningen och en silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär som tidigare redovisats i ansökan. Underlaget rörande alternativens strålsäkerhetsmässiga konsekvenser efter förslutning och kostnader för uppförande och förslutning har utvecklats. Motiven till vald utformning redovisas.

2 Konstruktionsstyrande förutsättningar

2.1 Konstruktionsstyrande fall ur säkerhetsanalysen SR-PSU

Ur säkerhetsanalysen SR-PSU (SKB 2015a) och tidigare arbeten har ett antal konstruktionsstyrande fall identifierats. Dessa redovisas i detalj i Andersson et al. (2017) och presenteras översiktligt i detta avsnitt.

Konstruktionsstyrande scenarier

Utöver säkerhetsanalysen huvudscenariot bedöms följande analyserade scenarier vara konstruktionsstyrande för betongkonstruktionen i 2BMA:

Vidareutvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

- Accelererad betongdegradering
- Höga koncentrationer av komplexbildare
- Förlust av barriärfunktion – ingen sorption i förvaret
- Förlust av barriärfunktion – högt vattenflöde i förvaret

Accelererad betongdegradering. I detta scenario antas säkerhetsfunktionen lågt flöde i försvarsutrymmen vara försämrade till följd av att de fysikaliska degraderingsprocesser som verkar på betongen i förvaret antas ske snabbare och vara mer omfattande än i huvudscenariot. Den ökade dosen jämfört med huvudscenariot visar på vikten av en god betongbarriär för försvarsutrymmena 1BMA och 2BMA.

Höga koncentrationer komplexbildare. I detta scenario antas säkerhetsfunktionen god retention vara försämrade till följd av osäkerheter i den initiala mängden cellulosa. Den ökade dosen jämfört med huvudscenariot visar att komplexbildare kan ha betydelse för dosen och att större mängder komplexbildare än de som antagits i huvudscenariot inte är att föredra. Scenariot visar på betydelsen av att begränsa mängden komplexbildare i avfall och konstruktionsmaterial.

Förlust av barriärfunktion – ingen sorption i förvaret. Detta scenario illustrerar betydelsen av sorption i förvaret. Scenariot visar att sorption har stor betydelse för förvarets skyddsförmåga. En god sorption i SFR erhålls genom användandet av cement som ingående komponent i konstruktionerna i de försvarsutrymmen som har säkerhetsfunktionen god retention, exempelvis 2BMA.

Förlust av barriärfunktion – högt vattenflöde i förvaret. Detta scenario illustrerar betydelsen av de tekniska barriärernas förmåga att begränsa vattenflöde genom den del av försvarsutrymmena som innehåller avfall. Detta scenario visar att de flödesbegränsande egenskaperna hos barriärerna är viktiga och scenariot kan anses vara ett konstruktionsstyrande fall. För BMA-salarna är det betongkonstruktionerna som reglerar det advektiva flödet.

Konstruktionsstyrande förutsättningar

Konstruktionsstyrande förutsättningar för betongkonstruktionerna i 2BMA identifieras ur de konstruktionsstyrande fallen. I säkerhetsanalysen görs därtill ett antal antaganden som kopplar till barriärernas utveckling över tid och som därmed leder till krav på material och konstruktionernas egenskaper.

För 2BMA är *god retention* och *lågt flöde i försvarsutrymmet* viktiga säkerhetsfunktioner som identifierats vid scenarioanalysen. En av säkerhetsfunktionsindikatorerna för god retention är pH. Högt pH reducerar korrosionshastigheten för järn och stål, leder till en försumbar mikrobiell aktivitet samt bidrar till god sorption för vissa radionuklider. Högt pH kan erhållas genom användandet av betongmaterial i försvarsutrymmet. För 2BMA innebär det att betong används som konstruktionsmaterial och cementbaserade material används för igjutning av avfallskollin.

För att erhålla lågt flöde i försvarsutrymmen behöver betongen som används i barriären vara av bra kvalitet och grundläggningen stabil. På så sätt minimeras risken för uppkomst av sprickor i barriären. Vid konstruktionen av betongbarriären i 2BMA minimeras som en följd av denna användningen av material som kan orsaka genomgående sprickor i konstruktionen, exempelvis genomgående formstag. Vidare utvecklas betongreceptet för att minimera betongens krympning, vilket också minskar risken för uppkomst av sprickor i barriären.

2.2 Lastförutsättningar

Nedan redovisas de lastfall som identifierats som relevanta för dimensionering av en betongkonstruktion i 2BMA.

- Laster under byggskedet
 - Gjuttryck (dimensionering av form)
 - Spänningar förorsakade av temperaturutveckling vid utförande

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

- Laster under drift och vid förslutning
 - Spänningar orsakade av skillnad i uttorkningskrympning mellan bottenplatta och väggar
 - Yttre jordtryck (från återfyllnadsmaterialet)
 - Inre gjuttryck
 - Last av avfall
- Olyckslaster under drift och vid förslutning
 - Last av tappad kokill
 - Oavsiktlig stöt från travers
- Laster efter förslutning
 - Last av fallande bergblock
 - Yttre vattentryck
 - Yttre jordtryck (från återfyllnadsmaterialet)
 - Inre tryck till följd av processer i avfallet

De identifierade lasternas natur och deras påverkan på betongkonstruktionen redovisas i följande avsnitt.

Laster under byggskedet

Gjuttryck från betongen uppstår då betongen hålls i formen och upphör då betongen härdat till en fast volym. Gjuttrycket är dimensionerande för formen och bland annat beroende av betongrecept och gjuthöjder.

Spänningar förorsakade av temperaturutveckling vid utförande. Under betongens härdning utvecklas värme i den gjutna volymen. Beroende på geometriska förutsättningar, omgivande temperatur, formmaterial etc avges värmen olika effektivt från olika delar av den gjutna volymen. En uniform svalningsprocess är att föredra för att minska de spänningar som introduceras i den gjutna volymen, då sprickor kan uppstå till följd av spänningar i materialet. Värmeutvecklingen i materialet kan påverkas genom val av betongrecept. Spänningarna i materialet kan fördelas genom armering. Vidare kan grova konstruktioner behöva särskilda arrangemang för att reducera temperaturgradienterna i den gjutna volymen under härdningen.

Laster under drift och förslutning

Spänningar orsakade av skillnad i uttorkningskrympning mellan bottenplatta och väggar.

Uttorkningen skiljer sig mellan olika delar hos betongkonstruktionen och beror främst på om uttorkningen sker dubbelsidigt – som för betongkonstruktionens väggar – eller enkelsidigt – som för bottenplattan. Skillnaderna i uttorkningshastighet leder till skillnader i uttorkningskrympning mellan olika delar i konstruktionen. De spänningar som uppstår beror även av om konstruktionsdelen är fri att röra sig eller inte, vilket bör beaktas vid utvecklingen av produktionsmetod. Valet av betongrecept har betydelse för krympningens storlek. I befintligt SFR varierar klimatet beroende på ventilationssystemets utformning, men i det utbyggda SFR strävas efter ett mer kontrollerat klimat, vilket kan åstadkommas genom styrning av ventilation och därmed luftomsättningen i förvarsutrymmet. Detta i kombination med installation av tunnelduk eller motsvarande för vattenavledning (förhindra dropp) samt dränerad bottenbädd ger en god miljö för betongkonstruktionerna i förvarsutrymmet.

Yttre jordtryck utgörs av det tryck som återfyllnadsmaterialet i förvarsutrymmet utövar på betongkonstruktionen. Trycket bestäms av återfyllnadsmaterialets densitet och höjd. Denna last uppstår vid förslutningen när återfyllnadsmaterialet installeras och består sedan under tiden efter förslutning. Storleken på lasten på betongkonstruktionen minskar dock när förvaret är vattenmättat, eftersom återfyllnadens tunghet i vatten är mindre än i luft.

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

Inre gjuttryck uppstår om avfallsbehållarna kringgjuts i konstruktionen och verkar på betongkonstruktionens ytterväggar. Gjuttrycket bestäms av betongrecept och gjuthöjder. Trycket uppstår då kringgjutningsbruket hålls i betongkonstruktionen och upphör då kringgjutningsbruket härdat till en fast volym. Gjuttrycket kan reduceras genom minskade gjuthöjder eller hanteras med mekaniska mothåll som monteras på utsidan av betongkonstruktionens ytterväggar i samband med gjutningen.

Last av avfall bestäms av det avfall som placeras i betongkonstruktionen och verkar på betongkonstruktionens bottenplatta. Lasten uppstår successivt vid deponering av avfall och består sedan under tiden efter förslutning. Bottenplattan dimensioneras även för den snedbelastning som kan uppstå då avfallet successivt placeras i betongkonstruktionen.

Olyckslaster under drift och vid förslutning

Last av tappad kokill och oavsiktlig stöt från travers är impulslaster till följd av olycksfall under driftskedet eller vid förslutning. Dessa laster utgör inte dimensionerande laster för betongkonstruktionen utan hanteras genom andra åtgärder på traversens styrsystem och traversens ingående komponenter.

Laster efter förslutning

Last av fallande bergblock är en impulslast som kan uppstå vid bergutfall efter förslutning. Denna last hanteras genom att återfyllnadsmaterialet installeras till sådan höjd i förvarsutrymmet att fallhöjden för eventuella bergblock reduceras. På så sätt reduceras impulsen från fallande bergblock så att betongkonstruktionen inte påverkas negativt.

Yttre vattentryck verkar på betongkonstruktionens bottenplatta, väggar och lock. Det ensidiga vattentrycket uppstår när återmättnaden av förvarsutrymmet påbörjas omedelbart efter förslutning, och verkar till dess att grundvattnet trängt in även i betongkonstruktionens inre. Det ensidiga vattentrycket bestäms av förvarsutrymmets förläggningsdjup och uppgår till maximalt 150 mVp (1,5 MPa) för 2BMA i det utbyggda SFR. Den tid som det ensidiga vattentrycket verkar på betongkonstruktionen har värderats till något eller ett par tiotal år efter förslutning. När vatten trängt in i betongkonstruktionens inre utgör vattentrycket ett isostatiskt tryck, som verkar lika på betongkonstruktionens sidor under resterande del av tiden efter förslutning. Det ensidiga vattentrycket är dimensionerande för betongkonstruktionens bottenplatta, väggar och lock, medan det isostatiska trycket inte är dimensionerande för betongkonstruktionen.

Yttre jordtryck utgörs av det tryck som återfyllnadsmaterialet i förvarsutrymmet utövar på betongkonstruktionen. Trycket bestäms av återfyllnadsmaterialets densitet och höjd. Denna last uppstår vid förslutningen när återfyllnadsmaterialet installeras och består sedan under tiden efter förslutning. Storleken på lasten på betongkonstruktionen minskar dock när förvaret är vattenmättat, eftersom återfyllnadens tunghet i vatten är mindre än i luft.

Inre tryck till följd av processer i avfallet. Efter förslutning startar olika processer i avfallet. I 2BMA utgörs de viktigaste processerna som kan påverka lasterna på betongkonstruktionen av korrosion av metaller samt vattenåtermättnad av jonbytarmassor. Korrosion pågår i begränsad omfattning redan vid förslutning och upphör första när all metall i förvarets korroderat. Hur lång tid processen pågår beror bland annat på tjockleken på metallgodset i avfallet. Korrosionsprodukterna har större volym än metallen och kan således utöva ett tryck på omgivningen. Vid korrosion av metall under anaeroba förhållanden bildas utöver korrosionsprodukter även gas. Gasproduktionen kan bygga upp tryck och utöva last på betongkonstruktionens bottenplatta, väggar och lock. Vattenåtermättnad av jonbytarmassa kan leda till ett svälltryck som verkar på omgivningen. Dessa processer är beroende av tillgången på vatten och tidsutvecklingen av lasterna kopplar således till vattentransporten i och kring förvarsutrymmet.

