

ISSN 1104-8395

ID 2095737

September 2025

Fud-program 2025

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle

Svensk Kärnbränslehantering AB

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2025 Svensk Kärnbränslehantering AB

Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, som ägs av de företag som driver de svenska kärnkraftverken har till uppgift att ta hand om kärnavfallet och det använda kärnbränslet från kärnkraftsreaktorerna. Enligt kärntekniklagen ska tillståndshavarna till reaktorerna vart tredje år upprätta ett allsidigt program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Tillståndshavarna har genom avtal delegerat till SKB att utarbeta dessa Fud-program och lämna in dem till Strålsäkerhetsmyndigheten. Här presenterar SKB Fud-program 2025 som tagits fram i samverkan med kärnkraftsföretagen.

Under den gångna Fud-perioden har de erhållna regeringstillstånden, för utbyggnaden av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) samt för uppförandet av slutförvarssystemet för använt kärnbränsle (KBS-3-systemet), inneburit att SKB:s verksamhet har anpassats för den nya fasen att uppföra anläggningar. SFR byggs ut för att kunna ta emot kärnavfall från drift och avveckling av kärnkraftsreaktorerna. Avveckling pågår av sex kärnkraftsreaktorer, exklusive Ågestareaktorn som redan har avvecklats. I och med regeringstillstånden för nya anläggningar, är dessa under SSM:s tillsyn, har omfattningen av Fud-programmet minskat. Detaljerad redovisning i Fud-programmet avseende tillståndsgiven verksamhet skulle innebära både dubbel redovisning av SKB och dubbel prövning av SSM, varför den verksamheten endast redovisas översiktligt i Fud-programmet. Sammantaget ger redovisningen en översikt av alla aktiviteter som är nödvändiga för att förstå helheten.

I Fud-program 2025 presenterar SKB ett övergripande perspektiv av verksamheten samt den planerade forskningen och teknikutvecklingen. Det är av betydelse för etableringen av hela avfallssystemet att aktiviteter genomförs i en logisk följd, vilket avspeglas i handlingsplanens aktivitets- och milstolpeplan där relationer mellan aktiviteter och milstolpar för anläggningarna är i fokus. Den sista ännu ej tillståndsgivna kärntekniska anläggningen som SKB kommer att uppföra är ett slutförvar för långlivat avfall.

SKB har arbetat med forskning och teknikutveckling i över fyra decennier och SKB:s omfattande kunskapsutbyte inom forskarvärlden i stort och med systerorganisationer i synnerhet har skapat en ovärderlig internationell kunskapsbank om omhändertagande av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. SKB:s öppna, kunskapsorienterade och samarbetsinriktade förhållningssätt har bidragit till internationellt erkännande av KBS-3-metoden för geologisk slutförvaring av kärnbränsle. SKB:s samlade kunskap och erfarenhet omsätts nu i uppförande av nya anläggningar för att möjliggöra ett slutligt omhändertagande av kärnavfallet och det använda kärnbränslet.

Solna i september 2025
Svensk Kärnbränslehantering AB



Stefan Engdahl

Verkställande direktör

Sammanfattning

Den svenska kraftindustrin har under mer än ett halvt sekel producerat elektricitet med kärnkraft. På uppdrag av sina ägare ansvarar Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) för hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle. Fud-program 2025 (Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle) syftar till att uppfylla kravet på att redovisa den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att utveckla och implementera återstående verksamheter som anges i kärntekniklagen (KTL). I programmet presenteras planer för att genomföra de återstående delarna av avfallssystemet för kärnavfall och använt kärnbränsle samt för att utveckla kärnkraftsreaktorerna. Den verksamhet som SKB bedriver inom ramen för givna tillstånd redovisas mer övergripande.

Fud-program 2025

I Fud-program 2025 presenterar SKB tillsammans med tillståndshavarna för de svenska kärnkraftsreaktorerna sina planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2026–2031. Programmet består av fem kapitel:

- Kapitel 1 – Introduktion.
- Kapitel 2 – Beskrivning av avfallssystemet.
- Kapitel 3 – Plan för genomförande.
- Kapitel 4 – Fortsatt forskning och utveckling.
- Kapitel 5 – Arbetssätt, kompetens och resurser.

Kapitel 1 – Introduktion

Kapitel 1 utgör en introduktion med förutsättningar samt en återblick på Fud-program 2022 och kort sammanfattning av uppnådda milstolpar.

Under 2014 lämnade SKB tillståndsansökningar om utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) för tillkommande drift- och rivningsavfall och i december 2021 beslutade regeringen om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt miljöbalken (MB). I mars 2023 lämnade SKB in en ansökan om godkännande av en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) och i november 2024 godkändes den av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). I mitten av december påbörjades den inledande bergdrivningen i SFR och i januari 2025 kunde sprängarbeten på 45 meters djup starta. Förvaret beräknas ta cirka sex år att uppföra.

SKB lämnade 2011 tillståndsansökningar till mark- och miljödomstolen (MMD) och SSM, om tillstånd att uppföra och driva ett slutförvarssystem för använt kärnbränsle (KBS-3-systemet). SKB ansökte 2015 om tillstånd att öka den mängd använt kärnbränsle som tillåts mellanlagras i Clab från 8 000 till 11 000 ton. I augusti 2021 fattade regeringen beslut om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB för den utökande lagringskapaciteten och i januari 2022 om att ge SKB tillstånd att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark (Östhammars kommun) och en inkapslingsanläggning på Simpevarpshalvön (Oskarshamns kommun). Regeringen bedömde att den ansökta verksamheten om ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle, uppfyller kraven på val av metod och bästa möjliga teknik. Villkorsförhandlingen enligt MB för KBS-3-systemet hölls i september 2024 och dom meddelades av MMD i november. Domen beviljar även SKB verkställighetsförordnande så att arbeten på Forsmarksområdet kan inledas. I januari 2025 lämnade SKB in en ansökan om godkännande av PSAR för Slutförvaret för använt kärnbränsle (SFK) till SSM. Först efter godkännande av PSAR kan SKB påbörja uppförandet av den kärntekniska anläggningen.

Då SKB fått tillstånd att uppföra och driva nya kärntekniska anläggningar (KBS-3-systemet samt utbyggnad av SFR) står dessa verksamheter under SSM:s tillsyn. En detaljerad redovisning i Fud-programmet av tillståndsgiven verksamhet skulle innebära dubbel redovisning av SKB och dubbel prövning av SSM, varför den verksamheten endast redovisas översiktligt i Fud-programmet. Forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att utveckla och implementera återstående verksamheter, främst slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall, redovisas som ej tillståndsgiven verksamhet.

Kapitel 2 – Beskrivning av avfallssystemet

Kapitel 2 beskriver avfallssystemet med anläggningar och transportvägar för hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle.

Kapitel 3 – Plan för genomförande

Kapitel 3 redovisar övergripande genomförandeplaner för återstående delar av avfallssystemet.

Planeringen för att uppföra och ta i drift nya och utbyggda anläggningar redovisas liksom reaktorinnehavarnas och SKB:s handlingsplaner för avveckling av kärntekniska anläggningar. I slutet av kapitlet redovisas handlingsalternativ och åtgärder för att hantera eventuella större förändringar av planeringsförutsättningarna.

Redovisningen i kapitlet understöds av den övergripande aktivitets- och milstolpeplanen för kärnavfallsprogrammet med avfallsströmmar och beroenden samt av figurerna som visar planerna för avveckling av de kärntekniska anläggningarna för Uniper, Vattenfall och SKB.

Kapitel 4 – Fortsatt forskning och utveckling

Kapitel 4 redovisar uppnådda resultat under den gångna Fud-perioden och de forsknings- och utvecklingsinsatser som planeras att genomföras under Fud-perioden för de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet. Redovisningen är i punktform. För programpunkterna är redovisningen till övervägande del endast översiktlig för att visa vilka de planerade insatserna är men utan att skapa dubbel redovisning för tillståndsgiven verksamhet med hänsyn till den stegvisa prövningen. Några av de uppnådda resultaten liksom programpunkter är även till nytta i arbetet med ej tillståndsgiven verksamhet, som slutförvaring av långlivat avfall.

I slutet av kapitlet redovisas de avslutande fältförsöken i Äspölaboratoriet, SKB:s arbete med övervakning och undersökningar under uppförande och drift samt bevarande av information och kunskap över generationer. Utvecklingsarbete för avveckling beskrivs i ett separat avsnitt.

Kapitel 5 – Arbetssätt, kompetens och resurser

Kapitel 5 redovisar behov för att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt genomföra den forskning och utveckling som behövs för att uppföra och ta i drift de nya anläggningarna.

Kapitlet beskriver arbetssätt för forskning och teknikutveckling, vilka arbetsverktyg som används samt i vilka forskningsanläggningar verksamheten bedrivs. Vidare beskrivs hur nödvändig kompetens upprätthålls och bevaras på kort och lång sikt. Detta i ett nationellt så väl som ett internationellt perspektiv.

Att Fud-programmet är ett av flera sätt för reaktorinnehavarna och SKB att bidra till öppenhet och insyn i verksamheten framgår av det sista kapitlets inledning.

Summary

The Swedish power industry has been generating electricity through nuclear power for more than half a century. On behalf of its owners, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) is responsible for the management and final disposal of nuclear waste and spent nuclear fuel. The RD&D Programme 2025 (Programme for Research, Development and Demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste and spent fuel) aims to meet the statutory requirement to report the comprehensive research and development activities necessary for the advancement and implementation of the remaining operations stipulated in the Nuclear Activities Act. The programme outlines the plans for completing the remaining components of the nuclear waste and spent fuel management system, as well as for the decommissioning of nuclear reactors. Activities conducted by SKB under existing licenses are presented in a more general context.

RD&D Programme 2025

In the RD&D Programme 2025, SKB, together with the license holders of the Swedish nuclear power plants, presents plans for research, development and demonstration activities for the period 2026–2031. The programme is structured into five chapters:

- Chapter 1 – Introduction.
- Chapter 2 – Description of the waste management system.
- Chapter 3 – Plan of action.
- Chapter 4 – Continued research and development.
- Chapter 5 – Procedures, competence and resources.

Chapter 1 – Introduction

Chapter 1 serves as an introduction, outlining the conditions and providing a summary of the RD&D Programme 2022 along with a brief account of milestones achieved.

In 2014, SKB submitted an application for permission to extend the Final Repository for Short-Lived Radioactive Waste (SFR) to accommodate additional operational and decommissioning waste. In December 2021, the Swedish Government granted a license under the Nuclear Activities Act and issued a decision on permissibility under the Environmental Code. In March 2023, SKB submitted an application for approval of a Preliminary Safety Assessment Report (PSAR), which was subsequently approved by the Swedish Radiation Safety Authority (SSM) in November 2024. Initial rock construction work at the SFR site began in mid-December, and blasting operations at a depth of 45 meters commenced in January 2025. The construction of the repository is estimated to take approximately six years.

In 2011, SKB submitted applications to the Land and Environment Court and SSM for a license to construct and operate a final repository system for spent nuclear fuel (the KBS-3 system). In 2015, SKB submitted an application to increase the interim storage capacity for spent nuclear fuel at Clab from 8,000 to 11,000 tonnes. In August 2021, the Government granted a license under the Nuclear Activities Act and permissibility under the Environmental Code for the increased storage capacity.

In January 2022 SKB was authorized to construct, possess and operate a final repository for spent nuclear fuel in Forsmark in the municipality of Östhammar, as well as an encapsulation facility on the Simpevarp Peninsula in the municipality of Oskarshamn. The Government concluded that the proposed integrated system for final disposal of spent nuclear fuel meets the requirements for method selection and best available technology. A hearing regarding licensing conditions under the Environmental Code for the KBS-3 system was held in September 2024, and the ruling was issued by Land and Environment Court in November. The ruling also granted SKB an enforcement order, allowing initial work to commence at the Forsmark site. In January 2025, SKB applied to SSM for approval of the PSAR for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel (SFK), after approval of the PSAR SKB may commence construction of the nuclear facility.

As SKB has received licenses to construct and operate the new nuclear facilities (the KBS-3 system and the extension of SFR), these activities now fall under the supervision of SSM. As a detailed account of licensed activities in the RD&D Programme would result in duplicate reporting by SKB and duplicate review by SSM, such activities are presented in summary form in the programme. Research and development efforts necessary to develop and implement remaining operations—primarily the final disposal of long-lived low- and intermediate-level waste—are reported as non-licensed operations.

Chapter 2 – Description of the waste management system

Chapter 2 provides an overview of the waste management system, including facilities and transport routes for the handling and final disposal of nuclear waste and spent nuclear fuel.

Chapter 3 – Plan of action

Chapter 3 presents comprehensive implementation plans for the remaining parts of the waste management system. It outlines the planning for the construction and commissioning of new and extended facilities, as well as the action plans of reactor licensees and SKB regarding the decommissioning of nuclear facilities. Toward the end of the chapter, alternative actions and measures are presented to address potential major changes in planning conditions.

The reporting in this chapter is supported by the overarching activity and milestone schedule for the nuclear waste programme, including waste streams and interdependencies, as well as diagrams illustrating the decommissioning plans for nuclear facilities operated by Uniper, Vattenfall and SKB.

Chapter 4 – Continued research and development

Chapter 4 summarizes the results achieved during the previous RD&D period and outlines the research and development efforts planned for the upcoming, focusing on the remaining parts of the nuclear waste programme. The reporting is presented in bullet-point format. For the programme items, the reporting is primarily high-level, intended to indicate the planned efforts without duplicating reporting for licensed activities, in consideration of the stepwise regulatory review process. Some of the results achieved are also beneficial for non-licensed activities, such as the final disposal of long-lived waste.

At the end of the chapter, final field experiments at the Äspö Hard Rock Laboratory are presented, along with SKB's work on monitoring and investigations during construction and operation, and the preservation of information and knowledge across generations. Development work related to decommissioning is also described.

Chapter 5 – Procedures, competence and resources

Chapter 5 outlines the requirements for safely and cost-effectively conducting the research and development necessary for the construction and commissioning of new facilities.

It describes the methodologies used in research and technological development, the tools employed, and the research facilities where activities are carried out. Furthermore, it explains how essential expertise is maintained and preserved in both the short and long term, from national and international perspectives.

The introduction to the final chapter highlights that the RD&D Programme is one of several means by which reactor licensees and SKB contribute to transparency and public insight into their operations.

Innehåll

1	Introduktion	9
1.1	Förutsättningar	9
1.1.1	Gällande regelverk och SKB:s uppdrag	9
1.1.2	Grundläggande principer	10
1.1.3	Reaktoreernas planerade drifttider	11
1.1.4	Kärnavfallet och det använda kärnbränslet	11
1.1.5	Tillståndprocesser	13
1.2	Program för forskning, utveckling och demonstration	15
1.2.1	Fud-program 2022	15
1.2.2	Milstolpar och utveckling sedan Fud-program 2022	16
1.2.3	Fud-program 2025	17
2	Beskrivning av avfallssystemet	19
2.1	Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall	19
2.1.1	Anläggningar för kortlivat avfall	19
2.1.2	Anläggningar för långlivat avfall	21
2.2	Anläggningar inom KBS-3-systemet för använt kärnbränsle	22
2.3	Transportsystemet	25
2.4	Kärnämneskontroll	26
3	Plan för genomförande	27
3.1	Genomförandeplan för kärnavfallsprogrammet	27
3.2	Planeringen för låg- och medelaktivt avfall	29
3.2.1	Kortlivat avfall	29
3.2.2	Långlivat avfall	29
3.3	Planeringen för använt kärnbränsle	30
3.3.1	Mellanlagring	31
3.3.2	Inkapsling	31
3.3.3	Slutförvaring	32
3.4	Planeringen för mycket lågaktivt avfall	33
3.5	Planeringen för avveckling av kärntekniska anläggningar	33
3.5.1	Avveckling inom Uniper	36
3.5.2	Avveckling inom Vattenfall	37
3.5.3	Avveckling av SKB:s anläggningar	39
3.6	Planeringen för transporter	40
3.6.1	Övergripande planering	40
3.6.2	Transport av låg- och medelaktivt avfall	41
3.6.3	Transport av använt kärnbränsle	41
3.6.4	Specialtransporter	41
3.7	Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar	41
3.7.1	Kärnkraftsreaktoreernas drifttider	42
3.7.2	Deponering av mycket lågaktivt rivningsavfall	42
3.7.3	Lokalisering och driftsättning av slutförvar för långlivat avfall	43
3.7.4	Driftsättning av KBS-3-systemet	43
4	Fortsatt forskning och utveckling	44
4.1	Tillståndsgivna anläggningar	44
4.1.1	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	45
4.1.2	Slutförvaret för använt kärnbränsle och Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle	46
4.2	Ej tillståndsgivna anläggningar	47
4.2.1	Slutförvar för långlivat avfall	47
4.3	Låg- och medelaktivt avfall	48
4.3.1	Processer kopplade till materialegenskaper	48
4.3.2	Radionuklidinventarium	49

4.3.3	Acceptanskriterier	50
4.3.4	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	51
4.4	Använt kärnbränsle	52
4.4.1	Icke-reguljära bränslen och bränsleintegritet	52
4.4.2	Resteffekt, bränslekaraktärisering och val av kärnbränsle för inkapsling	53
4.4.3	Kriticitet	54
4.4.4	Kärnämneskontroll	55
4.4.5	Bränsleupplösning, radionuklidspeciering och lösligheter	56
4.5	Kapsel för använt kärnbränsle	58
4.5.1	Processer kopplade till korrosion	59
4.5.2	Processer kopplade till materialegenskaper för kapselmateriel	61
4.5.3	Konstruktion	63
4.5.4	Tillverkning, kontroll och provning	64
4.6	Cementbaserade materiel	66
4.6.1	Processer i cementbaserade materiel	66
4.6.2	Utformning av betongkonstruktioner och materiel	67
4.7	Lerbarriärer, pluggar och förslutning	68
4.7.1	Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad	68
4.7.2	Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad	71
4.7.3	Utformning av barriärer samt tillverkning, kontroll och provning	72
4.7.4	Installation av buffert och återfyllning	73
4.7.5	Förslutning av borrhål och förvar	73
4.8	Berg	74
4.8.1	Geomekanisk karaktärisering och modellering	74
4.8.2	Geometrisk modellering av diskreta spricknätverk	76
4.8.3	Seismisk påverkan på förvarens säkerhet	77
4.8.4	Hydrogeologi	78
4.8.5	Transport av lösta ämnen	80
4.8.6	Hydrogeokemi	82
4.9	Ytekosystem	83
4.9.1	Upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer	83
4.9.2	Temporal och spatial heterogenitet i landskapet	84
4.9.3	Transport- och ackumulationsprocesser	85
4.9.4	Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos betydelsefulla ämnen	86
4.10	Klimat och klimatrelaterade processer	86
4.11	Avslutande av fältförsök i Äspölaboratoriet	88
4.11.1	Genomförda brytningar under den gångna Fud-perioden	88
4.11.2	Avslut av nya fältförsök	89
4.12	Övervakning och undersökningar under uppförande och drift	89
4.12.1	Övervakningsprogram	90
4.12.2	Övervakning av barriärer	90
4.12.3	Internationell utveckling	90
4.13	Avveckling	91
4.14	Bevarande av information och kunskap över generationer	91
5	Arbetsätt, kompetens och resurser	94
5.1	Fud-programmets roll för öppenhet och insyn	94
5.2	Forskning	94
5.2.1	Forskningens framtida inriktning	94
5.2.2	Granskning, öppenhet och insyn	95
5.3	Teknikutveckling	95
5.3.1	Styrning av teknikutveckling	95
5.3.2	Teknikutvecklingsprocess	96
5.3.3	Gränssnitt mellan teknikutveckling och konstruktion	96
5.3.4	Kvalitetssäkring, styrning och kontroll	97
5.4	SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration	97
5.4.1	Äspölaboratoriet	97
5.4.2	Vattenkemilaboratorium i Forsmark	98

5.4.3	Kapsellaboratoriet i Oskarshamn	99
5.5	IT-arbetsverktyg	99
5.5.1	Databaser.....	99
5.5.2	Modellerings- och beräkningsverktyg.....	100
5.5.3	Artificiell intelligens.....	100
5.5.4	Undersökningsmetoder och instrument för platsmodellering.....	100
5.5.5	Kvalitetssäkring.....	101
5.6	Kompetens, resurser och samarbeten	101
5.6.1	Kompetens och samarbeten inom avfallshantering och slutförvaring.....	102
5.6.2	Kompetens och samarbeten inom avveckling	105
5.6.3	Närliggande utmaningar och upprätthållande av kompetens på längre sikt.....	107
Referenser		110
Bilaga Förkortningar och förklaringar		126

1 Introduktion

Den svenska kraftindustrin har under mer än ett halvt sekel producerat elektricitet med kärnkraft. År 1964 togs Ågestareaktorn, landets första kommersiella kärnkraftsreaktor, i drift. Sedan dess har ett system byggts upp, för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och kärnavfallet från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. De anläggningar som är i drift är ett Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), markförvar och mellanlager samt ett fartyg, terminalfordon och transportbehållare.

För att kunna ta hand om det använda kärnbränslet på ett långsiktigt säkert sätt återstår det att uppföra och driftsätta det system av anläggningar, KBS-3-systemet, som behövs för slutförvaring. I KBS-3-systemet ingår Clab med en tillkommande anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet (tillsammans kallat Clink, Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle i och med att provdrift inleds), ett transportsystem för transporter av det inkapslade bränslet och Slutförvaret för använt kärnbränsle (SFK). I denna rapport används SFK för både den kärntekniska anläggningen under uppförande eller i drift (i andra dokument ofta benämnt Kärnbränsleförvaret) och det förslutna slutförvaret för använt kärnbränsle.

För omhändertagande av det låg- och medelaktiva avfallet från drift och avveckling behöver kapacitet i mellanlager finnas och en utbyggnad av SFR uppföras. Dessutom behöver långlivat avfall tas om hand.

Genomförandeplanen i detta Fud-program beskriver de övergripande planerna för att realisera de återstående delarna av avfallssystemet och anpassa befintliga. Ett antal kärnkraftsreaktorer är för närvarande under avveckling. Fud-programmet beskriver därför översiktligt kravbild, ansvar och arbetsfördelning vid avveckling samt genomförandet för de reaktorer som ska avvecklas på 2020-talet.

1.1 Förutsättningar

Förutsättningar för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och kärnavfallet från de svenska kärnkraftsreaktorerna utgörs av gällande regelverk, grundläggande principer för genomförandet samt politiska inriktningsbeslut, reaktornas planerade drifttider samt principerna för indelning av kärnkraftens restprodukter i olika avfallskategorier.

1.1.1 Gällande regelverk och SKB:s uppdrag

Enligt 10 § i lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (KTL) ska den som bedriver kärnteknisk verksamhet svara för de åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt avveckla och riva anläggningar samt hantera och slutförvara använt kärnbränsle och kärnavfall.

Tillståndshavare för kärnkraftsreaktorerna i Forsmark, Oskarshamn, Ringhals och Barsebäck är Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA), OKG Aktiebolag (OKG), Ringhals AB (RAB) och Barsebäck Kraft AB (BKAB). Tillståndshavare för den avvecklade Ågestareaktorn är Vattenfall AB. Dessa företag benämns fortsättningsvis reaktorinnehavarna. Vattenfall är huvudägare för RAB och FKA. Uniper är huvudägare för OKG och BKAB.

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) ägs av reaktorinnehavarna och dess ägare. På uppdrag av sina ägare ansvarar SKB för hantering och slutförvaring av kärnavfallet och det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken. För detta ändamål har SKB ett transportsystem och är tillståndshavare för Clab och SFR.

SKB ska också få till stånd slutförvar för det använda kärnbränslet och kärnavfallet från avvecklingen enligt reaktorinnehavarnas behov. Reaktorinnehavaren har ansvar för att avveckla sina kärnkraftsreaktorer och SKB har fått i uppdrag att delta i planeringen av avvecklingen. SKB sammanställer det utvecklingsbehov som identifierats av reaktorinnehavarna, samordnar generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle. SKB samverkar också med de olika avvecklingsprojekten i centrala frågor som rör avfallshantering, exempelvis acceptanskriterier och typbeskrivningar för rivningsavfall samt transporter.

Enligt 11-12 §§ i KTL ska den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnkraftsreaktor, i samråd med övriga reaktorinnehavare upprätta eller låta upprätta ett program för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfall eller kärnämne som inte ska användas på nytt. Vidare ska programmet på motsvarande sätt redovisa det som behövs för att avveckla kärntekniska anläggningar som inte ska användas. Ett sådant program för forskning, utveckling och demonstration (Fud-program) ska lämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) vart tredje år och det ska omfatta samtliga åtgärder som behövs och närmare beskriva vad som ska göras inom en tidrymd om minst sex år. SSM lämnar ett yttrande över Fud-programmet till regeringen och i förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet (kärnteknikförordningen) anges omfattningen av SSM:s granskning och prövning. Det är SKB som på uppdrag av och i samarbete med reaktorinnehavarna och deras huvudägare utarbetar Fud-programmen och lämnar dem till SSM.

Detta Fud-program omfattar endast hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle från reaktorinnehavarna. Men SKB:s uppdrag är vidare och omfattar bland annat att stötta AB Svafo i arbetet med att karakterisera historiskt avfall samt tillhandahålla service åt producenter av icke-kärntekniskt avfall (IKA) och av övrigt avfall från annan kärnteknisk verksamhet än från drift och avveckling av kärnkraftverk. Denna service regleras genom avtal mellan SKB och de företag som producerat avfallet alternativt hanterar det för annat företags räkning, oberoende av vem som har det juridiska ansvaret för avfallet.

1.1.2 Grundläggande principer

Hanteringen av radioaktiva ämnen är reglerad i lagar och förordningar. Radioaktivt avfall är material som avger joniserande strålning som är skadlig och utgör avfall enligt 15 kap. 1 § i miljöbalken (1998:808), MB eller som det inte finns någon planerad och godtagbar användning för. Kärnavfall är radioaktivt avfall som bildas i kärnkraftverk eller andra kärntekniska anläggningar. I praktiken betraktas och behandlas det använda kärnbränslet som avfall, även om det inte är juridiskt definierat som avfall innan det slutligt placerats i ett slutförvar.

Viktiga grundläggande principer som finns i lagstiftningen är:

- Den som har gett upphov till använt kärnbränsle och radioaktivt avfall ska också bära kostnaderna för omhändertagandet.
- Tillståndshavaren för en kärnteknisk verksamhet, liksom den som i övrigt utövar verksamhet med joniserande strålning, är skyldig att på ett säkert sätt hantera och slutförvara använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från verksamheten.
- Staten har ett sekundärt ansvar för det använda kärnbränsle och radioaktiva avfall som genererats i landet. Ansvaret innebär att om det inte finns någon som kan göras ansvarig för säkerheten ansvarar staten till dess att en tillståndshavare kan fullgöra skyldigheterna.
- Sverige tar ansvar för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall som uppkommer i landet.
- Berörda kommuner har vetorätt mot etablering av nya kärntekniska anläggningar.
- Det slutliga ansvaret för ett slutligt förslutet geologiskt slutförvar och det avfall som finns i anläggningen ska vila på staten förutsatt att tillståndshavaren fått tillstånd av regeringen att försluta det.

En annan central princip är det politiska beslutet att det använda kärnbränslet inte ska upparbetas.

SKB tillämpar geologisk slutförvaring av kortlivat radioaktivt avfall och har tillstånd att tillämpa det också för det använda kärnbränslet. Flertalet länder och organisationer som International Atomic Energy Agency (IAEA) och Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) är överens om att geologisk deponering är en accepterad lösning som har förutsättningar att uppfylla kraven på säker slutförvaring och genomförbarhet. Vidare stöds geologisk deponering av Europeiska unionens (EU) direktiv för ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall (2011/70/Euratom).

Nedanstående principer ligger till grund för SKB:s slutförvar:

- Förvaren ska förläggas till en långsiktigt stabil geologisk miljö.
- Förvaren ska förläggas i berggrund som kan antas vara ekonomiskt ointressant för kommande generationer.
- Förvarens säkerhet baseras på flera barriärer (flerbarriärsprincipen).
- Tekniska barriärer ska i första hand bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.
- Förvaren ska utformas på ett sådant sätt att säkerheten inte är beroende av aktiva åtgärder som underhåll och reparationer efter förslutning.

Flerbarriärsprincipen är en grundläggande och internationellt vedertagen säkerhetsprincip för slutförvaring. Den innebär att ett slutförvars säkerhet efter förslutning baseras på flera barriärer som har till uppgift att innesluta, förhindra eller fördröja spridningen av de radioaktiva ämnena i avfallet. Vilka barriärer och övriga komponenter som behövs i ett slutförvar beror till stor del på mängden radioaktiva ämnen, deras halveringstider och avfallets övriga egenskaper.

1.1.3 Reaktorernas planerade drifttider

Reaktorernas drifttider utgör grunden för planeringen av kärnavfallsprogrammet. Utifrån reaktorinnehavarnas aktuella planeringsförutsättningar, görs prognoser för de mängder kärnavfall och använt kärnbränsle som ska omhändertas i avfallssystemet samt när i tiden behov för mellanlagring och slutförvaring uppstår.

Under perioden 1999 till 2020 har sex stycken av Sveriges tolv elproducerande kärnkraftsreaktorer permanent stängts ner. Samtliga stängda reaktorer togs i drift under 1970-talet. För de sex reaktorer som är i drift är den planerade drifttiden 60 år. Detta gäller reaktorerna Forsmark 1 (F1), Forsmark 2 (F2) och Forsmark 3 (F3), Oskarshamn 3 (O3) samt Ringhals 3 (R3) och Ringhals 4 (R4). De yngsta reaktorerna, F3 och O3, kommer därmed att vara i drift till 2045 enligt den planering som reaktorinnehavarna har idag. Konsekvenser för avfallssystemet av förändrade drifttider diskuteras i avsnitt 3.7.1.

1.1.4 Kärnavfallet och det använda kärnbränslet

Kärnavfall och använt kärnbränsle genereras vid drift och avveckling av kärnkraftsreaktorerna. Det använda kärnbränslet och kärnavfallet behöver hållas avskilt från människor och miljö, för att undvika skadlig påverkan från joniserande strålning.

Omhändertagandet av det använda kärnbränslet och kärnavfallet styrs till stor del av dess egenskaper. Kärnavfallet delas in i kategorier efter aktivitetsinnehåll (mycket lågaktivt, lågaktivt eller medelaktivt) och efter de radioaktiva ämnens halveringstid (kort- eller långlivade). Aktiviteten styr hur avfallet hanteras. Det medelaktiva avfallet och det högaktiva använda kärnbränslet kräver en strålskärmad hantering medan lågaktivt avfall kan hanteras utan strålskärning. Hur slutförvaringen ska utformas styrs till stor del av om de radioaktiva ämnena i avfallet är kortlivade eller långlivade, då det har betydelse för den tid som barriärernas funktion behöver upprätthållas.

Hur stor mängd och när avfallet uppkommer är också viktiga utgångspunkter för planeringen av avfallssystemet. Avfallsmängderna från driften är beroende av reaktorernas drifttid, tillgänglighet och andra driftförhållanden. Kärnavfallet från avveckling är till vissa delar av samma typ som det avfall som uppstår under drift, men volymerna är större. Vid avvecklingen av kärnkraftsreaktorerna hanteras merparten av avfallet som konventionellt avfall, då det härrör från anläggningsdelar där radioaktivt material inte har hanterats eller där det historiskt inte detekterats någon kontamination. Detta avfall benämns nollklassat avfall, vilket innebär att hanteringen föregåtts av en initial bedömning där avfallet kategoriserats som extremt liten risk för kontamination. De konventionella bortskaffningsalternativen omfattar även de stora volymer material som kan friklassas. Friklassning av avfall sker då kontaminationsnivån i avfallet understiger gällande friklassningsgränser.

Avfallssystemet är utformat för att hantera och slutförvara kärnavfall och använt kärnbränsle från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna och baseras på respektive reaktorinnehavares prognoser.

Mycket lågaktivt kärnavfall

Avfall som innehåller mindre mängd kortlivade radionuklider med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år¹, begränsad mängd långlivade radionuklider och har en dosrat på kolli som är under 0,5 mSv/h klassificeras som mycket lågaktivt avfall. Detta avfall uppstår både under drift och rivning av kärnkraftverken. Under drift genereras det främst under revisioner samt underhålls- och serviceinsatser. Den andel av avfallet från avveckling som klassificeras som mycket lågaktivt består huvudsakligen av nedmonterade system och strukturdelar samt skydds- och saneringsutrustning.

Hanteringen av mycket lågaktivt avfall bestäms av materialslag och aktivitetsinnehåll och sker huvudsakligen på plats vid kärnkraftverken.

Mycket lågaktivt kärnavfall deponeras idag huvudsakligen i markförvar. Alternativ med mer komplex behandling, exempelvis förbränning och smältning, sker i särskilda anläggningar.

Låg- och medelaktivt kärnavfall

Det låg- och medelaktiva kärnavfallet kan vara kort- eller långlivat. Kortlivat avfall innehåller en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid än cirka 30 år. Avfall klassas som långlivat om det har ett signifikant innehåll av långlivade radionuklider.

Låg- och medelaktivt avfall uppkommer både under drift och avveckling av kärntekniska anläggningar. Driftavfallet består till exempel av jonbytarmassor, förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Avfallet från avveckling består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

Huvuddelen av det kortlivade avfallet kommer från kärnkraftverken. Dessutom kommer kortlivat avfall idag från Clab och senare från Clink. Kortlivat avfall deponeras i SFR.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken består av förbrukade hårdkomponenter, reaktortankar från tryckvattenreaktorer (PWR) och styrstavar från kokvattenreaktorer (BWR). De långlivade radionukliderna bildas företrädesvis när stabila grundämnen i till exempel stål utsätts för stark neutronbestrålning från reaktorhärden.

Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet utgör en mindre del av den totala volymen avfall som ska slutförvaras. Bränslet innehåller dock den helt dominerande mängden av all aktivitet, både kort- och långlivad. Använt kärnbränsle kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Slutförvaringen kommer att ske i SFK.

Det använda kärnbränslet alstrar värme även efter att det tagits ur reaktorn (resteffekt), vilket gör att det måste kylas för att inte överhettas. Resteffektens storlek beror framför allt på utbränningsgraden (hur mycket energi som utvunnits ur kärnbränslet) och hur lång tid som gått sedan det togs ut ur reaktorn. I och med den tekniska utvecklingen och förändringar i driften av reaktorerna för att få ett så effektivt utnyttjande av bränslet som möjligt, har utbränningen av bränslet successivt ökat sedan reaktorerna togs i drift. En konsekvens av ökad utbränning är ökad resteffekt, vilket är av betydelse vid mellanlagring och slutförvaring.

Nästan allt använt kärnbränsle som ska deponeras i SFK kommer från de svenska kärnkraftverken. Men det finns även små mängder använt kärnbränsle som kommer från avslutade uppdragsavtal, andra typer av reaktorer samt Studsviks bränsleverksamhet.

¹ Kortlivad radionuklid definieras enligt IAEA Safety Standards, Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide, No GSG-1 som en radionuklid med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år.

1.1.5 Tillståndprocesser

Det krävs tillstånd för att uppföra, inneha eller driva en kärnteknisk anläggning. Den som redan har tillstånd behöver ansöka om nytt tillstånd för ändringar som går utanför ramen för det redan givna tillståndet. Avveckling av kärntekniska anläggningar kräver inget ändrat tillstånd enligt KTL. Däremot måste en ansökan göras till mark- och miljödomstolen (MMD) för att få tillstånd enligt MB för nedmontering och rivning (NoR). Dessutom krävs SSM:s godkännande innan NoR kan påbörjas. I nuläget finns det inte någon etablerad eller beskriven process för hur ett kärntekniskt tillstånd kan återkallas efter slutförd NoR.

Tillståndsprövning för uppförande eller större ombyggnader eller ändringar av kärntekniska anläggningar

Det är regeringen som beslutar om tillstånd respektive tillåtlighet enligt KTL respektive MB för uppförandet av en kärnteknisk anläggning och genomförandet av större ombyggnader eller större ändringar av en befintlig anläggning. SSM är beredande myndighet för ansökningar enligt KTL och MMD för ansökningar enligt MB och sökanden lämnar in ansökningar parallellt till båda instanserna. I ansökningarna ingår en förberedande preliminär säkerhetsredovisning (F-PSAR) eller motsvarande sammanfattande information och en miljökonsekvensbeskrivning (MKB).

Syftet med ansökningarna är att visa att sökanden, i detta fall SKB, har kunskap och förmåga att konstruera anläggningen så att den uppfyller myndigheternas och andra ställda krav. Även efter att tillstånd enligt KTL erhållits, kommer forskning och teknikutveckling fortsätta, redovisas och bedömas i en fortsatt stegvis prövning.

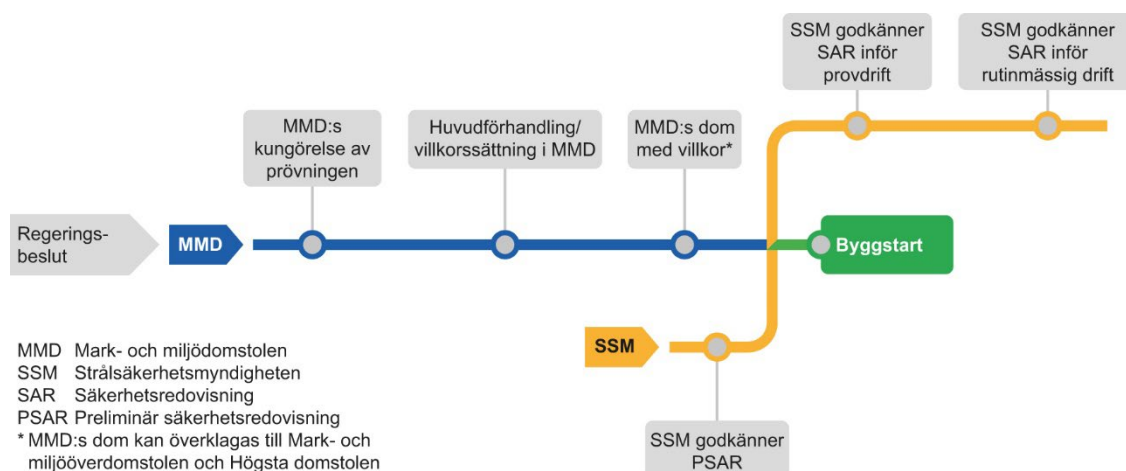
När regeringen beslutat om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB ska MMD utfärda miljötillstånd och föreskriva villkor enligt MB och SSM ska göra en fortsatt stegvis prövning enligt KTL, se figur 1-1.

I den stegvisa prövningen behövs godkännanden från SSM av flera säkerhetsredovisningar. Detta styrs av SSM:s föreskrifter som, baserat på internationella rekommendationer från bland annat IAEA och OECD/NEA, anger att utveckling och tillståndsgivning av kärntekniska anläggningar ska ske genom en process där kraven på anläggningen, dess utformning och tekniska lösningar successivt fastställs. Denna stegvisa prövning, som är gemensam för samtliga anläggningar, innefattar:

- **Godkännande av säkerhetsredovisning inför uppförande** – baserad på redovisning av en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) som redogör för anläggningens planerade utformning, hur verksamheten anordnas och hur kraven uppfylls.
- **Godkännande av säkerhetsredovisning inför provdrift respektive rutinmässig drift** – baserad på successiva redovisningar av förnyad respektive kompletterad säkerhetsredovisning (SAR). Säkerhetsredovisningen ska sammantaget visa hur anläggningens säkerhet är anordnad och ska avspegla anläggningen som den är byggd, analyserad och verifierad samt visa hur gällande krav på dess konstruktion, funktion, organisation och verksamhet är uppfyllda.

Därutöver tillkommer notifiering till EU-kommissionen enligt Euratomfördraget artikel 41 från SKB inför uppförandet och enligt Euratomfördraget artikel 37 från svenska staten via SSM, baserat på underlag från SKB inför driftsättning.

Krav på kärnämneskontroll från såväl svenska myndigheter som internationella kontrollorgan ska alltid uppfyllas för anläggningar där kärnämne kommer att hanteras. Detta innebär att SKB för dessa anläggningar inför uppförande, till SSM och EU-kommissionen lämnar in en preliminär grundläggande teknisk beskrivning, Basic Technical Characteristics (BTC) och en anläggningsbeskrivning. Inför driftsättning ska SKB, till SSM och EU-kommissionen, överlämna en officiell fastställd BTC och en uppdaterad anläggningsbeskrivning.



Figur 1-1. Efter att regeringen beslutat om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB följer villkorsprocess och dom av MMD samt stegvis prövning av SSM.

Driftperioden för ett slutförvar inleds med provdrift när en förnyad säkerhetsredovisning som avspeglar anläggningen som den är byggd har godkänts av SSM. Under provdrift deponeras använt kärnbränsle eller radioaktivt avfall. Innan anläggningen får tas i rutinmässig drift ska säkerhetsredovisningen kompletteras med erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM. Först därefter övergår verksamheten i en förvaltningsfas under så kallad rutinmässig drift. Den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnteknisk anläggning ska minst vart tionde år göra en systematisk helhetsbedömning av säkerhet och strålskydd. I samband med dessa görs också en genomgång och sammanställning av läget inom de kunskapsområden som är väsentliga för strålsäkerheten.

Det är regeringen som, enligt KTL, ger tillstånd om den slutliga förslutningen av ett slutförvar. Det innebär att den förnyade slutliga säkerhetsredovisningen, som ska godkännas av SSM utgör underlag för regeringens prövning inför förslutning. Regeringen kan då även besluta om villkor för att förvaret slutligt ska få förslutas. Staten ansvarar för ett slutligt förslutet geologiskt slutförvar och det avfall som finns i anläggningen.

Tillståndprocesser för avveckling av kärntekniska anläggningar

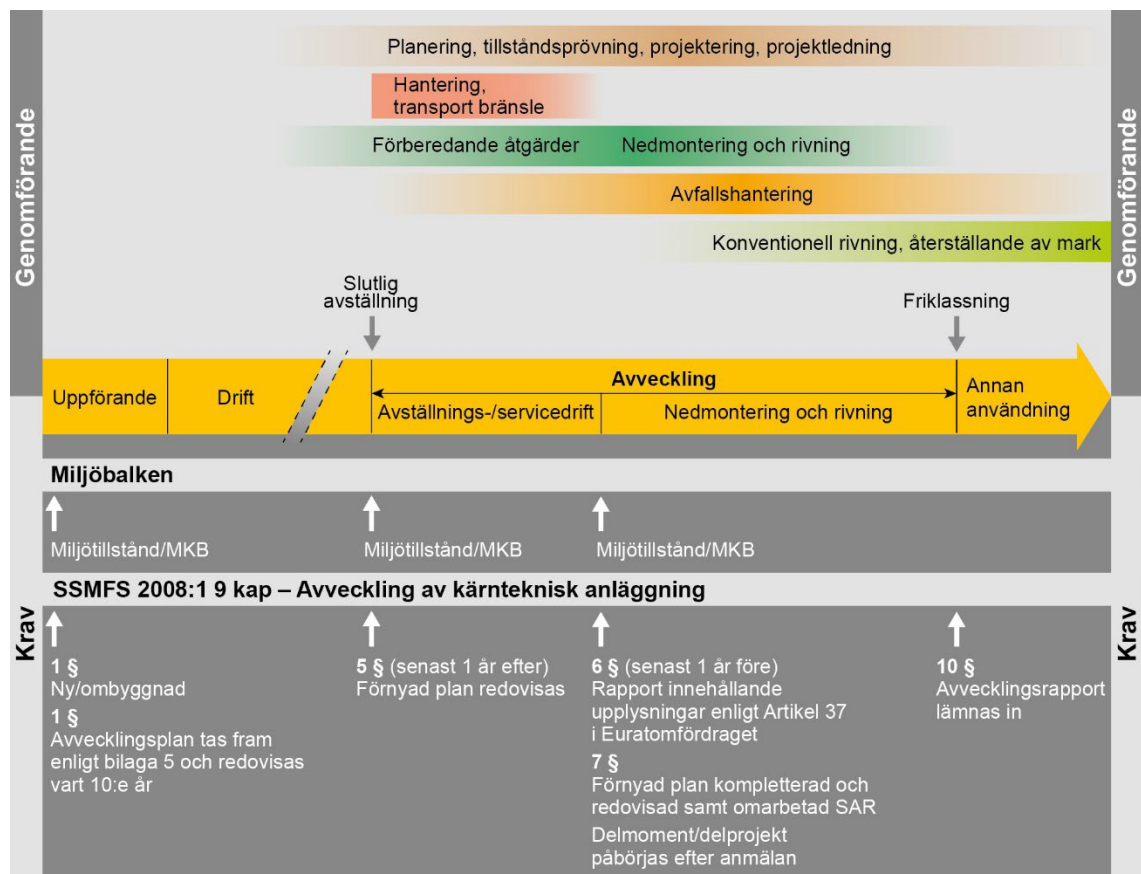
De huvudsakliga tillståndprocesserna som styr avvecklingen är:

- Tillstånd enligt MB med en MKB, enligt miljöprövningsförordningen (2013:251).
- SSM:s godkännande av en omarbetad NoR SAR.
- SSM:s godkännande av ett för NoR anpassat program för radiologisk omgivningskontroll.

Enligt MB ska en MKB lämnas in både innan slutlig avställning av anläggningen och som en del i ansökan om att få utföra NoR, se figur 1-2. I samband med slutlig avställning väntas den befintliga MKB:n kunna omarbetas då avställnings- och servicedrift till stor del kommer att likna den tidigare driften. Inför NoR krävs däremot att en ny och ändamålsenlig MKB tas fram. MKB:n tillsammans med samråd utgör grunden för miljötillstånd enligt MB.

I enlighet med KTL och strålskyddslagen (2018:396) samt gällande förordningar, tillståndsvillkor och föreskrifter ska ett antal dokument utarbetas inför och i vissa fall löpande under genomförandet av avvecklingen. En avvecklingsplan ska redovisas för SSM, medan avfallsplan och säkerhetsredovisning ska delges för formellt godkännande enligt SSM:s författningssamling (SSMFS) 2008:1. Vidare ska även underlag tas fram för information till EU-kommissionen i enlighet med Euratomfördragets artikel 37. Den formella rapporten skickas till EU-kommissionen av SSM, men respektive avvecklingsprojekt tar fram underlagsrapporter.

Figur 1-2 visar schematiskt hur avvecklingen av en kärnkraftsreaktor genomförs i förhållande till den kravbild som finns på anläggningen under dess livscykel. Figurens övre del presenterar de aktiviteter som planeras att ske på anläggningen och den undre delen visar kraven enligt MB och SSM:s föreskrifter.



Figur 1-2. Översikt över de olika faserna för genomförandet av en reaktors avveckling samt krav i SSMFS och MB för avveckling under en kärnteknisk anläggnings livslängd.

1.2 Program för forskning, utveckling och demonstration

Fud-programmens fokus har varierat genom åren, beroende på var tyngdpunkten i SKB:s respektive reaktorinnehavarnas verksamhet har legat. I Fud-program 2010 (SKB 2010) fanns en kort sammanfattning av de program som SKB har presenterat fram till och med 2007. Därefter har en sammanfattning gjorts av det närmast föregående Fud-programmet.

1.2.1 Fud-program 2022

I Fud-program 2022 (SKB 2022) presenterade SKB ett systemövergripande perspektiv av verksamheten samt den planerade forskningen och teknikutvecklingen. Den strategiska inriktningen drevs ett steg längre i förhållande till Fud-program 2019 (SKB 2019). Motivet var att det är av betydelse för etableringen av hela avfallssystemet att aktiviteter genomförs i en logisk följd, där hänsyn tas till behov och beroenden, vilket avspeglades i handlingsplanens aktivitets- och milstolpeplan, där relationer mellan aktiviteter och milstolpar för anläggningarna var i fokus. Programmet gav en översikt av alla aktiviteter och verksamheter som är nödvändiga för att ge en tillräcklig förståelse för helheten. Vidare framförde SKB sin uppfattning om att fokus flyttas och omfattningen av Fud-programmet minskar när planerade anläggningar övergår till tillståndsgivna anläggningar under tillsyn av SSM.

I granskningen av Fud-program 2022 bedömde SSM att SKB vid utarbetandet av programmet har hörsammat villkoren i regeringens beslut om Fud-program 2019, liksom att SKB i allt väsentligt har beaktat de synpunkter som SSM och Kärnavfallsrådet fört fram i yttranden över Fud-program 2019. SSM bedömde också att redovisningen i Fud-program 2022 var ändamålsenlig i förhållande till lagstiftarens syfte med programmet och de krav som ställs och att redovisningen ger en tillräcklig överblick av programmet, och tillräcklig insikt i planerade insatser under Fud-perioden för att myndigheten ska kunna bedöma att programmet uppfyller lagens krav.

Regeringen ställde som villkor för den fortsatta forsknings- och utvecklingsverksamheten att SKB ska inhämta synpunkter från SSM på hur den fortsatta forskningen och teknikutvecklingen för de av regeringen redan tillståndsgivna verksamheterna ska redovisas i Fud-program 2025. Dessutom ska redovisningen i Fud-programmet även fortsättningsvis inkludera en redovisning av planerade åtgärder för informationsbevarande. Reaktorinnehavarna och SKB uppmanades också att noga överväga de övriga delarna av yttrandena som SSM (2023) och Kärnavfallsrådet (2022) lämnat vid granskningen av Fud-program 2022.

I enlighet med regeringsbeslutet om Fud-program 2022 har SKB och SSM genomfört informationsutbyte vid tre mötestillfällen avseende hur den fortsatta forskningen och teknikutvecklingen för de av regeringen tillståndsgivna verksamheterna ska redovisas.

1.2.2 Milstolpar och utveckling sedan Fud-program 2022

Systemet för låg- och medelaktivt avfall

När Fud-program 2022 redovisades pågick förberedelserna inför villkorsförhandlingar i MMD avseende utbyggnaden av SFR för tillkommande drift- och rivningsavfall som SKB ansökte om 2014 och som regeringen beslutade om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB för i december 2021. Villkorsförhandlingen enligt MB hölls i november 2022 och i december samma år meddelade MMD dom och SKB fick miljötillstånd för utbyggnaden. Domstolen beslutade också om verkställighet för inledande arbeten, vilket innebar att SKB kunde påbörja vissa arbeten ovan mark.

Parallellt med tillståndsprocessen fortsatte forskning, utveckling och framtagande av underlag till bland annat PSAR för ett utbyggt SFR. I mars 2023 lämnade SKB in en PSAR och i slutet av november 2024 godkändes den av SSM. I mitten av december påbörjades den inledande bergdrivningen i SFR och i januari 2025 kunde sprängarbeten på 45 meters djup starta. Uppförandet av utbyggnaden av förvaret beräknas ta cirka sex år.

KBS-3-systemet för använt kärnbränsle

SKB lämnade 2011 tillståndsansökningar till MMD och SSM om tillstånd att uppföra och driva ett slutförvarssystem för använt kärnbränsle (KBS-3-systemet). SKB ansökte 2015 om tillstånd att öka den mängd använt kärnbränsle som tillåts mellanlagras i Clab från 8 000 till 11 000 ton. Regeringen bröt ut ansökan om att utöka mängden kärnbränsle för mellanlagring i Clab från den inlämnade ansökan och i augusti 2021 fattade regeringen beslut om tillåtlighet enligt MB och tillstånd enligt KTL för den utökade lagringen i Clab. Efter att Fud-program 2022 redovisades har villkorsförhandling genomförts i MMD. Dom samt miljötillstånd meddelades under våren 2022 för utökad mellanlagring. SKB lämnade i oktober 2023 in en ansökan om godkännande av förnyad SAR och fick den godkänd av SSM i februari 2024. Detta godkännande innebar att provdriften av den utökade verksamheten kunde inledas. Nästa steg är att skriva samman SAR med den befintliga säkerhetsredovisningen inför rutinmässig drift. I januari 2022 fattade regeringen beslut om att ge SKB tillstånd att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark (Östhammars kommun) och en inkapslingsanläggning på Simpevarpshalvön (Oskarshamns kommun). Villkorsförhandlingen enligt MB hölls i september 2024 och domen meddelades av MMD i november. Domen beviljar även SKB verkställighetsförordnande så att arbeten på Forsmarksområdet har kunnat inledas.

Parallellt med tillståndsprocessen har fortsatt forskning, utveckling och framtagande av underlag till bland annat PSAR SFK respektive PSAR Clink pågått.

I januari 2025 lämnade SKB in en ansökan om godkännande av PSAR SFK till SSM. Denna ansökan är ett steg i den stegvisa prövningen enligt regeringsbeslut M2018/00221. Ansökan innehåller förutom den PSAR som ska granskas och godkännas av SSM ett antal stödjande dokument i form av planer för fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete för SFK fram till idrifttagande av anläggningen samt program för undersökningar och övervakning under uppförande och drift. Denna dokumentation granskas av SSM inom ärende SSM2025-905. I löpande text i detta Fud-program refereras till ansökan om godkännande av PSAR SFK. Först efter godkännande av PSAR kan SKB påbörja uppförandet av den kärntekniska anläggningen.

1.2.3 Fud-program 2025

Innehållet i Fud-program 2025 har anpassats till delvis nya förutsättningar för redovisningen eftersom SKB har fått tillstånd att uppföra och driva nya kärntekniska anläggningar (KBS-3-systemet) samt ett utbyggt SFR. Dessa verksamheter står därmed under SSM:s tillsyn. Av särskild betydelse för Fud-programmet är att SKB successivt har redovisat och fortsatt ska redovisa säkerhetsredovisningar till SSM inom ramen för de stegvisa prövningarna enligt KTL (avsnitt 1.2.2). SSM:s godkännande av dessa krävs enligt regeringens tillståndsvillkor för att inleda i) uppförande, ii) provdrift och iii) rutinmässig drift av anläggningarna. I dessa säkerhetsredovisningar, med tillhörande underlag, beaktas ny kunskap samt ändringar och optimering av anläggningarna. I många fall stöds dessa av forskningsinsatser och teknikutveckling. Planerade forsknings- och utvecklingsinsatser är del av redovisningen i SSM:s stegvisa prövning och det är därför inte lämpligt att som tidigare redovisa detaljerade planer och resultat för forskning och utveckling i Fud-programmet.

En redovisning i Fud-programmet av tillståndsgivna verksamheter innebär dubbel redovisning av SKB och dubbel prövning av SSM. Exempelvis skulle det inte vara lämpligt för SSM att ta ställning i Fud-granskningen eftersom det skulle kunna uppfattas som förhandsbesked inför kommande granskningar i pågående stegvisa prövningar. Dessa omständigheter påtalades av såväl SKB som SSM i anslutning till Fud-program 2022 och exempelvis sammanfattade SKB i sitt yttrande till regeringen den 8 november 2023 över SSM:s och Kärnavfallsrådets Fud-granskningar att ”Det är i linje med SKB:s uppfattning att fokus för kommande Fud-redovisningar därmed flyttas och omfattningen av Fud-programmet minskar när planerade anläggningar övergår till tillståndsgivna anläggningar under tillsyn av SSM”.

Det ska noteras att regeringen i tillståndsbesluten enligt KTL för SFK, Clink och utbyggnaden av SFR tydligt framfört att fortsatt forskning är viktig och att Fud-programmen därmed är betydelsefulla. I beslutet om SFK gör regeringen ställningstagandet att ”... det i dag inte finns någon alternativ metod som skulle kunna utgöra bästa möjliga teknik”. Regeringen gör i sitt beslut i december 2021 om tillåtlighet enligt MB motsvarande bedömning avseende utbyggnaden av SFR: ”Den valda metoden för slutförvaring innebär att strålningen kommer hålla sig under tillämpliga riskkriterier och uppfyller kraven på bästa möjliga teknik”. Att SKB:s metoder för slutförvaring bedöms uppfylla kraven på bästa möjliga teknik (BAT) innebär att den fortsatta forskningen och teknikutveckling kommer att inriktas på optimering och effektivisering av de tillståndsgivna verksamheterna.

SKB bedriver omvärldsbevakning och värderar om internationella erfarenheter kan bidra till optimering av systemet för omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Detta bidrar till att SKB uppfyller det lagstadgade kravet på allsidighet i forskningen och utvecklingen.

I tidigare Fud-program och deras granskning har frågor som inte har direkt koppling till slutförvarens säkerhet uppmärksamats och i vissa fall har regeringen i Fud-beslut ställt som villkor att de ska belysas av SKB i kommande program. Till dessa frågor hör hur SKB långsiktigt (50–100 år) arbetar med kompetensförsörjning, överföring av information till kommande generationer om slutförvaren och eventuella behov av övervakning av slutförvar efter att de förslutits. Dessa frågeställningar kommer tills vidare att redovisas i Fud-programmen på samma sätt som tidigare eftersom de inte omfattas av de säkerhetsredovisningar som SKB ska lämna till SSM för prövning och godkännande.

Redovisningen i Fud-program 2025 syftar till att svara upp mot kravet på den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att utveckla och implementera återstående verksamheter som anges i 12 § i KTL (avsnitt 1.1.1).

SKB fokuserar i Fud-program 2025 på övergripande planering för fortsatt forskning och teknikutveckling under perioden 2026–2031. Programmet innehåller följande kapitel:

- **Kapitel 1 – Introduktion** med förutsättningar samt återblick på Fud-program 2022 och kort sammanfattning av uppnådda milstolpar.
- **Kapitel 2 – Beskrivning av avfallssystemet** med anläggningar och transportvägar för hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle.
- **Kapitel 3 – Plan för genomförande** med övergripande genomförandeplaner för de återstående delarna av avfallssystemet med beslutade prioriteringar utifrån behov och beroenden.
- **Kapitel 4 – Fortsatt forskning och utveckling** redovisar uppnådda resultat under den gångna Fud-perioden och de forsknings- och utvecklingsinsatser som identifierats för att genomföra de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet samt för att avveckla kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar.
- **Kapitel 5 – Arbetssätt, kompetens och resurser** redovisar behov för att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt genomföra den forskning och utveckling som behövs för att uppföra och ta i drift de nya anläggningarna.

2 Beskrivning av avfallssystemet

Avfallssystemet för omhändertagande av allt kärnavfall och använt kärnbränsle från reaktorinnehavarna består av två huvuddelar, systemet för låg- och medelaktivt avfall och systemet för det använda kärnbränslet (KBS-3-systemet), samt ett gemensamt transportsystem. I figur 2-1 redovisas nuvarande och tillkommande anläggningar inom systemen samt transportflöden.

I detta kapitel redovisas nuvarande situation för systemen och utformning av de färdigställda systemen. Omhändertagandet av kärnavfallet och det använda kärnbränslet beskrivs översiktligt i kapitel 3 där också planerna för genomförandet av systemens färdigställande redovisas.

Systemet för låg- och medelaktivt avfall omfattar anläggningar för hantering, mellanlagring och slutförvaring. För närvarande finns SFR liksom anläggningar för behandling och mellanlagring samt markförvar i anslutning till de kärntekniska anläggningarna. För att slutligt omhänderta allt kärnavfall som uppkommer vid drift och avveckling av kärnkraftsreaktorerna och andra kärntekniska anläggningar kommer befintliga anläggningar att byggas ut och nya anläggningar att tillkomma.

KBS-3-systemet omfattar anläggningar för omhändertagande av det använda kärnbränslet. För närvarande finns mellanlagret Clab. Anläggningar som tillkommer inom systemet är Clink, som utgörs av nuvarande Clab med en tillkommande anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet och SFK för slutförvaring av det använda kärnbränslet.

Transportsystemet omfattar idag hamnar, ett fartyg, transportbehållare och terminalfordon för kortare landtransporter. Det kommer att kompletteras för de transporter som blir aktuella för de tillkommande anläggningarna.

De tre systemen är, när de färdigställts, utformade för omhändertagande av allt använt kärnbränsle och kärnavfall från reaktorinnehavarna och SKB:s kärntekniska anläggningar. Vid förändrade förutsättningar, av till exempel kärnkraftsreaktorernas drifttider eller prognos avseende aktivitetsinventarier, kommer detta att hanteras i enlighet med redovisning i avsnitt 3.7.

2.1 Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall

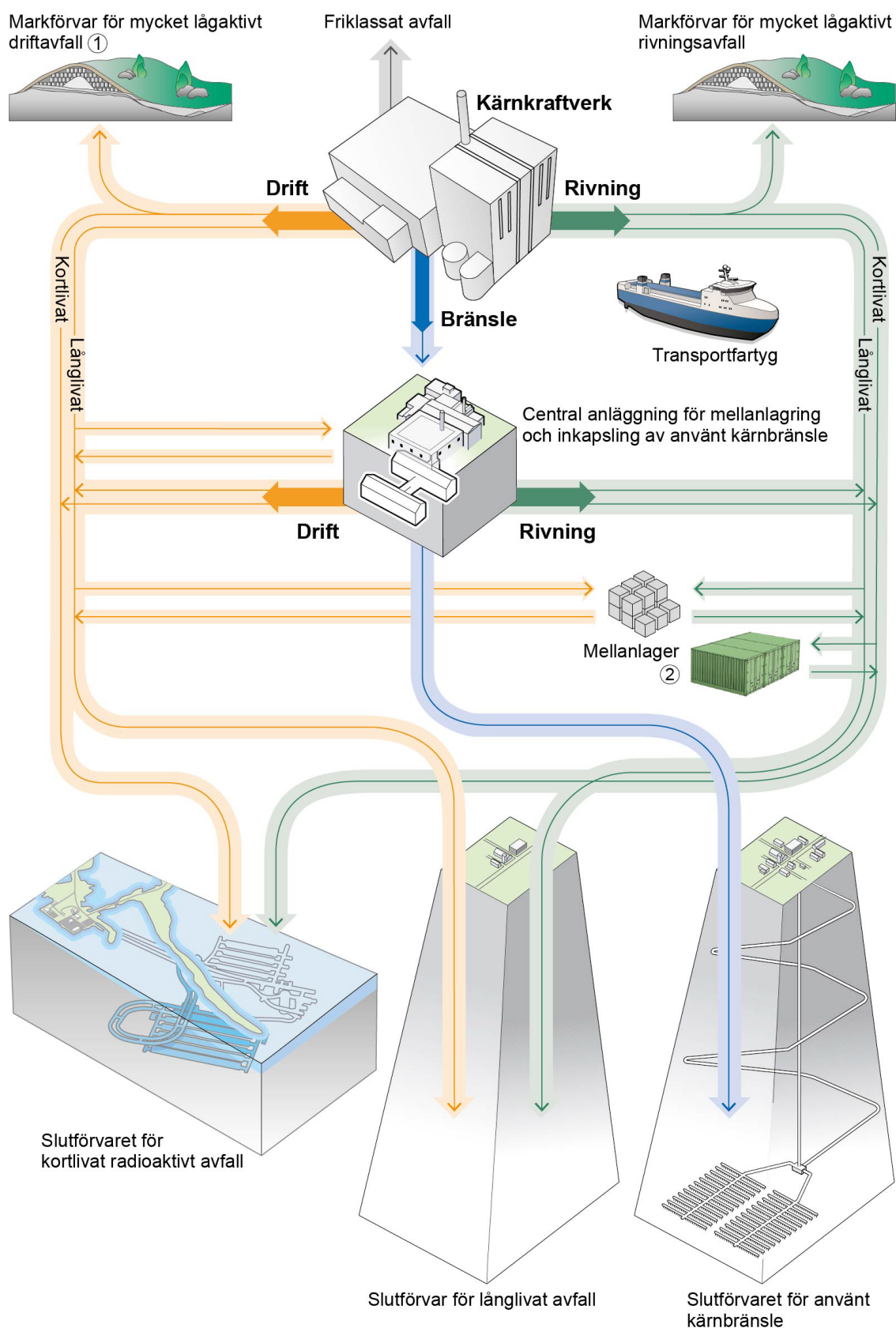
Systemet för låg- och medelaktivt avfall består av anläggningar för hantering, behandling, mellanlagring och deponering. Anläggningarna och hantering och behandling av avfallet anpassas till olika kategorier av avfallet, se avsnitt 1.1.4. Inom systemet finns både anläggningar som drivs av SKB och anläggningar som drivs av reaktorinnehavare. Därutöver finns anläggningar på Studsviksområdet, vid vilka avfall från kärnkraftverken och Clab vid behov hanteras eller mellanlagras. De nuvarande anläggningarna kommer att byggas ut och kompletteras med nya för att omhänderta och slutförvara allt det kärnavfall som uppkommer vid drift och avveckling av de svenska kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar.

2.1.1 Anläggningar för kortlivat avfall

Var kortlivat avfall slutförvaras beror på dess egenskaper. Avfall som innehåller begränsad mängd radionuklider med kort halveringstid och har låg ytdosrat kan deponeras i markförvar. Övrigt kortlivat avfall slutförvaras i SFR.

Behandling av avfall

Vid kärnkraftverken, på Studsviksområdet och i Clab finns behandlingsanläggningar för kortlivat avfall. Här behandlas avfallet så att det uppfyller de krav som ställs för friklassning eller för deponering i SFR alternativt i markförvar. Syftet med behandlingen kan vara att reducera volymen, koncentrera aktiviteten, solidifiera eller konditionera materialet. Vidare placeras det i behållare som uppfyller de krav som ställs för respektive avfallstyp.



① Markförvar finns vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals.

② Mellanlager vid kärnkraftverken eller annan plats. Mellanlagring av långlivat avfall sker idag vid kärnkraftverken, i Clab och på Studsviksområdet.

Figur 2-1. Systemet för omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Pilarna representerar transportflöden till befintliga eller planerade anläggningar.

Mellanlager

Vid kärnkraftverken finns anläggningar för mellanlagring av kortlivat och långlivat avfall. Där mellanlagras avfall i väntan på att behandlas och eller förpackas liksom färdiga avfallskollin.

Avvecklingen av sju reaktorer, inklusive Ågesta, inleddes innan utbyggnaden av SFR genomförts. Detta innebär att avfallet från avvecklingen behöver mellanlagras vid kärnkraftverken eller på annan plats.

Markförvar

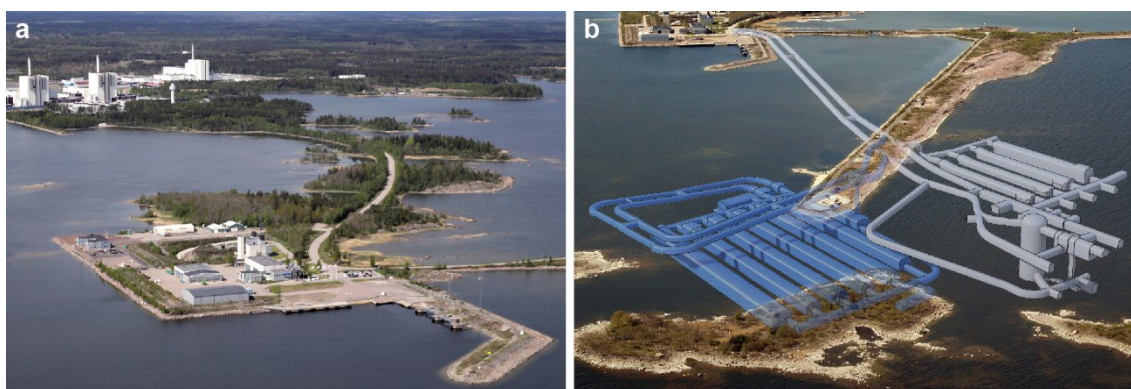
Delar av det lågaktiva avfallet har mycket låg aktivitet. Avfall med en ytdosrat under 0,5 mSv/h och som till övervägande del innehåller kortlivade radionuklider, med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år, får deponeras i markförvar. Markförvar finns på industriområdena vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Enligt nuvarande praxis krävs att markförvaren övervakas i cirka 30 år efter att det sista avfallet deponerats. Markförvaret i anslutning till Oskarshamns kärnkraftverk har kompletterats med ett nytt för att ha kapacitet och tillstånd för deponering av avfallet från avveckling av Oskarshamn 1 (O1) och Oskarshamn 2 (O2) och även för återstående driftavfall från O3. Utökningen innebär att avfall från avveckling av Barsebäck 1 (B1) och Barsebäck 2 (B2) också kan tas emot.