SKB bedriver utredningar för en förbättrad processförståelse och för att minska osäkerheterna kopplat till dessa processer och deras utveckling över tid. Genomförda försök indikerar att korrosionshastigheter hos aluminium och zink tidigare har överskattats, och mer kontrollerade försök pågår i samarbete med Kungliga tekniska högskolan i Stockholm. Kontrollerade försök rörande vilket svälltryck som kan utvecklas vid vattenåtermättnad av bitumensolidifierad jonbytarmassa pågår på Äspö-laboratoriet inom

Vidareutvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

SKB. Dock är detta långsamma processer som kräver välbestämda experimentella förhållanden och noggranna mätningar, varför SKB bedömer att kunskapsläget inte radikalt kommer att förändras i närtid.

3 Utvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA

3.1 Översikt

Styrande för utvecklingen av försvarsutformningar är de krav som identifieras ur säkerhetsanalyser och andra utredningar. Den stegvisa teknikutvecklingen innefattar en successiv detaljering av krav och konstruktionsstyrande förutsättningar allt eftersom arbetet fortskrider. På en övergripande nivå har ett antal konstruktionsstyrande fall identifierats ur säkerhetsanalysen SR-PSU (SKB 2015a) och tidigare arbeten. Dessa redovisas i detalj i Andersson et al. (2017). De konstruktionsstyrande fallen ur säkerhetsanalyserna påvisar behoven att begränsa flödet i försvarsutrymmet 2BMA och att upprätthålla god retentionsförmåga genom att säkerställa högt pH, reducerande förhållanden och tillräcklig sorptionsyta. Krav kan därifrån formuleras på betongen i försvarskonstruktionen täthet vid förslutning och mängden cement i förvaret. Dessa krav används sedan som grund för den fortsatta teknikutvecklingen.

Andra förutsättningar som är relevanta för dimensioneringen och för att säkerställa byggbarhet utgörs av de *yttre* och *inre* laster som konstruktionen utsätts för under förvarets olika skeden – uppförande, drift samt vid och efter förslutning. Sådana laster är exempelvis spänningar vid gjutning av betongkonstruktionen, laster från avfall och återfyllnadsmaterial och laster från bergutfall. Identifierade laster finns redovisade i avsnitt 2.2. Bland de identifierade lasterna finns laster vars kvantitativa värden är väl kända, men också laster där osäkerheter i exempelvis storlek och utveckling över tid föreligger. Det senare gäller exempelvis inre tryck till följd av processer i avfallet. Inriktningen på arbetet inom teknikutvecklingen är att genom val av konstruktionsutformningar minimera påkänningarna på betongkonstruktionen från laster där större osäkerheter föreligger, främst inre tryck till följd av processer i avfallet. Genom sådana val rörande utformningen av konstruktionen kan viktiga osäkerheter hanteras, vilket ger en robust utformning.

För att säkerställa en robust konstruktion, som inte är beroende av bärande samverkan med avfallskollin och kringgjutningsbruk för sin strukturella integritet, har innerväggar införts i betongkonstruktionen. Innerväggarna formar ett rutnät i betongkonstruktionen, och avfallsbehållarna staplas på varandra i fack likt i silon i befintligt SFR. Innerväggarna avlastar betongkonstruktionens ytterväggar, lock och bottenplatta och reducerar spännvidderna. Dimensioneringen av ytterväggar, lock och bottenplatta anpassas utifrån den förändrade lastsituationen. Vid dimensioneringen beaktas också utvecklingen av betongens egenskaper över tid.

De inre laster som påverkar betongkonstruktionen efter förslutning utgörs av inre tryck till följd av processer i avfallet, främst korrosion av metaller och vattenåtermättnad av jonbytarmassor. Osäkerheterna kopplat till dessa processer och deras tidsutveckling behöver därför beaktas vid utvecklingen av den tekniska utformningen av betongkonstruktionen och eventuell kringgjutning av avfallet.

Genom införandet av innerväggar i betongkonstruktionen behöver en eventuell kringgjutning inte utformas för att överföra last mellan avfallskollin och betongkonstruktionens väggar, för att betongkonstruktionen ska kunna hantera yttre laster. Ur lasthänseende kan utrymmet mellan avfallskollin och väggar lämnas tomt. Genom att utrymmet mellan avfallskollin och väggar lämnas tomt (eller att en eventuell kringgjutning utformas för att inte överföra last mellan avfallskollin och väggar), kommer inte heller inre laster överföras från avfallet till betongkonstruktionens väggar. Utrymmet mellan avfallskollin och betongkonstruktionens väggar ger rum för eventuell svällning av avfall och avfallsbehållare. Svälltryck från avfallet (till följd av korrosion och återmättnad av jonbytarmassor) är således inte dimensionerande för betongkonstruktionen.

Gasutveckling är främst en följd av korrosion av metall i avfallet. Betongkonstruktionen har försetts med en gasavlastningsutformning för att kontrollera gasavlastningen och därmed begränsa det övertryck som

Vidareutvecklad utformning av försvarutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

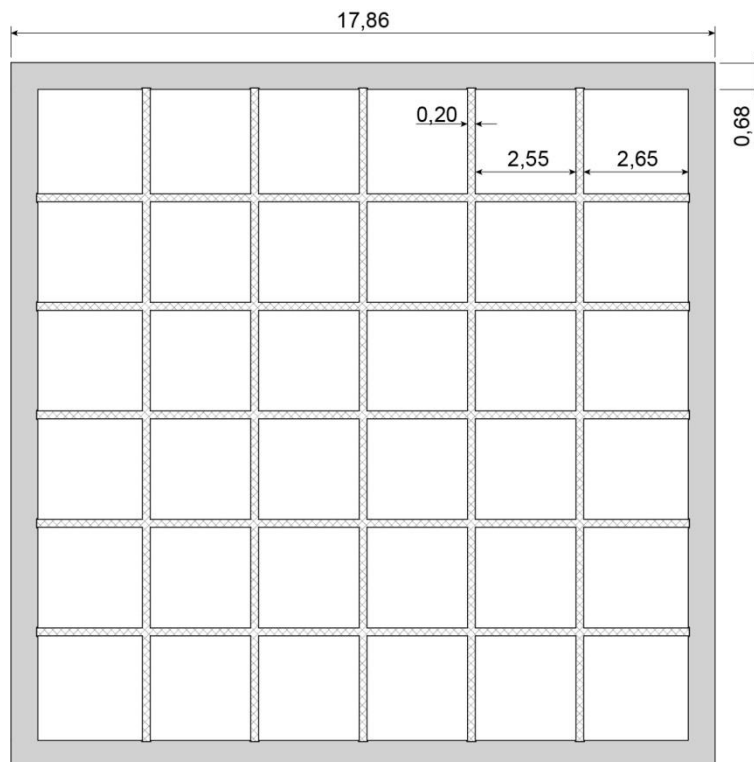
skulle kunna uppstå i betongkonstruktionen. Utformningen bygger på särskilt utformade vertikala kanaler i locket som fylls med mer poröst cementbruk.

Det porösa cementbruket tillåter uttransport av gas redan vid ett litet övertryck i betongkonstruktionen (ca 6 kPa vid en ca 0,5 m lång kanal med poröst cementbruk). Detta tryck är då dimensionerande för betongkonstruktionen och förväntas uppstå kort efter förslutning, till följd av gasutveckling i samband med korrosion av metall i avfall och avfallsbehållare. Poröst cementbruk används redan idag i silo i befintligt SFR för att säkerställa transportvägar för gas i schakten. Genom införandet av särskilt utformade kanaler som gasavlastningsväg i konstruktionen erhålls en utformning som är möjlig att verifiera, och där eventuella brister vid uppförandet kan åtgärdas. Gasavlastningsutformningen är utformad så att betongkonstruktionens strukturella integritet inte påverkas. Eventuella gjutspalter som uppstår mellan locket och betongkonstruktionens väggar behöver inte heller tillskrivas en gasavlastande funktion. Egenskaperna hos betongen i locket (utom gasavlastningskanalerna) förväntas inte skilja sig från egenskaperna hos betongen i konstruktionen i övrigt, som utformas för hög täthet och liten krympning.

3.2 Detaljerad beskrivning

Nuvarande preliminära dimensionering av betongkonstruktionerna bygger på betongklass C50/60, men slutlig dimensionering görs i samband med detaljprojektering av konstruktionen. Dimensionerande beräkningar redovisas i Westerberg (2017).

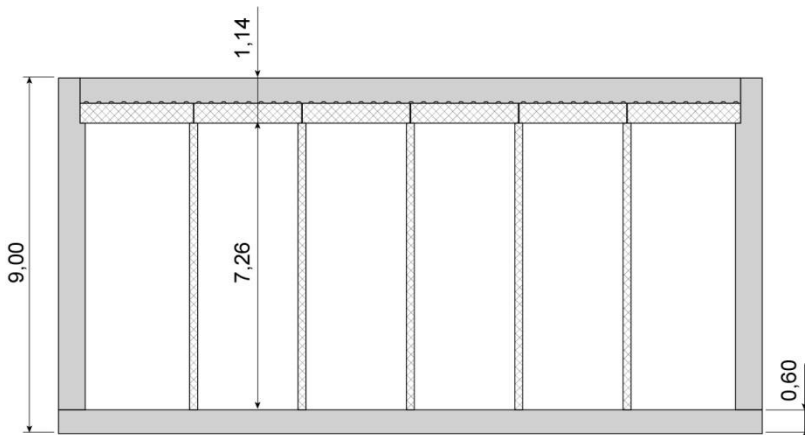
Betongkonstruktionens bottenplatta uppförs med 0,60 m tjocklek och ytterväggarna uppförs med 0,68 m tjocklek. Bottenplattan kan göras mindre grov då innerväggarnas placering ger en mer fördelaktig lastsituation. Ytterväggarnas tjocklek är något reducerad högst upp för att fungera som upplag för locket. Innerväggar med tjockleken 0,20 m placeras i ett rutnär, med ett inbördes avstånd 2,55–2,65 m (se Figur 3-1). Varje fack rymmer då 2×2 kokiller i planet (där varje kokill mäter 1,20 m \times 1,20 m). I presenterad utformning gjuts ytterväggarna med ursparningar (0,03 m) för att underlätta infästning av prefabricerade betongelement som innerväggar.



Figur 3-1. Grundplan för betongkonstruktion med innerväggar sedd från ovan. Betongkonstruktionen består av 6×6 fack som vardera rymmer 2×2 kokiller i planet.

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

Ytterväggarna uppförs till en höjd 8,4 m ovan bottenplatta (se Figur 3-2). Sex lager med kokiller eller åtta lager med fat på fatbricka kan då placeras i betongkonstruktionen. Strålskärmslock i betong (0,5 m) placeras över fack som är delvis eller helt fyllda med avfallskollin. Detta bidrar till god strålsäkerhet under drift och vid förslutning. Strålskärmslocken lämnas kvar och fungerar även som stöd för den pågjutningen med betong (0,6 m) görs senast i samband med förslutning. Tillsammans utgör de kvarsittande strålskärmslocken och pågjutningen betongkonstruktionens lock.