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SFR i Forsmark har varit i drift sedan 1988. SFR består av en ovanmarksdel och en undermarksdel med två tillfartstunnlar som anslutning mellan delarna, se figur 2-2. Slutförvaringen av det radioaktiva avfallet sker i bergssalar i undermarksdelen, 60–140 meter under havsbotten. Säkerheten efter förslutning för SFR baseras på att mängden långlivade radionuklider begränsas i förvaret och att de tekniska och naturliga barriärerna fördröjer spridningen av radionuklider. Utformningen av varje bergssal är anpassad utifrån aktivitetsnivån och materialen i det avfall som deponeras där. Vid årsskiftet 2024/2025 hade cirka 42 000 kubikmeter avfall deponerats i SFR.

För att ge utrymme att slutförvara avfall från återstående drift och avveckling av de svenska kärnkraftverken har SKB fått tillstånd att bygga ut SFR, se avsnitt 1.2.2. Utbyggnaden av undermarksdelen sker på 120–140 meter djup under havets botten, se figur 2-2. Totalt kommer det att finnas tio bergssalar och en silo som utformas med barriärer som anpassas till olika typer av avfall.

Efter utbyggnaden blir kapaciteten för slutförvaring cirka 180 000 kubikmeter.



Figur 2-2. Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR. a) Vy över ovanmarksdelen b) nuläge och planerad utbyggnad av undermarksdelen. Befintligt SFR är illustrerat med grått och den utbyggda delen med blått.

2.1.2 Anläggningar för långlivat avfall

Behandling av avfall

Vid kärnkraftverken finns idag möjlighet att segmentera vissa förbrukade hårdkomponenter för att därefter placera dessa i behållare för mellanlagring. Detta har tidigare genomförts i samband med uppgraderingar av reaktorerna, men genomförs för närvarande främst som en del av avvecklingsprojekten.

Mellanlager

Det långlivade avfallet mellanlagras fram till dess att ett slutförvar för långlivat avfall har tagits i drift. För närvarande mellanlagras det i anslutning till kärnkraftverken, i Clab och på Studsviksområdet. Clab är främst avsett för mellanlagring av använt kärnbränsle, men i bassängerna mellanlagras även visst långlivat driftavfall (styrstavar från BWR och andra hårdkomponenter). Det långlivade avfall som uppkommer från avveckling av reaktorer mellanlagras vid kärnkraftverket där avfallet uppkommer eller på annan plats.

FKA har ett mellanlager i en byggnad på kärnkraftverksområdet, för både kort- och långlivat avfall som uppkommit i samband med revisioner och effekthöjningar. OKG har ett mellanlager i ett särskilt berggrum på Simpevarps halvön (BFA) där långlivat avfall mellanlagras. Drifttillståndet innehas av OKG, men BFA är godkänt för mellanlagring av hårdkomponenter från alla svenska kärnkraftverk. För närvarande lagras avfall från Oskarshamns kärnkraftverk och Clab i BFA, som bedöms ha tillräcklig kapacitet även för det långlivade avfall som uppkommer vid avveckling av O1 och O2. RAB har ett mellanlager i en byggnad som bedöms ha tillräcklig kapacitet för det långlivade avfall som uppkommer vid avveckling av Ringhals 1 (R1) och Ringhals 2 (R2). För övriga reaktorer i Forsmark Oskarshamn och Ringhals är bedömningen att det går att skapa tillräcklig mellanlagringskapacitet lokalt vid kärnkraftverken.

BKAB har ett mellanlager i en byggnad på kraftverksområdet, där långlivat avfall från B1 och B2 lagras. Avfallet består av segmenterade interndelar som placerats i stältankar. Enligt nuvarande plan kommer stältankarna att transporteras till ett annat mellanlager så att BKAB:s område kan friklassas innan ett slutförvar för långlivat avfall tas i drift.

På Studsviksområdet har AB Svafo ett mellanlager där långlivat avfall från några av reaktorinnehavarna mellanlagras.

Slutförvar för långlivat avfall

SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet på ett relativt stort djup för att undvika intrång i förvaret och frysning av de tekniska barriärerna till följd av permafrost. Ett slutförvar för långlivat avfall kommer att vara den slutförvarsanläggning i avfallssystemet som tas i drift sist. Enligt nuvarande planer kommer uppförandet inledas i mitten av 2040-talet och anläggningen driftsätts knappt tio år därefter för att sedan vara i drift i tio år. Platsen för förvaret är ännu inte beslutad. Förvarsvolymen kommer att vara liten i jämförelse med SKB:s övriga slutförvar.

Utvecklingen av slutförvaret är i ett tidigt skede. Säkerheten efter förslutning planeras baseras på fördröjning av radionuklider i tekniska och naturliga barriärer.

2.2 Anläggningar inom KBS-3-systemet för använt kärnbränsle

KBS-3-systemet omfattar de anläggningar som krävs för genomförande av KBS-3-metoden. Det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken mellanlagras i Clab i Oskarshamns kommun. I anslutning till Clab kommer en ny anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet att uppföras. Inkapslingsdelen kommer att drivas integrerat med mellanlagret och den integrerade anläggningen benämns Clink. I Clink placeras det använda kärnbränslet i kopparkapslar som försluts. De förslutna kapslarna kommer att transporteras med fartyg i kapseltransportbehållare (KTB) till SFK i Forsmark i Östhammars kommun. SFK uppförs så att det använda kärnbränslet från det befintliga svenska kärnkraftsprogrammet kan slutförvaras. Kapslarna deponeras på cirka 500 meters djup i deponeringshål med en buffert av svällande bentonitlera. Efter att alla kapslar har deponerats återfylls tunnarna och slutförvaret försluts slutligt.

Centralt mellanlager för använt kärnbränsle

I Clab mellanlagras det använda kärnbränslet. Anläggningen, som varit i drift sedan 1985, består av en mottagningsdel på marknivå och en förvaringsdel i berget, drygt 30 meter under markytan. En bränslehiss förbinder mottagningsdelen med förvaringsdelen. Förvaringsdelen består av två berggrum som båda innehåller fyra förvaringsbassänger och en reservbassäng. Mottagningsdelen på marknivå innehåller bassänger och hanteringsutrustning för transportbehållare och använt kärnbränsle.

Mellanlagringen av det använda kärnbränslet sker med cirka åtta meters vattentäckning i kassetter, som placeras i fastställda positioner i förvaringsbassängerna. Det finns två typer av kassetter för

använt kärnbränsle, normalkassetter och kompaktkassetter. De två kassettyperna har samma yttre mått, men en kompaktkassett rymmer fler bränsleelement.

Regeringen har givit SKB tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB för att öka den maximalt tillåtna mängden kärnbränsle för mellanlagring i Clab från 8 000 ton till 11 000 ton, räknat som ursprunglig mängd uran. Det finns utrymme att ta emot den ökade mängden bränsle i befintlig anläggning. Vid årsskiftet 2024/2025 mellanlagrades cirka 8 000 ton använt kärnbränsle i Clab.

Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

Innan det använda kärnbränslet deponeras i SFK, kapslas det in i kopparkapslar. Detta kommer att genomföras i en ny anläggningsdel i anslutning till Clab. De två anläggningsdelarna kommer att drivas integrerat som en anläggning, Clink, se figur 2-3. Vid inkapsling förs kärnbränsle från sina positioner i mellanlagret till inkapslingsdelen där det torkas och placeras i kapseln. För varje kapsel väljs bränsle så att den totala resteffekten inte blir för stor. Kapseln försluts och kontroller av kapselns yta och dess förslutning genomförs. Kapseln med bränsle placeras i en KTB för transport till SFK.

Kapseln består av ett kopparhölje och en insats. Kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvaringsmiljön och insatsen ger skydd mot de mekaniska laster som kan uppkomma. Insatserna är anpassade för bränsle från BWR respektive PWR. Det finns även andra bränsletyper som ska slutförvaras. Dessa kommer att kunna placeras i någon av de två insatstyperna.



Figur 2-3. Clink med mottagningsdel, förvaringsdel i två bergrum för använt kärnbränsle samt inkapslingsdel.

Slutförvaret för använt kärnbränsle

SFK kommer att ligga i Forsmark i Östhammars kommun. Där kommer allt använt kärnbränsle från det befintliga svenska kärnkraftsprogrammet att slutförvaras.

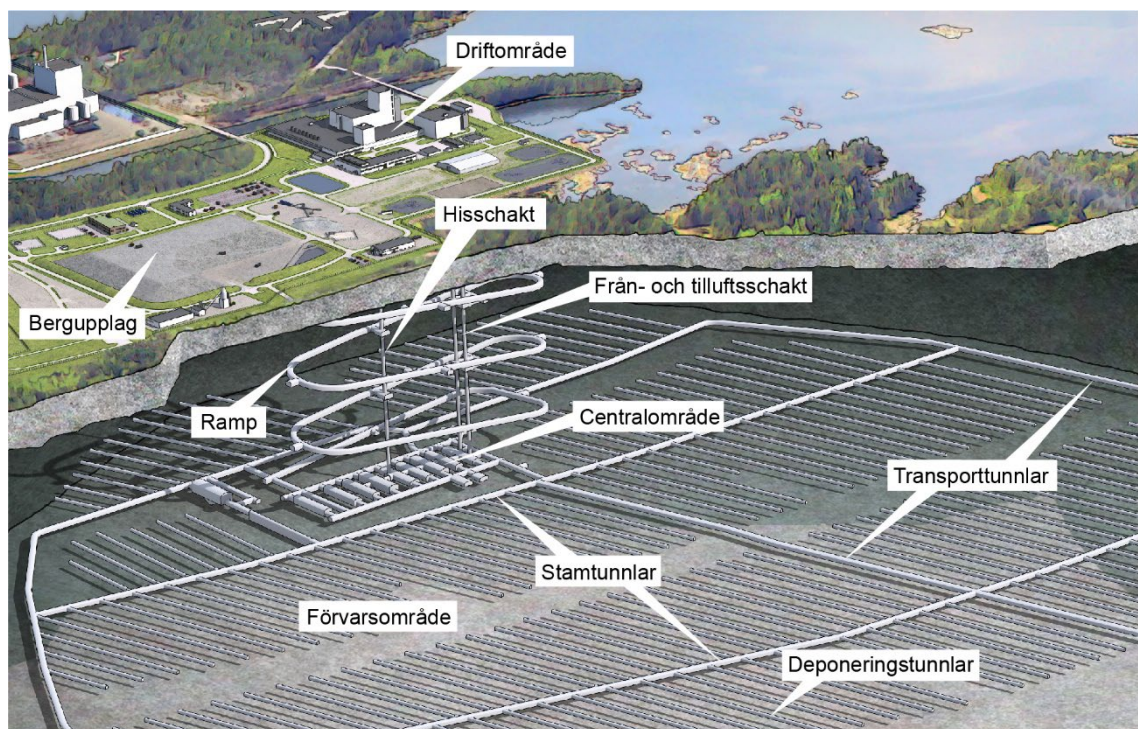
SKB har utvecklat och valt KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle. Metoden, vars utveckling påbörjades under slutet av 1970-talet, bygger på ett system av passiva samverkande skyddsbarriärer som tillsammans ska innesluta kärnbränslet och förhindra att radioaktiva ämnen sprids till människor och miljön i perspektivet 100 000 år. Metoden kan sammanfattas på följande sätt:

- Det använda kärnbränslet placeras i kopparkapslar med hög tålighet mot korrosion i förvaringsmiljön. De cirka fem meter långa kapslarna har en lastbärande insats.
- Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera – ett naturligt förekommande mineral som sväller i vatten. Bufferten skyddar kapseln vid mindre bergrörelser och skärmar av den från grundvattenflöden. Den begränsar att korroderande ämnen i grundvattnet når kapseln. Om kapslarna skulle skadas absorberar bufferten radioaktiva ämnen som kan frigöras.

- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på cirka 500 meters djup i urberg med långsiktigt stabila förhållanden.
- Om någon kapsel skulle skadas utgör kärnbränslet och de radioaktiva ämnas kemiska egenskaper, till exempel deras svårslöslighet i vatten, kraftiga begränsningar för transport av radioaktiva ämnen från förvaret till markytan.

Anläggningen kommer att bestå av en ovanmarksdel och en undermarksdel, se figur 2-4. Anläggningen ovan mark består av driftområde med en huvudbyggnad där den kärntekniska verksamheten äger rum och ett angränsande industriområde för bland annat hantering och lagring av bergmassor och vattenrening. Förbindelsen mellan undermarksdelen och ovanmarksdelen utgörs av en ramp för fordons-transporter och schakt för hiss och ventilation.

Undermarksdelen utgörs av ett centralområde och ett flertal deponeringsområden. Deponeringsområdena utgör tillsammans förvarsområde. Varje deponeringsområde består av ett antal deponeringstunnlar med deponeringshål borrarade i tunnelgolven. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom avståndet mellan deponeringshålen, bestäms utifrån bergets egenskaper. Viktiga egenskaper är bland annat läget av stora deformationszoner, förekomst av stora eller mycket vattenförande sprickor och bergets värmeledningsförmåga. Förvaret kommer att ligga 450–500 meter under marknivån.



Figur 2-4. Vy från söder som visar SFK:s ovanmarksdel och undermarksdel med centralområde, förvarsområde samt ramp och schakt som förbinder undermarksdelen med ovanmarksdelen.

Kapslarna förs med ett transportfordon via rampen ner till centralområdet. Därefter lastas de om till en deponeringsmaskin och transporteras antingen till en kapseldepå i avvaktan på deponering eller direkt till deponeringsområdet.

I deponeringsområdet placeras kapslarna i deponeringshål där de omges av bentonitlera. När samtliga kapslar i en deponeringstunnel har deponerats, fylls den igen med lera som kommer att svälla vid kontakt med vatten. Därefter försluts deponeringstunneln med en betongplugg. Anläggningen under mark kommer att uppföras successivt under driften vilket medför att bergbrytning, installation av buffert, deponering av kapslar, installation av återfyllnad samt pluggning av deponeringstunnlar kommer att pågå parallellt. När alla kapslar med använt kärnbränsle har deponerats fylls övriga utrymmen igen och anläggningarna ovan mark avvecklas.

2.3 Transportsystemet

Transportsystemet utgörs av ett fartyg, terminalfordon och olika typer av transportbehållare för kärnbränsle och kärnavfall, se figur 2-5.

Fartyget m/s Sigrid, som togs i drift 2014, används för transport av kärnavfall och använt kärnbränsle. Fartyget har dubbla bottenar och dubbel bordläggning. Konstruktionen skyddar lasten vid en eventuell grundstötning eller kollision. Normalt gör fartyget mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken, Studsviksområdet, SFR och Clab.

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall transporteras från kärnkraftverken och Clab till SFR. Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärming och transporteras i ISO-containrar. Medelaktivt avfall kräver strålskärming och merparten gjuts in i betong eller bitumen vid kärnkraftverken. Avfallet transporteras i avfallstransportbehållare (ATB) med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt avfallet är.

För närvarande transporteras en del av det långlivade avfallet, bland annat styrtstavar från BWR, från kärnkraftverken till Clab. Det transporteras i en transportbehållare med cirka 30 centimeter tjocka väggar av stål för att avskärma innehållets gammastrålning. Även det använda kärnbränslet transporteras från kärnkraftverken till Clab i liknande behållare med cirka 30 centimeter tjocka stål väggar. Eftersom bränslet även avger neutronstrålning och värme är dessa behållare utrustade med ett lager plast för neutronskaermmning och kylflänsar för kylning.



Figur 2-5. SKB:s transportsystem utgörs idag av ett fartyg, terminalfordon samt avfallstransportbehållare för kortlivat kärnavfall, behållare för hårdkomponenter och använt kärnbränsle.

Arbete pågår med att renovera och uppgradera ATB:er för att ge möjlighet att transportera fler typer av kärnavfall. Vidare tas det fram transportbehållare för bland annat större hårdkomponenter i ståltank.

För transport av använt kärnbränsle tas en ny typ av transportbehållare fram för att uppfylla nya säkerhetskrav. Utformning av den nya typen skiljer sig från nuvarande transportbehållare. Därför görs en anpassning på kärnkraftverken och Clab för hanteringen av denna. Levereras och provning av dessa inleds under 2025.

I framtiden kommer det även att gå transporter av inkapslat kärnbränsle från Clink till SFK. Transportsystemet kommer därför att kompletteras med KTB:er och förberedande arbete pågår för att utforma, licensiera och tillverka dessa.

2.4 Kärnämneskontroll

Kärnämneskontroll (Safeguards) syftar till att säkerställa att kärnämnen och kärntekniska anläggningar inte används för framställning av exempelvis kärnvapen. I och med att Sverige anslutit sig till icke-spridningsfördraget ska alla kärntekniska anläggningar uppfylla de krav som ställs på kärnämneskontroll. Det innebär bland annat att det ska finnas administrativa system för bokföring och redovisning av kärnämnesinventariet i anläggningarna samt tekniska system för kontroll och bevakning av att kärnämne inte avleds. All hantering och bearbetning av kärnämne ska redovisas och det ska inte finnas någon möjlighet att bedriva otillåten verksamhet i anläggningarna.

Aspekterna på kärnämneskontroll beaktas redan under konstruktionsskedet för SKB:s nya kärntekniska anläggningar så att tillsyn och kontroll underlättas under driftskedet. Arbetet syftar till att berörda intressenter ska vara medvetna om de krav som finns för kärnämneskontroll så att aktiviteter, konstruktion och anläggningsuppförande planeras effektivt. En viktig del av kontrollen av slutförvaren är, att kunna verifiera att en anläggning har byggts i enlighet med redovisade ritningar. Detta behövs för att kontrollorganen ska kunna förvissa sig om att det inte finns utrymmen eller vägar ut från anläggningen som inte har redovisats.

När KBS-3-systemet i sin helhet tas i drift kommer samtliga ingående anläggningar och transportsystemet att omfattas av ett sammanhållet system för kärnämneskontroll för att säkerställa att inget kärnämne avleds. Kontroller kommer att behövas för att verifiera det kärnämne som ska slutförvaras, för att säkerställa att det kapslas in och att det slutligen placeras i slutförvar.

Myndigheterna och kontrollorganen har satt upp regelverk för kärnämneskontrollen, men dessa regelverk är inte fullt utvecklade för inkapslingsanläggningar eller geologiska slutförvar. SKB deltar sedan flera år i internationella samarbeten med bland andra IAEA, EU-kommissionen och SSM för att bidra till utvecklingen av principer och metoder för kärnämneskontroll i dessa nya typer av anläggningar. SKB har tagit fram två utkast till grundläggande tekniska anläggningsbeskrivningar för SFK respektive Clink som ligger till grund för IAEA:s och EU-kommissionens arbete med kontrollåtgärder. Dokumenten uppdateras efterhand som anläggningarna optimeras och efter dialog med och synpunkter från IAEA och EU-kommissionen.

För att kontrollåtgärder ska kunna sättas in där det är lämpligast, pågår ett arbete tillsammans med kontrollorganen om så kallade Equipment Infrastructure Requirements (EIR). Där framför SKB till IAEA:s kontrollorgan förutsättningar och lämplighet ur ett drift- och säkerhetsperspektiv. Det är viktigt att den tekniska utformningen i anläggningarna och transportsystemet görs parallellt med utvecklingen av principer och metoder för kärnämneskontroll, så att anläggning och transportsystem anpassas för en tillförlitlig och effektiv kärnämneskontroll under driftskedet. Efter förslutning av slutförvaren kan kontrollåtgärderna komma att omfatta hantering på markytan.

3 Plan för genomförande

I detta kapitel redovisas planeringen för att uppföra och ta i drift nya och utbyggda anläggningar. Reaktorinnehavarnas och SKB:s handlingsplaner avseende avveckling av kärntekniska anläggningar beskrivs också. Kapitlet inleds med en övergripande redovisning av planerna för genomförandet av kärnavfallsprogrammet. Det avslutas med handlingsalternativ och åtgärder för att hantera eventuella större förändringar av planeringsförutsättningarna.

SKB redovisar i Fud-programmet den genomförandeplan som ligger till grund för långsiktig verksamhetsplanering och för operativa femårsplaner som årligen uppdateras. Planeringen omfattar samtliga anläggningar ända tills de avvecklas. Verksamheten anpassas och planer uppdateras till följd av händelser i omvärlden, så som beslut från reaktorägarna eller myndigheter.

SKB har erhållit viktiga beslut i flera ärenden under den gångna Fud-perioden, se avsnitt 1.2.2. Förutom de grundläggande regeringsbesluten har MMD meddelat villkor enligt MB för både utbyggnaden av SFR och KBS-3-systemet. Vidare har SSM godkänt PSAR SFR och uppförandet av utbyggnaden pågår. SKB har i januari 2025 ansökt om SSM:s godkännande av PSAR SFR och prövningen av ansökan pågår. Vissa inledande arbeten för SFR har kunnat inledas ovan mark på Forsmarksområdet eftersom MMD:s dom beviljar SKB verkställighetsförordnande.

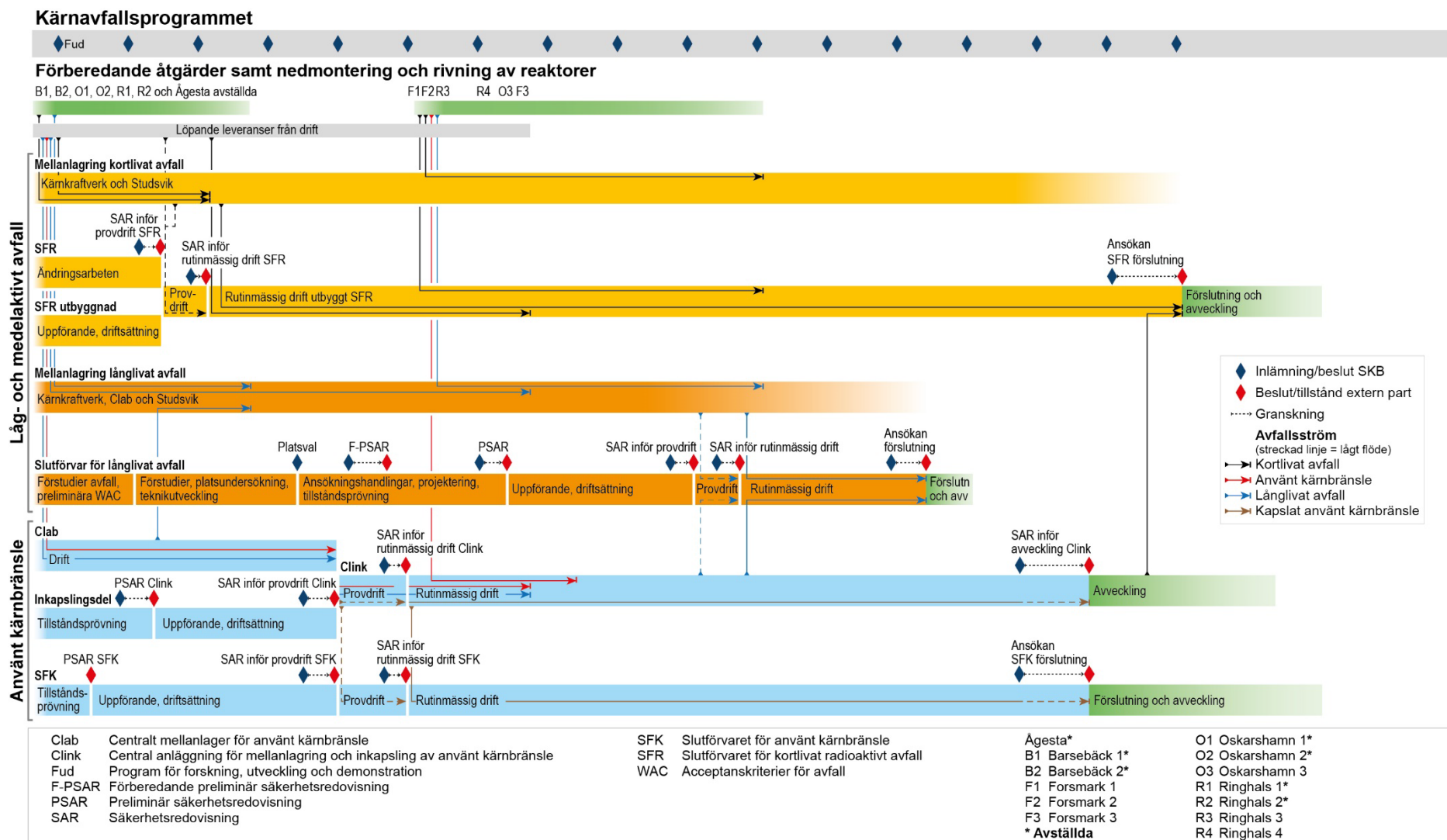
Det återstår att utveckla lösningar för slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall och under den gångna Fud-perioden har arbetet främst fokuserat på inventariet men även på preliminära acceptanskriterier. När nödvändiga data finns tillgängliga om inventariet kommer de att utgöra grunden för utformningen av slutförvar och analys av säkerheten efter förslutning. Förutom fortsatt arbete med inventariet är den tidigare genomförda säkerhetsvärderingen (SKB TR-19-01) en utgångspunkt för fortsatta insatser inom forskning och teknikutveckling. Resultaten kommer att ge förutsättningar för att kunna ansöka om tillstånd och tillåtlighet för slutförvaringen.

3.1 Genomförandeplan för kärnavfallsprogrammet

SKB:s planering för utbyggnad och uppförande av nya anläggningar utgår från de olika tillstånd och medgivanden som erfordras enligt den stegvisa process, där stegen utgör milstolpar, se avsnitt 1.1.5.

Driftperioden för slutförvarsanläggningarna och Clink inleds med provdrift, som innebär att radioaktivt avfall hanteras och deponeras men bland annat i lägre takt än vid den efterföljande rutinmässiga driften. SFR:s undermarksdel byggs successivt ut under den rutinmässiga driften. Avveckling av anläggningarna och slutlig förslutning av slutförvaren sker därefter under avvecklingsfasen. Samtliga faser kräver att SSM har prövat och godkänt uppdaterade säkerhetsredovisningar. För slutlig förslutning erfordras även ett regeringstillstånd.

Figur 3-1 visar den övergripande aktivitets- och milstolpeplanen för kärnavfallsprogrammet. I figuren visas också avfallsströmmar och deras utsträckning i tiden.



Figur 3-1. Aktivitets- och milstolpeplan för SKB:s kärnavfallsprogram och planer för avveckling av reaktorer. I figuren redovisas också avfallsströmmar och deras utsträckning i tiden.

3.2 Planeringen för låg- och medelaktivt avfall

De slutförvar som SKB planerar för låg- och medelaktivt avfall omfattar den påbörjade utbyggnaden av SFR samt ännu ej tillståndsgiven verksamhet för slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Anläggningarna beskrivs i kapitel 2 och de verksamheter som planeras för kortlivat respektive långlivat låg- och medelaktivt avfall sammanfattas i avsnitt 3.2.1 respektive 3.2.2.

3.2.1 Kortlivat avfall

Mellanlagring av kortlivat avfall

Arbetet med att nedmontera och riva de sju första reaktorerna har startat och för vissa redan avslutats innan det utbyggda SFR kan ta emot rivningsavfall. BKAB, OKG, RAB och Vattenfall kommer därför att mellanlagra det kortlivade rivningsavfallet huvudsakligen på kraftverksområdena, men även andra platser kan bli aktuella.

Det kommer även att finnas behov av att mellanlagra driftavfall, under perioden då utbyggnaden av SFR pågår eftersom det då råder deponeringsstopp i anläggningen.

Uppförande och driftsättning av utbyggt SFR

SKB inledde utbyggnaden av SFR i december 2024 när alla nödvändiga tillstånd, villkor och godkännanden från regeringen, MMD och SSM hade erhållits. Utbyggnaden planeras vara slutförd och den sammanslagna anläggningen klar för provdrift i början av 2030-talet.

Samtidigt som SFR byggs ut kommer en uppgradering av den befintliga anläggningen att göras, bland annat därför att drifttiden har förlängts i förhållande till den ursprungligt planerade. SKB planerar att lämna in en förnyad SAR inför provdrift i slutet av 2020-talet. Därefter kommer SKB att lämna in en kompletterad SAR inför rutinmässig drift.

3.2.2 Långlivat avfall

Mellanlagring av långlivat avfall

SKB planerar för att kunna inleda slutförvaring av långlivat avfall under 2050-talet. Eftersom reaktorer kommer att avvecklas dessförinnan mellanlagras långlivat avfall som uppstår vid avvecklingen.

Mellanlagren för långlivat avfall nyttjas tills det finns möjlighet att transportera avfallet till slutförvaring. För att genomföra transporterna av avfallsbehållare till en slutförvarsanläggning kommer det att behövas en ny typ av licensierad ATB.

Behandling av långlivat avfall

Radioaktivt avfall som är avsett för ett slutförvar som inte har tagits i drift, får inte behandlas på ett sätt som förhindrar ytterligare karakterisering eller ny eller ändrad behandling. Det kan dock bli aktuellt med viss konditionering av det långlivade avfallet innan det kan slutförvaras. Innan slutlig konditionering kan genomföras, behöver acceptanskriterier fastställas för avfallet. Utvecklingen av preliminära acceptanskriterier fortsätter under Fud-perioden.

Slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall

För att slutförvara långlivat avfall behöver flera viktiga milstolpar passeras, såsom platsundersökningar och val av plats, analys av säkerheten efter förslutning, genomförd tillståndsprocess och slutligen uppförande. Planeringen bygger på ett scenario där slutförvaring sker på en av de platser som SKB har kännedom om sedan tidigare. Enligt planeringen kommer deponering av avfallet att kunna inledas under 2050-talet och pågå under cirka tio år. Skulle mer omfattande platsundersökningar krävas bedömer SKB att tidpunkten för driftsättning av slutförvaringen kommer att skjutas framåt i tiden. Ett sådant scenario berörs i avsnitt 3.7.3.

Utvärdering av säkerheten efter förslutning

I anslutning till Fud-program 2019 redovisade SKB en säkerhetsvärdering (SKB TR-19-01) för ett konceptuellt slutförvar för långlivat avfall. Ett av syftena vara att identifiera vilka avfallskategorier som bidrar mest till de beräknade långsiktiga strålsäkerhetskONSEKVENSerna, vilket ger underlag till arbetet med att utveckla acceptanskriterier. De känslighetsfall som analyserades för olika barriär-lösningar utgör också underlag till fortsatt arbete med att utveckla de tekniska barriärerna.

Säkerhetsvärderingen utgör en grund för att identifiera områden för fortsatt forskning och utveckling inför kommande fullständiga säkerhetsanalyser. Dessutom ger den underlag till den kommande lokaliseringsprocessen.

Inventarium och acceptanskriterier

Inför kommande säkerhetsanalyser behövs bättre information om avfallets egenskaper. Avfallet behöver karakteriseras (radiologiska, fysikaliska, kemiska, biologiska och mekaniska egenskaper) med det övergripande målet att få ett bättre specificerat inventarium. Karakteriseringen är nödvändig för att ta fram acceptanskriterier och anpassa behandlingsmetoder samt för utvecklingen av behållare och anläggningsutformning.

Arbetet, som genomförs av SKB och avfallsproducenterna i samarbete, syftar även till att ge underlag och vägledning för avfallsproducenternas fortsatta hantering av avfallet.

Lokalisering

SKB har sedan tidigare lagt fast grundläggande förutsättningar för platserna för slutförvar för radioaktivt avfall:

- Säkerheten under drift och efter förslutning samt påverkan på miljön måste uppfylla kraven i KTL och MB.
- Det lokala politiska och opinionsmässiga stödet behöver vara brett och stabilt.

SKB planerar att driva en stegvis lokaliseringsprocess för slutförvaring av långlivat avfall. Målsättningen är att driva en öppen och transparent process i samråd med SSM, berörda kommuner och andra intressenter, där förutsättningarna för olika aktörer tidigt är klarlagda och där processens olika steg är förankrade och kommunicerade.

Den kunskap om Sveriges geologi som SKB förvärvat genom tidigare lokaliseringsprocesser utgör grund för arbetet. Underlaget utgörs av alla områden i Sverige med data som behövs för värdering av säkerhet på 400–700 meters djup, exempelvis Forsmark, Simpevarp/Laxemar/Äspö och samtliga så kallade typområden från lokaliseringsprocessen för SFK. En systematik baserad på en indelning i lokaliseringsfaktorer har tidigare utarbetats och använts av SKB för SFK. Erfarenheterna från detta kommer att appliceras på den kommande lokaliseringsprocessen. Bland annat kommer samma huvudgrupper av faktorer vid värdering och jämförelser av lokaliseringsalternativ att användas:

- Säkerhet efter förslutning.
- Teknik för genomförande.
- Miljö och hälsa.
- Samhällsaspekter.

Ansökningar, uppförande, drift och förslutning

Efter att SKB lämnat tillståndsansökningar enligt KTL och MB för slutförvaring av långlivat avfall fortsätter arbetet med bland annat systemprojektering och detaljprojektering. Uppförande och provdrift följs av rutinmässig drift. Förslutning av slutförvaret sker då allt mellanlagrat långlivat avfall samt det långlivade avfallet från avvecklingen av kärnkraftverken har deponerats. Innan förslutningen görs behöver SKB säkerställa att det avfall som kommer från avvecklingen av Clink är lämpligt för SFR och således inte behöver slutförvaras tillsammans med det långlivade avfallet.

3.3 Planeringen för använt kärnbränsle

Den enda anläggningen som är i drift i KBS-3-systemet är Clab. De anläggningar som återstår att uppföra är en inkapslingsdel i anslutning till Clab (drivs integrerat med Clab och benämns då Clink) samt SFK, där det använda kärnbränslet ska slutförvaras. Etableringen av KBS-3-systemets anläggningar delas in i huvudskedena tillståndsprövning, uppförande och driftsättning, provdrift, drift samt avveckling och förslutning. Anläggningarna beskrivs i kapitel 2 och planerade verksamheter sammanfattas för respektive anläggning i avsnitt 3.3.1 till 3.3.3.