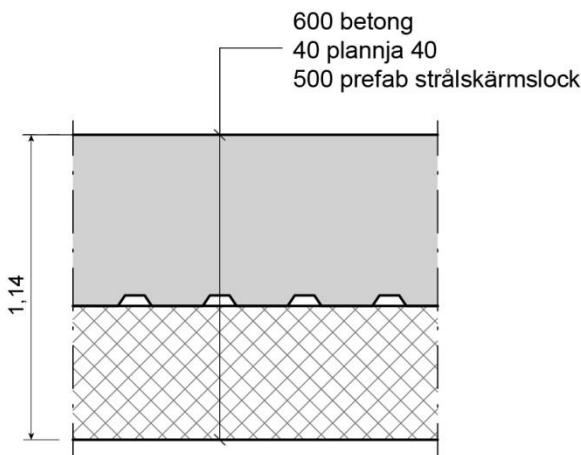


Figur 3-2. Genomsnitt av betongkonstruktion sedd från sidan. Bottenplatta, ytterväggar, innerväggar, kvarsittande strålskärmslock och pågjutning (lock) synliga. Strålskärmslock placeras över fack som är delvis eller helt fyllda med avfallskollin. Ovanpå de kvarsittande strålskärmslocken görs en pågjutningen med betong senast i samband med förslutning.

Gasavlastningsutformningen består av

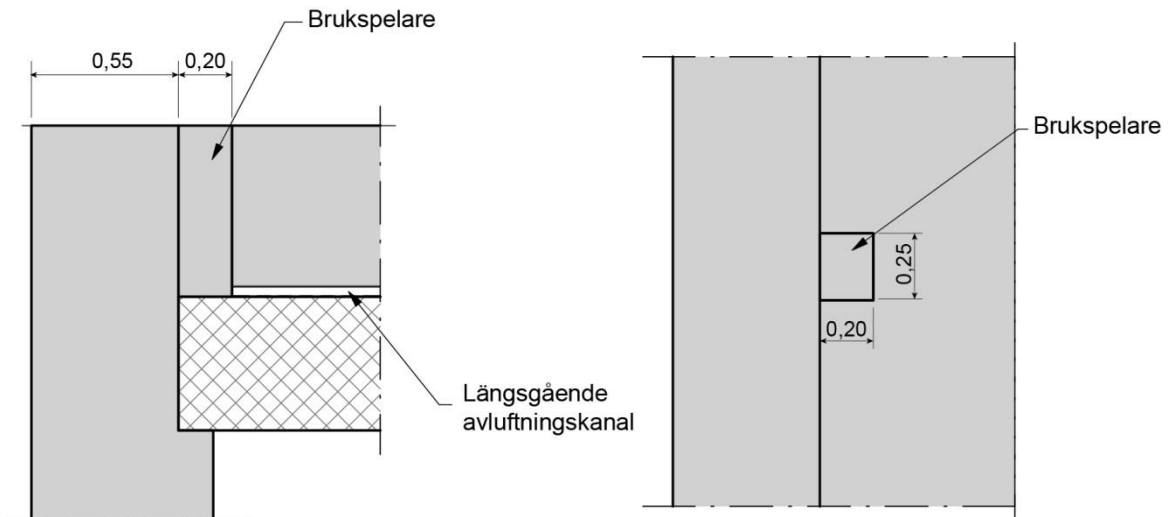
1. horisontella (tomma) gasavlastningskanaler som löper i gränsytan mellan strålskärmslocken och den tätare pågjutningen (se Figur 3-3) och
2. vertikala gasavlastningskanaler fyllda med poröst cementbruk som placeras längs med en yttervägg (och som genomskär det pågjutna locket; se Figur 3-4).

I nuvarande utformning konstrueras sex vertikala gasavlastningskanaler med tvärsnittet 0,20 m × 0,25 m. Gasavlastningsutformningen är utformad så att betongkonstruktionens strukturella integritet inte påverkas. Betongkonstruktionen sedd från ovan efter pågjutning och installation av de vertikala gasavlastningskanalerna visas i Figur 3-5.

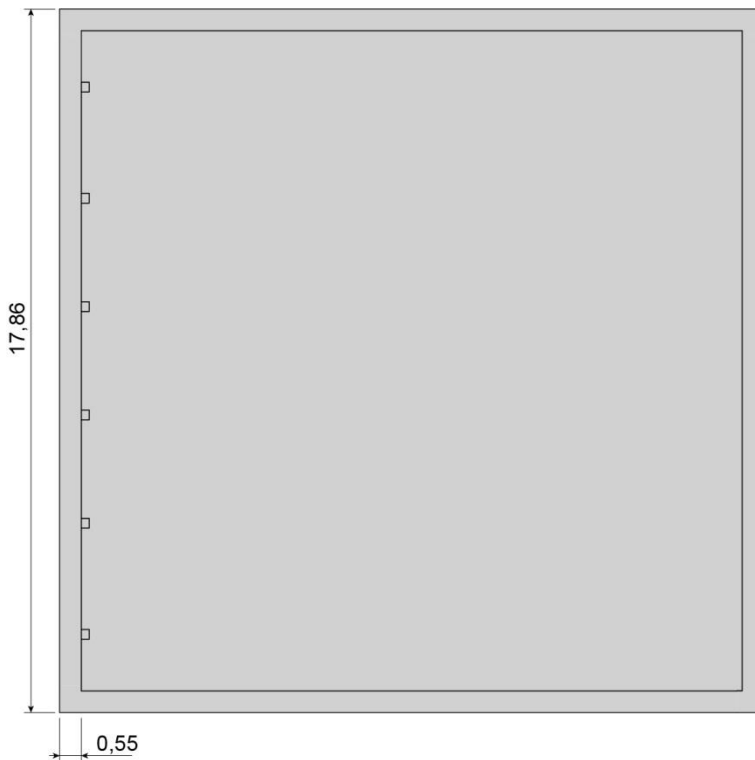


Figur 3-3. Horisontella gasavlastningskanaler som löper i gränsytan mellan strålskärmslocken och den pågjutningen. Dessa kanaler lämnas tomma. Mått i meter.

Vidareutvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR



Figur 3-4. Vertikal gasavlastningskanal fylld med poröst cementbruk; genomskärning till vänster och sett från ovan till höger. Yttreväggen ses till vänster i båda figurerna och det pågjutna locket till höger. I genomskärningen (till vänster) ses även strålskärmslock (rutat). Mått i meter.



Figur 3-5. Betongkonstruktionens lock sett från ovan. De vertikala gasavlastningskanalerna med poröst cementbruk placeras längs med en yttrevägg och kan ses i vänsterkanten på betongkonstruktionens lock i figuren. Mått i meter.

3.3 Uppförande

Betongkonstruktionerna i 2BMA är tänkt att grundläggas på en plan och avjämnad arbetsbetong som i sin tur är gjuten på en bädd av packad makadam. Mellan betongkonstruktionens bottenplatta och arbetsbetongen görs ett glidskikt som minskar risken för sprickbildning i bottenplattan vid uppförandet. Före gjutning av betongkonstruktionens bottenplatta ställs en lågform längs bottenplattans ränder upp och ett fogband av koppar, tvärs gjutfogen mellan bottenplattan och ytterväggarna, fixeras till lågformen. Syftet med fogbandet är att försvåra möjliga vattenrörelser genom fogen lång tid efter förslutning. För att ytterligare förbättra fogens täthet kommer ytan i fogen att ruggas upp efter gjutningen av bottenplattan med hjälp av exempelvis sandblästring. Den råare ytan ger en bättre vidhäftning mellan bottenplattan och de senare gjutna ytterväggarna, vilket ökar fogens täthet. Detaljerad utformning och metod för att säkerställa tätheten hos fogen, är under utveckling vid SKB:s laboratorium i Äspö.

När betongen i bottenplattan härdat tillräckligt demonteras lågformen och fixeringen av fogbandet. Den yttre väggformen för gjutning av betongkonstruktionens ytterväggar ställs upp på arbetsbetongen och då inga genomgående formstag kommer att användas, stagas formen mot bergvägg, motgjutningsbockar och tidigare gjuten kassun. Den inre väggformen ställs upp på bottenplattan och stagas med ett inre fackverk alternativt motgjutningsbockar uppställda direkt på bottenplattan. På den inre väggformen monteras före gjutning av ytterväggarna vertikala ursparingar längs hela väggarnas höjd för sidostagnung av de prefabricerade innerväggarna. Även horisontella ursparingar monteras i överkant av väggarna för att få ett upplag till strålskärmslocken. Stighöjden vid gjutningen av betongkonstruktionens ytterväggar anpassas så att gjutrycken hålls på en lämplig nivå. När betongen i konstruktionen härdat tillräckligt påbörjas montaget av innerväggar, som byggs upp av prefabricerade betongelement som lyfts på plats och sammanfogas.

I god tid före uppförandet analyseras risken för uppkomst av temperatursprickor i betongen i tidigt skede. Det är av särskild vikt med valda tjocklekar på betongkonstruktionens bottenplatta och väggar och då bottenplatta och väggar inte planeras att gjutas i ett sammanhang. Resultatet av analysen används för att anpassa produktionsmetoden så att risken för uppkomst av temperatursprickor begränsas. Produktionsmetoden kan anpassas genom exempelvis val av formmaterial, betongtemperatur, anpassning av omkringliggande temperatur liksom förvärmning av tidigare gjuten bottenplatta fram till dess att gjutningen av väggar påbörjas.

Om det vid projekteringen av konstruktionen bedöms lämpligt att uppföra betongkonstruktionen med en viss mängd armering kommer denna att vara en ytterkantsarmering, ej genomgående, med det primära syftet att få en mer seg och sammanhållen betongsektion. En ytterkantsarmering i tillräcklig mängd skulle ha en positiv effekt då det gäller att fördela eventuella sprickor som kan uppkomma vid uppförandet av betongkonstruktionen, till följd av temperaturutveckling och/eller krympning i den härdande betongen. En eventuell ytterkantsarmering tillskrivs dock ingen lastbärande funktion under driftskede, vid eller efter förslutning vid dimensioneringen av betongkonstruktionen. Den kan tillåtas korrodera fullständigt utan att den i övrigt oarmerade betongkonstruktionens mekaniska integritet påverkas på ett oacceptabelt sätt.

En eventuell underkantsarmering i bottenplattan samt skarvjärn för väggarnas ytterkantsarmering monteras med distansklots mot den glidskiktetsförsedda arbetsbetongen samt mot lågformen. Ytterväggarnas ytterkantsarmering monteras med distansklots mot den yttre väggformen.

De mest kritiska processerna kopplade till sprickbildning är temperatutveckling och krympning av betongen i samband med gjutning. Risken för sprickbildning i betongkonstruktionen är som störst vid tiden närmast efter uppförandet. Om inte sprickor uppkommit efter några månader bedöms risken för att det ska ske under driftperioden som relativt låg. Den mest kritiska perioden inträffar således innan avfall deponeras, vilket möjliggör både inspektion av konstruktionen och goda möjligheter att genomföra eventuella korrigerande åtgärder, som exempelvis injektering av sprickor.

3.4 Förslutning

Senast i samband med förslutning placeras strålskärmslock av betong över samtliga fack i betongkonstruktionerna. Strålskärmslocken sörjer för god strålsäkerhet under det fortsatta arbetet med förslutningen. På strålskärmslocken placeras en trapetskorrugerad plåt som agerar kvarsittande form för den senare gjutningen av betongkonstruktionens betonglock. Gjutning på den trapetskorrugerade plåten ger horisontella kanaler i hela gränsytan mellan strålskärmslocken och det gjutna betonglocket, vilka kommer att fungera som helt fria gasavlastningsvägar för samtliga fack i betongkonstruktionerna efter förslutning. Före gjutningen av locket placeras ursparingslådor för de vertikala gasavlastningskanalerna ut i anslutning till en av ytterväggarna, i kontakt med de horisontella gasavlastningskanalerna. När betongen i locket härdat tillräckligt, demonteras ursparingslådorna och de vertikala gasavlastningskanalerna igjuts med ett poröst cementbruk. Höjden på igjutningen i de vertikala gasavlastningskanalerna påverkar det tryck som tillåts byggas upp i betongkonstruktionen och kan anpassas så att gasavlastning sker vid gynnsamma trycknivåer.