Som redovisats ovan har väsentliga beslut för genomförandet av KBS-3-systemet erhållits under den gångna Fud-perioden. De närmaste återstående milstolparna är att få SSM:s godkännande av PSAR SFK (ansökan inlämnad i januari 2025) och att sammanställa och ansöka om godkännande av PSAR Clink.

Huvudsakliga avnämare av den forskning och teknikutveckling som genomförs är Clink respektive SFK, arbetet med säkerhetsredovisningar samt produktionen av de tekniska barriärerna.

3.3.1 Mellanlagring

Enligt gällande planer kommer provdrift av SFK och Clink att inledas under andra halvan av 2030-talet och utlastning av mellanlagrat använt kärnbränsle kan inledas. För att i Clab kunna ta emot använt kärnbränsle fram till dess krävs åtgärder för att frigöra förvaringsutrymme. Detta kommer att göras genom att lasta om det använda kärnbränslet som lagras i normalkassetter till kompaktkassetter. Kompaktkassetterna har samma dimensioner som normalkassetterna, men rymmer fler bränselement. En ytterligare åtgärd som behövs är urlastning av hårdkomponenter för mellanlagring på annan plats.

3.3.2 Inkapsling

Tillståndsprövning och projektering

Konstruktionsarbete pågår för inkapslingsdelen av Clink och resultaten kommer att ligga till grund för fortsatt arbete under uppförandeskedet. Det pågår arbete med att ta fram handlingar som ska utgöra underlag för ansökan till SSM om godkännande av PSAR Clink.

I projekteringen av Clink ingår planering och genomförande av förberedande markarbeten samt anpassning av den lokala infrastrukturen.

Uppförande

Uppförandet av inkapslingsdelen påbörjas efter att SSM har godkänt PSAR Clink. Uppförandet innebär, förutom själva byggnationen av inkapslingsdelen, även verifiering och validering av installerade system samt nödvändig kvalificering av dugligheten i vissa produktions- och mätsystem för inkapsling. Den huvudsakliga säkerhetsfrågan under uppförande av inkapslingsdelen är, att säkerheten i Clab kan upprätthållas. Under uppförandeskedet kommer driftpersonalen att utbildas och styrande dokument tas fram inför provdrift.

Driften av Clab fortgår under hela uppförandet av inkapslingsdelen, men mottagning av använt kärnbränsle kan under vissa tider behöva begränsas.

Driftsättning och drift

Driftsättningen av anläggningens delsystem sker successivt, i takt med att systemen installeras. Inför provdriften upprättas säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) och andra dokument med instruktioner och styrning av driften. Efter att anläggningens olika funktioner och organisation har testats och godkänts i ett inaktivt samfunktionsprov och SSM har godkänt en förnyad SAR kan provdriften inledas.

När provdriften utvärderats och SSM godkänt en ansökan om att få ta anläggningen i rutinmässig drift kan denna inledas. Driften av Clink omfattar både dagens verksamhet i Clab och inkapslingsdelens olika processer såsom val av använt kärnbränsle för inkapsling, kontroller och inkapsling av använt kärnbränsle samt kontroll av kapslar.

Produktionssystem för kapslar

Förnyade analyser och planering av produktionssystemet för kapslar kommer att genomföras under Fud-perioden för att fastställa omfattning och tidsplan för etablerandet av produktionssystemet.

Förutom optimering och design av kapselkomponenter, planeras teknikutveckling främst avseende processer för att styra och kontrollera kvaliteten vid tillverkning av kapselkomponenter, svetsning av kopparbotten, förslutning samt utveckling av kontroll och provning av komponenter och svetsar. Detta redovisas i avsnitt 4.5.

3.3.3 Slutförvaring

SKB har fått alla beslut som behövs för att påbörja markarbeten i Forsmark. Uppförandet av undermarksdelar för SFK förbereds så att de kan påbörjas så snart SSM godkänt PSAR. Uppförandeskedet medför nya förutsättningar för SKB:s organisation och verksamhet. Det gäller exempelvis styrning av projektet baserat på insamlad information från detaljundersökningsprogrammet och eventuellt tillkommande markundersökningar.

Tillståndsprovning och projektering

I projekteringen av SFK ingår byggtekniska förberedelser och geologiska undersökningar. Vidare genomförs markundersökningar för att få underlag för placering av byggnader och dimensionering av grundläggning. Berget kommer att undersökas, främst vid rampens planerade läge. Den lokala infrastrukturen i Forsmark förbereds vilket i stor utsträckning handlar om att i samarbete med FKA anpassa den befintliga infrastrukturen så att behoven för SFK och utbyggnaden av SFR tillgodoses.

Parallellt med tillståndsprovningarna har de anläggningsdelar som ska byggas tidigt detaljprojekterats. Det är framför allt etableringsytor, platskontor, tillfarter till förvaret – det vill säga ramp, schakt och centralområde – samt anläggningsdelar ovan mark.

Uppförande

Uppförandeskedet kan börja efter att PSAR har godkänts av SSM. Inledningsvis görs utfyllnader av delar av driftområdet, hanteringsytor iordningställs och byggprovisorier etableras.

Uppförandet av undermarksanläggningarna delas in i tre delar. I den första drivs tillfarter (schakt och ramp) ner till förvarsnivån. Den andra är när centralområdets bergutrymmen byggs och tekniska system installeras och den tredje när det första deponeringsområdet etableras och provdrift inleds.

Uppförandet av tillfarterna är tidskritiskt för hela projektets framdrift. Undersökningar vid uppförande av ramp och schakt kommer att ge viktig information för etablering av referensdjup. Bergspänningsmättningsdata och information om hydrogeologiska förhållanden från pilotborrhål från den nedre delen av rampen är av särskilt intresse för att fastställa förvarsdjupet. När förvarsnivån nåtts, inleds uppförandet av centralområdet. Drivningen av tillfarterna och centralområdet ger fördjupade kunskaper om bergförhållandena som kommer att omsättas i exempelvis insatser av bergförstärkning och tätning i tunnlar eller modifiering av förvarsutformningen. Bergarbetena för tillfarter och centralområde åtföljs av montagearbeten för den utrustning som behövs för driften. Anläggningarna ovan mark byggs i en takt som anpassas till arbetena under mark.

Ett deponeringsområde kommer att färdigställas i ett tidigt skede i syfte att dels användas för produktionslinjetester och samfunktionsprovning, dels samla de geovetenskapliga data som behövs för förnyad SAR.

Den teknikutveckling som behövs för att färdigställa systemet för deponering omfattar buffert, återfyllning, plugg samt metodik och maskiner för installationer, redovisas i avsnitt 4.7.

Driftsättning och drift

Liksom för Clink genomförs ett samfunktionsprov för slutförvarsanläggningen där alla moment i verksamheten genomförs, inklusive deponering av ett antal kapslar utan använt kärnbränsle, för att testa funktioner och organisation. Den deponeringen sker i det första deponeringsområdet som byggs under senare delen av uppförandeskedet. Därefter, när SSM har godkänt förnyad SAR, inleds provdriften med fyllda kapslar. Inför provdriften upprättas STF och andra dokument med instruktioner och styrning av driften. Innan en anläggning får tas i rutinmässig drift ska SAR kompletteras med beaktande av erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM.

Rutinmässig drift av SFK omfattar dels successivt uppförande och färdigställande av platsanpassade deponeringstunnlar med deponeringshåll, dels transport och deponering av kapslar samt installation av buffert, återfyllning och pluggning av deponeringstunnlar.

3.4 Planeringen för mycket lågaktivt avfall

Idag finns de anläggningar som behövs för hantering av det mycket lågaktiva avfall som genereras under drift, men vid avvecklingen av kärnkraftsreaktorer kommer volymerna avfall som ska hanteras att öka väsentligt.

Prognoserna för mycket lågaktivt rivningsavfall innehåller osäkerheter och en översyn av både uppskattade totalmängder och fördelning mellan olika avfallskategorier kommer att genomföras.

För att minska avfallsvolymerna pågår ett generellt kontinuerligt förbättringsarbete med bland annat av- och omemballering av inkommande gods, källsortering och zonindelning av arbetsområden under revisioner. Dessutom pekar internationella erfarenheter på att det initialt görs konservativa antaganden gällande aktivitetsnivåer, vilket resulterar i inledande bedömningar att relativt små mängder kan friklassas i samband med NoR. Vid genomförandet visar det sig sedan att aktivitetsnivåerna är lägre än de konservativa antagandena och därmed att större volymer material kan friklassas.

För att omhänderta de stora volymerna mycket lågaktivt avfall som genereras vid NoR av kärnkraftsreaktorerna ser reaktorinnehavarna ett behov av markförvar, se avsnitt 2.1.1.

3.5 Planeringen för avveckling av kärntekniska anläggningar

Planeringen för avveckling av kärnkraftverken i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals, samt för SKB:s kärntekniska anläggningar redovisas nedan. Ågestareaktorn har under den gångna Fud-perioden nedmonterats.

Reaktorinnehavarnas liksom SKB:s avvecklingsplaner redovisar det tänkta genomförandet med fokus på strålsäkerhet samt strategiska aspekter. Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen redovisas i avvecklingsplaner respektive i avfallsplaner. Redovisade avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori uppdateras löpande under NoR utifrån resultat från den radiologiska kartläggningen.

Syftet med avveckling av en kärnteknisk anläggning är att kunna friklassa den och erhålla en industritomt med så få begränsningar som rimligt och möjligt. Byggnader och infrastruktur som är av nytta för fortsatt verksamhet, och som är möjliga att friklassa, lämnas medan övriga installationer rivs. Den konventionella rivningen av byggnader sker till cirka en meter under mark och kvarvarande hålrum återfylls med rivningsmassor. Det översta marklagret återställs till den status som den fortsatta verksamheten på platsen kräver. För slutförvarsanläggningarnas undermarksdelar innebär avveckling att tunnlar återfylls och förvaren försluts. Ovanmarksdelarna avvecklas enligt samma principer som gäller för övriga kärntekniska anläggningar.

Avveckling av en reaktor genererar ett antal avfallsströmmar. Använt kärnbränsle transporteras till Clab eller senare till Clink och sedan vidare till SFK för slutförvaring, medan övrigt avfall sorteras. Det kortlivade avfallet, som inte kan friklassas, sorteras med avseende på aktivitetsinnehåll och deponeras i markförvar eller i SFR. Det långlivade avfallet planeras att deponeras i ett slutförvar för långlivat avfall. Reaktortankar och interndelar segmenteras varefter exempelvis reaktortanksegment från BWR-reaktorer deponeras i SFR medan de från PWR-reaktorer även deponeras i ett slutförvar för långlivat avfall.

Visst kärnavfall som uppkommer i samband med NoR är av samma typ som det som uppkommer under drift, med skillnaden att volymerna är betydligt större. Detta gör att kapaciteten för hantering av vissa avfallsströmmar måste öka väsentligt inför avvecklingen. Kapacitetsökningen kan uppnås på flera olika sätt, till exempel genom att anpassa befintliga byggnader eller lokaler som inte behövs efter avställningen för avfallshantering.

Reaktorinnehavarnas planering är att starta NoR så snart som möjligt efter permanent avstängning. Inför avveckling måste erforderliga tillstånd finnas. När en reaktor stängts av permanent påbörjas avställningsdrift och allt använt kärnbränsle transporteras bort från reaktorn för mellanlagring. Vid behov vidtar därefter servicedrift fram till dess att NoR påbörjas. Efter friklassning kan rivningen av byggnaderna genomföras och området återställas.

Under avställningsdriften planeras, förutom transporter av använt kärnbränsle, avställning av system och omhändertagande av driftavfall, även förberedande aktiviteter inför NoR. Förberedelserna, exempelvis dekontaminering av primärsystem, syftar till att göra efterföljande arbete så säkert och effektivt som möjligt genom att sänka dosraten inne i anläggningen. Tiden för NoR optimeras med utgångspunkten att avvecklingen påbörjas utan dröjsmål efter avställning. Arbetet med NoR delas upp i ett lämpligt antal avgränsade paket/etapper. Planeringen av arbetsmomentens genomförande och inbördes ordning kommer under hela avvecklingen att optimeras utifrån Alara- och BAT-principer för att minimera stråldoser och maximera effektivitet.

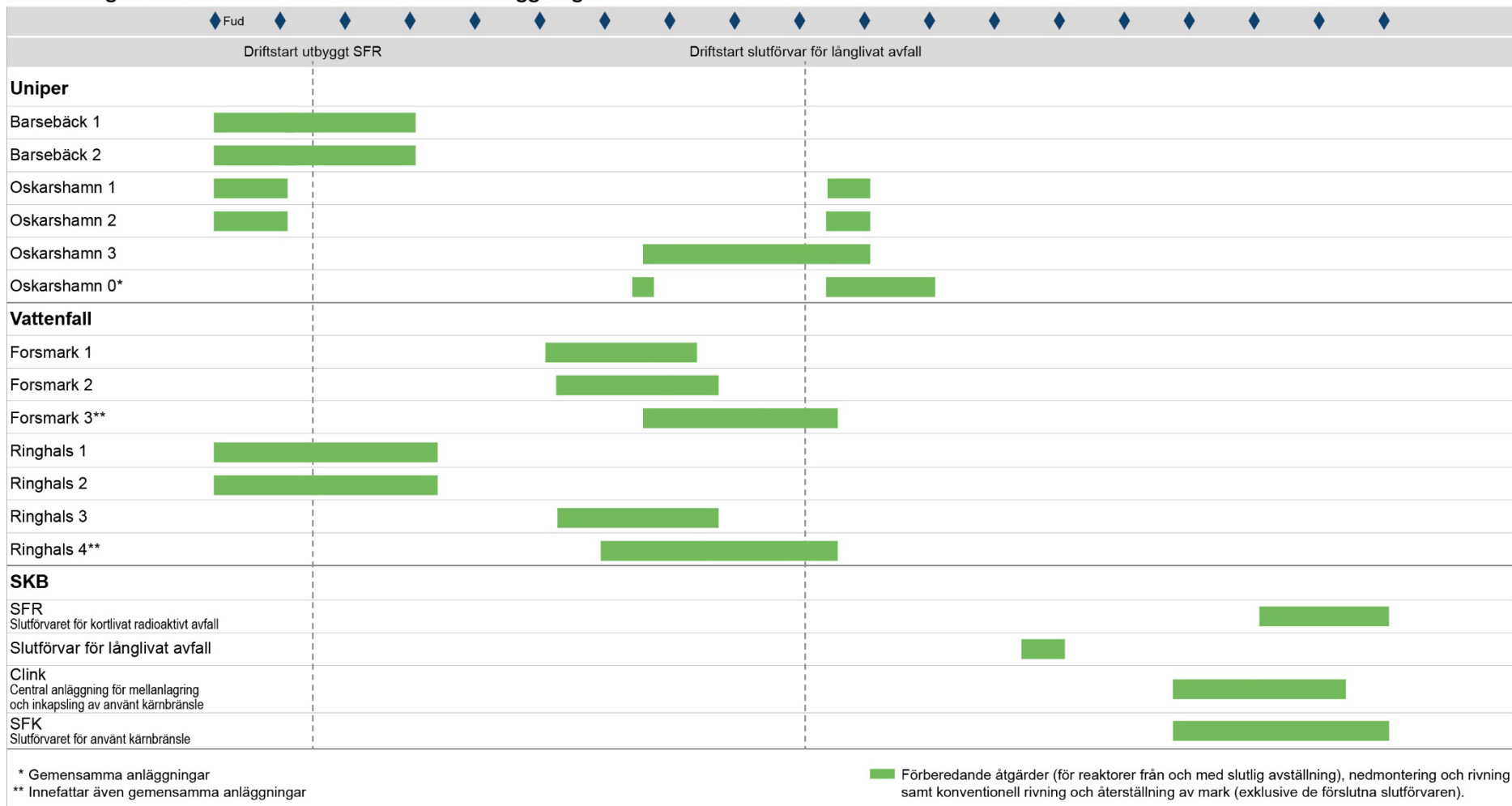
Uppskattningsvis utgör den konventionella avfallsströmmen cirka 95 procent av den totala avfallsmängden, där majoriteten utgörs av rivningsmassor från byggnader. För att minimera kraven på efterhantering dekontamineras byggnader inför rivning. Rivningsmassor krossas och återanvänds för anläggningsändamål efter behov. Icke-mineraliska avfallsfraktioner och överskottsmassor bortskaffas för återvinning eller deponering.

SKB har fått i uppdrag av reaktorinnehavarna att samordna de generella metoder och rutiner för transport och hantering av använt kärnbränsle och kärnavfall som behövs för avvecklingsarbetet. Exempel på detta har varit framtagande av gemensamma riktlinjer för friklassning (Berglund et al. 2016), metodik för inrapportering av prognostiserat rivningsavfall (Ahlford och Andgren 2024) samt branschgemensamma riktlinjer för redovisning av avvecklingsplaner, omarbetad NoR SAR och kontrollprogram för friklassning.

Reaktorinnehavarna och SKB samarbetar för att välja en säker hanteringslösning som uppfyller myndighetskrav och som i sin helhet är optimerad för hela avfallskedjan – från rivning genom karakterisering, paketering, mellanlagring och transport av avfallet för slutligt omhändertagande för olika typer av rivningsavfall.

Figur 3-2 visar den övergripande aktivitets- och milstolpeplanen för avveckling av kärntekniska och konventionella anläggningar.

Avveckling av kärntekniska och konventionella anläggningar



Figur 3-2. Aktivitets- och milstolpeplan för avveckling av kärntekniska och konventionella anläggningar.

3.5.1 Avveckling inom Uniper

Uniper är huvudägare till OKG och BKAB. 2017 beslutade Uniper att genomföra NoR av reaktorerna B1, B2, O1 och O2 i ett gemensamt program. Unipers dotterbolag Sydkraft Nuclear Services AB är sedan 2022 leverantör (Swedish Uniper Decommissioning and Dismantling, SUDD) för NoR av reaktorerna. SUDD:s detaljplanering av och upphandling för respektive delmoment bygger på att använda beprövad teknik och beprövade metoder för att minska tekniska och säkerhetsmässiga risker. BKAB och OKG är således beställarorganisationer mot SUDD.

Uniper kommer att utvärdera och bevara erfarenheter från det pågående avvecklingsprogrammet så att de kan nyttjas vid planering och genomförande av kommande avveckling av O0 (gemensamma anläggningar) och O3.

I figur 3-3 presenteras de övergripande planerna för avvecklingen av Unipers kärntekniska anläggningar i Sverige.

Avveckling av kärntekniska anläggningar inom Uniper



Figur 3-3. Principiell översikt av Barsebäck Kraft AB:s och OKG Aktiebolags planer för avveckling.

Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling

Barsebäckverket ägs och förvaltas av BKAB. Reaktorn B1 har varit permanent avställd sedan 1999 och reaktorn B2 sedan 2005. Förlägningsplatsen (fastigheten) ägs av Sydkraft Nuclear Power AB.

NoR påbörjades 2020. Byggnaderna på det så kallade kraftverksområdet planeras vara friklassningsbara för rivning 2028 och kommer efter erhållet beslut om friklassning att rivas enligt nuvarande plan. Kraftverksområdet återställs för friklassning i början av 2030-talet.

Efter det att mellanlagren för låg- och medelaktivt avfall på hamnområdet har tömts på kärnavfall kan dessa och området förberedas för friklassning.

Avfallshantering

BKAB har en etablerad lokal friklassning av material. Vid behov kan viss dekontaminering göras inför friklassning. Utöver det nyttjar BKAB friklassning av metall efter extern behandling.

BKAB kan deponera mycket lågaktivt avfall i OKG:s nya markförvar MLA3 eller, efter särskilt friklassningsbeslut, på deponin för farligt avfall utanför Kumla.

Då NoR av Barsebäcksverket genomförs innan utbyggt SFR är i drift har BKAB byggt ett nytt mellanlager för lågaktivt avfall. Det medelaktiva avfallet mellanlagras också inom hamnområdet i väntan på slutförvaring. För att kunna friklassa hamnområdet innan ett slutförvar för långlivat avfall är i drift undersöks extern mellanlagring.

OKG Aktiebolags planering för avveckling

OKG äger kärnkraftsreaktorerna O1, O2 och O3 vilka samtliga är av reaktortypen BWR samt de gemensamma anläggningarna O0. Förlägningsplatsen (fastigheten) ägs av OKG.

Reaktorn O1 har varit permanent avstängd sedan 2017 och reaktorn O2 sedan 2015. NoR av dessa två anläggningar påbörjades 2020. Byggnaderna inom det så kallade avvecklingsområdet, huvudsakligen O1 och O2 samt en gemensam avfallsbyggnad OAVF, planeras vara friklassningsbara 2028. Konventionell rivning är planerad att ske i samband med konventionell rivning av O3.

O3 planeras vara i drift till mitten av 2040-talet. Gemensamma anläggningar avvecklas när de inte längre behövs för O3:s drift eller avveckling. Avvecklingsplaneringen för O3 och O0 kommer att fortsätta under pågående drifttid enligt ordinarie rutiner, där erfarenheter från Unipers avvecklingsprogram tas tillvara.

Rivning av O3 och övriga byggnader på förlägningsplatsen planeras att påbörjas i mitten av 2050-talet. Området återställs därefter för friklassning.

Avfallshantering

OKG har en etablerad lokal friklassning av material. Vid behov kan viss dekontaminering göras inför friklassning. Utöver det friklassas metall efter extern behandling.

Mycket lågaktivt avfall kan deponeras i OKG:s nya markförvar MLA3.

Då nedmontering av O1 och O2 genomförs innan utbyggt SFR är i drift har OKG byggt ett nytt mellanlager för lågaktivt avfall. Det medelaktiva avfallet mellanlagras i BFA i väntan på slutförvaring.

3.5.2 Avveckling inom Vattenfall

Vattenfall är huvudägare till RAB och FKA.

Avveckling av reaktorerna R1 och R2 pågår. Ågestareaktorn har under den gångna Fud-perioden nedmonterats och ansökan om friklassning avses skickas in i slutet av 2025.

I figur 3-4 presenteras de övergripande planerna för avvecklingen av Vattenfalls kärntekniska anläggningar i Sverige.

Avveckling av kärntekniska anläggningar inom Vattenfall



Figur 3-4. Principiell översikt av Forsmarks Kraftgrupp AB:s respektive Ringhals AB:s planer för avveckling.

Ringhals AB:s planering för avveckling

Ringhals kärnkraftverk har fyra reaktorer, varav R1 är av reaktortypen BWR och R2, R3 och R4 är av reaktortypen PWR, i två reaktorpar.

R1 och R2 är bränslefria och NoR har påbörjats och beräknas vara slutförd under början av 2030-talet. R3 och R4 planeras vara i drift fram till 2041 respektive 2043.

Reaktorernas placering har möjliggjort separation av reaktorparen och möjliggör parallell drift och avveckling inom olika driftområden.

Avvecklingen av R1 och R2 underlättas avfallslogistiskt av att den befintliga avfallsanläggningen är placerad intill R1.

Avvecklingen av reaktorerna i Ringhals återges i två avvecklingsplaner, en för R1 och R2 och en för R3 och R4. R4 inkluderar även gemensamma anläggningar, till exempel avfallshanteringsanläggningen och mellanlager. R1 och R2 övergick i NoR under 2024. Alla aktiviteter för genomförandet av avvecklingen finns samlade i ett gemensamt program. I avvecklingsplanen beskrivs de aktiviteter som analyseras eller genomförs under de olika programfaserna.

Avfallshantering

Då slutlig avställning av R1 och R2 skett innan det utbyggda SFR tagits i drift måste kärnavfallet som uppstår mellanlagras. Detta kan ske lokalt på Ringhals kärnkraftverk och till del externt. Vid mellanlagring på kärnkraftverket reduceras de externa beroendena vilket gör att detta alternativ är första-handsvalet för de flesta avfallsströmmar. Mellanlagring på kärnkraftverket ska ske i ombyggda befintliga lager för medelaktivt avfall samt i nytt mellanlager för lågaktivt avfall på det befintliga avfallsområdet.

Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling

Forsmarks kraftstation har tre kärnkraftsreaktorer F1, F2 och F3 av reaktortypen BWR.

FKA:s samtliga reaktorer planeras vara i drift i 60 år, vilket innebär till 2040, 2041 respektive 2045 för F1, F2 respektive F3.

Avvecklingen av F1, F2 och F3 redovisas i avvecklingsplanen. NoR för F1 och F2 förväntas genomföras på ett sätt som maximerar synergivinster och minimerar behovet av anläggningsseparation alternativt servicedrift. Under avvecklingsprojekten för F1 och F2 etableras avställningsdrift på F3, vilket gör att avveckling förväntas pågå på området utan uppehåll från starten av det första projektet till dess att den sista reaktorn slutligt nedmonterats.

Grundplaneringen utgår från att utbyggt SFR är i drift vid tidpunkten för NoR av Forsmarks anläggningar, vilket innebär att behovet av mellanlagring i väntan på slutförvaring kan begränsas till det långlivade avfallet. Det kortlivade avfallet skickas efter emballering till SFR.

Avfallshantering

När NoR inleds kommer ett slutförvar för långlivat avfall inte vara driftsatt, vilket innebär att mellanlagring och slutkonditionering av långlivat avfall kommer att pågå efter avslutad NoR av reaktorerna.

Vattenfalls planering för avveckling av Ågestareaktorn

Ågestaanläggningen nedmonterades under den gångna Fud-perioden och det som återstår är hantering av friklassningsansökningarna (som avses skickas in under 2025) för de olika anläggningsdelarna; yttre byggnader, bergrum och anläggningsområde. Efter friklassningsbeslut kommer bergrummet att förslutas permanent. För avfallet kvarstår volymreducerande extern behandling och mellanlagring hos AB Svafo inför idrifttagning av framtida slutförvar.

3.5.3 Avveckling av SKB:s anläggningar

SKB:s anläggningar är bland de sista kärntekniska anläggningarna att avveckla och avvecklingen ligger cirka 50 år fram i tiden. Avvecklingsplaneringen beskrivs därför övergripande och med hänvisningar till befintliga avvecklingsplaner för mer detaljerad information.

Avvecklingen av Clink och SFR kan inledas tidigast när allt använt kärnbränsle har deponerats och avvecklingen av SFR kan inledas tidigast när avfallet från avvecklingen av Clink har deponerats. Ett slutförvar för långlivat avfall däremot kan avvecklas då det långlivade avfallet från den sista reaktorn tagits om hand. Denna planering förutsätter dels att avfallet från avvecklingen av Clink inte innehåller långlivat avfall, dels att det långlivade avfall som mellanlagras hos AB Svafo är omhändertaget.

Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

SKB kommer att vara tillståndshavare för den integrerade anläggningen Clink. Avvecklingsplanen för Clink kommer att uppdateras i samband med framtagandet av PSAR inför uppförandet av inkapslingsdelen. Avvecklingen av Clink kan inledas när allt använt kärnbränsle kapslats in och planeras ta fem till sju år.

För att ge underlag till utbyggnaden av SFR gällande avfallsinventarium samt som kostnadsuppskattning för planarbetet tog SKB under 2013 fram en studie för avveckling av Clink (Edelborg et al. 2014). Det radioaktiva avfallet från NoR ska enligt gällande planer slutförvaras i SFR.

För den befintliga anläggningen Clab finns en avvecklingsplan framtagen. Den uppdaterades under 2020 med tydliggörande av hur NoR planeras för de delar av anläggningen som är belägna under mark.

Efter att SKB erhållit en godkänd PSAR Clink samt att en uppdaterad avvecklingsplan för anläggningen anmälts till SSM enligt 9 kap. 1 § SSMFS 2008:1 kan avvecklingsplanen för Clink ersätta befintlig avvecklingsplan för Clab.

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SKB är tillståndshavare för SFR och avvecklingsplanen för befintlig anläggning uppdaterades under 2018 då SKB redovisade den återkommande helhetsbedömningen av anläggningens säkerhet och strålskydd.

Under den gångna Fud-perioden uppdaterades avvecklingsplanen för ett utbyggt SFR. Uppdateringen genomfördes parallellt med framtagande av PSAR.

Tidsplanen för när SFR ska avvecklas med syfte att inte återuppta verksamheten är kopplad till när de sista kärnkraftverken och SKB:s övriga kärntekniska anläggningar är nedmonterade och det radioaktiva avfallet har deponerats. Då kan avvecklingen av SFR inledas och den planeras att avslutas inom fem år. Avfallet från de anläggningsdelar som kan bli föremål för rivning i samband med avveckling (ovanmarksdelarna), hanteras som konventionellt då de inte innehåller något radioaktivt material. En radiologisk kartläggning av anläggningen kommer att göras för att utesluta kontaminering av byggnadsdelar som varit i kontakt med avfallsbehållare under drift, exempelvis terminalbyggnaden.

SKB:s PSAR för ett utbyggt SFR har godkänts med uppdaterad avvecklingsplan för anläggningen vilken har anmälts till SSM, enligt 9 kap. 1 § SSMFS 2008:1. Nästa uppdatering av avvecklingsplanen rapporteras i samband med en förnyad SAR inför provdrift.

Slutförvar för långlivat avfall

Utformningen av ett framtida slutförvar för långlivat avfall befinner sig på konceptstadiet. En avvecklingsplan kommer att tas fram i samband med en ansökan om tillstånd för att uppföra anläggningen. Avvecklingen kommer att inledas i samband med förslutning av förvaret.

Slutförvaret för använt kärnbränsle

Under den gångna Fud-perioden uppdaterades avvecklingsplanen för SFK. Uppdateringen genomfördes parallellt med framtagande av PSAR för anläggningen och ingår som en del av ansökan om godkännande av PSAR SFK.

Avvecklingen av SFK vidtar efter att den huvudsakliga driften avslutats, det vill säga när allt använt kärnbränsle deponerats, deponeringstunnlarna återfyllts och pluggar installerats. Förslutningen av undermarksdelarna är en del av förvarets barriärfunktioner och av betydelse för säkerheten efter förslutning.

När avvecklingen startar kommer det inte att finnas någon kontamination i anläggningen ovan mark. Rivningen utförs därför som för en konventionell anläggning.

3.6 Planeringen för transporter

Samtliga transporter sker sjövägen, utom från Forsmarks kärnkraftverk till SFR och från Oskarshamns kärnkraftverk till Clab, vilka sker landvägen.

3.6.1 Övergripande planering

Beläggningen på transportsystemet kommer att öka från och med 2030-talet eftersom inkapslat kärnbränsle kommer att transporteras från Clink till SFK parallellt med transporter av rivningsavfall till SFR.

Ett ökat behov av att transportera driftavfall till SFR kommer även att föreligga när det deponeringsstopp som råder under tiden för utbyggnaden av anläggningen hävs. När de sista reaktorerna har avvecklats minskar beläggningen och antalet transporter domineras då av inkapslat kärnbränsle till SFK.

Varken fartygets kapacitet eller övriga komponenter i transportsystemet bedöms bli gränssättande för genomförandet av kärnavfallsprogrammet, se avsnitt 2.3 då det i dagens transportsystem finns överkapacitet.

3.6.2 Transport av låg- och medelaktivt avfall

Styrstavar till mellanlager

Transporter av långlivat avfall, i form av styrstavar från BWR till mellanlager, kommer fortsätta så länge som det finns BWR i drift. Vid transporten används en transportbehållare avsedd för hårdkomponenter.

Kortlivat drift- och rivningsavfall

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall transporteras från kärnkraftverken, Clab och Studsviksområdet till SFR för slutförvaring. Lågaktivt avfall transporteras i ISO-containerar, medan medelaktivt avfall transporteras i ATB. Transporterna kommer att ske i kampanjer.

Långlivat drift- och rivningsavfall

Innan ett slutförvar för långlivat avfall tas i drift kommer transporter av avfallet att ske från Barsebäcks kärnkraftverk till mellanlager. Under slutförvarets drifttid kommer både avfall i mellanlager och avfall som produceras under drifttiden att transporteras dit.

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för långlivat medelaktivt avfall.

3.6.3 Transport av använt kärnbränsle

Använt kärnbränsle från kärnkraftverken

Dagens transporter av använt kärnbränsle från kärnkraftverken till Clab kommer fortsätta på motsvarande sätt till Clink så länge det finns reaktorer i drift.

Inkapslat kärnbränsle

När KBS-3-systemet tas i drift kommer använt kärnbränsle att transporteras från Clink till SFK. Transportsystemet har då kompletterats med en KTB för transport av kapslar.

För att uppfylla licensieringskrav och SKB:s krav sker utformning av KTB:n i en iterativ process tillsammans med leverantören. Behållarens konstruktion och säkerhetstekniska egenskaper redovisas i en säkerhetsrapport som utgör underlag för licensiering av behörig myndighet i det land KTB:n tillverkas. Innan behållaren får användas i Sverige ska en validering av licensen göras av SSM. Tidsåtgången för konstruktion och licensiering skattas till minst sju år.

Första KTB:n ska levereras inför provningen av enskilda system. De inledande systemvisa testerna planeras genomföras ett år innan samfunktionsprovningen av respektive anläggning. Resterande behållare tillverkas och levereras därefter successivt.

3.6.4 Specialtransporter

Erfarenheter från transporter av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall med SKB:s fartyg ger förutsättningar vad gäller bemanning med kompetens för att utföra externa transporter av annat radioaktivt gods. Erfarenheter från dessa uppdrag ökar i sin tur kompetensen att utföra specialtransporter som kan behövas vid avveckling av de kärntekniska anläggningarna.

Behovet av specialtransport av udda komponenter som eventuellt uppkommer i samband med avvecklingen av kärnkraftverken kan komma att kräva ytterligare studier. Det handlar rimligen bara om ett fåtal stora rivningskomponenter som kan komma att kräva specialtransport.

3.7 Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar

SKB:s och reaktorinnehavarnas planering för omhändertagande av kärnavfall och använt kärnbränsle baseras på de förutsättningar och antaganden som gäller för kärnkrafts- och kärnavfallsprogrammen idag. Det finns olika slag av osäkerheter i förutsättningarna för planeringen, men verksamheten medger en förhållandevis stor flexibilitet. I detta avsnitt redovisas ett antal möjliga förändringar av förutsättningar och tänkbara konsekvenser.