Efter förslutningen av betongkonstruktionerna demonteras travers och övriga installationer innan hela bergssalen återfylls med makadam och försluts med pluggar (Luterkort et al. 2014).

3.5 Kvarstående frågor

Vid dimensionering av betongkonstruktionen har betongklass C50/60 använts. Utveckling av betongrecept och verifierande försök pågår för närvarande inom teknikutvecklingen för att ta fram underlag till kommande projektering. I samband med detaljprojektering sätts den slutliga dimensioneringen baserat på betongens egenskaper, uppdaterade lastberäkningar, etc. Preliminära analyser av den betong som utvecklas indikerar högre tryckhållfasthet och högre täthet jämfört med betongklass C50/60, vilket skulle kunna innebära att dimensionerna på ytterväggar, bottenplatta och lock kan reduceras något med bibehållen funktion.

4 Säkerhet efter förslutning

4.1 Förvarets funktion efter förslutning

En av säkerhetsfunktionerna i 2BMA är *lågt flöde i förvarsutrymmet*. Detta åstadkoms genom en hydrauliskt mindre genomsläpplig komponent – betongkonstruktionen – som omges av ett hydrauliskt mer genomsläppligt material – återfyllnaden. För att upprätthålla betongkonstruktionens funktion över så lång tid som säkerheten efter förslutning kräver, dimensioneras betongkonstruktionen utifrån de laster som verkar på konstruktionen. På så sätt säkerställs betongkonstruktionens strukturella integritet för långa tider, utan krav på bärande samverkan med avfallskollin och kringgjutningsbruk.

Innerväggarna bidrar med att ta upp de *yttre* laster som identifierats som dimensionerande vid och efter förslutning. Dimensionerande yttre laster vid och efter förslutning är:

- grundvattentrycket i förvarsutrymmet,
- tryck från återfyllning och
- last från eventuella bergutfall.

Grundvattentrycket uppstår snart efter förslutning, då betongkonstruktionen är i princip opåverkad jämfört med initialtillståndet. När grundvattnet trängt in även i betongkonstruktionens inre, upphör denna last på konstruktionen. Grundvattenlasten verkar således under en kort period, då betongkonstruktionen är i gott skick. Trycket från återfyllningen utövar därefter ett tryck på framförallt betongkonstruktionens lock. Detta tryck verkar under resten av tiden efter förslutning. De långsamma kemiska processerna i betongen i förvarsutrymmet påverkar de mekaniska egenskaperna över tid. Analyser visar att en betongkonstruktion som dimensioneras för det ensidiga grundvattentrycket, även kan bära last från återfyllnadsmaterialet fram till cirka 20 000 år efter förslutning med hänsyn taget till den kemiska och mekaniska utvecklingen hos betongen (Mårtensson 2017). Efter denna tidpunkt förväntas betongkonstruktionens flödesbegränsande

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

egenskaper avta och betongkonstruktionen tillskrivs förändrade egenskaper i radionuklidtransportmodelleringen (SKB 2014, 2015a). Last av fallande bergblock är en impulslast som kan uppstå vid bergutfall efter förslutning. Denna last hanteras genom att återfyllnadsmaterialet installeras till sådan höjd i förvarsutrymmet att fallhöjden hos eventuella bergblock reduceras. På så sätt reduceras impulsen från fallande bergblock så att betongkonstruktionen inte påverkas negativt. Impulsen är lägre i det vattenfyllda förvarsutrymmet jämfört med tiden innan vattenmättnad.

Kringgjutning av avfallskollin kan utelämnas ur lasthänseende, vilket även påverkar hur *inre laster* till följd av processer i avfallet kan hanteras. Genom att utrymmet mellan avfallskollin och väggar lämnas tomt (eller att en eventuell kringgjutning utformas för att inte överföra last mellan avfallskollin och betongkonstruktionens väggar), kommer inte heller inre laster överföras från avfallet till väggarna. Utrymmet mellan avfallskollin och betongkonstruktionens väggar (> 0,05 m) ger rum för eventuell svällning av avfall och avfallsbehållare. Därmed påverkar inte svällning av avfall och avfallsbehållare betongkonstruktionens strukturella integritet under skedet efter förslutning.

Gasutveckling är en följd av främst korrosion av metall i avfallet. Gastrycket förväntas uppstå kort efter förslutning, till följd av gasutveckling i samband med korrosion av metall i avfall och avfallsbehållare. De horisontella gasavlastningskanalerna står i kontakt med schakten i betongkonstruktionen genom skarvarna i strålskärmslocken. De horisontella gasavlastningskanalerna överför sedan trycket till de vertikala gasavlastningskanalerna i betongkonstruktionens lock. Ett övertryck byggs upp innan det porösa cementbruket tillåter uttransport av gas ur betongkonstruktionen. Det porösa cementbruket tillåter uttransport av gas redan vid ett litet övertryck i betongkonstruktionen (ca 6 kPa vid en ca 0,5 m lång kanal med poröst cementbruk), vilket understiger sådana tryck som har en negativ påverkan på funktion hos betongkonstruktionens bottenplatta, ytterväggar och lock (Eriksson et al. 2015).

Som nämnts i avsnitt 3.3 kan en viss mängd ytterkantsarmering, ej genomgående, komma att användas i 2BMA. Ytterkantsarmering i tillräcklig mängd har en positiv effekt då det gäller att fördela eventuella sprickor som kan uppkomma vid framförallt *uppförandet* av betongkonstruktionen, till följd av temperaturutveckling och/eller krympning i den härdande betongen. Den eventuella ytterkantsarmeringen tillskrivs dock ingen bärande funktion under driftskede, vid eller efter förslutning vid dimensioneringen av betongkonstruktionen. Den kan tillåtas korrodera fullständigt utan att den i övrigt oarmerade betongkonstruktionens mekaniska integritet påverkas på ett oacceptabelt sätt.

Betongkonstruktionen i 2BMA bidrar även till säkerhetsfunktionen *god retention*. Den stora mängden cement i förvarsutrymmet – både i betongkonstruktionen och i avfallskollin – bidrar under lång tid till en alkalisk miljö i förvarsutrymmet, med reducerad korrosionshastighet för stål och försumbar mikrobiell aktivitet som följd, och bidrar med sorptionsytor för många radionuklider. Denna funktion har ingen koppling till betongkonstruktionens strukturella integritet och de identifierande lasterna är således inte dimensionerande för mängden cement. Cementmängden i förvaret styrs av de antaganden om cementmängder som legat till grund för säkerhetsanalysen SR-PSU (SKB 2015a). Denna säkerhetsfunktion förväntas verka under längre tid än betongkonstruktionen tillskrivs flödesbegränsande egenskaper.

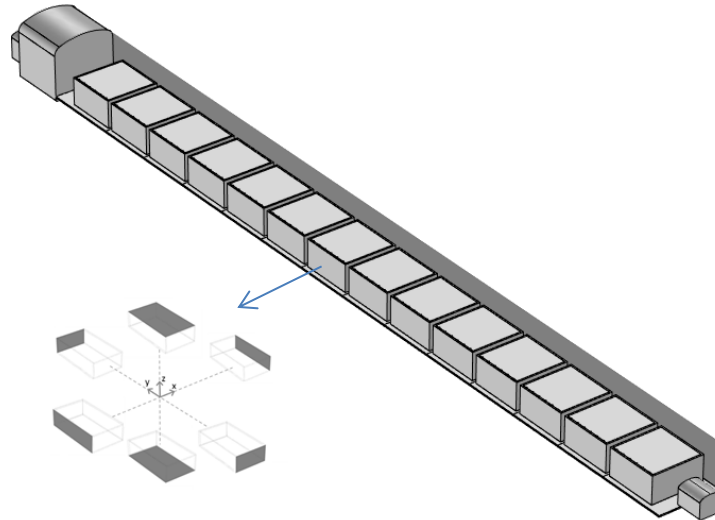
4.2 Modellering av närzonshydrologi och radionuklidtransport

Gasavlastningskanalerna kan påverka vattenflöden och radionuklidtransport i betongkonstruktionerna då kanalerna fylls med ett cementbruk som har andra egenskaper än betongen i konstruktionen i övrigt. Modellerna för vattenflöden och radionuklidtransport har därför uppdaterats med gasavlastningskanaler. Resultat från simuleringar har utvärderats och jämförts med resultaten från säkerhetsanalysen SR-PSU (SKB 2015a) som inlämnats som stöd till ansökan.

I de uppdaterade modellerna för vattenflöden och radionuklidtransport beaktas inte den vidareutvecklade utformningens ökade tjocklek av betongkonstruktionens väggar och lock och inte heller närvaron av innerväggar (se avsnitt 3.2). Dessa förändringar förväntas ytterligare begränsa radionuklidutsläpp från 2BMA jämfört med utformningen presenterad inom SR-PSU. Genom att endast förändra modellerna med avseende på gasavlastningskanalerna tydliggörs deras inverkan på vattenflöde och radionuklidtransport.

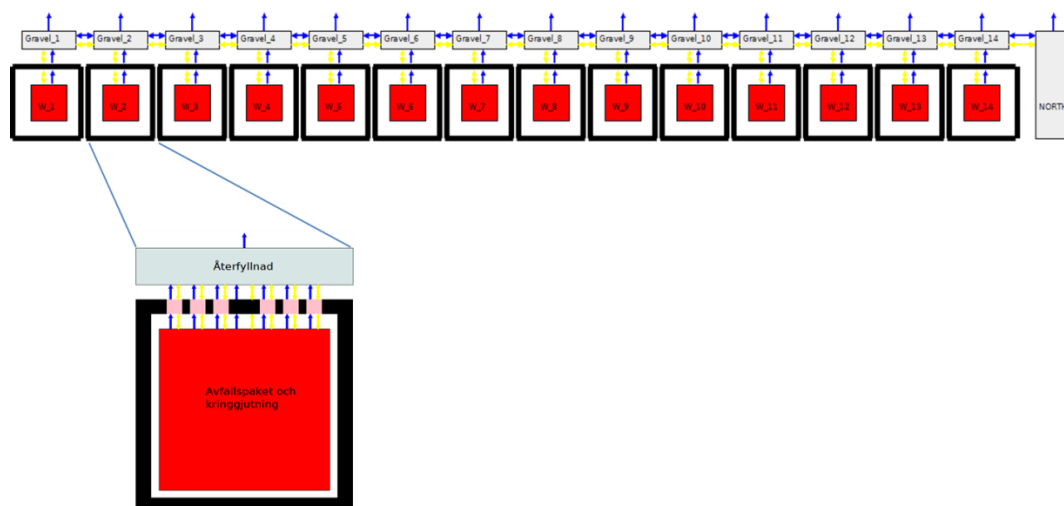
Vidareutvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

Figur 4-1 visar en översikt av geometrin för 2BMA som används i modelleringen av närzonshydrologin (se även Figur 4-3). Geometrin är indelad i kontrollvolym, vilka tillhandahåller kopplingen mellan modellerna för närzonshydrologi och radionuklidtransport. Vattenflöden beräknas över en kontrollvolymens sex sidor och tabeller med vattenflöden ($m^3/år$) överlämnas till radionuklidtransportmodellen (se avsnitt 4.4.4).



Figur 4-1. Närzonshydrologin simuleras i en 3D-modell över 2BMA. Flöden till modellen för radionuklidtransport beräknas över ytorna på kontrollvolym.

Figur 4-2 visare en schematisk bild av den uppdaterade radionuklidtransportmodellen för 2BMA. Förvaret beskrivs av ett system av perfekt omblandade kompartiment som vardera kan ha inlopp, utlopp, sänkor och källor. Blå pilar representerar advektiv transport mellan modellens delar och gula pilar diffusiv transport. Det advektiva bidraget svarar mot grundvattenflödet genom förvaret och erhålls från modelleringen av närzonshydrologin. I varje kassun är de enskilda gasavlastningskanalerna representerade med varsitt kompartiment.

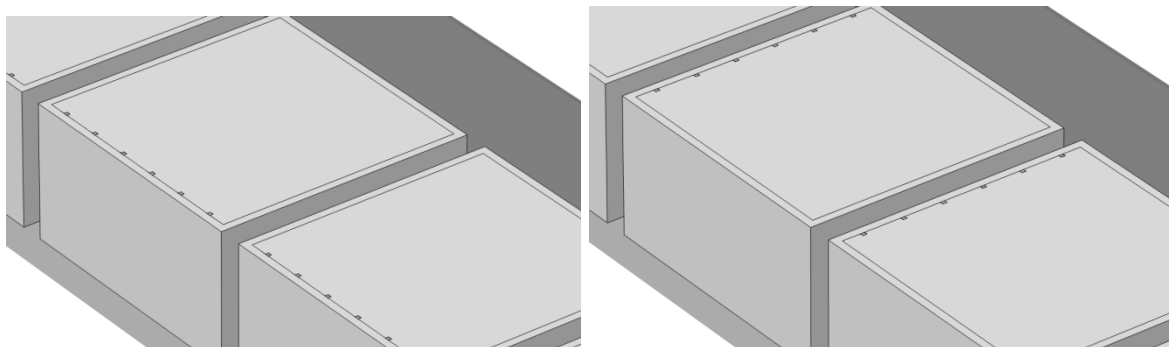


Figur 4-2. Schematisk bild av radionuklidtransportmodellen för 2BMA. Blå pilar representerar vattenflöden och gula pilar diffusiv transport. Röda kompartiment svarar mot avfall och grå mot återfyllnad. Yttre betongkonstruktionen anges av svarta linjer. I varje kassun är de enskilda gasavlastningskanalerna representerade med varsitt kompartiment.

4.3 Indata och beräkningsfall

4.3.1 Geometri

Simuleringar av vattenflöden och radionuklidtransport utgår från de modeller för 2BMA som redovisats inom SR-PSU (Abarca et al. 2014, SKB 2015b). I modellerna för närzonshydrologi och radionuklidtransport har sex kanaler med tvärsnittet $0,20 \times 0,25$ m införts i locket på varje kassun. Gasavlastningskanalerna är jämt fördelade längs med en yttervägg (se avsnitt 3.2). Två alternativa placeringar av gasavlastningskanalerna har utvärderats. I ett fall har serien av kanaler placerats i bergssalens längdriktning och i ett andra fall har kanalerna placerats vinkelrätt mot längdriktningen (se Figur 4-3).



Figur 4-3. Närbild av geometrin i modellen för närzonshydrologin i 2BMA. I ett fall har serien gasavlastningskanaler placerats i bergssalens längdriktning (vänster) och i ett annat fall vinkelrätt mot bergssalens längdriktning (höger).

4.3.2 Transportegenskaper för material

Transportegenskaperna för konstruktionsbetongen i betongkonstruktionerna i 2BMA antas följa samma tidsutveckling som huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (SKB 2014, 2015a) och redovisas i Tabell 4-1.

Tabell 4-1. Transportegenskaper för konstruktionsbetong.

Tid (år e Kr)	K (m/s)	D _e (m ² /s)	Porositet
Initialtillstånd	$8,3 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	0,11
2000–22 000	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-12}$	0,14
22 000–52 000	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-11}$	0,18
52 000–102 000	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-10}$	0,5

I den vidareutvecklade utformningen av 2BMA är gasavlastningskanalerna fyllda med ett poröst cementbruk som är genomsläppligt för gas. För att utvärdera påverkan av ett väsentligt mer genomsläppligt material i gasavlastningskanalerna så har beräkningar även genomförts för ett sandmaterial. Transportegenskaperna för avfallsdomänen antas vara desamma som redovisats inom SR-PSU (SKB 2015b).

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

Gasavlastningskanaler med poröst cementbruk

Den hydrauliska konduktiviteten för gasavlastningskanalerna vid initialtillståndet ges av det krav som ställts på kringgjutningsbruket i silon, $K \geq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Efter förslutning är värden på hydraulisk konduktivitet, porositet och effektiv diffusivitet satta till desamma som angivits i SR-PSU för kringgjutningsbruk i BMA (SKB 2014). Detta gäller även sorptionsegenskaper. Transportegenskaperna för gasavlastningskanalerna sammanfattas i Tabell 4-2.

Tabell 4-2. Transportegenskaper för ett poröst cementbruk i gasavlastningskanalerna.

Tid (år e Kr)	K (m/s)	D_e (m ² /s)	Porositet
Initialtillstånd	$5 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	0,3
2000–22 000	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-10}$	0,4
22 000–52 000	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-10}$	0,5
52 000–102 000	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$	0,5

Gasavlastningskanaler med sandmaterial

För ren sand eller sand blandad med grus så anger Baer (1988) den hydrauliska konduktiviteten i ett intervall $1 \cdot 10^{-2}$ – $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Här antas en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-5}$ m/s vid förslutning. Värdet för effektiv diffusivitet vid förslutning är satt till $6 \cdot 10^{-10}$ m²/s och för porositet till 0,3 (SKB 2001). I intervallet 2 000–52 000 e Kr sätts den hydrauliska konduktiviteten till $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Porositeten tillåts öka till 0,5 efter 22 000 e Kr som ett resultat av att sand delvis kan rinna ut i den degraderade betongkonstruktionen. Efter förslutning svarar den effektiva diffusiviteten genom materialet mot diffusiviteten av lösta ämnen i vatten multiplicerat med materialets porositet. Sorption försummas i gasavlastningskanalerna vid alla tidpunkter. Transportegenskaperna för gasavlastningskanalerna sammanfattas i Tabell 4-3.

Tabell 4-3. Transportegenskaper för ett sandmaterial i gasavlastningskanalerna.

Tid (år e Kr)	K (m/s)	D_e (m ² /s)	Porositet
Initialtillstånd	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-10}$	0,3
2000–22 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-10}$	0,3
22 000–52 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-9}$	0,5
52 000–102 000	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$	0,5

4.3.3 Hydrologiska randvillkor

Inom SR-PSU utvärderas dos och risk under 100 000 år. Under denna period påverkas flödet genom förvaret av förändrade hydrologiska randvillkor. Vid förslutning ligger SFR under Östersjön. Landhöjningen väntas förskjuta strandlinjen så att landförhållanden råder ovan förvaret runt 5000 e Kr. När väl landförhållanden råder över förvaret når grundvattenflödet ett stationärt tillstånd (Odén et al. 2014). Modellering av närzonshydrologi och radionuklidtransport tar hänsyn till denna utveckling av hydrologiska randvillkor (Abarca et al. 2013).

4.3.4 Beräkningsfall

I den vidareutvecklade utformningen av 2BMA är gasavlastningskanalerna fyllda med ett poröst cementbruk som är genomsläppligt för gas. För att utvärdera påverkan av ett väsentligt mer genomsläppligt material i gasavlastningskanalerna så har beräkningar även genomförts för ett sandmaterial. Två orienteringar av gasavlastningskanalerna har undersökts för varje material (se Figur 4-3). Tidsutvecklingen av transportparametrar för material i gasavlastningskanaler och betongkonstruktion ges av Tabell 4-1 till Tabell 4-3. För initialtillståndet antas hydrologiska randvillkor motsvarande att förvaret ligger under Östersjön. Under tiden fram till 5000 e Kr antas de hydrologiska randvillkoren utvecklas mot landdominerade förhållanden. Efter 5000 e Kr antas ett stationärt tillstånd för grundvattenflödet. Beräkningsfallen sammanfattas i Tabell 4-4.

Tabell 4-4. Sammanfattning av beräkningsfall.

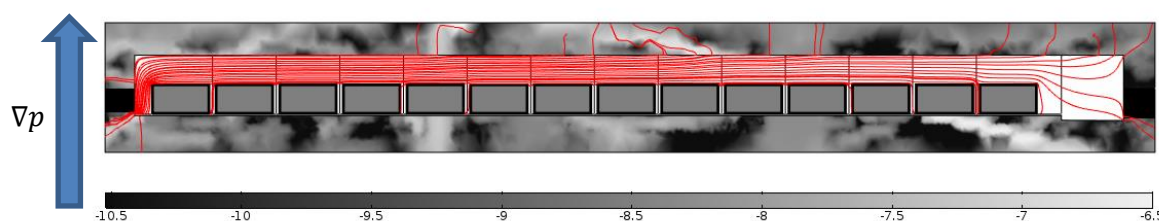
Beräkningsfall	Material	Orientering*	Parametervärden för gasavlastningskanal	Parametervärden för konstruktionsbetong
B1	Bruk	parallell	Tabell 4-2	Tabell 4-1
B2	Bruk	vinkelrät	Tabell 4-2	Tabell 4-1
S1	Sand	parallell	Tabell 4-3	Tabell 4-1
S2	Sand	vinkelrät	Tabell 4-3	Tabell 4-1

* Gasavlastningskanalernas orientering relativt bergssalens riktning

4.4 Resultat – närzonshydrologi

4.4.1 Flöde genom bergssalen

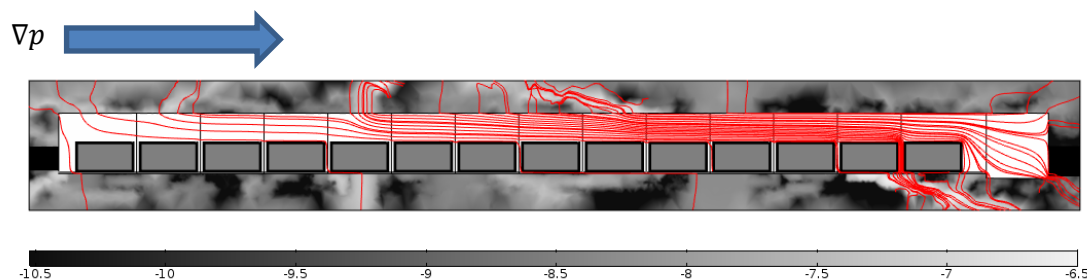
Vid initialtillståndet råder hydrologiska randvillkor motsvarande havsförhållanden över förvaret. Den huvudsakliga regionala tryckgradienten är riktad vertikalt uppåt. Det grundvatten som når 2BMA underifrån rör sig sedan längs med bergssalen och lämnar salens ovan del genom zoner i berget med relativt hög hydraulisk konduktivitet (se Figur 4-4).



Figur 4-4. Strömlinjer som illustrerar den lokala flödesbilden vid 2000 e Kr i ett vertikalt plan som skär 2BMA. Gråskalan visar logaritmen av den hydrauliska konduktiviteten i berget, $\log(K \text{ (m/s)})$. Den blå pilen indikerar tryckgradientens huvudkomponent i berget.

Vid övriga materialtillstånd råder hydrologiska randvillkor motsvarande landförhållanden över förvaret. Den regionala tryckgradienten är nu snett ovanifrån. Vatten når 2BMA ovanifrån, rör sig längs med bergssalen och lämnar salen genom sprickzoner undertill (se Figur 4-5).

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR



Figur 4-5. Strömlinjer som illustrerar den lokala flödesbilden vid 5000 e Kr i ett vertikalt plan som skär 2BMA. Gråskalan visar logaritmen av den hydrauliska konduktiviteten i berget, $\log(K)$ (m/s). Den blå pilen indikerar tryckgradientens huvudkomponent i berget.

Flödes hastigheten ökar cirka tre storleksordningar i övergången från havsförhållanden till landförhållanden över förvaret (Abarca et al. 2013). Att gasavlastningskanaler installeras i kassunernas lock har ingen påverkan på vattenflödet genom bergssalen.