3.7.1 Kärnkraftsreaktorernas drifttider

För de sex reaktorer som är i drift är den planerade drifttiden 60 år. Det innebär att dessa reaktorer är tänkta att ställas av under perioden 2040 till 2045.

Förlängning av de planerade drifttiderna

SKB:s anläggningar inom KBS-3-systemet dimensioneras för att hantera och deponera 6 000 kapslar med använt kärnbränsle medan kärnkraftsföretagen prognoserar cirka 5 600 kapslar. Detta ger en marginal för förlängda drifttider för återstående reaktorer. Exempelvis kommer det dimensionerande kapselantalet (6 000 kapslar) nås om reaktorernas drifttid förlängs med cirka sex år, det vill säga till en total drifttid på cirka 66 år. Eventuella beslut om ytterligare förlängning av reaktorernas drifttid kräver tidig planering eftersom en utökning av SFK behöver nya eller ändrade tillstånd. En kapacitetsökning bedöms kunna åstadkommas genom att utnyttjade områden på det valda förvarsdjupet tas i anspråk.

Behovet av mellanlagringskapacitet i Clab påverkas inte av en förlängning av reaktorernas drifttid eftersom behovet uppkommer under 2040-talet då deponering i SFK pågår och vilket frigör kapacitet i förvaringsbassängerna. Om den planerade driftsättningen av Clink och SFK under andra halvan av 2030-talet skulle försenas med mer än åtta år kommer det att bli nödvändigt att utöka mellanlagringskapaciteten i Clab. Det gäller även efter att utrymme har frigjorts i Clab, se avsnitt 3.3.2.

När det gäller det utbyggda SFR är bedömningen att kapaciteten i någon del kan bli otillräcklig för tillkommande driftavfall vid förlängda drifttider. Den baseras på de tidigare planerade drifttiderna för reaktorerna inklusive ett osäkerhetspåslag. Mängden driftavfall som deponeras i markförvar kommer sannolikt att öka vid förlängda drifttider. Det rör sig dock om en mindre del av den totala avfalls-mängden. Volymen rivningsavfall bedöms inte påverkas av förlängda drifttider men inventariet av radioaktiva ämnen kan påverkas till följd av den längre bestrålningen.

Vid förlängda drifttider kommer även långlivat avfallet i form av BWR-styrstavar och övriga hårdkomponenter att öka. Det finns möjlighet att anpassa den slutliga förvarsvolymen i ett slutförvar för långlivat avfall fram till byggstart, det vill säga fram till 2040-talet med dagens planering.

Förkortning av de planerade drifttiderna

En förkortning av kärnkraftverkens drifttider innebär att mängden använt kärnbränsle och driftavfall minskar och därmed utrymmesbehovet i slutförvaren. Eftersom SFK byggs ut successivt kan deponeringsområdenas storlek anpassas utifrån ett förändrat behov. Om SFR redan har byggts ut, kommer en förkortad drifttid av reaktorerna sannolikt innebära att anläggningen inte kommer att utnyttjas fullt ut.

Om kärnkraftverkens drifttider förkortas kommer den totala mängden använt kärnbränsle sannolikt understiga den tillståndsgivna mängden för mellanlagring i Clab på 11 000 ton.

Förkortade drifttider av reaktorerna, speciellt om reaktorerna F3 och O3 stänger tidigare än planerat, skulle troligen innebära en tidigareläggning av avvecklingen av berörda reaktorer. Det skulle också kunna medföra att kärnavfallsprogrammet kan avslutas tidigare. Om en reaktor rivs innan slutförvar för långlivat avfall tagits i drift, behöver det långlivade rivningsavfallet från berörd reaktor mellanlagras.

3.7.2 Deponering av mycket lågaktivt rivningsavfall

De alternativ som finns för deponering av mycket lågaktivt avfall är markförvar eller bergssal för lågaktivt avfall (BLA) i SFR. BLA är en strålsäkerhetsmässigt betydligt mer avancerad anläggning än ett markförvar och för att motivera kostnader och miljöpåverkan (i form av exempelvis berguttag och transporter) bör avfall som deponeras i BLA ha ett högre aktivitetsinnehåll än det mycket lågaktiva avfallet.

Utbyggnaden av SFR är dimensionerad för att slutförvara allt lågaktivt avfall från NoR av reaktorerna, inklusive mindre mängder av det mycket lågaktiva avfallet. Den nuvarande inriktningen är att mycket lågaktivt avfall deponeras i markförvar.

Det mycket lågaktiva avfallet skulle kunna deponeras i BLA, om det finns plats där, i samma form som i ett markförvar men för att maximera nyttjandet av förvarsutrymmet är någon form av extra behandling att föredra. Det kan antingen vara att aktiviteten flyttas till annat bärarmaterial (genom dekontaminering) eller genom att ändra form på det ursprungliga avfallet (genom exempelvis förbränning). Det är främst metaller i det mycket lågaktiva avfallet som kan dekontamineras och sedan friklassas. Rester från dekontaminering konditioneras sedan för slutförvaring. Mjuka och inerta fraktioner, såsom isoleringsmaterial, är vanligen tekniskt mycket svåra att dekontaminera, alternativt svåra att friklassa efter dekontaminering.

För de delmängder av avfallet som är brännbara kan kontrollerad förbränning vara en alternativ metod för att koncentrera radioaktivitetsinnehållet.

3.7.3 Lokalisering och driftsättning av slutförvar för långlivat avfall

SKB planerar att inleda deponering av långlivat avfall under 2050-talet, vilket är fem till tio år efter att de sista reaktorerne, ställts av. Detta förutsätter en lokalisering till en plats som SKB har kännedom om genom tidigare platsundersökningsprogram.

Skulle lokaliseringen ske till plats som kräver omfattande undersökningar kan driftsättningen komma att skjutas framåt i tiden. En försening i driftsättningen skulle innebära en förlängd mellanlagring av det långlivade avfallet, både vid kraftverken och hos AB Svafo. Detta skulle i sin tur kunna påverka kärnkraftsföretagens möjligheter att avveckla den kärntekniska verksamheten på sina områden.

Det finns också osäkerheter i den gällande planeringen beroende av att utvecklingen av en slutförvarslösning är i ett relativt tidigt skede. En försening på något eller några år i processen fram till driftsättning av slutförvar går inte att utesluta.

En eventuell tidigareläggning av driftsättningen av ett slutförvar för långlivat avfall skulle innebära en kortare tids mellanlagring av det långlivade avfallet men en längre drifttid för slutförvaret.

De studier som SKB hittills genomför har antagit ett slutförvar med två olika förvarsdelar med olika barriärlösningar, som rent principiellt skulle kunna lokaliseras till olika platser. Hur driftsättningstiderna skulle påverkas av att separera förvarsdelarna beror på valet av platser och omfattningen av platsundersökningarna.

3.7.4 Driftsättning av KBS-3-systemet

Enligt planerna inleds provdrift av SFK och Clink andra halvan av 2030-talet, vilket innebär att SKB då påbörjar utlastningen av det använda kärnbränslet från Clinks förvaringsbassänger. För att Clab ska kunna ta emot det använda kärnbränsle som produceras fram till denna tidpunkt behöver SKB frigöra lagringspositioner i bassängerna, se avsnitt 3.3.2. Efter att utrymme frigjorts bedöms lagringsutrymmet vara tillräckligt tills SFK och Clink har driftsatts.

Senareläggning

Vid en senareläggning av KBS-3 systemets driftstart till mitten av 2040-talet kommer sluthärdarna från F3 och O3 inte rymmas i Clab utan måste lagras i bassängerna på kärnkraftverken. Förutsättningarna för att kunna lagra övrigt använt kärnbränsle i Clab är att hårdkomponenter utlastats till annat mellanlager, se avsnitt 3.3.2.

Om det skulle visa sig nödvändigt finns även möjligheten att bygga ut mellanlagringskapaciteten för det använda kärnbränslet. Det finns två lagringsmetoder, våt respektive torr lagring. Våt lagring är det som används i Clab. Inför ett beslut om en eventuell utökning, kan möjligheten till torr mellanlagring komma att utredas. Då måste bland annat aspekter avseende kärnbränslets egenskaper efter torr mellanlagring och eventuell påverkan av det på säkerheten efter förslutning analyseras. Torr mellanlagring används idag i ett flertal länder, bland annat Spanien, Tyskland och USA.

Tidigareläggning

SKB bedömer möjligheterna att ta Clink och SFK i drift väsentligt tidigare än planerat som små. En eventuell tidigareläggning bedöms inte ge några negativa konsekvenser för kärnavfallsprogrammet.

4 Fortsatt forskning och utveckling

I detta kapitel redovisas de forsknings- och utvecklingsbehov som identifierats för de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet. Samma stegvisa process avseende ansökningar och prövningar enligt KTL gäller för alla slutförvararen och Clink, även om omfattningen och komplexiteten varierar. Regeringsbesluten avseende KBS-3-systemet och utbyggnaden av SFR har varit viktiga milstolpar, men innebär inte att SKB:s forskning och teknikutveckling kan avslutas.

För de tillståndsgivna anläggningarna, SFR samt SFK och Clink i KBS-3-systemet fortsätter forskningen för att utveckla och stärka analyserna inför kommande steg i den stegvisa prövningen enligt KTL. Forskning och teknikutveckling genomförs också för att minska konservatismen i analyserna och som underlag för att optimera slutförvarsanläggningen och dess tekniska barriärer. I ansökan om godkännande av PSAR SFK ingår planer som beskriver fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete.

Redovisningen av fortsatt forskning och utveckling i Fud-program 2025 har anpassats till delvis nya förutsättningarna i och med att SKB fått tillstånd att uppföra och driva kärntekniska anläggningar (SFK och Clink samt utbyggnad av SFR) och att dessa verksamheter därmed står under SSM:s tillsyn (se avsnitt 1.2.3). Detta innebär att redovisningens detaljeringsgrad har minskat i förhållande till tidigare Fud-program. Därmed undviks en dubbel redovisning i förhållande till ansökningarna i de stegvisa processerna enligt KTL. Samtidigt har SKB valt en omfattning så att SSM kan erhålla en allsidig bild och granska och utvärdera Fud-programmet i fråga om planerad forsknings- och utvecklingsverksamhet och redovisade forskningsresultat i enlighet med kärnteknikförordningens krav (SFS 1984:14, 26 §).

De erfarenheter som erhållits från driften av befintligt SFR kommer att användas under arbetet med att förfina beskrivningar av processer i avfallet där påkallat, förändrade prognoser för inventariet, liksom att identifiera behov av nya eller vidareutvecklade avfallsbehållare och ATB. Utveckling för att förfina metoderna för att bestämma inventariet i låg- och medelaktivt avfall sker löpande.

För ett slutförvar för långlivat avfall kvarstår arbete innan ansökningar om tillåtlighet och tillstånd enligt MB respektive KTL kan färdigställas. En stor del av den forskning och teknikutveckling som har genomförts och som planeras för SFR är även relevant för slutförvaring av långlivat avfall. Den säkerhetsvärdering som redovisades 2019 (SKB TR-19-01) har varit en utgångspunkt för fortsatta forsknings- och teknikutvecklingsinsatser. Den ger också underlag för platsvalskriterier och för arbetet med att finna en lämplig plats för slutförvaret.

De forsknings- och teknikutvecklingsinsatser som krävs för att omhänderta det mycket lågaktiva kärnavfallet bedöms vara små.

Grunderna för planeringen av forsknings- och teknikutvecklingsinsatserna beskrivs i avsnitt 4.1 och 4.2. Där ges en översikt av hur långt forskningen och teknikutvecklingen ska ha nått vid de milstolpar som är relevanta för Clink och respektive slutförvar.

I avsnitten 4.3 till 4.10 beskrivs de områden SKB bedriver forskning och teknikutveckling inom. För att ge en överblick över insatserna redovisas programmen för fortsatt forskning och teknikutveckling i punktform. Mer utförliga förklaringar kring hur kunskapsläget förhåller sig till tillämpningar i analysen av säkerhet efter förslutning för SFK och möjligheter till förbättringar återges i redovisningen av planer som ingår i ansökan om godkännande av PSAR SFK.

De avslutande arbeten som har genomförts i Äspölaboratoriet presenteras i avsnitt 4.11. Hur SFK planeras att övervakas under uppförande och drift beskrivs i avsnitt 4.12. En översikt av teknikutvecklingsbehoven utifrån avveckling av kärntekniska anläggningar återfinns i avsnitt 4.13. I avsnitt 4.14 ges en beskrivning av SKB:s arbete inom området informationsbevarande och överföring av kunskap mellan generationer.

4.1 Tillståndsgivna anläggningar

SKB:s och reaktorinnehavarnas planering av forsknings- och teknikutvecklingsinsatser för slutförvararen och Clink utgår från de tillståndprocesser som redovisas i avsnitt 1.1.5. Ansökningar och säkerhetsredovisningar styr när kunskap och teknikutveckling behöver ha nått den nivå när SKB kan påbörja uppförande respektive drift av anläggningar, se avsnitt 3.1.

En del av förberedelserna inför byggstart är planeringen av entreprenadupphandling och att forma en organisationsstruktur som har förutsättningar för erfarenhetsåterföring mellan de olika uppförande-projekten. Framtagande av undersökningsprogram med tillhörande metodbeskrivningar är också viktiga förberedelser.

En viktig utgångspunkt för Fud-programmet för SFK är de planer och program som utgör del av SKB:s ansökan om godkännande av PSAR SFK. Eftersom regeringstillstånd för SFR har erhållits har fokus skiftat från utförliga beskrivningar i Fud-programmet till beskrivningen av planer och program inom ramen för den fortsatta stegvisa prövningen. Resultat och program redovisas därför mer kortfattat i föreliggande Fud-program än i tidigare.

Då regeringstillstånd har erhållits även för utbyggnaden av SFR har redovisningen förändrats på motsvarande sätt som för SFR. Utgångspunkten för prioritering av aktiviteter kopplat till SFR är erfarenheter från drift av anläggningen, synpunkter från myndighetsgranskningar och resultat från genomförda analyser av säkerhet efter förslutning samt tidigare forskning och utveckling.

Ett led i utvecklingsarbetet är att demonstrera hur framtagna lösningar fungerar i praktiken. Efter att fältförsöken i Äspölaboratoriet har avslutats, se avsnitt 4.11, kommer demonstrationsförsök att kunna genomföras i anslutning till slutförvaren, som en del i provningen och verifieringen av valda lösningar. För SFR övervägs även långtidsförsök under förvarets drifttid, se avsnitt 4.12.

Som del av forsknings- och utvecklingsarbetet utreds hur den tekniska utformningen av slutförvaren kan optimeras, med bibehållen eller ökad säkerhet. Utvecklingsarbetet har hittills fokuserat på enskilda system. Därför bedöms förutsättningarna för teknikoptimering som speciellt goda när det gäller samverkan mellan produktionslinjerna för de olika barriärerna samt för utvecklingen av de tekniska systemen inom respektive produktionslinje.

4.1.1 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

Uppförande

Uppförandet av utbyggnaden av SFR inleddes under den gångna Fud-perioden med att nödvändig infrastruktur etablerades och bergarbetena påbörjades. Efter bergarbetena vidtar tillverkning och installation av tekniska barriärer samt förberedelser inför driftsättning. I slutskedet av uppförandet genomförs verifiering och validering av system och funktioner och uppförandeskedet avslutas med samfunktionsprovning och tester för deponering av avfallskollin.

Vid byggstart är krav och konstruktionsförutsättningar för utbyggnaden fastlagda men vissa detaljerade krav planeras att förfinas och tillhörande verifieringsbehov uppdateras. Under kommande projektering av konstruktioner och installationer detaljeras utformningen av barriärerna (till exempel kassuner i 2BMA). Även utveckling av förslutningskomponenter, till exempel pluggar, fortsätter. Innan bergarbetena påbörjades förslöts ett antal undersökningsborrhål. För kvarvarande borrhål kommer förslutningstekniken att anpassas till förhållandena vid SFR och ett program för kvalitetskontroll utformas och fastställas.

Drift och förslutning

Innan provdrift tas en förnyad SAR fram och förslutningsplanen uppdateras.

Inför rutinmässig drift av det utbyggda SFR tas en kompletterad SAR fram där erfarenheterna från provdriften inarbetas. Den platsbeskrivande modellen planeras att uppdateras utifrån information från detaljundersökningar under uppförandeskedet. Provdrift förväntas inte medföra några särskilda behov av teknikutveckling eller forskning inför rutinmässig drift.

Inför avveckling och förslutning av anläggningen, kommer teknik för förslutning och förslutningskomponenter att utvecklas. Avvecklingsplanen kompletteras och en uppdaterad analys av säkerhet efter förslutning som kommer att ingå i en omarbetad SAR tas fram inför förslutning.

4.1.2 Slutförvaret för använt kärnbränsle och Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

Uppförande

Inför byggstart av SFK respektive Clink kommer nödvändiga system, strukturer och komponenter vara specificerade, med fastställd funktion och prestanda. Inlämnandet av PSAR för vardera anläggning är en viktig leverans till SSM. Den kommande kunskapsuppbyggnaden för frågor kring säkerhet efter förslutning är i första hand fokuserad på att leverera underlag till SAR SFK. Ökad kunskap ger underlag för en bedömning med mindre konservativa antaganden, vilket kan utgöra underlag vid optimering av krav för förvarets komponenter och layout. I utformningen av inkapslingsdelen av Clink och av slutförvarsanläggningen kommer förutsättningarna för kärnämneskontroll beaktas, se avsnitt 2.4.

Målet med teknikutvecklingen är att ta fram produkter som uppfyller både externa och interna krav samt att nå tillräckligt långt i utvecklingsarbetet för att kunna påbörja detaljkonstruktion och upphandlingar av SFK och inkapslingsdelen av Clink.

Redan under uppförandet av tillfarter, centralområde och första deponeringsområdet, tas det underlag fram som behövs för att omhänderta frågor som har betydelse för strålsäkerheten före och efter förslutning. Underlaget är del av ansökan om godkännande av PSAR SFK och redovisas dels i ett dokument om säkerhet under uppförandeskedet (Suus), dels i ett detaljundersökningsprogram för uppförandefasen. Syftet är att identifiera de aktiviteter och åtgärder som är nödvändiga för att verifiera och vidareutveckla den platsbeskrivande modellen för Forsmark inför kommande analyser av säkerhet efter förslutning. Vidare behöver de tekniska system (till exempel för deponering och återfyllning) som kommer finnas inom förvarsområdet, vidareutvecklas till SAR SFK. Vid inlämnande av ansökan om godkännande av PSAR SFK lämnades ett antal stödjande dokument till SSM i form av planer för fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete fram till idrifttagande av anläggningen samt program för undersökningar och övervakning under uppförande och drift.

Inför byggstart av det första deponeringsområdet i SFK kommer konstruktionsförutsättningar för detta deponeringsområde att revideras. Därmed behöver konstruktions- och installationsmetoder för buffert, återfyllning och pluggar vara fastlagda liksom metodiken för uttag av deponeringstunnlar och deponeringshål. Dessutom behöver de kontrollmetoder som ska tillämpas vid detaljundersökningar vara verifierade. Eftersom deponeringsområdet löpande ska anpassas till platsens betingelser baserat på resultat från genomförda detaljundersökningar kommer det finnas metoder för undersökning och modellering av berget i deponeringsområdet. Ett uppdaterat program för undersökningar av deponeringsområden planeras att anmälas till SSM innan uttag av deponeringstunnlar för deponering av kapslar påbörjas.

I Forsmark har övervakningen av berg, grundvatten och ekosystem pågått i det närmaste oförändrat efter platsundersökningen och den planeras fortsätta fram till byggstart av SFK. Viss anpassning har dock gjorts eller planeras till följd av utvärderingarna av insamlade mätdata. Övervakningen ger underlag för att fastställa en referensnivå som kan användas för att bedöma eventuell miljöpåverkan under förvarets uppförande och drift.

Den pågående övervakningen av geosfärs- och biosfärsparametrar planeras fortsätta under uppförande och drift av SFK. Det nya, i förhållande till platsundersökningen, är framför allt de undersökningar som kommer att utföras under mark. Inför uppförandet av SFK kommer ett övervakningsprogram för uppförande- och driftskedena presenteras, se avsnitt 4.12.

Teknik och metoder för inkapsling kommer vara utvecklade och beskrivna inför detaljkonstruktion av inkapslingsanläggningen. De nödvändiga tekniska systemen kommer vara specificerade, vilket innebär att den nukleära bränslemätningen och den valda metoden för torkning av bränsleelement behöver vara utvecklade. På samma sätt behöver metoder för svetsning och kontroll av kapslarna under inkapsling vara framtagna och anpassade till den kärntekniska miljön i Clink.

Drift

Inför driftskedet för SFK och Clink planeras produktionslinjetester och samfunktionsprovning som ska verifiera och validera att utbyggnad och deponering kan bedrivas så att krav på säkerhet under drift och säkerhet efter förslutning, uppfylls. Dessa tester utförs i ett sent skede med den utrustning

som ska användas i anläggningarna och personalen som ska driva dem. Detta blir en slutlig kontroll av att driften kan ske på avsett sätt.

Inför samfunktionsprovning ska samtliga system för hantering och transport av kapsel, buffert och återfyllning vara tillverkade, installerade och testade. Kvalificeringar av processer med tillhörande utrustningar, personal och leverantörer kommer vara genomförda och dokumenterade. Vid denna tidpunkt behöver ett antal system för kvalitetsstyrning och kontroll av barriärerna vara implementerade. Det gäller såväl produktion, hantering och installation av kapslar, buffert- och återfyllningskomponenter som bergbyggnad med tillhörande detaljundersökningar.

Den platsbeskrivande modellen kommer att uppdateras, baserat på tillkommande data från förvarsdjup, inför framtagandet av SAR inför provdrift. När förvarssystemet tas i rutinmässig drift, efter SSM:s godkännande av kompletterad SAR, övergår verksamheten i en förvaltningsfas, då SAR ska hållas aktuell. Även utvecklingsarbetet övergår då till en ny fas med fokus på optimering utifrån bland annat erfarenheter från driftsatta slutförvarsanläggningar.

Återtag av deponerade kapslar

Det finns idag inget krav på att använt kärnbränsle som deponerats ska kunna återtas från ett slutligt förslutet slutförvar. Om särskilda åtgärder vidtas för att underlätta återtag av deponerade kapslar, får dessa inte äventyra förvarets säkerhet efter förslutning. SKB har bedömt och demonstrerat i försök i Äspölaboratoriet, att det är möjligt att återta deponerade kapslar under driften av SFK. Principiellt skulle det gå att återta kapslar också från ett förslutet förvar, men det skulle bli arbets- och resurskrävande. Inkapslingsdelen av Clink konstrueras så att det blir möjligt att återföra kapslar med kärnbränsle för förnyad inkapsling. Återtag ses som en tänkbar åtgärd för att hantera eventuella fel eller kvalitetsbrister som uppstår eller upptäcks under deponeringssekvensen. Planeringen för utveckling av tekniker och metoder för återtag redovisas, i ansökningarna om godkännande av PSAR SFK respektive PSAR Clink.

Förslutning

Inför förslutning av SFK tas en omarbetad SAR fram. Den innehåller en uppdaterad analys av säkerheten efter förslutning samt en plan för förslutning och avveckling. Den uppdaterade analysen av säkerheten efter förslutning, baseras på anläggningen som den är byggd och de planerade förslutningsåtgärderna samt den kunskap som erhållits under driftperioden. Där redovisas den teknik och det arbetssätt som ska användas vid förslutning av kvarvarande bergutrymmen och borrhål (deponeringstunnlar försluts under driftperioden) samt de åtgärder som planeras för att övervaka och kontrollera förvaret och verksamheten vid förslutningen.

4.2 Ej tillståndsgivna anläggningar

4.2.1 Slutförvar för långlivat avfall

För ett slutförvar för långlivat avfall var fokus under den gångna Fud-perioden främst på inventariet och acceptanskriterier och kommer även vara det under den föreliggande. Det föreslagna slutförvars-konceptet för långlivat avfall som låg till grund för den genomförda säkerhetsvärderingen 2019 (SKB TR-19-01) behöver konkretiseras allteftersom ökad kunskap om inventariet erhålls från den pågående avfallskaraktäriseringen. När avfallet är karakteriserat, det vill säga materialsammansättning och radionuklidinnehåll detaljerats i tillräcklig omfattning, finns förutsättningar för att kunna bedöma om den genomförda säkerhetsvärderingen behöver uppdateras. Fördjupad kunskap om avfallet bör minska osäkerheterna och/eller behovet av konservativa antaganden i säkerhetsvärderingen vilket ger bättre förutsättningar för det vidare arbetet med utvecklingen av tekniska barriärer och acceptanskriterier för avfallet.

Den pågående utbyggnaden av SFR samt arbetet med att uppföra SFK kommer att ge värdefull erfarenhet bland annat om barriärsutformningen. Kunskap från genomförd men även fortsatt forskning kopplad till SFR och SFK kommer även vara användbar för utvecklingen av ett slutförvar för långlivat avfall.

Sammanställning av data om hårdkomponenter

Flera projekt har genomförts för att säkerställa information och klarställa kravbild samt etablera en process för att transportera, mellanlagra och slutförvara hårdkomponenter. Hårdkomponenter är

långlivat medelaktivt avfall som planeras att deponeras i ett slutförvar för långlivat avfall. Härdkomponenter mellanlagras primärt i Clab idag och utgörs bland annat av BWR-styrstavar, härdskrot, borplåtar och olika typer av sonder. Datainsamling avseende vikter, material, dimensioner, drifhistorik med mera har gjorts och kommer fortsätta under Fud-perioden och all data bedöms med avseende på variationer och osäkerheter. Dokumentationen för härdkomponenter från 1970-talet är delvis ofullständig vilket innebär större osäkerheter i data.

4.3 Låg- och medelaktivt avfall

För vissa material i det låg- och medelaktiva avfallet som ska slutförvaras i SFR eller ett slutförvar för långlivat avfall, eftersträvas en fördjupad förståelse för de processer som påverkar förvaret. SKB avser även att uppdatera och fördjupa kunskapen om avfallets innehåll av radionuklider.

4.3.1 Processer kopplade till materialegenskaper

För både SFR och ett slutförvar för långlivat avfall utgör fördröjning av uttransport av radionuklider från förvaret en central säkerhetsfunktion. Sorption av radionuklider till cementmineral är en av de viktigaste fördröjande processerna. Potentiellt kan även sorption till metallkorrosionsprodukter ge betydande retention av vissa radionuklider, dock först senare i analysperioden när korrosionen framskridit längre; därmed viktigare för långlivat härdkomponentsavfall med längre analysperiod och större andel stålavfall än för SFR. Komplexbildande organiska ämnen kan reducera sorptionen och därmed påskynda uttransporten av radionuklider.

Gasbildning i slutförvarsmiljö kan leda till en tryckuppbyggnad och efterföljande påverkan på barriärernas funktion. Om gasproduktionstakten är så hög att den bildade gasen inte kan ledas ut på ett kontrollerat sätt kan gastrycket i förlängningen skada barriärer i slutförvaret. Gasbildningen orsakas huvudsakligen av korrosion av oädlade metaller och under vissa omständigheter kan en mindre gasproduktion från mikrobiell eller radiolytisk nedbrytning av organiska material bidra.

Även svällande avfall kan påverka betongbarriärers integritet och därmed påverka uttransporten av radionuklider.

Korrosionsprocesser är särskilt viktiga för avfall i form av stål med inducerad aktivitet. Långsam frisläppning av aktivitet via stålkorrosion tillgodoses i säkerhetsanalysen för segmenterade reaktortankar i IBRT och härdkomponenter i ett framtida slutförvar för långlivat avfall. Frigörelse styrs av korrosionshastigheten, som för stål i slutförvarsmiljö är väl karakteriserad. Den kemiska specieringen av frisläppt C-14 påverkar retentionsegenskaperna. För vissa metaller i det långlivade avfallet finns anledning att utöka kunskap om korrosionsegenskaperna.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har ett antal studier genomförts som rör material och deras kemiska och fysikaliska processer efter förslutning. Studierna gäller SFR om inget annat anges, och omfattar radionuklidens cementsorption, gasbildning i avfall, metallegeringars korrosion och radionuklid-frisläppning, betongtankars hållfasthet, samt svällande avfall:

- Påverkan på radionuklidsorption till cement av komplexbildande proxyligander samt långsiktiga nedbrytningsprodukter av ett polyakrylnitrilbaserat filterhjälpmedel har undersökts under noga kontrollerade förhållanden (Szabo et al. 2022, 2023a, b, Tasi et al. 2024) och en doktorsavhandling har publicerats (Szabó 2023). Studien bedrevs inom Eurad. Resultaten pekar på att nedbrytningsprodukterna är komplexbildande.
- Ett forskningsprojekt har bedrivits som under sju år undersökt korrosionen i noga kontrollerad, slutförvarsliknande miljö av rostfritt stål med inducerad aktivitet. Fokus var frisläppningen och specieringen av C-14 där gasformiga specier, främst metan, visade sig dominera långsiktigt (Titi et al. 2023, 2024). Resultaten väntas vara tillämpbara för SFR samt för slutförvaring av långlivat avfall. SKB har deltagit och delfinansierat projektet sedan 2022, tillsammans med Nagra, BGE och Paul Scherrer Institute.
- Svällande bitumensolidifierat avfalls påverkan på IBMA-betongbarriärerna har utretts kopplat till deras reaktion med sulfat i avfallet och bildande av expansiva mineralfaser (Idiart et al. 2024). Resultaten pekar på att grundvattnets sulfathalter har större påverkan än sulfatet i avfallet.

- Då även cementsolidifierat avfall kan svälla har påverkan på de tekniska barriärerna i silon utretts, där resultaten visar att de inre schaktväggarna kan skadas men inte den viktigare yttre cylindriska betongbarriären (Rosdahl och Bultmark 2023).

Program

SKB kommer under Fud-perioden att fortsätta fördjupa kunskapen inom processer kopplade till materialegenskaper, där sorption av viktiga radionuklider samt korrosion av relevanta metaller kommer studeras vidare. Vidare avser SKB att fortsätta undersöka svällning av bitumensolidifierat avfall och frisläppning av sulfat och radionuklider från cementsolidifierade jonbytarmassor under slutförvarsliknande förhållanden. Exempel på planerade insatser beskrivs i följande punktsatser.

- Molybden och selen är betydelsefulla vid analys av förvarets säkerhet efter förslutning. Ett forskningsuppdrag kring sorption till cement av dessa radionuklider, som också syftar till att stärka inhemsk forskningskompetens, startade 2024. SKB planerar fortsatt experimentverksamhet och modellering.
- AB Svafo finansierar en doktorand på Chalmers tekniska högskola (Chalmers) som studerar korrosion av oädla metaller i AB Svafo:s låg- och medelaktiva avfall avseende gasbildning och frisläppning av aktivitet, vilket även har bäring på kärnavfall. SKB deltar i diskussionerna kring försöksupställning och resultat, och bidrar med viss finansiering.
- SKB har påbörjat nya försök och beräkningar för att bättre förstå och kunna beskriva svällning av bitumenkonditionerat avfall under slutförvarsliknande förhållanden, för att minska osäkerheterna kopplade till svällningens påverkan på tekniska barriärer i SFR.
- De korrosionsförsök av inducerat rostfritt stål som beskrivs under Uppnådda resultat och har pågått till 2024 planeras att brytas och analyseras.
- SKB planerar att utreda om de löslighetsbegränsningar som föreligger för vissa radionuklider, i första hand uran, molybden och nickel, kan bli relevanta under slutförvarsbetingelser och - radionuklidkoncentrationer.
- SKB planerar studier om frisläppning av sulfat från, och retention av radionuklider i, jonbytarmassa inom Eurad-2.

4.3.2 Radionuklidinventarium

För att säkerställa ett tillräckligt väl bestämt radionuklidinventarium i det låg- och medelaktiva avfallet inför kommande analyser av säkerheten efter förslutning för SFR och ett slutförvar för långlivat avfall, avser SKB fördjupa kunskapsläget. Radionuklidinventariet uppdateras löpande och särskilda insatser görs för bestämning av svärmätbara nuklider, vilka i många fall har betydelse för säkerheten efter förslutning. Eftersom aktiviteten för svärmätbara nuklider endast bestäms genom indirekta mätningar eller som analyser av enstaka prov, är det nödvändigt att tillämpa beräkningsmodeller för att uppskatta radionuklidinventariet för dessa.

Uppnådda resultat

- Promemoria som beskriver förväntningarna på aktivitetsbestämningen av svärmätbara nuklider i avfall från NoR har uppdaterats. Promemorian omfattar allt avfall vars aktivitet bestäms utifrån nuklidvektorer och ger en tydligare bild över den arbetsgång SKB anser vara nödvändig för aktivitetsbestämningen av svärmätbara nuklider i sådant avfall (Ahlford och Andgren 2024).
- Under hösten 2024 har SKB erhållit uppdaterade prognoser för rivningsavfall för samtliga reaktorer som genomgår NoR.
- Inventarieberäkningar för rivningsavfallet har likformats med de beräkningar som görs för driftavfallet så att ett totalt radionuklidinventarium för SFR enklare kan sammanställas.
- Den modell som beskriver korrosionsavlossningen från molybdenlegerade material i BWR-reaktorer har vidareutvecklats. Utöver Mo-93 används modellen nu även till att bestämma avlossning av Tc-99 från samma process.