4.4.2 Flöde genom avfallet

Tabell 4-5 och Tabell 4-6 visar flödet genom avfallet som funktion av de materialparametrar som antagits för gasavlastningskanaler med ett poröst cementbruk och med ett sandmaterial. Flödet genom avfallet ($\text{m}^3/\text{år}$) har beräknats enligt den metodik som tidigare beskrivits inom SR-PSU (Abarca et al. 2013). Flödet genom avfallet jämförs med ett referensflöde som beräknats för det fall då inga gasavlastningskanaler installerats i kassunernas lock. Om kvoten mellan flödet genom avfallet och referensflödet är 1 så beräknas ingen påverkan från installationen av gasavlastningskanalerna. Resultat redovisas för två alternativa placeringar av gasavlastningskanalerna, där dessa antingen placerats parallellt med bergssalens längdriktning (beräkningsfall B1 och S1) eller vinkelrätt mot densamma (beräkningsfall B2 och S2).

Gasavlastningskanaler med bruk

Tabell 4-5 Gasavlastningskanaler fyllda med poröst cementbruk.

Tid (år e Kr)	Beräkningsfall	Flöde genom avfallet ($\text{m}^3/\text{år}$)	Flöde genom avfallet (referensflöde) ($\text{m}^3/\text{år}$)	Kvot*
Initialtillstånd	B1	2,5E-06	2,5E-06	1,00
2000–22 000	B1	2,5E-02	2,5E-02	1,00
22 000–52 000	B1	1,6E+00	1,6E+00	1,00
52 000–102 000	B1	7,6E+00	7,6E+00	1,00
Initialtillstånd	B2	2,5E-06	2,5E-06	1,00
2000–22 000	B2	2,5E-02	2,5E-02	1,00
22 000–52 000	B2	1,6E+00	1,6E+00	1,00
52 000–102 000	B2	7,6E+00	7,6E+00	1,00

* Kvoten mellan flödet genom avfallet och referensflödet genom avfallet

Vid förslutning och under perioden 2000–22 000 e Kr tillskrivs gasavlastningskanalerna med poröst cementbruk en högre hydraulisk konduktivitet än betongkonstruktionen i övrigt (se Tabell 4-2). Resultaten visar att inverkan på flödet genom avfallet är försumbar. Under tiden efter 22 000 e Kr antas den degraderade betongkonstruktionens hydrauliska konduktivitet vara densamma som för gasavlastningskanalerna varför ingen relativ ökning av flödet genom avfallet förväntas efter denna tidpunkt. Inverkan av gaskanalernas orientering är också försumbar.

Gasavlastningskanaler med sandmaterial

Tabell 4-6 Gasavlastningskanaler fyllda med sandmaterial.

Tid (år e Kr)	Beräkningsfall	Flöde genom avfallet (m ³ /år)	Flöde genom avfallet (referensflöde) (m ³ /år)	Kvot*
Initialtillstånd	S1	3,2E-06	2,5E-06	1,30
2000–22 000	S1	2,7E-02	2,5E-02	1,09
22 000–52 000	S1	1,6E+00	1,6E+00	1,00
52 000–102 000	S1	7,6E+00	7,6E+00	1,00
Initialtillstånd	S2	8,5E-06	2,5E-06	3,47
2000–22 000	S2	2,7E-02	2,5E-02	1,11
22 000–52 000	S2	1,6E+00	1,6E+00	1,00
52 000–102 000	S2	7,6E+00	7,6E+00	1,00

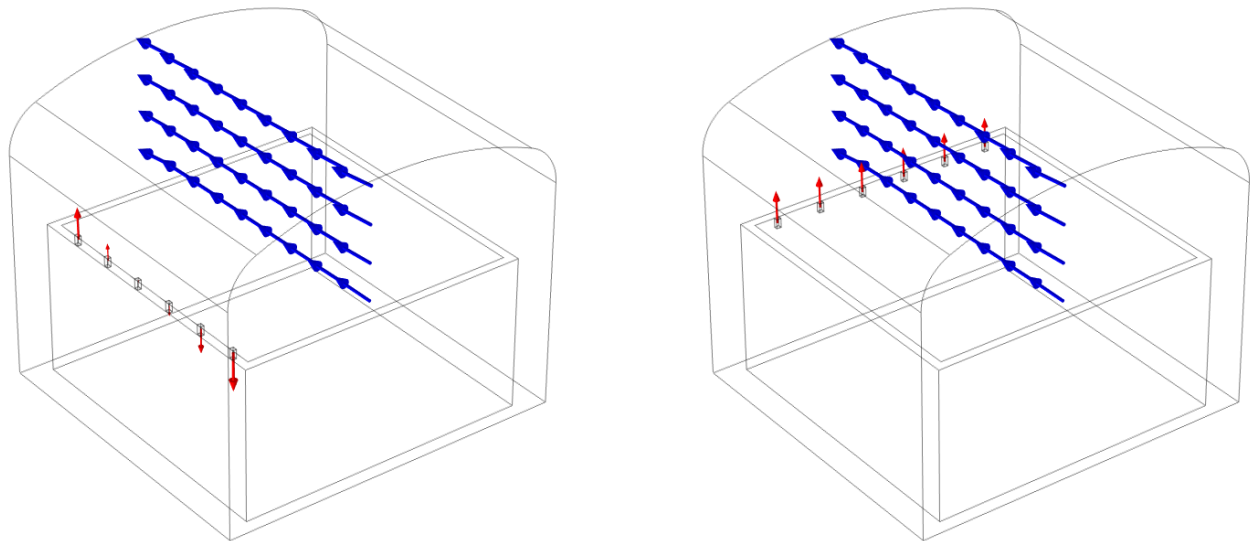
* Kvoten mellan flödet genom avfallet och referensflödet genom avfallet

Vid initialtillståndet och under perioden 2000–22 000 e Kr tillskrivs gasavlastningskanalerna ett sandmaterial med en väsentligt högre hydraulisk konduktivitet än betongkonstruktionen i övrigt (se Tabell 4-3). Detta leder till att flödet genom avfallet ökar. Vid initialtillståndet är ökningen cirka en faktor 3 då gasavlastningskanalerna är orienterade vinkelrätt mot bergssalens längdriktning. Det absoluta värdet av flödet är dock mycket lågt och diffusion dominerar masstransporten i förvaret. Under perioden 2000–22 000 e Kr observeras en ökning av flödet genom avfallet med 9–11 % för båda orienteringar. Under perioden 22 000–52 000 e Kr tillskrivs gasavlastningskanalerna med ett sandmaterial en något högre hydraulisk konduktivitet än betongkonstruktionen i övrigt. Påverkan på flödet genom avfallet blir dock försumbar.

4.4.3 Gasavlastningskanalernas orientering relativt bergssalen

Då gasavlastningskanalerna fyllts med ett sandmaterial observerades en påverkan på flödet genom avfallet liksom en viss inverkan av orienteringen av serien av kanaler i locket.

Figur 4-4 och Figur 4-5 visar att vattenflödet genom 2BMA i huvudsak går i salens längdriktning. Detta gäller både när SFR ligger under Östersjön och när landförhållanden råder över förvaret. I Figur 4-6 visas exempel på flödesriktningen i gasavlastningskanaler och i återfyllnaden utanför betongkonstruktionen i kassun nummer 8. När serien av kanaler ligger i flödesriktningen går vatten in genom kanaler uppströms och ut genom kanaler nedströms. Då serien av kanaler ligger vinkelrätt mot flödesriktningen lämnar vatten samtliga kanaler. Om det advektiva bidraget till uttransport av radionuklider genom kanalerna är av betydelse kan antalet kanaler som har ett vattenflöde riktat ut från avfallet påverka det totala utsläppet. Modellering av radionuklidtransport tar hänsyn till riktningen av flöden i gasavlastningskanaler och betongkonstruktion. Resultatet av beräkningarna presenteras i avsnitt 4.5.



Figur 4-6. Riktning av vattenrörelser i kassun nummer 8 vid grundvattenförhållanden vid 5000 e Kr. Gasavlastningskanalerna är fyllda med ett sandmaterial och orienterade längs med (vänster) och vinkelrät mot (höger) bergssalens längdriktning. Röda pilar indikerar riktningen av vattenflödet genom gasavlastningskanalerna. Blå pilar indikerar riktningen av vattenflödet i bergssalen utanför kassunen. Pilarna visar endast flödets riktning och inte dess magnitud.

4.4.4 Flöden över kontrollvolym

Figur 4-1 visar en översikt av geometrin för 2BMA som används i modelleringen av närzonshydrologin. Geometrin är indelad i kontrollvolym, vilka tillhandahåller kopplingen mellan modellerna för närzonshydrologi och radionuklidtransport. Vattenflöden beräknas över en kontrollvolymens sex sidor och tabeller med vattenflöden ($\text{m}^3/\text{år}$) överlämnas till radionuklidtransportmodellen. Tabeller med beräknade vattenflöden genom modellens kontrollvolym finns lagrade på SKBs Subversion-server (SVN¹).

4.5 Resultat – radionuklidtransport och dosberäkningar

I detta avsnitt redovisas resultat av radionuklidtransportberäkningar för att utvärdera radiotoxicitetsutsläpp och dos. Radiotoxicitetsutsläpp är aktivitetsutsläpp multiplicerat med doskoefficienten för födoing. Radiotoxicitetsutsläpp speglar därför varje enskild radionuklids potentiella effekt på dos på ett tydligare sätt än aktivitetsutsläpp. Redovisade doser är beräknade för olika exponeringsvägar i det landskap dit utsläppet förväntas ske. Vidare redovisas dosen för den mest exponerade gruppen i detta landskap (SKB 2015a). Som jämförelse används i denna studie huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (SKB 2015a), en beräkning som benämns CCM_GW. Beräkningen tar hänsyn till de korrigeringar som redovisas i Åstrand et al. (2017a, b). CCM_GW omfattar inte gasavlastningskanaler i betongkonstruktionerna i 2BMA.

4.5.1 Radiotoxicitetsutsläpp

Tabell 4-7 visar högsta radiotoxicitetsutsläppet från 2BMA, för huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (CCM_GW) och de olika beräkningsfallen beskrivna i avsnitt 4.3.4.

¹ Filerna är lagrade på SKB:s Subversion-server (SVN) url: "svn://svn.skb.se/projekt/SFR/SR-PSU-Data/Near-field/Indata/Ecoligo/SupportingCalculations/BMA2_gasavledning/BMA2/Water fluxes".

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

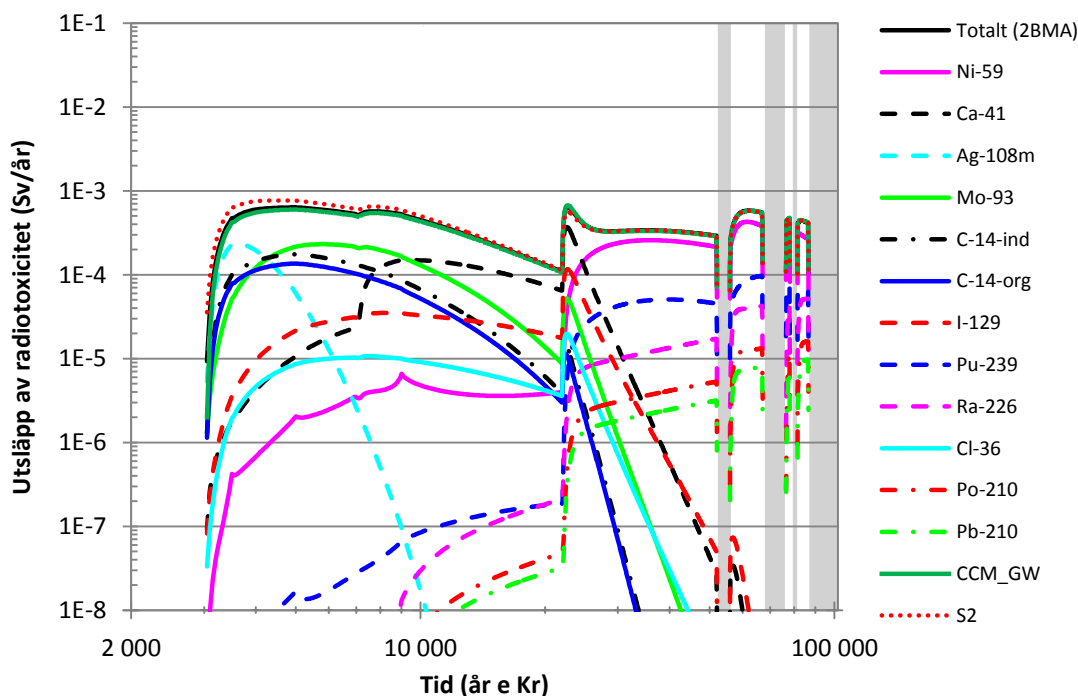
Tabell 4-7. Högsta årliga radiotoxicitetsutsläpp till biosfären från 2BMA.

Beräkningsfall	Radiotoxicitetsutsläpp (µSv/år)	Tidpunkt (år e Kr)
CCM_GW	671	22 700
B1	646	22 650
B2	646	22 650
S1	727	5 000
S2	767	4 650

I fallen med gasavlastningskanaler fyllda med poröst cementbruk skiljer sig resultaten obetydligt från värden beräknade i CCM_GW. För B1 och B2 blir det maximala radiotoxicitetsutsläppet något lägre än för CCM_GW. Detta beror på ett något ökat utsläpp under perioden fram till 22 000 e Kr. Orsaken är ett ökat bidrag av diffusiv masstransport genom gasavlastningskanalerna, en effekt av att bruket i kanalerna har en högre effektiv diffusivitet än övriga betongkonstruktionen (jfr Tabell 4-1 och Tabell 4-2). Ett något lägre radionuklidinnehåll frigörs således efter 22 000 e Kr.

I fallen med gasavlastningskanaler fyllda med ett sandmaterial är den initiala utsläppsökningen större. Det mer genomsläppliga materialet ger ett ökat advektivt och diffusivt bidrag till masstransporten genom gasavlastningskanalerna. Utsläppsmaximum kommer tidigare (ca 5000 e Kr) och det maximala radiotoxicitetsutsläppet ökar. För ett sandmaterial blir även inverkan av gasavlastningskanalernas orientering synlig i resultaten. När serien av kanaler är orienterad vinkelrätt mot bergssalens längdriktning och den huvudsakliga flödesriktningen är utsläppet som störst. Detta kan förstås mot bakgrund av att antalet gasavlastningskanaler som får ett vattenflöde riktat ut från avfallet ökar i denna konfiguration (se Figur 4-6).

Figur 4-7 visar radiotoxicitetsutsläppet över tid för beräkningsfall B1. Det totala radiotoxicitetsutsläppet för CCM_GW och beräkningsfall S2 är inlagda som jämförelse.



Figur 4-7. Radiotoxicitetsutsläpp från 2BMA till biosfären för beräkningsfall B1 (svart linje). Totalt radiotoxicitetsutsläpp från 2BMA i huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (CCM_GW) är inlagd som grönprickad linje. Beräkningsfall S2 är inlagd som rödprickad linje.

Vidareutvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

Den vidareutvecklade utformningen av 2BMA med gasavlastningskanaler fyllda med ett poröst cementbruk resulterar i en utsläppskurva som i det närmaste sammanfaller med resultat från huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (CCM_GW). Ett något större utsläpp resulterar om ett väsentligt mer genomsläppligt sandmaterial antas i gasavlastningskanalerna.

4.5.2 Doser

Tabell 4-8 visar högsta årliga doser från 2BMA i de olika beräkningsfallen. Tabell 4-9 visar högsta årliga doser från hela det utbyggda SFR.

Den högsta årliga dosen från hela det utbyggda SFR ökar något i samtliga beräkningsfall med gasavlastningskanaler, trots att den högsta årliga dosen från enbart 2BMA minskar i beräkningsfall B1, B2 och S1. Detta beror på att den lilla ökningen av tidigt utsläpp från 2BMA med gasavlastningskanaler (se avsnitt 4.5.1) sammanfaller i tiden med den högsta årliga dosen från hela det utbyggda SFR.

För samtliga beräkningsfall erhålls den högsta årliga dosen för den exponerade gruppen jordbrukare på dikad myr (DM). Den sammanlagda högsta årliga dosen från hela det utbyggda SFR fås i samtliga beräkningsfall i det biosfärsobjekt som får utsläppet direkt från geosfären (157_2). Den högsta årliga dosen från hela det utbyggda SFR domineras i samtliga beräkningsfall av Mo-93. Om enbart dosen från 2BMA betraktas, fås den högsta årliga dosen i samtliga beräkningsfall utom S2 i biosfärsobjekt 157_1, som ligger nedströms objekt 157_2. Tillförseln av radionuklider till detta objekt sker med ytvatten som strömmar ut från 157_2. Dosen domineras i dessa fall av Ca-41.

Tabell 4-8. Högsta årliga dosen från 2BMA.

Beräkningsfall	Årlig dos (µSv)	Tidpunkt (år e Kr)	Biosfärsobjekt	Exponerad grupp	Bidrag från dominerande radionuklid (%)
CCM_GW	1,08	28 500	157_1	DM*	Ca-41 (56,6)
B1	1,07	28 500	157_1	DM*	Ca-41 (56,5)
B2	1,07	28 500	157_1	DM*	Ca-41 (56,5)
S1	1,07	28 000	157_1	DM*	Ca-41 (55,6)
S2	1,11	9 550	157_2	DM*	Mo-93 (73,9)

* Jordbrukare på dikad myr

Tabell 4-9. Högsta årliga dosen från det utbyggda SFR.

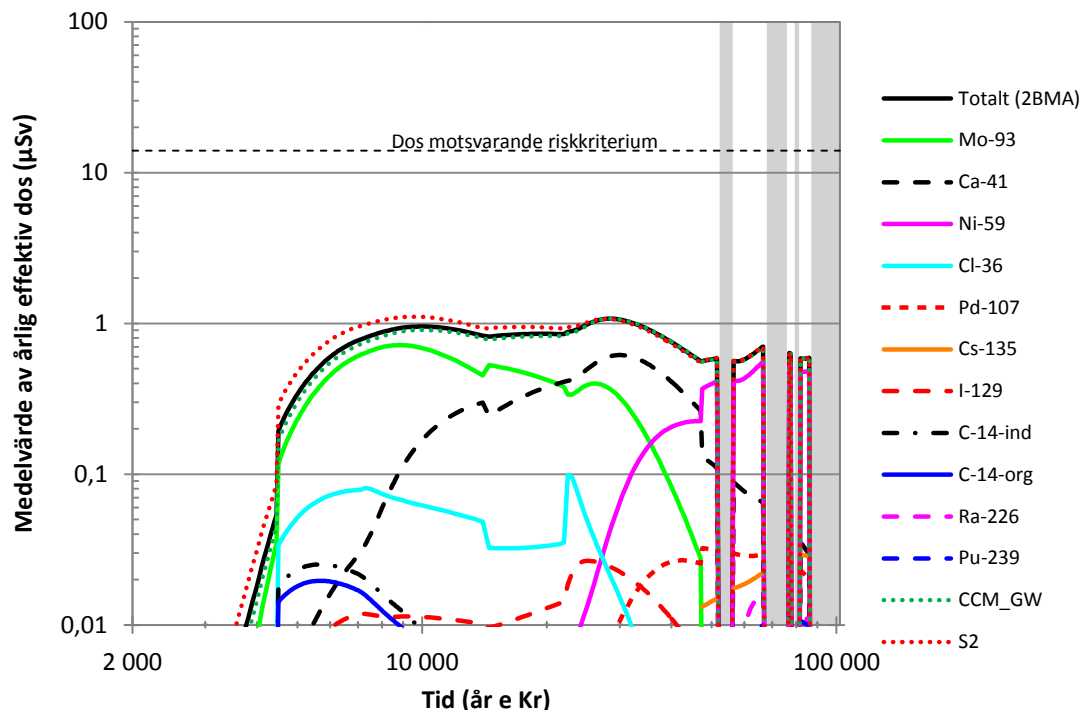
Beräkningsfall	Årlig dos (µSv)	Tidpunkt (år e Kr)	Biosfärsobjekt	Exponerad grupp	Bidrag från dominerande radionuklid (%)
CCM_GW	7,76	6 500	157_2	DM*	Mo-93 (58,0)
B1	7,82	6 550	157_2	DM*	Mo-93 (58,3)
B2	7,82	6 550	157_2	DM*	Mo-93 (58,3)
S1	7,93	6 550	157_2	DM*	Mo-93 (58,8)
S2	8,00	6 550	157_2	DM*	Mo-93 (59,0)

* Jordbrukare på dikad myr

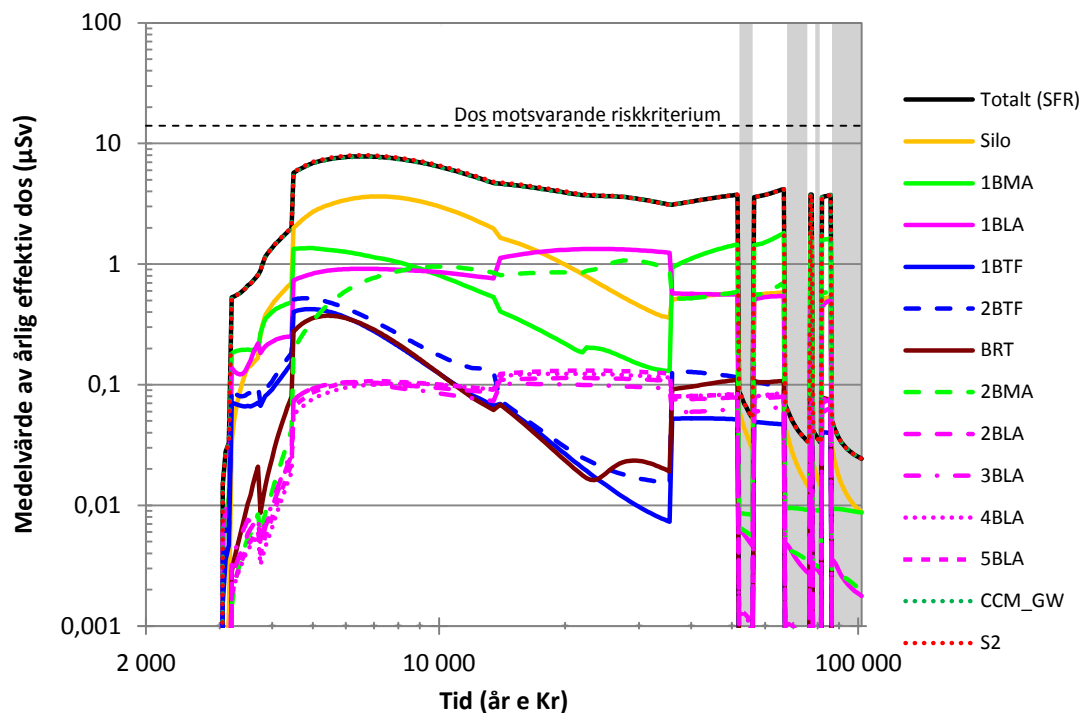
Figur 4-8 visar årlig dos och dosbidrag från olika radionuklider över tid från 2BMA i beräkningsfall B1 (CCM_GW och beräkningsfall S2 är inlagda som jämförelse). Inledningsvis domineras dosen av Mo-93 och Cl-36. Längre fram i tiden ökar dosbidraget från Ca-41 och slutligen domineras dosen av Ni-59.