- SKB har tillsammans med reaktorinnehavarna finansierat utredningar kring uppbyggnaden av systemoxider respektive bränslecrud i BWR-reaktorer. Vidare har upplösningshastigheten av bränslecrud studerats i autoklavförsök under olika kemiska betingelser som kan förekomma i en BWR-reaktor.
- För ytterligare förståelse av mekanismerna vid deponering på ytor har en beläggning på en bränslespridare intill en skadad bränslestav studerats med svepelektronmikroskopi och energidispersiv röntgenspektroskopi. Beläggningen studerades även med laserablation-induktivt kopplad plasma-masspektrometri för bestämning av relativa mängder aktinider i deponatet.
- SKB har utvecklat en modell för simulering av bränsleskador i BWR-reaktorer samt den frigjorda aktivitetens spridning i processsystem och upptag i reningssystem.
- SKB har tillsammans med reaktorinnehavarna utfört ytterligare verifierande mätningar av den svärmätbara nukliden Mo-93. Prover analyserades på två olika laboratorier med olika provberednings- och analysmetoder. Resultaten indikerar att modellen beaktar alla relevanta processer som bidrar till bildning och frigörelse av Mo-93 i reaktorvattnet.
- För att förbättra tillförlitligheten i hur uppmätta och beräknade aktivitetsmängder fördelas per kolli har SKB påbörjat utvecklingen av en modell som spårar avfallskollin till de system och tidsperioder där avfallet uppstått.
- SKB har utvecklat en modell som utifrån neutronfluenser beräknar radionuklidinventariet i BWR-styrstavar.
- SKB har utvecklat ett verktyg för att uppskatta produktionen av C-14 i processvatten, samt dess efterföljande spridning och upptag i olika reningssystem.
- Sedan Fud-program 2022 har flertalet insatser genomförts avseende uppskattning av osäkerheter i metodiken för bestämning av radionuklidinventariet i låg- och medelaktivt avfall.

Program

SKB planerar följande aktiviteter kopplat till radionuklidinventariet.

- Samla in löpande uppdateringar av avfallsprognoser för rivningsavfallet och att regelbundet följa upp dessa med radionuklidtransportberäkningar samt årligen uppdatera och komplettera den databas som SKB upprättat för reaktorernas drift- och kemidata.
- Fortsätta utvecklingen av beräkningsmodeller för att kvantifiera mängden svärmätbara nuklider i driftavfall samt tillsammans med reaktorinnehavarna utföra ytterligare mätningar av svärmätbara nuklider när behov av verifiering föreligger. SKB planerar även att detaljera den modell som fördelar uppmätta och beräknade aktivitetsmängder i system till enskilda avfallskollin.
- Aktualisera hanteringen av totala osäkerheter per radionuklid och förvarsdel i SFR.
- Fortsätta inhämta information och beräkningsunderlag från pågående NoR av de svenska reaktorerna.

4.3.3 Acceptanskriterier

Under den gångna Fud-perioden har de preliminära acceptanskriterierna för de olika förvarsdelarna i det utbyggda SFR, det vill säga 2BMA, 1BRT respektive 2–5BLA slagits samman till ett gemensamt kravdokument. Vidare har kravbilden och detaljeringsnivån jämkats med den för befintliga SFR, med utgångspunkt från den senaste säkerhetsanalysen PSAR SFR. Resultaten från flera utredningar kopplade till förelägganden och andra SSM-ärenden har också införlivats i kravbilden. Behovet av vidare utredningar kopplade till acceptanskriterier för avfall i utbyggt SFR är därför i dagsläget litet.

Långlivat avfall i form av hårdkomponenter produceras i samband med pågående avveckling av reaktorer. Acceptanskriterier för mellanlagring på Clab finns framtagna, med utgångspunkt att senare slutförvaring i betongbarriärbaserat slutförvarskoncept ska uppfylla krav på säkerhet efter förslutning.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har flera utredningar utförts, med acceptanskriterier för avfall som avnämare.

- Studier kopplade till acceptanskriterier för betongtankar till 1–2BTF har bedrivits utifrån föreläggande från SSM (2020). Hållfastheten hos en betongtank har först modellerats (Eriksson D 2022, Könönen och Malm 2021), och sedan testats i fullskaleförsök genom att betongtanken utsattes för hydrostatiska belastningar motsvarande vad som i vissa fall kan uppstå i samband med förslutning (Angele et al. 2022). Det resulterade i viss uppsprickning liknande den i modelleringen, men de resulterande hydrauliska egenskaperna är ändå i linje med vad som antas i säkerhetsanalysen (Bultmark 2023). En tankutformning som undviker stor hydrostatisk belastning har visats ha liten påverkan på utsläpp av radionuklider (Eriksson P 2022).
- Inom ramen för besvarande av materialföreläggandet (SSM 2021) har flera studier utförts. En metodutveckling för beräkning av radiolytisk gasproduktion (Bultmark et al. 2023), en modelleringsstudie av gasbildningens påverkan på trycket i silon (Wessely 2023) och en sammanställning av alla gasbildande processer och material i SFR som visar att metallkorrosion dominerar gasbildningen (Maier och Bultmark 2023). Slutsatsen är att kvantitativa riktvärden för gasbildande material i avfall endast behövs för silon (Hedström 2023).
- Rostskyddsfärger innehåller ofta oligoaminer, som kan fungera som komplexbildare när de löses upp då färgen långsiktigt bryts ner. En fördjupad analys av hur de, beroende på kemisk form, behöver gränssättas i SKB:s acceptanskriterier för avfall i hela utbyggda SFR har utförts, och en beräkningsmetod har tagits fram som utöver avfall till SFR också inkluderar hårdkomponenter (Hedström 2024).

Program

- Inga tillkommande forskningsfrågor är planerade att utredas under Fud-perioden.

4.3.4 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att avveckla de kärntekniska anläggningarna på ett optimalt sätt, behöver utvecklingsarbetet av avfallsbehållare och ATB för det låg- och medelaktiva avfallet löpande följas upp. Strategin är att i första hand undersöka tillämpligheten hos redan befintliga avfallsbehållare för deponering i kommande och befintliga slutförvar. Behovet av nya ATB styrs dels av kommande avfallsvolymer, dels av vilka tillkommande avfallsbehållare som kommer att utvecklas. Möjligheten att modifiera befintliga ATB för att inrymma ytterligare avfallsbehållartyper eller öka transportkapaciteten ses regelbundet över.

Uppnådda resultat

- Ombyggnation av ATB16K (tidigare avsedd för 16 enkokiller) till förpackningsklasserna Typ A och IP-3 har slutförts. Detta möjliggör att både en stål- eller betongtank, eller två stycken tvåkokiller, kan transporteras.
- En ny behållare, ATB1T, för transport av ståltankar med högre aktivitet har utvecklats i samarbete med amerikanska Holtec International Power Division Inc. Den nya ATB:n planeras att certifieras och driftsättas under 2026.
- Ombyggnation av ATB3T har genomförts till kollityp Typ A och IP-3 vilket möjliggör utökat avfallsinnehåll för effektivare transportkapacitet.

Program

- Behovet av modifiering av befintliga behållare för att inrymma en annan avfallstyp än vad de ursprungligen var avsedda för kommer att ses över inför kommande rivningsavfall. Det samma gäller omen annan förpackningsklass blir aktuell .
- SKB kommer löpande bevaka behovet av ny- eller vidareutveckling av ändamålsenliga avfallsbehållare till befintliga och kommande slutförvar.

4.4 Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat, högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Det utgör en mindre volym av det kärnavfall som ska slutförvaras, men innehåller den helt dominerande mängden radioaktivitet. Använt kärnbränsle måste hanteras så att kriticitet inte uppnås.

Om en kapsel i SFK skulle skadas och vatten skulle tränga in, är kärnbränslets egenskaper avgörande för hur snabbt radioaktiva ämnen frigörs. Resultat från tidigare säkerhetsanalyser visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från kärnbränslets olika delar signifikant påverkar analysen av SFK:s säkerhet efter förslutning. Upplösning av använt kärnbränsle i slutförvarsmiljö är därmed en central del i säkerhetsanalysen.

De kommande åren planerar SKB både forskning för kommande analyser av säkerhet efter förslutning, och teknikutveckling gällande hantering av det använda kärnbränslet i de olika delarna av KBS-3-systemet.

Teknikutveckling för hantering av kärnbränsle sker i takt med att detta behövs som underlag till systemkonstruktion och detaljkonstruktion av Clink, och färdigställs under uppförande och driftsättning av anläggningen.

4.4.1 Icke-reguljära bränslen och bränsleintegritet

Icke-reguljära kärnbränslen är bränslen vars egenskaper kräver speciella analyser eller åtgärder i något eller flera hanteringssteg. Exempel på icke-reguljärt kärnbränsle är bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik, quiver (se nedan), stavkassetter, rekonstruerade bränsleelement, Mox-bränsle samt skadat bränsle.

Kärnbränslets integritet har betydelse för inkapslingsanläggningen, då hanteringen av bränsleelementen i Clink måste kunna ske på ett förutbestämt sätt. Därför följer SKB åldring av kärnbränsle utifrån information från Clab, kärnkraftverk och industrin i övrigt samt internationell forskning. Vid Clab inspekteras ett antal individuella bränsleelement regelbundet för att följa förändringar i deras egenskaper under mellanlagring. För erfarenhetsåterföring upprätthålls kontakt även med bränsleleverantörer samt anläggningar med erfarenhet av mellanlagring.

Kärnbränslet består av urandioxidkulsar omsluta av kapslingsmaterial i zirkoniumbaserade legeringar. Skadat bränsle med otät kapsling kallas även läckande bränsle. Det läckande bränslet som lagrats på de svenska kärnkraftverken har placerats i behållare med dimensioner av PWR- eller BWR-bränsle. Dessa behållare är vattentäta och ersätter därmed den skadade kapslingen. Den ena lösningen är utvecklad av Westinghouse och kallas quiver. Den har utvecklats för användning i kärnkraftverkens bassänger. Den andra har utvecklats av Studsvik och innebär att de läckande bränslestavarna skickas till Studsvik där de kapslas in i täta hylsor, för vidare transport till Clab.

Uppnådda resultat

- En systematisk sammanställning av status för bränsletyper med svaghet i konstruktionen pågår. En gap-analys är inledningen av detta arbete och syftar till att utgöra en bas för vidare arbete med utredningar hur man kan mitigera funna svagheter och brister. Två av tre bränsletillverkare har slutfört sin redovisning av bränsletyper med problem och avvikelser. Den tredje bränsletillverkaren har initierat sin utredning.
- Ett pågående projekt rörande degraderingseffekter hos det använda kärnbränslet har funnit en del svagheter och brister som behöver åtgärdas inför eller i alla fall hanteras i samband med inkapsling. Utvecklad reaktordrift med ökad belastning, höjd utbränning och ökad drifttid har medfört design- och materialbrister hos bränsleelementen. Dessa svagheter och brister har med tiden lösts av bränsletillverkarna som en del av deras produktutveckling, men bränsleelement och bränsletyper med olika brister finns i Clabs bränsleinventarium. En preliminär projektrapport av hitintills vunna erfarenheter är under framtagande.
- Inga specifika brister har återfunnits vad gäller Ågestabränslet från ASEA-Atom (Ågesta 5x5) och gammalt Mox-bränsle från Tyskland (SWAP-Mox). Både Ågestabränslet 5x5 och Mox-bränslet har befunnits vara robust konstruerade och bedöms tåla reguljär hantering. Däremot så har svagheter i kärnbränslet från AB Atomenergi tillverkat på Liljeholmen upptäckts (Ågesta 19). De flesta av svagheterna har åtgärdats, men vissa bränsleelement kan eventuellt komma att kräva specialhantering.

- Ny forskning visar att kärnbränsle med läckande bränslestavar kan torkas till mycket låga halter av vatten under rätt förhållanden (Faber et al. 2020).
- SKB utför även forskning och erfarenhetsutbyte i internationella samarbetsorgan såsom OECD/NEA och EPRI samt nationellt inom Vattenfallkoncernen.
- I samband med undersökningar av en alternativ utformning av kapselinsatsen har nya modelleringar av effekter av radiolys av kvarvarande vätskor och gaser i en försluten kapsel utförts. Resultaten tydliggör bland annat hur mängden vatten som finns i kapseln påverkar hur systemet utvecklas över tid (Henshaw och Evins 2023).

Program

- Krav, principer eller metoder för särskild hantering av vissa bränsleelement planeras att sammanställas efter genomförd inventering av bränsleelementens status.
- En plan ska tas fram för hur det fåtal läckande bränslen som finns på Clab ska hanteras innan de placeras i kopparkapslar.
- Åldringsprogrammet för kärnbränsle planeras att uppdateras som en följd av pågående arbete med att genomlysna degraderingseffekter.

4.4.2 Resteffekt, bränslekaraktisering och val av kärnbränsle för inkapsling

Kärnbränslets resteffekt är en central parameter som måste vara känd vid de olika stegen i kärnbränslecykeln då den ger upphov till temperaturhöjningar. Ofta är resteffekt den begränsande faktorn för hur mycket kärnbränsle som kan placeras i transportbehållare, förvaringsbassänger eller kopparkapsel. Arbetet med bestämning av resteffekt med hjälp av kalorimetri och genom mätning av gamma och neutroner fortsätter. Ett ytterligare syfte med arbetet är att ge underlag till utformningen av de delar av inkapslingsanläggningen där mätutrustningen ska finnas.

Vid bränslekaraktiseringen före inkapsling av kärnbränslet beräknas bränsleelementets radionuklidinventarium, och utifrån detta kan bränslets neutronmultiplikationsfaktor (kopplat till kriticitet), strålningsfält och resteffekt tas fram. Dessutom bestäms kärnbränslets innehåll av fissila ämnen, vilket gör att kärnbränslet kan verifieras avseende kärnämneskontroll. Beräkningarna verifieras sedan med gamma- och neutronmätningar.

Resteffekten i individuella bränsleelement är underlag för inkapslingsoptimeringen för att minimera det totala antalet kapslar. Ytterligare parametrar är inkapslingstakt, startdatum för inkapsling samt kravet på att minimera antalet förflyttningar av kärnbränsle i mellanlagret. Val och placering av bränsleelement behöver göras under beaktande av kriticitet och strålnivåer på kapselns utsida.

Arbetet med att samla information om det använda kärnbränslet fortsätter. Kommande utredningar ska visa hur informationen bäst hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet.

Uppnådda resultat

- Resteffektberäkningar för Clab och transportsystemet görs med Studsviks beräkningssystem Spent Nuclear Fuel (SNF) som beräknar bland annat resteffekt och nuklidinventarium baserat på varje bränsleelements drifthistorik. Resultaten visar god överensstämmelse med kalorimetriska mätningar på Clab. SKB har ett pågående samarbetsprojekt med EPRI, vilket syftar till att utöka och förbättra det valideringsunderlag som finns gällande resteffekt. Exempelvis har mätresultat från kalorimetern på Clab publicerats (EPRI 2024).
- SKB deltar i en ny expertgrupp för resteffekt inom OECD/NEA.
- Inom IAEA Coordinated Research Project (CRP) avslutades projektet Spent Fuel Characterization (SFC) under 2024, ett projekt där SKB deltagit.
- Arbetet med utvecklingen av bränslekaraktiseringsmetoder och instrument har resulterat i att SKB har beslutat att gå vidare med utvecklingen av mätutrustning som baseras på neutronmätning med DDSI-tekniken samt mätning med gammaspektroskopi.

- Projekt Kapseloptimering har genomförts under den gångna Fud-perioden. Resultatet av projektet ger möjligheten att utvärdera mängden av kärnbränsle som behöver finnas i Clabs ovanmarksdel för att urvalet av kärnbränsle och deras placering i kapslar kan göras så resursmässigt effektivt som möjligt. Antalet kassetter som lyfts upp till ovanmarksdelen minimeras utan att det innebär att kapslarna måste lämnas med tomma positioner på grund av resteffektbegränsningar.

Program

- Kapacitet att utföra egen termisk modellering runt kapseln har etablerats inom SKB, och modellering av olika fall relevanta för KBS-3-systemet planeras att fortsätta under Fud-perioden.
- Fortsatt arbete med EPRI rörande validering av resteffekt och ombyggnation av befintlig kalorimeter i Clab. En milstolpe är att under 2026 slutföra renoveringen av kalorimetern och samtidigt göra den till ett eget system i Clab.
- Tester av resteffekt med en utvecklad kalorimeter planeras att genomföras. Syftet med testerna är att bekräfta bränsledata och förmåga att beräkna resteffekt som del i urvalet av bränsleelement för inkapsling. Från 2026 och framåt planeras nya kalorimetriska mätningar genomföras på kärnbränsle för att förbättra valideringsunderlag till resteffektberäkningar.
- SKB arbetar med att ta fram industriellt tillämpliga metoder och bygga en prototyp för karakterisering av BWR- och PWR-bränsle inför inkapsling. Bränsleparametrar som bestäms vid karakteriseringen är resteffekt, utbränning och reaktivitet. Kommande testning och verifiering av metodiken planeras att genomförs i Clab. Vidare tas riktlinjer fram för vilka osäkerheter som måste associeras med bränsle där information saknas. Karakteriseringsmetoder för icke-reguljära kärnbränslen, såsom bränsle från Ågestareaktorn och Mox-bränsle, samt de nya behållarna för hantering av skadat bränsle från kärnkraftsreaktorerna tas fram i ett efterföljande skede.
- Inom området bränslekarakterisering fortsätter de väl etablerade samarbetena med olika internationella grupper och organisationer, inte minst samarbetet med U.S. Department of Energy (DOE) genom Los Alamos National Laboratory och Oak Ridge National Laboratory. I Sverige planeras samarbetena med Uppsala universitet och Lunds universitet att fortsätta.
- Fortsatt arbetet med att samla in och kvalitetssäkra bränsleinformation från kärnkraftverk och bränsletillverkare. Kommande utredningar ska visa hur informationen bäst ska hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet.
- Kapseloptimeringsprogrammet planeras fortsätta att utvecklas under Fud-perioden för att ge ett bättre stöd åt den kommande praktiska hanteringen av bränsleelement i inkapslingsanläggningen. Förutom resteffekt planeras även optimering med avseende på andra parametrar såsom kriticitet och strålning.

4.4.3 Kriticitet

För kriticitetsberäkningar tillämpar SKB utbränningskreditering för PWR samt BA-kreditering för BWR. Utbränningskreditering innebär att den minskning av reaktiviteten som sker då kärnbränslet bestrålas i reaktorn och utbränningen ökar, tillgodoräknas i kriticitetsanalyserna. BA-kreditering innebär att hänsyn tas till att kärnbränslet innehåller så kallad brännbar absorbator (BA), främst gadolinium-155, som är en stark neutronabsorbator och därmed minskar bränslets reaktivitet.

SKB:s program avseende kriticitetssäkerhet utvecklar metodik löpande och validerar nya versioner av beräkningsprogram.

Metodutveckling pågår för analys av kriticitet i olika scenarier under drift och efter förslutning av förvaret. SKB planerar att komplettera metodiken för kriticitetsanalys med en strategi för att hantera bränsleknippen som inte möter utbränningskraven samt metodik för utbränningskreditering för BWR. De beräkningar som görs med numeriska metoder ger också underlag för bedömning av strålfältets påverkan på omgivningen.

Uppnådda resultat

- Metodiken för kriticitetsanalys avseende de aspekter som är unika för SFK har vidareutvecklats. SKB har uppskattat och analyserat effekter av eventuella geometri- och materialförändringar i långtidsförvar av slutförvarskapsel avseende kriticitet (Johansson et al. 2024). En metodik för utbränningskreditering för BWR-bränsle har börjat utarbetas.
- Hittills genomfört arbete om metodik för karakterisering av kärnbränsle har resulterat i att neutronmätning med DDSI kombinerat med gammaspektroskopi kan ge ett mycket bra underlag för verifiering av kärnämnesdeklaration.

Program

- Fortsätta utveckla metodiken för utbränningskreditering bland annat genom att undersöka nuklidsammansättningen beroende av driftsätt och genom att gå igenom experiment för validering av beräkningskoder och motivera val av experiment.
- Fram till att utvecklingen av kapselns insats är helt färdig kan effekter av eventuella geometri- och materialförändringar behöva utvärderas avseende kriticitet.
- Fortsatt metodutveckling för kapselspecifika kriticitetsberäkningar av kärnbränsle som inte uppfyller dagens utbränningskriterier, till exempel ettårigt kärnbränsle från R2 sluthärd som avviker från nu gällande krav på utbränning.
- SKB planerar att fortsätta delta i internationella samarbeten kring kriticitetsanalys för mycket långa tider efter förslutning inom Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform (IGD-TP) och Eurad-2.

4.4.4 Kärnämneskontroll

Kärnämneskontroll (Safeguards) syftar till att säkerställa att kärnämnen och kärntekniska anläggningar inte används för framställning av exempelvis kärnvapen. Inom området kärnämneskontroll fortsätter den pågående utvecklingen av metoder för märkning och identifiering av kopparkapslar med använt kärnbränsle, i samverkan med IAEA, Euratom och SSM, (se även avsnitt 2.4). Tillämpningen av kärnämneskontroll måste säkerställa kontinuerlig kännedom om kärnbränslet. Detta innebär kontroller och verifiering för att tillse att det använda kärnbränslet inte kommer på avvägar. Det medför att utvecklingen av kärnämneskontrollen för KBS-3-systemet i huvudsak rör följande områden:

- Metod för verifiering av deklarerat kärnämne.
- Logistik.
- Identifiering av kopparkapslar.
- Sigill.
- Hantering av onormala händelser.

Utvecklingsarbetet kommer att genomföras sammanhållet så att helheten inom kärnämneskontrollen beaktas, för att på så sätt säkerställa kontinuerlig kännedom om kärnämne i KBS-3-systemet.

Uppnådda resultat

- Logistik för kärnämne med avseende på kärnämneskontroll för kärnbränsle och av färdiga kopparkapslar i Clink har integrerats i arbetet med anläggningsutformningar och har redovisats samt diskuterats med kontrollorganen IAEA och Euratom. Kontrollorganens synpunkter beaktas i kommande anläggningskonstruktioner.
- Utveckling av identifieringsmetod för kopparkapslar har utmynnat i en lämplig metod för säker avläsning av ingraverade identitetsmärkningar.
- Hantering av onormala händelser i inkapslingsverksamheten har beaktats i anläggningskonstruktionen, och kärnämneskontrollens funktion bedöms därvid kunna fungera ändamålsenligt.

Program

- Metodik som möjliggör verifiering av mängden fissilt material (safeguards) planeras att utvecklas, kopplat till utveckling av bränslekarakterisering och bränsleinformation. Inom detta område pågår också utveckling av mätstationens utformning, metodik och teknik för bränslekarakterisering och kärnämnesverifiering. Resultat planeras redovisas under 2026.
- SKB planerar logistikstudier med avseende på kärnämneskontroll för kärnbränsle och färdiga kopparkapslar i Clink i samband med anläggningskonstruktionens kommande steg. Studierna planeras att löpande diskuteras med kontrollorganen IAEA och Euratom. Delresultat planeras kunna redovisas under 2026.
- Identifieringsmetoden för kopparkapslar innefattar en säker avläsning av ingraverade identitetsmärkningar. Hur märkningen ska göras i detalj och var i processen det är lämpligast att göra den kommer att utredas under anläggningens systemkonstruktion med start 2026.
- Sigill för kapseltransportbehållare utvecklas av EU-kommissionens Joint Research Centre (JRC) och SKB avser tillhandahålla nödvändig information för denna utveckling allt eftersom kapseltransportbehållaren och anläggningens layout utformas.
- Hantering av onormala händelser i inkapslingsverksamheten beaktas i anläggningskonstruktionen och ska framgent även beaktas i systemkonstruktionen, i vilken kärnämneskontrollens funktion behöver bedömas. Bedömningar görs tillsammans med kontrollorganen IAEA, Euratom och SSM.

4.4.5 Bränsleupplösning, radionuklidspeciering och lösligheter

Upplösning av kärnbränslet i slutförvaret är en fundamental process i analysen av säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse för de processer som sker vid radiolytisk oxidation av kärnbränslet är av nytta för tolkningar av experimentella data. Kunskap om hur strålning, vätgas, oxidanter samt övriga joner i vattenlösning påverkar oxidation och upplösning av uran krävs för modellering av kärnbränslets upplösningshastighet. Insatser inom detta forskningsområde bidrar till modellutveckling samt de parametrar som styr kinetiken, till exempel reaktionshastigheter för relevanta ytreaktioner och hur dessa hastigheter ändras med tid och andra parametrar.

Fördelningen av radionuklider i kärnbränslets olika delar, speciellt hur stor del som sitter mellan kuts och kapsling, har också betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning. Detta varierar beroende på bränsletyp, effekthistorik och utbränning. SKB planerar fortsatt forskning inom området för att spegla den variation av kärnbränslen som kommer deponeras i SFK. Ett syfte är att ytterligare utreda osäkerheter kring speciering och lösligheter av frigjorda radionuklider, inklusive uran. Då förståelse av urankemi i slutförvarsmiljö är en hörnsten i beskrivningen av den kemiska utvecklingen i en skadad vattenfylld kapsel, planeras fortsatta forskningsinsatser även inom detta område. Fällning av uran som urandioxid kan också påverka koncentrationen av övriga aktinider (till exempel plutonium) genom samfällning och är ett område för fortsatta insatser.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har resultat från studier som syftar till ökad förståelse för processer och mekanismer kopplade till bränsleupplösning publicerats:

- Hur uranoxidytor gradvis oxideras och reduceras har studerats i plasmaexperiment som simulerar de oxidanter och reduktanter som uppstår vid radiolys av vatten. Resultaten visar att U(V) är ett viktigt mellansteg vid både oxidation av UO_2 och reduktion av UO_3 (El Jamal et al. 2022).
- Ett doktorandarbete på Chalmers har slutförts (Hansson 2022), vilket inkluderar både experimentella resultat för alfa-dopade urandioxidkutsar, samt arbeten rörande modellering av oxidativ bränsleupplösning med Matlab (Hansson et al. 2022, 2023a). Med hjälp av Matlab-modellen utforskas hur effektivt vätgas inhiberar oxidation av UO_2 med och utan metallpartiklar (Hansson och Jonsson 2023).
- Kopplat till arbetet med modellering av radiolytisk oxidation av kärnbränsle, har de för detta ändamål relevanta kemiska reaktionerna och deras hastighetskonstanter sammanställts i två rapporter (Jonsson 2022, 2023a).

- Ett doktorandarbete på Kungliga Tekniska högskolan (KTH) har slutförts (Li 2023), vilket inkluderar arbeten om hur speciering av peroxid påverkar bildningen av uranmineralet studtit, samt hur UO_2 -ytors redox-reaktivitet påverkas av progressiv exponering av oxidanter, främst väteperoxid (Li et al. 2022, 2023, 2024b). Detta arbete har visat att bildning av ett uranyl-komplex med peroxid kan påverka det kemiska systemet signifikant.
- Inom ett pågående doktorandarbete på KTH har fortsatta studier av peroxidspeciering och hur den påverkas av vattenkemin publicerats (Olsson et al. 2022, 2024). Resultaten tyder på att bildning av uranyl-peroxid-komplexet minskar den oxidativa effekten av peroxiden. Det är endast den fria väteperoxiden som oxiderar U.

Lakstudier av standardbränsle ingår i det arbete som utförs för att underbygga förståelsen för hur oxidativ bränsleupplösning sker under vätgastryck:

- Studier av mycket högutbränt bränsle har visat att ett övertryck av vätgas kan undertrycka den oxidativa bränsleupplösningen (Puranen et al. 2022). Detta betyder att även mycket högutbränt bränsle kan antas lösa upp sig mycket långsamt i slutförvarsmiljön.
- Resultat från experiment med kärnbränsle som lakats upp till fem år i slutna glasampuller har rapporterats i vetenskaplig litteratur (Evins et al. 2025). Data från bränslefragment utan föroxidering visar att långsam radiolytisk oxidation sker i en initialt anoxisk atmosfär, medan föroxiderade bränslefragment ger en större frigörelse av radionuklider i början av lakningen.

Moderna bränsletyper med tillsatser (dopat bränsle) samt Mox studerades i det nu avslutade projektet DisCo, och några studier har publicerats efter projektets avslut:

- UO_2 med olika tillsatser studerades både utifrån fas-fas aspekter, exempelvis hur tillsatt Cr innefattas i kristallstrukturen (Smith et al. 2022) samt hur tillsatserna kan påverka upplösningen (Rodriguez-Villagra et al. 2022). En viss skillnad i upplösningshastighet rapporterades för Cr-dopat och Cr-Al-dopat UO_2 , vilket författarna tolkade som att $\text{Cr}+\text{Al}$ bidrar mer till att aktivera vätgas än i UO_2 med endast Cr.
- Resultaten från DisCo sammanfattades i samband med konferensen Euradwaste 2022, med slutsatsen att överlag syns ingen skillnad på upplösningshastighet för standardbränsle, dopat bränsle och Mox-bränsle (Sjöland et al. 2023).

Studier har även genomförts vilka är relevanta för icke reguljära bränsletyper, såsom skadat bränsle:

- Studier av ett bränslesegment som lakats i avjoniserat vatten i en hot cell i Studsvik under 37 år (Serie 3), genomfördes med syfte att karakterisera de sekundära uranfaser som bildats på ytan. En intressant iakttagelse är att det återfinns en del Cs i sekundärfasen, samt att även i 10 mM bikarbonat kan det ta lång tid att lösa upp sekundärfasen (Roth et al. 2021, 2024).
- En skadad bränslestav från Ringhals har studerats med olika metoder, inklusive lakning i luftmättad miljö. Resultaten visar, i likhet med studierna av Serie 3-segmentet, viss retention av Cs har skett i sekundärfaserna. Resultaten har presenterats på konferensen Spent Fuel Workshop och en vetenskaplig artikel planeras.

Inom området speciering, samfällning och lösligheter har studierna fokuserat kring aktinidkemi:

- I ljuset av att uran kan bilda Ca-uranyl-karbonat-komplex i granitiska grundvatten, till exempel i Forsmark, har ett experiment genomförts för att undersöka om detta komplex hindrar uranyl från att reduceras i närvaro av korroderande järn (Hansson et al. 2023b). Resultatet visar på en effektiv reduktion trots en grundvattensammansättning som simulerar Forsmarks grundvatten där detta komplex har visats förekomma.
- Då många bränsleexperiment indikerar att Pu och Np samfäller med uran i reducerande miljö, har ett doktorandarbete påbörjats för att testa denna hypotes och ge en bättre vetenskaplig grund för antagandet om aktinidsamfällning. Som en förstudie till detta har ett experiment genomförts vilket visar att Ce (III) samfäller med UO_2 (Saleh et al. 2024).

- För att genomföra termodynamiska modelleringar krävs lämpliga data; arbetet inom projektet NEA-TDB bidrar till detta. Det senaste arbete som publicerats rör data för de ämnen som, utöver radionukliderna, är viktiga för en korrekt representation av det kemiska systemet, till exempel karbonater och fosfater (Rand et al. 2024).

Program

För en förbättrad förståelse för processer som är viktiga för bränsleupplösning, och hur dessa processer påverkar olika bränsletyper, samt hur speciering och samfällning påverkar radionuklidkoncentrationer, planeras följande insatser:

- Doktorandarbete vid KTH för att ytterligare undersöka de reaktioner som påverkar uranoxidation, till exempel hur provgeometri och peroxidspeciering påverkar oxidation av UO_2 i olika situationer. Doktorandarbete vid Chalmers om samfällning av aktinider avses slutföras.
- Utveckling av en mekanistisk modell för bränsleupplösning som baseras på processförståelse, vilken kan användas inom ramen för nästa säkerhetsanalys.
- Arbete med en sammanställning över kunskapsläget angående speciering och fällningar av aktinider i en reducerande miljö har pågått under den gångna Fud-perioden och planeras slutföras. Preliminära slutsatsen är att det återstår arbete innan frågan om koffinitisering och eventuell bildning av U(IV) -silikatkomplex är löst.
- Deltagande i Eurad-2 i arbetspaketet SAREC. Detta omfattar många aspekter av bränsleupplösning, bland annat modellering och autoklavlakning av bränsle för att undersöka kopplingen mellan frigörelse under lakning av bland annat I, Cs och fissionsgaser.
- Återstående glasampuller med bränsle ska öppnas och analyseras, vilket kommer ge ett dataset för radiolytisk bränsleoxidation i ett slutet system under tio års tid.
- Under den senare delen av Fud-perioden planeras använt bränsle att lakas i autoklav med övertryck av vätas och sulfid, för att undersöka hur sulfid påverkar systemet. Därutöver planeras data från 37 års lakning i närvaro av syre (Serie 3) sammanställas och relateras till nya kunskaper om bränsleoxidation. SKB planerar även en litteraturstudie för att belysa om de lakdata som finns tillgängliga för Mox-bränsle kan antas vara gällande för de gamla Mox-element som finns i Clab (SWAP-Mox).
- Inom ramen för undersökningar av moderna bränsletyper finns återstående frågor kring Cr-dopat bränsle. Ett autoklavförsök planeras för att svara på dessa frågor.
- Under 2025 planeras start av nästa fas inom NEA-TDB (TDB-7) vilket SKB kommer att delta i. Under TDB-7 förväntas arbete ske som rör organiska komplex samt effekter av förhöjd temperatur.

4.5 Kapsel för använt kärnbränsle

I detta avsnitt beskrivs planerna för kompletterande forskning om egenskaper hos kapselns kopparhölje och insats inför kommande säkerhetsredovisningar. Vidare beskrivs behoven av teknikutveckling för att kapseln ska kunna tillverkas, kontrolleras, verifieras mot ställda krav och användas inom KBS-3-systemet. En detaljerad beskrivning av planer för forskning och utveckling återges i ansökan om godkännande av PSAR SFK.

I SFK är kapseln med kopparhölje och insats den inneslutande barriären. I kapselns initialtillstånd i analysen av säkerhet efter förslutning beaktas utformningen, dess förmåga att tåla mekaniska påfrestningar (hållfasthet) samt den tillverkade kapselns materialegenskaper. Mer kunskap om processerna som påverkar kapseln i förvaret blir underlag till att ytterligare underbygga analysen av säkerhet efter förslutning.

Korrosion och kopparkrypning är centrala processer respektive egenskaper för kapseln i analysen av säkerhet efter förslutning. Sulfidkorrosion är den viktigaste korrosionsprocessen eftersom processen ger ett dominerande riskbidrag för de fall då bufferten eroderats bort. Även strålningsinducerad korrosion och spänningskorrosion beaktas i analyserna. Lokal korrosion utvärderas för olika skeden i förvaret, med särskilt fokus på perioden med omättad bentonitbuffert. Modellering av korrosion

används till såväl processförståelse som kvantitativa analyser i beräkningskedjor i analysen av säkerhet efter förslutning.