Figur 4-9 visar total årlig dos och dosbidrag från olika försvarsutrymmen över tid från hela det utbyggda SFR i beräkningsfall B1 (CCM_GW och beräkningsfall S2 är inlagda som jämförelse). Eftersom dosen för hela det utbyggda SFR domineras av silon, 1BLA och 1BMA så påverkas inte den totala dosen signifikant vid någon tidpunkt av ändringen i utsläpp från 2BMA, oavsett utförande på gasavlastningskanalerna.

Vidareutvecklad utformning av försvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR



Figur 4-8. Doser från 2BMA för beräkningsfall B1 (svart linje). Total dos från 2BMA i huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (CCM_GW) är inlagd som grönpriklad linje. Beräkningsfall S2 är inlagd som rödpriklad linje.



Figur 4-9. Doser från hela det utbyggda SFR för beräkningsfall B1 (svart linje). Totaldosen för huvudscenariots variant med global uppvärmning i SR-PSU (CCM_GW) är inlagd som grönpriklad linje. Totaldosen från beräkningsfall S2 är inlagd som rödpriklad linje.

4.6 Slutsatser

Den vidareutvecklade utformningen av 2BMA med gasavlastningskanaler fyllda med ett poröst cementbruk ger ringa påverkan på den beräknade dosen jämfört med referensutformningen som presenterades i SR-PSU. Känsligheten hos den vidareutvecklade utformningen har även utvärderats genom att ansätta mer genomsläppliga egenskaper hos materialet i gasavlastningskanalerna. Utvärderingen visar att konsekvensen i form av ökad dos till människa och miljö är ytterst begränsad, vilket styrker slutsatsen att den vidareutvecklade utformningen med gasavlastningskanaler fyllda med ett poröst cementbruk utgör en robust utformning.

5 Alternativjämförelse och val

Vid jämförelse mellan alternativa utformningar används redovisningen av den ansökta utformningen i Millqvist och Pettersson (2016, avsnitt 4) tillsammans med den kompletterande informationen rörande senare utveckling som ges i föreliggande rapport som sammantaget underlag för beskrivningen av den föreslagna utformningen av 2BMA med en teknisk barriär av betong. Jämförelsen görs med den alternativa utformningen silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär som beskrivs i Millqvist och Pettersson (2016, avsnitt 5.2). Underlaget rörande alternativens strålsäkerhetsmässiga konsekvenser efter förslutning och kostnader har utvecklats.

5.1 Alternativa utformningar

Den ansökta utformningen

Vid utformning av den tekniska barriären i förvarsutrymmet för medelaktivt avfall har erfarenheter tagits tillvara från uppförande och drift av befintligt SFR (Millqvist och Pettersson 2016, avsnitt 2). Den tekniska barriären har utformats med beaktande av de laster som konstruktionen utsätts för under förvarets olika skeden. Den strukturella integriteten hos den utvecklade konstruktionen är inte beroende av bärande samverkan med avfallskollin och kringgjutningsbruk (se avsnitt 4.1). 2BMA med betongkonstruktion är en väl anpassad konstruktion för den aktivitet och det avfall som ska deponeras. Den är därtill en flexibel utformning som kan uppföras etappvis och anpassas efter exempelvis förändrade avfallsvolymer. Erfarenheterna från befintligt SFR visar att föreslagen utformning kan drivas med god säkerhet under driftskedet.

Alternativet silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär

Alternativet silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär bygger på material, utformning och utförande likt befintligt siloförvar i SFR. Konstruktionen är således ett beprövat alternativ där det finns erfarenheter från uppförande och drift samt där alternativet tidigare har analyserats med avseende på säkerheten efter förslutning. Vissa förändringar behöver dock genomföras för ett nytt siloförvar kopplat till dagens krav och konstruktionsförutsättningar, däribland avfallsmängd, förläggingsdjup samt övriga normer och regelverk för byggnadskonstruktion. Rent byggnadstekniskt är en silokonstruktion gynnsam för att ta upp yttre last då lasterna kan bäras genom rent tryck i betongen. Den cylindriska konstruktionen medger dock ingen flexibilitet vid eventuellt förändrade avfallsvolymer. Erfarenheterna från befintligt SFR visar att silo kan drivas med god säkerhet under driftskedet.

5.2 Utvärdering av strålsäkerheten efter förslutning

De strålsäkerhetsmässiga konsekvenserna av de två alternativen har analyserats för tiden efter förslutning. Den ansökta utformningen med en teknisk barriär av betong utvärderas i säkerhetsanalysen SR-PSU (SKB 2015a). Barriärutformningen ger god skyddsförmåga efter förslutning och ett lågt radionuklidutsläpp relativt den mängd aktivitet som ska omhändertas. Dosbidraget från 2BMA, vid tidpunkten för maximal dos för hela SFR, är omkring 8,4 % (ca 0,6 μSv) av maxdosens 7,7 μSv för huvudscenariot i säkerhetsanalysen. Radionuklidtransportberäkningar med något förenklade antaganden har genomförts för kombinerad betong- och bentonitbarriär (Åstrand och Lindgren 2017). Dessa beräkningar indikerar att en kombinerad betong- och bentonitbarriär skulle kunna reducera radionuklidutsläppet från 2BMA med

Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR

omkring en faktor 100 för radionuklider som exempelvis Mo-93, Cl-36, C-14 och Ca-41 som alla ger signifikanta dosbidrag från 2BMA. Båda alternativen ger således god skyddsförmåga efter förslutning och ett lågt radionuklidutsläpp relativt den mängd aktivitet som ska omhändertas.

5.3 Utvärdering av kostnader

Kostnaden för de två alternativen har beräknats. Analysen avser bergarbeten samt byggnadsarbeten av form, stål och betong samt återfyllning vid förslutning. Kostnader för tekniska installationer (el, tele, styr, övervakning samt travers för hantering av avfall) bedöms som likartade för konstruktionerna och har därför inte behandlats i analysen. Drift- och underhållskostnaderna bedöms också som likartade för båda utformningarna. Kostnaden har beräknats i 2017 år penningvärde. Ingen nuvärdesberäkning av framtida kostnader (främst förslutning) har genomförts.

Underlagen för kvantitativa beräkningar för silon är genomförd på förstudieunderlag och konstruktionsunderlag från 1980-talet medan för 2BMA är beräkningarna utförda på systemhandlingsunderlag och konstruktionsritningar. Detta leder till att detaljeringsgraden i beräkningarna skiljer sig åt mellan alternativen där noggrannheten är större i kostnadsberäkningarna för 2BMA.

I analysen för 2BMA ingår betongkonstruktioner med innerväggar, strålskärmslock och permanenta lock, inlastningszon och slussar. Förslutning av förvarsutrymmet sker enligt Luterkort et al. (2014). I analysen av silon ingår betongarbeten med kringfyllning av bentonit, temporära och permanenta lock, inlastningshall med betongkonstruktioner, en tunnel för åtkomst av nedre delen av silon, anslutningstunnlar under silon, dränagebassäng samt trappschakt. Förslutning av silon sker enligt Luterkort et al. (2014).

Den sammanlagda kalkylen visar att alternativet silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär medför en tillkommande kostnad om cirka 130 miljoner SEK jämfört med det ansökta alternativet.

5.4 Motivering till valt alternativ

En av SFR:s säkerhetsprinciper är begränsning av mängden aktivitet av långlivade nuklider. Vidare innebär deponeringsstrategin för SFR att avfallet placeras i lämpligt förvarsutrymme baserat på dosrat, material- och nuklidinnehåll. Det radiologiskt farligaste avfallet placeras i den befintliga silon, där de mest kvalificerade barriärerna är installerade. Det avfall som SKB planerar att slutförvara i 2BMA är av likartad karaktär som det driftavfall som redan placerats i 1BMA i befintligt SFR. Befintligt 1BMA är försett med en teknisk barriär av betong. Utbyggd del av SFR med 2BMA planeras att placeras på större djup i berggrunden än det befintliga 1BMA.

Den ansökta utformningen utgör en effektiv lösning för det avfall som SKB planerar att deponera vid beaktande av faktorer som byggbarhet, ekonomi, hantering under drift samt säkerhet under drift och efter förslutning. Den ansökta utformningen kan uppföras med i stora delar beprövad och tillgänglig teknik, och tillkommande utvecklingsinsatser bedöms som begränsade. Prestanda och kvalitet kan säkerställas genom att utformningen erbjuder goda möjligheter till kontroll av konstruktionen under uppförande, drift och inför förslutning. Den ansökta utformningen ger erforderlig strålskärning samt erbjuder säker hantering och förvaring under drift. Utformningen med en barriär av betong uppfyller kraven på säkerhet under drift och efter förslutning, vilket visats i säkerhetsanalyser (Andersson 2014, SKB 2015a).

Den alternativa utformningen silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär utgör vid en sammanvägd bedömning en mindre effektiv lösning för det avfall som SKB planerar att deponera jämfört med den ansökta utformningen. En silo ger en marginell förbättring av skyddsförmågan (en reduktion av den maximala årliga dosen med ca 0,6 μSv) till en betydligt större kostnad (cirka 130 miljoner SEK). En silo med kombinerad betong- och bentonitbarriär innebär därtill en mindre flexibel lösning, som inte kan anpassas efter exempelvis förändrade avfallsvolymer efter att förvarsutrymmet uppförts.

Referenser

- Abarca E, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Molinero J, von Schenck H, 2013.** Flow modelling on the repository scale for the safety assessment of the SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Abarca E, Silva O, Idiart A, Nardi A, Font J, Molinero J, 2014.** Flow and transport modelling on the vault scale. Supporting calculations for the safety assessment SR-PSU. SKB R-14-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson E, Källström K, Lindgren M, 2017.** Information om konstruktionsstyrande fall för utbyggnad av SFR. SKBdoc 1572211 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson M, 2014.** F-PSAR SFR - Allmän del 1 kapitel 8 - Säkerhetsanalys för driftskedet. SKBdoc 1261979 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Baer J, 1988.** Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, NY: Dover Publications Inc.
- Eriksson D, Bultmark F, Andersson H, 2015.** Gasevakivering genom betongbarriär i 2BMA. SKBdoc 1409731 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Luterkort D, Nyblad B, Wimelius H, Pettersson A, Aghili B, 2014.** SFR förslutningsplan. SKBdoc 1358612 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Millqvist T, Pettersson A, 2016.** Redovisning av alternativa utformningar av bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA. SKBdoc 1526718 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, 2017.** Hållfasthetsegenskaper hos betongkonstruktionerna i 1–2BMA under de första 20 000 åren efter förslutning. SKBdoc 1577237 ver 1.0, 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, 2014.** Data report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2015a.** Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU. 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, 2001.** Project SAFE. Compilation of data for radionuclide transport analysis. SKB R-01-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Westerberg B, 2017.** 2BMA – Fristående kassun med lastbärande innerväggar. SKBdoc 1587450 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åstrand P-G, Lindgren M, 2017.** Radionuklidtransportberäkningar för alternativ utformning av 2BMA med bentonitbarriär. SKBdoc 1536396 ver 3.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åstrand P-G, Lindgren M, Ekström P-A, 2017a.** Corrected waste volumes in radionuclide transport models used in SR-PSU. SKBdoc 1585177 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åstrand P-G, Lindgren M, Ekström P-A, 2017b.** Corrected implementation of fracture model used for 1BMA and 2BMA in SR-PSU. SKBdoc 1585173 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.