För beskrivningen av koppars materialegenskaper är den viktigaste forskningsfrågan förståelsen för hur tillsats av fosfor till koppars leder till ett gynnsamt och bestående krypbeteende. SKB planerar att utreda påverkan på materialegenskaperna av eventuell inträngning av väte i kapselmaterialet och försprödning av kapselmaterialet på grund av strålning och åldring av materialet i insatsen.

4.5.1 Processer kopplade till korrosion

SKB låter utföra elektrokemiska experiment för att undersöka de detaljerade mekanismerna för sulfidkorrosion, kopparytans utseende efter korrosionen, liksom förutsättningar för att korrosionen skulle kunna vara mer koncentrerad (lokal). SKB kommer också att fortsätta studera mekanismerna för de spänningskorrosionsliknande effekter som observerats i experiment. En ökad förståelse för vilka sulfidkoncentrationer som kan finnas i förvarsmiljön, både i lermaterialet och i berget (se även avsnitt 4.7.2 och 4.8.5), gör det möjligt att i säkerhetsanalysen minska överskattningar av transporten av sulfid till kapseln, och därmed av korrosionen.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har SKB genomfört studier som kopplar till sulfidkorrosion, oxiderande förhållanden samt radiolytisk korrosion.

- Experimentella studier pågår kring omvandlingen av oxidfilm till kopparsulfid, där olika metoder för forcerad oxidtillväxt har studerats. Resultat från dessa studier visar att en tunn (elektrokemiskt bildad) oxidfilm snabbt konverteras till sulfid, medan en tjockare oxidfilm i två lager (kemiskt bildad under accelererade förhållanden) inte konverteras fullt ut under försöksperioden (24 timmar) och att då även kopparoxidation förekommer (Salehi Alaei et al. 2023). Arbetet detaljeras ytterligare i en framlagd avhandling (Salehi Alaei 2024).
- Att en initial oxidfilm kan påverka bildningen av sulfidfilmen är även tydligt från Hanby-Ratio et al. (2023).
- SKB har fortsatt utreda lokal sulfidkorrosion i form av mikrogalvanisk korrosion med en experimentell tidsserie vid varierande koncentration. Resultaten visar att denna typ av lokal korrosion endast kunde påvisas vid den högsta studerade koncentrationen (5×10^{-4} M) och att allmätkorrosion observerades vid övriga koncentrationer ($\leq 5 \times 10^{-5}$ M). Den observerade mikrogalvaniska korrosionen observerades avstanna vid längre exponeringstid till fördel för allmätkorrosion (Chen et al. 2025).
- Effekten av klorid- respektive sulfatjoner på morfologin hos korrosionsfilmen som bildas på koppar i sulfidlösning har undersökts (Chen et al. 2023). Dessa anjoner påverkar bland annat porositeten hos filmen (klorid ökar porositeten jämfört med sulfat), hur kopparsulfidkluster (Cu_3S_3) kan avsättas på de växande kristallerna (klorid motverkar detta), samt korrosionshastigheten (klorid ökar korrosionshastigheten initialt), men effekterna är också beroende av koncentrationen av sulfid.
- I ett försök att belysa de experimentella svårigheter som föreligger vid studier av sulfidkorrosion under syrefria förhållanden, har en studie publicerats där olika steg för att minimera mängden syre i försöken har analyserats (Ramamurthy et al. 2024). Resultaten visar att även små mängder syre inverkar på uppmätt korrosionshastighet.
- Det senaste arbetet kring radiolytisk korrosion stött av SKB har inkluderat effekter av ytterligare grundvattenkomponenter, så som organiskt material, Fe(II), initialt förekommande O_2 och sulfidflöden representativa för förvarsmiljön (Jonsson 2023b). Resultaten indikerar en generellt ökande korrosion med minskande dosrat medan de ytterligare grundvattenkomponenterna i övrigt har marginell eller minskande effekt på korrosionen. Modellen har även använts för beräkningar av korrosion till följd av radiolys under realistisk initial dosrat samt realistiskt sönderfall av Cs-137.

En rad studier har bedrivits kopplat till korrosionsförlopp under mekanisk påverkan samt inverkan på materialets mekaniska egenskaper.

- Passivering av korrosionsfilmen har även fortsatt studerats med elektrokemiska metoder där resultaten inte visar på något passiverande skikt (Bojinov et al. 2023, 2024). Elektrokemiska metoder har även använts som grund för modellering med Point Defect Model (PDM); en jämförande studie mellan fosfordopad och icke-dopad koppar tyder på en ökad korrosionsbeständighet för det fosfordopade materialet (Ning et al. 2024).
- Vätgasutveckling används inte sällan som ett mått på omfattningen av korrosion hos metaller, men en felkälla skulle kunna vara väte som kommer ut ur själva materialet. I en studie av Senior et al. (2023) har tre typer av koppar från det kanadensiska programmet undersökts med tre olika metoder vid olika temperaturer, för att förbättra tolkningen av korrosionsexperiment, men också för att öka kunskapen om hur väte kan vara fördelat i olika typer av kopparmaterial.
- Huruvida koppars materialegenskaper påverkas av injektion av vakanser från en korrosionsprocess har fortsatt studerats, och det har till exempel noterats att kryphastigheten kortvarigt påverkas av såväl polarisation (anodisk såväl som katodisk) som av sulfidexponering. För det sistnämnda fallet har ytterligare experiment genomförts, från vilka resultaten tyder på att ändringen av kryphastighet relaterar till inträngning av väte vid sulfidexponering och diffusion ut ur materialet när sulfidexponeringen upphör (Ikäläinen et al. 2023a).
- Långsam dragprovning stöder fortsatt hypotesen att observationer kopplade till sulfidkorrosion under mekanisk last är en form av korngränskorrosion (Moya Núñez och Taxén 2023), och har gett underlag för utvecklingen av en mekanistisk modell (Taxén et al. 2023). Undersökning av mikrosprickor pekar på att dessa har mer att göra med plastisk deformation än korrosion under exponering i sulfidlösning (Goel et al. 2023).
- SKB har gjort ytterligare försök med för-spräckta prov av den typ som användes i MiniCan, i syfte att studera sprickinitiering och sprickpropagering i koppar (Hesketh och Johansson 2024). Resultaten visar fortsatt på svårigheter att inducera sprickinitiering och -propagering i koppar. Både primära och sekundära sprickor i provämnena kunde härledas från mekanisk deformation orsakad av utmattning, vilket indikerar att motsvarande observationer i prover från MiniCan härrör från provtillverkning och alltså inte från spänningskorrosion till följd av exponering i en korrosiv miljö.
- Experiment under sulfidexponering har utförts för att studera inträngning av korrosiva ämnen med ToF-SIMS (Time-of-Flight – Secondary Ion Mass Spectroscopy) (Yue et al. 2023). SKB har flera invändningar (Hedin et al. 2023) mot innehållet i publikationen. Författarnas svar (Pan et al. 2023) på SKB:s invändningar har inte i något avgörande avseende bemött invändningarna, enligt SKB:s åsikt.

SKB har under den gångna Fud-perioden även genomfört studier kopplade till korrosionmodellering samt försök under förvarsliknande förhållanden.

- En probabilistisk modell för lokal korrosion under oxiderande omättade förhållanden har tagits fram i samarbete med NWMO (Briggs et al. 2024). Modellen visar att groptillväxten begränsas till < 200 µm under de första månaderna i tid, till följd av förändringar i närzonsmiljön tillsammans med att kraven för fortsatt groptillväxt inte uppfylls.
- Den modell som använts för att beräkna radiolytisk korrosion inuti kapseln har uppdaterats med nya data och fler potentiella processer har inkluderats, bland annat bildning av ammoniak (Henshaw och Spahiu 2021, Henshaw och Evins 2023). Dessa processer och efterföljande effekter är i sin tur beroende av mängden vatten i kapseln, förhållandet temperatur–luftfuktighet och anoxisk korrosion av järn.
- Ett omfattande internationellt samarbete för att studera naturliga kopparanaloger har slutfört den inledande förstudien (Aaltonen et al. 2023). Genom ett mindre experimentellt program kunde en lämplig uppsättning instrument och analyser identifieras, och därtill de kopparprover som för fortsatta studier är mest relevanta för analysen av säkerhet efter förslutning: bland annat nativ koppar som under geologiska tidsrymder utsatts för svavelbärande vatten.

- Som ett komplement till genomförda fältförsök har SKB genomfört laboratorieförsök för att studera koppar–bentonitinteraktioner i syrgasfri miljö, delvis för att undersöka hur adsorption av koppar kan påverka bentonitens egenskaper (se även avsnitt 4.7.1 och 4.7.2). Analys av kopparkomponenter från två försökspaket visar skillnader i korrosion mellan olika bentonitleror, där koppar i kontakt med Asha-bentoniten visar ökad korrosion jämfört med MX80 (Moya Núñez et al. 2025).
- Experimentella försök har utförts för att utreda sambanden mellan syrekonzentration, syreförbrukning och korrosion vid koppar–bentonitinteraktion (Haynes et al. 2024). Resultaten antyder att tillgången till syre för korrosion minskar med närvaro av bentonit. Försöken kan ses som en förstudie och metodutveckling för vidare undersökningar.

Program

- Elektrokemiska laboratorieförsök planeras fortsätta för att studera sulfidering av koppar med bland annat förväntat förvarsliknande oxidfilm men potentiellt även i närvaro av svavel–syrespecier som kan förekomma vid övergången mellan syrefattiga och syrefria förhållanden. SKB ser även över möjligheten av fortsatta korrosionsförsök för att utreda initieringsgrund för mikrogalvanisk- och korngränskorrosion.
- SKB planerar kopparstudier som exempelvis omfattar exponeringar i olika sulfidmiljöer där korrosion mäts som vätegasutveckling. Det pågår även studier av väteinträngning från sulfidkorrosion. Inverkan av injektion av vakanser i kopparn under sulfidkorrosionen planeras att fortsatt undersökas. Studier av denna typ kan också ge information om vätes roll för eventuell korngränskorrosion under dragspänning i sulfidlösning.
- SKB ser också över behovet att studera bland annat hög kloridjonhalt i kombination med sulfid i lösningen och effekter av gasformig sulfid.
- Utifrån nyligen publicerade studier kring fosfors roll i passivering av koppar, kommer SKB framöver utvärdera behovet av fortsatta studier kring fosfors roll för korrosionsförloppet och då med fokus på lokal korrosion.
- SKB avser att följa utvecklingen av modellering och modelleringsverktyg i andra länders kärnavfallsprogram och att se över modelleringen av korrosion i analysen av säkerhet efter förslutning, exempelvis de olika delarna i modelleringen av korrosion i sulfid, med och utan dragprovning. SKB kommer att fortsätta studera naturliga kopparanaloger, som ett nästa steg i det redan påbörjade arbetet.
- Analys och rapportering planeras fortgå av kapselkomponenter från den inre sektionen inom Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Analysplan är under framtagande för kopparkomponenter från återstående försökspaket inom försöksserierna LOT, ABM och MiniCan (se även avsnitt 4.7). I syfte att bättre kunna förstå och förklara de defekter som observerats i U-böjar från MiniCan 4 har SKB låtit tillverka nya prover med samma dimensioner som tidigare. Proverna planeras att undersökas metallografiskt samt med modellering.
- SKB planerar att analysera behovet av fortsatta studier av strålningsinducerad materialpåverkan samt korrosion för relevant kopparsort. En möjlig studie vore att utföra bestrålningen i lösning så att samtidig inverkan av bestrålning och korrosion på materialet studeras.
- För spänningskorrosion under oxiderande förhållanden avser SKB att fördjupa kunskapen om vilka halter av spänningskorrosionsinducerande kväveföreningar som kan uppstå genom inverkan av gammastrålning nära kapseln (på utsidan, såväl som inuti kapseln), i syfte att bedöma om spänningskorrosion kan uppstå.

4.5.2 Processer kopplade till materialegenskaper för kapselmateriäl

SKB har som kapselmateriäl valt en syrefri koppar, med låga halter av föroreningar, till vilken små mängder fosfor tillsätts för att få gynnsamma krypegenskaper som låg kryphastighet och tillräckligt hög seghet (duktilitet). Effekten av fosfor är belagd genom omfattande krypprovning och förutsägelser av materialegenskaperna över långa tider underbyggs utifrån teoretisk förståelse av krypprocessen.

Uppnådda resultat

SKB har bedrivit ett antal fosfor- och korngränsstudier vars resultat kortfattat beskrivs i det följande.

- Som underlag till vilka korngränser som bör undersökas med beräkningar, har fördelningen av misorientering (misorientation) i korngränser i Cu-OFP fortsatt kvantifierats med Electron back-scattered diffraction (EBSD) (Hagström 2023) och bekräftat att $\Sigma 9$ -korngränser är vanligare än vad som tidigare visats för koppar.
- Kvantkemiska beräkningar i Lousada och Korzhavyi (2022) visar att de så kallade $\Sigma 9$ -korngränsen (som är vanlig) och $\Sigma 5$ -korngränsen (som har speciella egenskaper) kan fungera som kraftiga sänkor för vakanser och dessa är i sin tur nödvändiga för segregation av fosfor- och svavelatomer till korngränser. Genom att inkludera segregationsenergin även för $\Sigma 9$ -korngränsen erhålls en mer robust beskrivning av tätheten för fosfor i korngränserna (Hagström et al. 2022) än tidigare modellering med färre specifika korngränser angivna, eller med användningen av samma segregationsenergi för alla korngränser. Beräkningar visar att segregeringen till korngränserna av fosfor- och svavelatomer, inklusive par av sådana, skiljer sig åt, såtillvida att svavel segregerar lättare än fosfor och dessutom kan tränga ut fosfor (Lousada och Korzhavyi 2024). Mellan svavelatomer finns attraktiva krafter, medan fosfor oftare uppvisar repulsivt beteende. Vidare har mekanismer för diffusion av fosfor och svavel i koppar studerats (Lousada och Korzhavyi 2025), med slutsatsen att svavel diffunderar fortare än fosfor i själva kopparmatrisen, medan diffusionen troligen skiljer sig mindre åt i korngränserna.
- Stabiliteten hos den fosforinnehållande föreningen $\alpha\text{-Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ har utforskats med kvantkemisk modellering, och föreningen har befunnits vara mekaniskt och termodynamiskt stabil (Yang et al. 2023).
- Fortsatta undersökningar med Auger och Transmission Electron Microscopy (TEM) har gjorts för att lokalisera fosfor i Cu-OFP och hur den är fördelad. Särskilt har krypprovet material undersökts (Sundström och Andersson-Östling 2023) och resultaten stärker hypotesen att fosfor befinner sig i och rör sig mot korngränserna genom diffusion under själva krypprocessen.

Inom områdena kryp och åldring av koppar, segjärn och stål har SKB genomfört ett antal studier som beskrivs kortfattat följande punktsatser.

- Koppars krypbeteende som kryphastighet samt initiering och tillväxt av krypdefekter har undersökts (Pohja et al. 2022, Rantala och Pohja 2023, Andersson et al. 2023, Shang et al. 2023). Krypskador lokaliseras i första hand vid korngränserna, och ökningen av skador följer korngränserna. Forskarna framhåller kornstrukturens inverkan på beteendet och simulerar den lokala krypdeformationen i representativa modeller av strukturen.
- En modell utgående från Avrami-ekvationen har tagits fram för att extrapolera rekristallisation av koppar till slutförvarstider. Vid utebliven rekristallisation förväntas inte heller att koppars materialegenskaper förändras. Modellen uppskattar 10^{-5} % rekristallisation efter 100 000 år vid 175 °C (Sundström et al. 2024).
- Krypprovningen av materialet med förhöjd halt av zink, vismut och tellur (cirka 5 vikt-ppm av varje) har avslutats, men resultaten är inte helt tydliga (Andersson-Östling och Vuoristo 2022). En något lägre kryplivslängd noterades vid högre temperatur (175 °C jämfört med 75 °C), men antalet prover var för litet för att dra några säkra slutsatser om skillnader mellan detta material och koppar med halter inom specifikationen.
- Sammanställningen av det mångåriga arbetet med utveckling av krypmodeller som utförs på KTH, har publicerats i bokform (Sandström 2024). En kortare version finns publicerad i Sandström (2023a). Andra förfiningar av modellerna har avsett till exempel primärkryp (Sandström 2023b), hur empiriska krypdata kan representeras av fundamentala modeller (Sandström 2023c), hur krypduktilitet kan beskrivas både vid sega och spröda brott (Sandström och He 2022) samt hur substrukturer kan modelleras (Sandström 2022).
- Dynamisk deformationsåldring av segjärn och lågkolhaltigt stål beror främst av kvävehalten och är mest påfallande vid 200–300 °C för en töjningshastighet av $0,0001 \text{ s}^{-1}$. En övergående åldring eller avspänning antyds vid långa tider som förmodligen kommer att höja insatsens töjbarhet och seghet (Sarnet 2022, 2024).

- Det noteras dessutom att dynamisk deformationssåldring har föreslagits vid rumstemperatur (Valmalle et al. 2024, Björklund et al. 2024).

SKB har under den gångna Fud-perioden även bedrivit studier som kopplar till väte i koppar samt kopparkluster i järn. Dessa beskrivs i följande punktsatser.

- Absorption och transport av väte i koppar har inom ramen för det kanadensiska programmet studerats med neutronreflektometri och Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) (Situm et al. 2023). Studien visar att metoderna kan användas för att studera kinetisk och kvantitativ transport av små mängder väte genom koppar.
- Vätetransport i olika korngränser har studerats med kvantkemiska beräkningar, där det kunde konstateras att $\Sigma 9$ är en korngränstyp vid vilken diffusion är energetiskt fördelaktig (Lousada och Korzhavyi 2023).
- I en studie från VTT har vätehalt analyserats på material från svetsområdet som krypprovats i sulfidlösning (Ikäläinen et al. 2023b). Utöver att kryphastigheten konstaterades vara högre i sulfidlösning kunde inte några skillnader i vätehalt uppmätas i materialet efter exponering.
- Arbetet med beräkningar av bildning av kopparkluster i järnmaterial under bestrålning har även resulterat i en doktorsavhandling (Yang 2022), från vilken relevanta slutsatser sammanfattats i tidigare Fud-program.

Program

I syfte att förbättra underlaget för analysen av säkerhet efter förslutning fortsätter SKB studierna av fosfors effekt på krypegenskaperna, både experimentellt och teoretiskt. Det finns också planer på fortsatta undersökningar för att studera eventuell inträngning av väte i koppar, och om detta i så fall påverkar materialegenskaperna på något betydelsefullt sätt.

- Fortsatta planer kring fosforanrikning i koppar inkluderar bland annat studier av om diffusion av fosfor kan förklara anrikningen vid deformation och vidare undersöks möjligheten att detektera fosfor i korngränserna med atomsond (Atom Probe Tomography, APT).
- Fortsatta kvantkemiska beräkningar planeras för att undersöka den relativa stabiliteten hos olika atomära defekter i koppars struktur. Detta kopplar också till förståelse för hur vakanser injekteras i koppars struktur vid bildning av en kopparsulfidfilm och hur det samverkar med väte. De kvantkemiska beräkningarna planeras att arbetas in i förfinade kryppmodeller under beaktande av data från analyserna av korngränser.
- SKB planerar att utreda förbättringar för beskrivningen av kryppförlopp och anpassningar av konstitutiva samband efter spänningstillstånd, långsamma tidsförlopp och krypmekanismer.
- SKB planerar att mäta tid till krypbrott för provtillverkad kapselkoppar vid accelererad provning med hög temperatur och höga spänningar. Även inverkan av mindre variationer i kapselkoppars sammansättning, struktur och kornstorlek kan utvärderas vid försöken.
- Även framgent planeras arbetet fortsätta för att bättre säkerställa noggrannheten hos mätningar av väte i koppar.
- Utfällning av ytterligare andra faser, utöver kopparkluster, innehållande föroreningsatomer i material till insatser planeras fortsatt att studeras. Strålningseffekter på stål planeras att undersökas och resultat är tillämpliga för både segjärn och stål. Även studier av strålningens inverkan på fosforlegerad koppar och samverkan med korrosionsprocesser diskuteras inom SKB. SKB ser över behovet att gränssätta och analysera mängden väte i insatsmaterialen.

4.5.3 Konstruktion

SKB kommer fortsätta att utveckla kraven för kapseln och dess ingående komponenter. Arbetet omfattar krav för både tillverkning som hantering av respektive kapselkomponent och kapseln som helhet.

Uppnådda resultat

För kapselns insats pågår utveckling av utformningen och resultat har uppnåtts inom följande områden:

- En specifikation på justerad utformning av nuvarande segjärnsinsats har utvecklats med syfte att möjliggöra ett mer homogent material. Utformningen tillämpar en solid gjuten insats, utan ingjuten stålkassett, där håltagning för bränslepositioner görs efter gjutningen. Beslut om införandet av denna justering har ännu inte tagits.
- En alternativt utformad insats som består av komponenter tillverkade enligt etablerade produktstandards har utvecklats. Den alternativa utformningen består av ett yttre hölje (rör, lock och botten) av stål avsett för tryckbärande anordningar och en inre struktur med plåtar i konstruktionsstål. Inom ramen för utvecklingen har ett omfattande arbete gjorts för att verifiera insatsens konstruktion mot förväntade laster. En analys av den alternativa insatsens funktion i ett slutförvar visar att den har goda förutsättningar att bidra till att uppfylla gällande krav på slutförvarets säkerhet efter förslutning (Hedin et al. 2025). Beslut om införande av denna utformning av insats har ännu inte tagits.
- Stållockets utformning har utvecklats där insatsens funktion säkerställs genom en integrerad grafitpackning och tillämpning av ett skruvförband. Beslut om införande av denna utformning av stållocket har ännu inte tagits.
- För kapselns kopparhölje har utveckling av konstruktionen gjorts inom följande områden:
- Geometrin för svetsfogen mellan rör och lock och botten har förenklats genom att tillämpa en rak och svagt lutande fog (istället för den tidigare utformningen med en klack).
- En preliminär alternativ utformning av kopparhöljet, som baseras på valsad kopparplåt som rundformas till rörhalvor, vilka sedan längssvetsas med friktionsomrörningssvetsning (FSW), har utvecklats. Beslut om införande av denna utformning av kopparhöljet har ännu inte tagits.

Program

För att säkerställa en tillförlitlig framtida industriell produktion av kapseln och dess komponenter fortsätter SKB att utveckla och optimera både tillverkningsmetoder och utformningar. Exempel på planerade aktiviteter ges nedan.

- Översyn av produktkraven för kopparhöljet. I detta planeras kompletterande utredningar kopplat till tillåtna och förväntade hanteringslaster och hanteringsdefekter. Dessutom planeras en analys om den detaljerade kapselutformningen behöver optimeras för att reducera dragspänningar i kopparlocket. SKB planerar även utarbetning av krav på renhet i för kapselns olika delar och hur kravet ska verifieras i produktion.
- Med utgångspunkt från av SSM beslutade villkor för kapslar i SFK (SSM 2024) planeras ett arbete där tolkning och tänkt tillämpning av villkoren fastställs som underlag för vidare utveckling och kvalitetssäkring av kapseln.
- SKB planerar att vidareutveckla detaljutformningen för det alternativt utformade kopparhöljet som baseras på valsad och rullformad kopparplåt som längssvetsas med FSW.
- PWR-bränslet är kortare än det BWR-bränsle som utgör konstruktionsförutsättning för kapselns referensutformning. Med utgångspunkt från detta avser SKB utreda om en kapselutformning som är anpassad till det kortare PWR-bränslet kan bidra till en effektivare produktion.
- Fastställa och besluta om utformningen av den alternativt utformade insatsen som består av komponenter tillverkade enligt etablerade produktstandards.

4.5.4 Tillverkning, kontroll och provning

För att säkerställa att kapseln och dess ingående komponenter kan tillverkas på ett tillförlitligt sätt enligt fastställda krav, är det av stor vikt att ha tillräcklig förståelse om respektive komponents tillverkningsprocess. Utvecklingsarbetet som beskrivs i detta avsnitt syftar till att uppnå detta.

Uppnådda resultat

För tillverkning av kapselns insats har följande utveckling gjorts:

- Inledande tillverkningsförsök har genomförts av den alternativt utformade segjärnsinsatsen bestående av en solid gjuten insats, utan ingjuten stål-kassett. En homogen fullstor insats har gjutits och provning visar på ett gjutgods med goda och homogena egenskaper. Håltagning för bränslepositioner har gjorts genom att genomgående hål borrats i full skala. För att skapa ett fyrkantigt tvärsnitt har helt ny teknik utvecklats, vilken har demonstrerats i nedkortad skala.
- Den alternativt utformade men ännu inte beslutade insatsen som består av komponenter tillverkade enligt etablerade produktstandards har verifierats genom tillverkning i flera steg. Tillverkningen har initialt gjorts genom framtagning av prototyper i varierande skala samt med syfte att få fram materialdata för stål-röret som är den mest kritiska komponenten. För slutlig verifiering har en demonstrationsserie bestående av tre BWR- och tre PWR-insatser tillverkats och kontrollerats enligt en kontrollplan som utarbetats med utgångspunkt från ställda krav. Utöver detta har trycktest, motsvarande de som redovisats för referensutformningen (Nilsson et al. 2005) genomförts som visar på goda marginaler mot kraven enligt isostatlastfallet.
- Inom ramen för demonstration av den alternativt utformade insatsen har även tillverkningen av den nya utformningen av stål-locket och dess täthet demonstrerats.

För tillverkning av kapselns kopparhölje har följande utveckling gjorts:

- Implementerat en optimerad process för extrusion av kopparrör.
- Genomfört tillverkningsförsök med syfte att ta fram underlag för processfönster för processparametrar vid extrusion av kopparrör.
- Utarbetat processkartläggningar som underlag för försöksplanering av processparametrar för extrusion av kopparrör och smide av kopparlock/-botten.
- Initierat tillverkningsförsök med syfte att ta fram underlag för processfönster för temperatur vid smide av kopparlock.
- Genomfört initiala försök för att undersöka om smide kan tillämpas som alternativ tillverkningsmetod för kopparrör.
- Genomfört initial tillverkning av den alternativa utformningen av kopparhöljet, som baseras på valsad kopparplåt som rullformas till rörhalvor, vilka sedan längssvetsats med FSW.
- En svetsprocedur för FSW av botten på rör åt Posiva har kvalificerats på Kapsellaboratoriet.
- Utvecklat och tillverkat nya utrustningar för hantering av kopparkapseln samt gjort initiala tester på Kapsellaboratoriet för att visa att den tillämpade tekniken möjliggör hantering av kapseln utan att skada kopparhöljet.

Inom kontroll och provning av kapseln har följande utveckling gjorts:

- Implementering av provningsteknik för den alternativt utformade insatsen, som består av komponenter tillverkade enligt etablerade produktstandards, med utgångspunkt från tillämpliga provningsstandards.
- Implementerat virvelströmsprovning av kopparlock/-botten samt kopparrörets insida.
- Utvecklat och implementerat en ny manipulator för provning av kopparrör och insatser.
- Implementerat ett system för optisk scanning av kapselkomponenter avseende dimensioner och hanteringsskador.
- Utarbetat förslag på provprogram avseende förstörande provning med syfte att identifiera behov av provning vid kvalificering och produktion av kopparkomponenter.

Program

En utvecklad förståelse av respektive komponents tillverkningsprocess planeras att uppnås genom fortsatta tillverkningsförsök i full skala och processkartläggning av tillverkningskedjan för respektive kapselkomponent. Med utgångspunkt från processkartläggningarna kommer processfönster och detaljerad specifikation för respektive process i tillverkningskedjan att utprovas och fastställas. Detta utgör förutsättningarna för kommande kvalificering av processerna. Utifrån processkartläggningar ska produktions- och mätsystem av betydelse för säkerheten efter förslutning vara utprovade och kvalificerade inför provdrift. Nedan ges exempel på insatser som planeras.

- SKB planerar en detaljering av krav och förutsättningar för kvalificering med utgångspunkt från av SSM beslutade villkor för kapslar i SFK (SSM 2024).
- SKB avser att ta fram datormodeller för simulering av smide av kopparlock och extrusion av kopparrör samt kvalitetssäkra tillverkning för koppargöt för varmformning av kopparrör och kopparlock.
- SKB planerar att utprova och fastställa krav för invändig skyddsgas vid FSW av kopparhöljets botten och lock.
- SKB planerar en utveckling av metoder för kontroll med avseende på hanteringsskador på kapselytan.
- SKB planerar vidareutveckling av metoder för oförstörande provning av kapselns kopparhölje.

4.6 Cementbaserade material

Cementbaserade material förekommer i avfallsmatriser, barriärer och betongkonstruktioner i SFR och planeras att användas i framtida slutförvar för långlivat avfall. Cementbaserade material återfinns även i pluggar, bergförstärkning och injekteringsbruk. I detta avsnitt redovisas forskningsresultat för cementbaserade material för den gångna Fud-perioden samt program för fortsatt forskning och utveckling. Programmet syftar till ökad processförståelse och kunskap om de cementbaserade materialens egenskaper och utveckling över den tidsperiod som analysen av säkerhet efter förslutning avser. Vidare beskrivs den teknikutveckling som behövs för utformning av betongkonstruktioner, material och produktionsmetoder till de olika förvaren.

4.6.1 Processer i cementbaserade material

Cementbaserade material har i flera avseenden en central funktion i upprätthållande av säkerheten efter förslutning och SKB bedriver löpande arbete för att upprätthålla och förstärka förståelsen av de processer som kan påverka utvecklingen av materialens egenskaper över tid. Arbetet kommer att bedrivas i form av både experimentella studier och datorbaserad modellering. Utveckling av beräknings- och modelleringsverktyg utgör en viktig del av forskningsarbetet.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har ett omfattande arbete genomförts för att sammanställa SKB:s kunskap om cementbaserade material och komponenter (däribland barriärer, pluggar, betongkokiller och betongtankar) i SFR:

- Anläggningen och dess cementbaserade komponenter, använda cementtyper och cementbaserade material, processer som kan påverka egenskaperna hos de cementbaserade materialen och de olika komponenternas förväntade egenskaper under de första 100 000 åren efter förslutning beskrivs (Mårtensson 2024).
- SKB har genomfört utvecklingsinsatser för att förbättra förmågan att modellera den hydrokemiska utvecklingen hos cementbaserade material vid förekomst av sprickor. Ett beräkningsverktyg för reaktiv transportmodellering i sprickig porös media har utvecklats. Modelleringsverktyget presenteras i Sampietro et al. (2022a, b) och möjliggör reaktiv transportmodellering med fyra olika ansatser. Dessa innefattar ett sprickigt poröst medium representerat av ett diskret spricknätverk (DFN-modell), en hybridmodell i vilka hydro-geokemiska reaktioner sker i diskreta sprickor och i ett kontinuerligt poröst medium (matris), samt en DFN-modell där matrisen representeras av 1D-element som tillåter beräkning av matrisdiffusion.

- En radionuklidtransportmodell för masstransport mellan förvarssal för historiskt avfall och berg för slutförvarskonceptet för långlivat avfall har utvecklats. Modellen syftar till att förbättra systemförståelsen för masstransport mellan berg och förvarssal och inverkan av till exempel grundvattenflöde på masstransporten. I den framtagna modellen representeras berget av ett diskret spricknätverk och barriärerna i förvarssalen av ett poröst medium (Sampietro et al. 2022c).
- Inom ramen för fältexperimentet Concrete and Clay har SKB dragit slutsatsen att det inte är påkallat att återta och analysera kvarvarande provkroppar innehållande organiskt material. Tillräcklig kunskap anses ha inhämtats från tidigare analyserade prover (Szabó et al. 2020) innehållande organiskt material. Concrete and Clay experimentet installerades åren 2010–2014 i Äspölaboratoriet med mål att skapa förståelse för hur cementbaserade material interagerar med andra material som återfinns i avfall och barriärer i förvar för låg- och medelaktivt avfall.

Program

- SKB planerar att avsluta och avrapportera fältexperimentet Concrete and Clay. Detta omfattar både de provkroppar i vilka metalliskt material gjutits in i betong och bentonitblock innehållande materialprover (cementpasta, låg-pH cementpasta, metallpulver, metallklorid, stål och rostfritt stål). Resultaten från studierna syftar till att öka förståelsen för korrosionsprocesser och dess inverkan på betong över tid samt hur interaktioner mellan cementbaserade material och bentonit påverkar materialens egenskaper.
- SKB avser fortsatt att delta i experimentella forskningsstudier inom projektet SUDOKU inom Eurad-2. Studierna syftar till att öka kunskapen om hur radionuklidtransport i cementbaserade material förändras med tiden, med fokus på inverkan av stålkorrosion och de mest relevanta radionukliderna.
- SKB planerar genomföra modelleringsstudier med syfte att öka förståelsen för olika aspekter av den långsiktiga kemiska utvecklingen efter förslutning i förvarssalarna BRT, 2BMA och 1–2BTF i SFR. Långtidsutvecklingen av gasavledningssystem planeras genomföras för relevanta förvarssalar. SKB planerar även att modellera återmättnad och gasproduktion i silon i SFR. Betongbranschens framtagande av nya betongtyper följs och implikationer för SKB:s verksamhet bevakas.
- SKB planerar att avsluta och avrapportera det pågående experimentet i Äspölaboratoriet avseende långtidsutveckling av återfyllningsmaterial med fokus på förekomst och tillväxt av bakteriellt material samt ansamling av sprickmineral i makadam. Detta omfattar brytning och analys av experimentellt material.

4.6.2 Utformning av betongkonstruktioner och material

Inför utbyggnaden av SFR och uppförandet av SFK genomför SKB ett omfattande utvecklingsarbete kopplat till utformning av betongkonstruktioner och material till de olika förvarerna. Arbetet omfattar för SFR exempelvis utvärdering av betongtankars hållfasthet (BTF, se även avsnitt 4.3), framtagande av produktionsmetoder för kassuner (2BMA) och utveckling av system för gasavledning. Med tiden planeras arbetet att skifta från materialutveckling och utveckling av teknik för uppförande till mer produktionsrelaterat. För SFK planeras till exempel utvecklingsarbete avseende tillämpning av cementbaserade låg-pH-material, alternativt cementbaserade material av standardtyp, för injektering och bergförstärkning som syftar till att säkerställa att materialens lakningsprodukter inte påverkar bentoniten i buffert och återfyllning negativt. Utvecklingsarbetet för SFK omfattar också framtagande av krav och konstruktionsförutsättningar för pluggen i respektive deponeringstunnel.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har följande insatser genomförts:

- Betongtankarnas hållfasthetsegenskaper i BTF har undersökts och resultat avrapporterats, se vidare avsnitt 4.3.3.
- Inverkan av svällande avfall på betongkonstruktionen i 1BMA har undersökts och resultat avrapporterats, se vidare avsnitt 4.3.1.
- Effekten på hydrologiska flöden i SFR vid användning av betongpluggar istället för bentonitpluggar, för försegling av sektioner vid förslutning efter drift, har utvärderats (Sainz-García et al. 2022).

Program

För SFR planeras följande aktiviteter.

- Fördjupad analys av i vilken omfattning laster orsakade av svällande avfall i 1BMA kan påverka befintlig och ny betongkonstruktion.
- Uppdatering av metod för reparation och förstärkning av 1BMA med utgångspunkt i genomfört analysarbete.
- Utveckling av ett gassystem för 1BMA.
- Uppdatering av metod för reparation och förstärkning av 1BMA med utgångspunkt i genomfört analysarbete. SKB planerar även en utveckling av ett gasavledningssystem i 1BMA.
- Ytterligare insatser planeras kopplat till 2BMA med modellering av den långsiktiga kemiska utvecklingen hos de cementbaserade material som är tilltänkta för förslutning av hål från formstag (Mårtensson 2021).
- Utveckling och utvärdering av metod för uppförande av 2BMA kassunernas innerväggar. Verifierande tester av konstruktions- och produktionsteknik för 2BMA. Framtagning av drift- och underhållsprogram för 2BMA. Fortsatta utredningar rörande utformning av gasavledningssystemet i 2BMA, däribland studier om transportegenskaper hos olika typer av material aktuella för användning i gasavledningssystem.

För SFK planeras följande aktiviteter:

- Fortsatt arbeta med specificering av krav och konstruktionsförutsättningar för pluggen till deponeringstunnlarna, med utgångspunkt i uppskattade tunneltvärnsnitt.
- Fortsatt utreda hur användning av cementbaserade material av standardtyp (utan pH-sänkande tillsatsmaterial) vid injektering och bergförstärkning påverkar pH i förvaret och därefter bedöma om krav gällande maximalt djup för användning av dessa material bör revideras.

4.7 Lerbarriärer, pluggar och förslutning

Lerbarriärer används för att minimera vattenflöde och skydda mot korrosion i SFK. Dessa barriärer har låg hydraulisk konduktivitet, vilket innebär att diffusion blir den primära transportmekanismen. Deras funktion innefattar även att hålla kapslarna för använt kärnbränsle på plats och reducera den mikrobiella aktiviteten. I den genomförda säkerhetsvärderingen av ett förvarskoncept för långlivat avfall (SKB TR-19-01) ingår lerbarriärer. Riktade insatser för utvecklingen av de tekniska barriärerna för ett slutförvar för långlivat avfall avvaktar fördjupad kunskap kring inventariet (avsnitt 4.2). Forskningen och utvecklingen som rör lerbarriärerna för SFK kommer dock även framtida utveckling av slutförvaret för långlivat avfall till godo. En detaljerad beskrivning av planer för forskning och utveckling kopplat till SFK finns i ansökan om godkännande av PSAR SFK.

En betydande forskningsinsats som kopplar till lerbarriärerna är Prototypförvaret som har varit ett fullskaleförsök installerat på 450 meters djup i Äspö med kapslar och buffert av liknande referensutformning som i det planerade slutförvaret. En beskrivning av Prototypförvaret ges i avsnitt 4.11.

4.7.1 Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad

I Forsmark förväntas mättnaden av bufferten att ta tusentals år i de flesta deponeringshål i SFK. Detta betyder att kapseln kommer att stå i kontakt med en gasfas under en lång tid. En fråga för kapselkorrosion blir då gasens kemiska sammansättning i den omättade bentoniten. Av särskilt intresse är innehålllet av syrgas (O_2) och svavelväte (H_2S).

Ett hydrauliskt problem under drift är att vatteninflöde genom sprickor i berget kan orsaka kanalbildning och erosion i bentonitbufferten. Om vatteninflödet är snabbare än vad bufferten kan absorbera, byggs ett tryck upp som kan leda till att bufferten eroderas. Detta leder till att bentoniten förlorar material och långsiktigt riskerar att förlora sin skyddande funktion.

När bentonit installeras i deponeringshål kommer den att suga upp vatten från omgivande berg, vilket skapar ett svälltryck som påverkar berget och barriärerna. Denna vattenmättnadsprocess beror på

faktorer som temperatur, bentonitens densitet och den omgivande fuktigheten, och kan ta från några år till tusentals år beroende på vattentillgången i berget. Det finns också en frågeställning om att vatten kan förångas mot kapseln, vilket skulle kunna leda till saltanrikning vid kapselytan.

När vatten tas upp av bentonitbufferten i SFK sväller den och fyller alla spalter, vilket främjar en viss homogenisering. Dock kvarstår en viss inhomogenitet på grund av friktion, och studier undersöker om homogeniseringen är tillräcklig för att bufferten ska behålla sin skyddande funktion på lång sikt.

Uppnådda resultat

- Sandén et al. (2024) presenterar arbete som gjorts med syfte att undersöka hur buffert och återfyllning som installerats under torra förhållande påverkas av naturlig konvektion och därav följande omfördelning av fukt. Testerna utfördes vid väldefinierade förhållanden och har resulterat i samstämmiga datamängder angående temperaturfördelningar, vattenhalt och torrdensitet, och bör därför vara tillämpliga för modellvalidering.
- Uppgift 9 av SKB:s Task Force on Engineered Barrier Systems (Task Force EBS) (Gens et al. 2023) ägnades åt numerisk analys av FEBEX in situ experiment, ett fullskaligt värmetest utfört på Grimsel Test Site i Schweiz. Målen är att förbättra förståelsen för Termo-hydrauliska-mekaniska (THM)-beteendet under den transienta fasen, en detaljerad beskrivning av utvecklingen av barriärens tillstånd, och validering och förbättring av den numeriska förmågan hos de deltagande modelleringsteamerna.
- En beräkningsuppgift, benämnd Vattentransport i pelletsfyllda spalter, har utförts inom samarbetsprojektet Task Force EBS. Målet med denna var att undersöka olika materialmodellers förmåga att simulera vattentransport under olika testförhållanden. Åkesson (2023) innehåller en utvärdering av deluppgift B, vilken inriktades mot en testtyp med konstant inflödeshastighet från en inflödespunkt. Fyra olika modelleringsgrupper deltog i uppgiften. Kristensson et al. (2022) beskriver arbete utfört inom denna uppgift med att utveckla en modell där vattenflöde i pelletsfyllda spalter kan representeras. Det fall som studerats är när vatten tillsätts som ett konstant punktinflöde. I modellen kan kanalbildning ske och olika vattenupptagstransportmönster bildas vid olika inflödeshastigheter, vilket också har observerats i experiment.
- I Malmberg och Åkesson (2022) har det hydrauliska tillståndet (vattenmättnad/vattenkvot) i bufferten i Prototypförvaret vid den förväntade tiden för brytning analyserats med hjälp av fullt kopplade termiska och hydrauliska modeller. Simuleringarna har genomförts med den finita elementlösaren CODE_BRIGTH. Modeller av utvecklingen i tre separata deponeringshåll har genomförts: en kalibreringsmodell av deponeringshåll 6 i den yttre delen och två modeller av deponeringshåll i den inre sektionen (deponeringshåll 3 och 4) vilka var blinda prediktioner av tillståndet vid brytning.
- Åkesson (2022) redovisar en uppskattning av bufferthomogeniseringens omfattning i Prototypförvaret. Två typer av modeller har analyserats: i) 1D axisymmetriska modeller med snabb eller långsam bevätning, samt med eller utan en termisk gradient. Dessa modeller tar i tu med frågeställningen om bevätningshastigheten och hur denna påverkar den kvarvarande heterogenitet vid full vattenmättnad; och ii) 2D modeller med en cirkulär geometri. Dessa används för att analysera frågeställningen om horisontella kapselrörelser som orsakas av en ojämn bevätning av bufferten.
- För att få en bättre förståelse för hur bufferten beter sig vid högre vatteninflöden under installationsfasen har två fullskaletest utförts med vatteninflöden på 0,01 l/min och 0,1 l/min (Hermansson et al. 2024). Baserat på resultaten från testerna har tillgängliga tider för buffertinstallation vid olika vatteninflöden uppskattats. Som exempel indikerar resultaten att bufferten kan lämnas oskyddad utan återfyllning under cirka 60 dagar vid inflödet 0,001 l/min, cirka 22 dagar vid inflödet 0,01 l/min och 8 dagar vid 0,1 l/min.
- Sandén et al. (2025a) beskriver vattenupptagsförsök som genomförts i en simulerad deponeringstunnel med förenklad cylindergeometri fylld med kompakterade block och pellets. Två försök har genomförts, ett där ett högt vattentryck lades på från start och ett med ett lågt konstant inflöde. Testerna kördes under maximalt 200 dagar. En omfattande provtagning av bentoniten gjordes i samband med brytningen av försöken för att bestämma vatteninnehåll och densitetsfördelning.

- Sandén et al. (2025b) beskriver kanalbildnings/erosionsförsök som genomförs i en utrustning i skala 1:10, i vilken både bufferten i ett deponeringshåll och återfyllningen i motsvarande två tunnelsektioner representeras. Mängden eroderat material i utflödande vatten mättes under försökens gång, medan densitetsfördelningar i buffert och återfyllning mättes efter försökens avslutning. Två försök med olika flödeshastigheter och försöksperioder har genomförts.
- I Kristensson (2023) beskrivs den Hysteresbaserade materialmodellen (HBM). Rapporten ger en beskrivning av formuleringen och implementationen i beräkningsverktyget Comsol. Några delar av modellen är beskrivna i detalj; massbalanser, totalspänning, lerpotentialfunktioner, evolutionsekvationerna av den vägberoende variabeln och evolutionsekvationen för mikroportalet. I Åkesson et al. (2023) undersöks modellens validitet genom att analysera nio experimentella testförhållanden med en enda uppsättning parametervärden. Modellresultat jämfördes med experimentella data för både mättade förhållanden och för omättade förhållanden. Dessa jämförelser gav en bred demonstration av modellens prediktiva förmåga.
- Pintado (2022) presenterar en simulering av buffertuppsvällning som en funktion av återfyllningens styvhet, vattentillförsel, buffertblockens torrdensitet och väggfriktion vid gränssytan mellan buffert och berg. Simuleringar utfördes under isotermiska förhållanden och endast buffertkomponenterna (block och pellets) beaktades. Resultaten visar att återfyllningens styvhet och blockens torrdensitet hade en stor inverkan på buffertens uppsvällning. Kristensson (2022) undersöker också buffertuppsvällning och redovisar en numerisk undersökning av hur bufferten i en förenklad isoterm uppställning beter sig hydrauliskt och mekaniskt. Det undersökta fallet kan ses som extremt, eftersom tunnelåterfyllningen antas vara torr under det att bufferten i deponeringshålet tar upp vatten. Modellerna tar hänsyn till friktion mellan bufferten och deponeringshållsväggen.
- Pintado et al. (2022) innehåller mätningar av vattenretentionskurvan för två olika bentoniter, Georgisk och Wyoming (USA). Vattenretentionskurvan mättes med burkmetoden, där ett torrt eller vått pulverprov placerades i en burk med olika mättade saltlösningar som kontrollerade den relativa fuktighetsnivån. Vattenretentionskurvan mättes under torkning eller vätning. Resultaten visar effekten av hysteres. Bentonit hade en högre vattenretentionsförmåga under torkning än under vätning.

Program

SKB planerar följande aktiviteter kopplat till bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till förslutning med syftet att förbättra underlaget för säkerhet efter förslutning.

- Det experimentella programmet med gasbildningsförsök planeras fortsätta. Syftet är att få en bättre förståelse och mer data för hur de viktigaste förhållandena som temperatur, vattenkvot, tillgång till pyrit (och möjligtvis andra svavelmineral) samt tillgång till kopparytor påverkar syrekonsumtion och bildning av svavelväte.
- Skalförsök med piping och erosion pågår och planeras att slutrapporteras under Fud-perioden.
- Den konceptuella beskrivningen och de modelleringsverktyg som används för vattenupptagsprediktioner planeras att uppdateras, dels beträffande bergets hydrauliska egenskaper, dels för att kunna representera kanalbildning i bentoniten.
- Vattenupptagsmodelleringar i samband med utvärderingen av Prototypförvaret. Dessa arbeten syftar till att utveckla och validera de modelleringsverktyg som används för vattenupptagsprediktioner genom att tillämpa verktygen på olika experiment.
- Fortsatta studier av fuktomfördelning från buffert till återfyllning för att öka förståelsen för den naturliga konvektionens bidrag till fuktomfördelningen från varma till kalla delar av bentoniten i buffert och återfyllning. Arbetet innefattar i första hand modellvalidering.
- Implementera HBM i Comsol, utveckla och generalisera denna samt testa hur väl materialmodellen presterar vid jämförelse mot experimentella mätdata. Detta arbete kommer att fortsätta bland annat inom ramen för Eurad-2.

- Arbete med långsiktig stabilitet beträffande krypning, hysteres och friktion. Detta syftar till att öka förståelsen för de hydromekaniska processerna i bentonit under långa tidsperioder. Arbetet planeras innefatta såväl laboratorietester som modellering och teoretiska studier.
- Analys av resultat från Prototypförvaret avseende på buffertens uppsvällning upp i återfyllningen och buffertens homogenisering. Syftet är att bidra till att validera materialmodellen för bentonit, i synnerhet beträffande de hydromekaniska processerna.

4.7.2 Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad

Sulfid i porvattnet kan orsaka korrosion på kopparkapseln, och dess transport i bentoniten beror på sulfidkoncentrationer som påverkas av mikrobiell aktivitet. Denna aktivitet begränsas av bentonitens svälltryck och torrdensitet, men varför olika bentonitmaterial har varierande sulfidproduktionsgränser är oklart; hög järnhalt verkar hämma sulfidproduktionen, men orsaken är ännu inte förstådd.

När bentonitbufferten i SFK tar upp vatten sväller den och utvecklar ett tryck mot deponeringshålets väggar. Om sprickor finns kan bentoniten svälla in i dessa, vilket kan leda till att montmorillonitskikt separeras och en del av bufferten transporteras bort via grundvattnet, särskilt vid låga salthalter och närvaron av envärda joner. Denna kolloidala erosion kan innebära en risk för betydande massförlust, och i vissa deponeringshål kan flödesförhållandena bli advektiva, vilket ökar osäkerheten kring långsiktig stabilitet.

Bentonit används som barriärmaterial i SFK på grund av sin långsiktiga stabilitet, men dess stabilitet påverkas av faktorer som temperatur, kaliumhalt och pH. Efter deponeringen orsakar kapselns värmeutveckling en termisk gradient i bufferten, och dess sugförmåga skapar en hydraulisk gradient, vilket påverkar ämnesfördelningen i bentonitens porvatten. För att säkerställa buffertens säkerhetsfunktioner långsiktigt har den kemiska utvecklingen i bufferten studerats, särskilt med avseende på temperatur, redoxförhållanden och transport av ämnen som kalium och sulfat.

Uppnådda resultat

- I Cabrera et al. (2023) användes flera 3D-reaktiva transportmodeller av deponeringshål 1 av Prototypförvaret för att studera omfattningen av de katjonutbytesreaktioner som förväntas ske i bufferten. Syftet var att bedöma om omfattningen jonbytet skulle kunna användas som ett mått på utbytet av lösta ämnen mellan grundvatten och bentonitbufferten. Slutsatsen var att detta skulle kunna vara en möjlighet och ett mer omfattande analysprogram för jonbyte i Prototypförvaret har därför initierats.
- Inverkan av jonbyte, olika spänningsvägar och uttorkning på den enaxliga tryckhållfastheten har studerats i Dueck et al. (2022). Olika typer av bentonit har använts för de olika försöksserierna. Huvuddelen av proverna har varit vattenmättade vid det enaxliga tryckförsöket men även en serie med omättade uttorkade prover har ingått i studien.
- En stor mängd experimentella studier av sulfatreduktion i bentonit har genomförts och finns rapporterade i Pedersen et al. (2025). Syftet har både varit att ta fram data för olika bentoniter och att ta fram en effektiv och pålitlig metod.
- Leal et al. (2024) rapporterar om ett pilotprogram för att undersöka flockuleringsfenomen i olika leror, för att förstå sedimentationshastigheter och skillnaden mellan olika lerors beteende i utspädda vatten i ett KBS-3-förvar.
- Den nya modellen för erosion (Pont 2023) beskriver skjuvmotstånd i segregerad gel som en kantkraft och ger en tillförlitlig förutsägelse av bentonitens erosion och expansion i olika scenarier, även om det finns förbättringspotential gällande friktions- och sedimentationsmodellering för mycket smala sprickor. Resultaten visar också en tydlig korrelation mellan erosionstakten och flödeshastighet samt spricköppning, men den förväntade påverkan av natriumkoncentration behöver ytterligare modellering för att ge möjlighet till en bättre bedömning.
- I Alexander et al. (2024) slutrapporteras en naturlig analogi för långtidsstabiliteten hos bentonit. Studien visar att de smektitrika naturliga lerorna i Kiirunavaara har överlevt mycket längre än vad som krävs för industriella bentoniter i ett slutförvar och fungerar som utmärkta analoger för sådana material i buffertar, återfyllning och förslutning.

- ABM5-experimentet pågick från 2012 till 2017. ABM5 representerar extrema förhållanden för ett kärnbränsleförvar, eftersom det är en av de hetaste bentonittesterna (upp till 250 °C) som hittills genomförts i ett underjordiskt forskningslaboratorium. Prover från ABM5 har studerats ingående och resultaten finns presenterade i Kaufhold et al. (2021), Sudheer et al. (2021), Fernández et al. (2022) och Svensson et al. (2023a). De generella slutsatserna från samtliga analyser är att det har skett ett omfattande jonbyte och en relativt stor omfördelning av lösliga mineral såsom sulfater och karbonater. Ingen studie kunde dock detektera någon som helst förändring i montmorillonitmineralet. Detta trots att temperaturen varit upp till 250 °C.
- Studierna av materialet från LOT S2 och A3 (Svensson et al. 2024) visade inte heller någon förändring i montmorilloniten. Även här kunde dock en omfördelning av kalciumsulfater observeras. Förändringarna i de hydromekaniska egenskaperna var mycket små.

Program

SKB planerar följande aktiviteter kopplat till bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad med syftet att förbättra underlaget för säkerhet efter förslutning.

- Undersökningar för att experimentellt visa hur gränsen för mikrobers överlevnad beror av buffertens densitet eller svälltryck planeras fortsätta. Slutmålet med verksamheten är dels att fastställa en tydlig buffertdensitet över vilken mikrobiell sulfatreduktion kan undvikas, dels att ta fram en unik konstruktionsföresättning, i form av lägsta densitet eller svälltryck, för de material som kan tänkas användas i förvaret.
- Den modell som presenterades i Pont (2023) kommer fortsatt att utvecklas fram till SAR SFK inför provdrift, med fokus på att optimera modellen numeriskt, validera modellen gentemot laboratorieexperiment, samt att inkludera flockbildning och transport av flockulerade partiklar.
- Det experimentella programmet för att undersöka kolloidfrigörelse/erosion planeras fortsätta. Avsikten är att ta fram data och resultat som kan stödja modellutveckling och modelltestning.
- Analysen av den inre sektionen av Prototypförvaret pågår efter brytningen. Ett av syftena är att bekräfta stabiliteten hos montmorilloniten. Ett annat syfte är att studera den kemiska utvecklingen, upplösning/utfällning av accessoriska mineral, eventuell omfördelning av anjoner, och redoxförhållanden. Även analys av kvarvarande fältförsök i Äspölaboratoriet (LOT S3 och de återstående tre ABM-paketen) planeras att genomföras.
- Experiment i olika skalor kommer att genomföras för att undersöka olika bentoniters kemiska reaktivitet mot metallisk koppar och att för att öka kunskapsläget om de eventuella korrosionsprodukter som bildas.
- Fortsatt utveckling av THC-modell för att bättre kunna beskriva bentonit-cementinteraktion, retrogradupplösning av mineral och omfördelning av anjoner under den omättade perioden planeras. Modellen planeras att testas mot data från Prototypförvaret och inom Task Force EBS.
- En genomgång och syntes av det material som finns tillgängligt rörande strålningspåverkan på bentonit kommer att genomföras.

4.7.3 Utformning av barriärer samt tillverkning, kontroll och provning

Lerbarriärernas utformning kopplar främst till enskilda komponenters geometrier och materialegenskaper. Centrala utgångspunkter för komponenternas utformning är dels kraven från säkerhet efter förslutning dels krav som är relaterade till teknisk genomförbarhet. Väl specificerade designparametrar är grunden för en tillverkning som kan åstadkomma slutförvarets önskade initialtillstånd samtidigt som den tekniska genomförbarheten blir god. Kontroll och provning genomförs för att säkerställa att ställda krav uppfylls.

SKB planerar att vidareutveckla utformningen, tillverkning samt kontroll och provning i linje med det som anges i ansökan om godkännande av PSAR SFK. Förutom att referensutformningen vidareutvecklas arbetar SKB med att utveckla alternativa utformningar, exempelvis att återfylla deponeringstunnlar med granulär återfyllning istället för referensutformningens block och pellets.

Uppnådda resultat

- Segmenterad buffert har testats i fullskala vid olika vatteninflöden (Hermansson et al. 2024) som underlag för att bestämma gränser för hur lång tid installationen av buffert kan ta vid olika vatteninflöden i deponeringshålet.
- Möjligheten att använda extruderade istället för rullkompakterade pellets i bufferten har utvärderats (Hermansson et al. 2024) med resultatet att det endast är små skillnader i deras beteende.
- Utvecklingsinsatser har lett till en uppdatering av buffertens dimensioner inklusive krav och toleranser.
- SKB har tagit fram ett kriterium för tiden till att återfyllning behöver vara installerad ovanför deponeringshål för att inte bufferten ska svälla upp otillåtet mycket. Utifrån detta har en gräns mellan vad som räknas som vått respektive torrt deponeringshål fastställts.
- SKB har tagit fram en uppdaterad konstruktionsföresättning för återfyllningsblocken utifrån krav på tunneldimensioner och återfyllningens styvhet.

Program

- SKB planerar en uppdatering av kartläggningarna av processtegen som ingår i produktionen av buffert och återfyllning.
- SKB planerar försök för hantering av bufferten i ett återtag av kapsel från deponeringshål efter deponering.
- Fortsatt arbete planeras med alternativa utformningen granulerad återfyllning.

4.7.4 Installation av buffert och återfyllning

Till tekniska system för deponering hör till exempel deponeringsmaskin, återfyllningsrobot och transportsystem för buffert och återfyllningskomponenter. Prototyper och principlösningar för deponeringsarbetet finns framme. Deponeringsprocessen avses bli automatiserad och för att styra och övervaka ett sådant system pågår utveckling av ett överordnat styrsystem. Vidareutveckling av maskiner kommer att fortsätta och utrustningarna behöver anpassas för segmenterade buffertblock.

Uppnådda resultat

- SKB har utvecklat ett nytt lyftverktyg för buffert.

Program

- SKB avser att se över hela deponeringssekvensens inklusive torra och våta hål.
- SKB planerar att ytterligare studera inflödande vattens påverkan på installation av återfyllning. Vid behov utvecklas vattenhanteringen vidare utifrån från de föreslagna metoderna (Sandén et al. 2018). SKB planerar även arbete med utformning av plugg för deponeringstunnlar som kan användas vid eventuella händelser som leder till större avbrott i installationen. Pluggens syfte är att skapa mothåll för att säkerställa den redan installerade återfyllningens densitet.
- SKB planerar att specificera krav på hur lermaterial som inte fullt ut uppfyller kraven i någon del av produktionslinjen ska hanteras och möjligtvis omarbetas för att kunna föras tillbaka till produktionslinjen.
- SKB planerar ta fram krav samt utveckla och testa en prototyp för buffertnedläggningskarossen.

4.7.5 Förslutning av borrhål och förvar

Förslutningen av SFK beskrivs i SKB:s ansökan om godkännande av PSAR SFK. SKB arbetar vidare med att uppdatera förslutningsplanen och kraven för att uppnå en effektiv förslutning. Förslutningskonceptet utvärderas bland annat med avseende på en granulär förslutning istället för med block och pellets i de bergutrymmen som försluts med bentonit.

SKB har bedrivit arbete med metoden för borrhålsförslutning. Ytterligare utveckling kommer att ske i syfte att förenkla installationen och göra möjligt att installera även i flacka och horisontella borrhål.

Uppnådda resultat

- En metod för borrhålsförslutning har tagits fram.

Program

- SKB avser att optimera utformningen av borrhålsförslutningen med dess olika komponenter.
- SKB planerar att vidare optimera konceptet förslutning av bergutrymmen. Exempelvis genom att utvärdera användning av granulär återfyllning eller möjligheterna till att i bentoniten blanda in bergkross från bergmassor som tagits ut vid uppförandet.
- SKB planerar utveckling av en metod för att uppskatta läckaget av vatten genom valvpluggen efter dess installation för att bekräfta bibehållen förmåga att begränsa läckage.

4.8 Berg

Berggrundens viktigaste funktion i slutförvaren är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden samt att vattenflödet är lågt i och i anslutning till förvaren över den tid som avfallet behöver isoleras från människor och miljön. SKB har genom forskning och undersökningar skapat sig en god kunskap om de processer som påverkar de mekaniska, kemiska och hydrogeologiska förhållandena i berggrunden i Forsmark. Framöver behöver bergutrymmena utformas på ett sådant sätt att de långsiktiga förhållandena inte äventyras. En stor del av de forsknings- och teknikutvecklingsfrågor som rör berget och slutförvarens bergutrymmen är gemensamma för alla slutförvar.

Den teknikutveckling inom bergområdet som behövdes för SFK som underlag till ansökan om godkännande av PSAR är genomförd. Ytterligare metodutveckling inför SAR bedöms kunna leda till mer effektiva urvalskriterier för deponeringshål, vilket medför att färre hål behöver väljas bort.

4.8.1 Geomekanisk karakterisering och modellering

Geomekanisk karakterisering och modellering av bergets egenskaper och beteende handlar om att kvantifiera in situ-bergspänningar, spänningsförändringar, deformationer och bergbrott samt att fastställa dessa faktors effekt på bergets stabilitet och på vattenflöde. Bergets långsiktiga utveckling påverkas av olika processer såsom exempelvis av uppförande av slutförvar, termisk last, glaciation och jordskalv. Den geomekaniska karakteriseringen genomförs med matematisk modellering och fält- och laboratoriestudier.

Kunskap om det aktuella bergspänningsfältet i Forsmark och dess utveckling är betydelsefull för utformningen av SFK och analysen av säkerhet efter förslutning. Det rådande spänningsfältet bestämmer stabiliteten i deformationszoner och sprickor, och det kommer också att styra stabiliteten i berget runt tunnlar och schakt vid förvarets utbyggnad. Bergspänningarna påverkar bergskadezonen, det vill säga Excavation Damage Zone (EDZ) som utvecklas under utbyggnaden av förvaret (Hakami et al. 2022). Även eventuell spjälkning under utbyggnad och drift av förvaret påverkas av det aktuella spänningsfältet. Grundvattenflödet i berget, inklusive dess anisotropi och djupberoende påverkas också av spänningsfältet.

Bergmassan består av intakt berg som genomkorsas av diskontinuiteter såsom deformationszoner, gångar, sprickor, defekter och korngränser. Kopplade modeller av bergmassan förutsätter att dess mekaniska egenskaper kan beskrivas på ett korrekt sätt med hänsyn till de inneboende diskontinuiteterna i olika skalor. Empiriska metoder för karakterisering av de mekaniska egenskaperna lämpar sig inte för att analysera det långsiktiga beteendet, där kopplade termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer (THMC) samt anisotropi och skalberoende spelar roll. Bergmassans egenskaper är betydelsefulla för bergets barriärfunktion. De mekaniska och hydromekaniska egenskaperna i intakt berg, sprickor, bergmassan och deformationszoner används som indata till analyser av stabilitet och deformation kopplade till olika mekaniska (M), hydromekaniska (HM) och termo-hydromekaniska (THM) processer som exempelvis spjälkning, glaciation, grundvattenflöde och jordskalv. Den senaste modelleringsmetodiken för DFN (Selroos et al. 2022), beaktar hydromekanisk koppling av flöde och transport i det diskreta spricknätverket. Metodiken utgår från ett gemensamt DFN-baserat ramverk för uppskattning av relevanta geologiska, geomekaniska och hydrogeologiska egenskaper samt transportegenskaper. Det bygger på kunskap om de grundläggande hydromekaniska processerna (Hakami et al. 2022) och transportprocesserna i sprickskala.

Dessutom kan rörelser i bergmassan som orsakas av termisk, seismisk eller glacial belastning leda till att bergets spricknätverk och sprickors egenskaper förändras. Det omfattar till exempel spjälkning, utveckling av bergskadezon samt sprickbildning, sprickdeformation, spricktillväxt, sprickkorsning och sprickavslutning.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har ett antal studier som rör processer kopplade till geomekanik genomförts:

- En uppdaterad bergspänningsmodell i 3D (Valli et al. 2023) baserad på den senaste modellen av Deterministiskt modellerade strukturer (DMS) (Hultgren och Petersson 2022). FLAC3D (Itasca 2022) har använts som simuleringsverktyg och hänsyn har tagits till resultat av en jämförelse mellan resultaten från 3DEC (Itasca 2020) och FLAC3D.
- En standardiserad metod för kvalitetskontroll och klassning av nya och befintliga spänningsmätningar har utvecklats (Sjöberg et al. 2025).
- En tensorbaserad probabilistisk metod för analys av spänningsmätningsdata och dess variabilitet har vidareutvecklats i ett doktorandprojekt vid University of Toronto tillsammans med NWMO (Javaid et al. 2023, 2024a, 2024b).
- Det DFN-baserade ramverket för uppskattning av bergmassans egenskaper vidareutvecklas för att inkludera uppskattning av bergmassans hållfasthet (Lavoine et al. 2023) och dess hydromekaniska egenskaper. Ramverket inkluderar nu möjligheten att beräkna ekvivalent riktad hydraulisk konduktivitet för bergmassor och dess beroende av spänningsfältet (Darcel et al. 2024). Som en del i det arbetet har även en metodik för att förutsäga de så kallade Biot- och Skemptonkoefficienterna för en sprucken bergmassa utvecklats (De Simone et al. 2023, 2024).
- Post-projektet (Sirén et al. 2017) har fortsatt i samarbete mellan NWMO och SKB. Fokus har legat på laboratorietester med sprickprover av olika storlekar och med lastvillkoren Constant Normal Stiffness (CNS) eller Constant Normal Load (CNL) (Larsson et al. 2023a, b, Jacobsson et al. 2024, Pérez Rey et al. 2024).
- Modellering av enstaka sprickor med aperturvariabilitet under beaktande av bergspänningseffekter har vidareutvecklats (Zou et al. 2024).
- Partikelbaserade numeriska metoder för simulering av spjälkning i 3D har vidareutvecklats (Potyondy och Fu 2024, Potyondy 2024 och Potyondy et al. 2024). En sprickmekanikbaserad numerisk teknik för spjälkningsmodellering har utvecklats i ett doktorandprojekt vid Imperial College (se Saceanu et al. 2023, 2024 samt Saceanu 2023). Resultat från ytterligare en studie av termomekanisk spjälkning baserad på numerisk sprickmekanisk simulering presenteras i Lisjak et al. (2023). Forskning om tillämpbarheten av kontinuumbaserade metoder för simulering av EDZ och spjälkning har utförts (Gómez 2024).
- Doolaeghe et al. (2023) har redovisat resultaten från en studie om vilka kopplade processer som styr spricköppning och reaktivering av sprickor i Forsmark.
- En studie för att jämföra simuleringar med FLAC3D och 3DEC av mekaniska, termomekaniska och seismiska processer liknande de som användes i SR-Site har genomförts (Fälth 2023).

Program

Forskningen som planeras inom området geomekanisk karakterisering och modellering sammanfattas i följande punkter:

- SKB planerar fortsatt arbete kopplat till olika aspekter av bergspänningar. Detta innefattar exempelvis planer på mätningar med olika metoder under uppförandefasen samt förnyad värdering av befintliga och nya data. Även modelleringsinsatser kopplade till nya data och spänningsfältets långsiktiga utveckling planeras liksom modellutveckling i samarbete med NWMO och University of Toronto.
- Fortsatt utveckling kopplat till karakterisering av bergmassans mekaniska och hydromekaniska egenskaper planeras. Exempelvis för att kunna förutsäga sprickors mekaniska beteende baserat på data från fältkarakteriseringskampanjer, eller hur sambanden mellan mekanisk sprickapertur och transmissivitet påverkas av spänningsfältets förändring.

- Ytterligare insatser planeras kopplat till spjälkning och EDZ vilket kan innefatta modellering och metodikutveckling.
- Metodiken för förenklad och geomekaniskt baserad DFN-generering, så kallade genetiska sprickor, planeras förfinas. Utgångspunkter är jämförelser mellan spricknätverk baserade på fältdata och DFN-realiseringar baserade på förenklade geomekaniska regler samt sprickmekanikbaserade metoder.
- Den pågående studien om sambandet mellan bergspänning och berggrundssprickning fortsätter genom doktorandprojektet vid universitet i Rennes i Frankrike.

4.8.2 Geometrisk modellering av diskreta spricknätverk

Sprickor i bergmassan utgör mekaniska svaghetsplan samt transportvägar för vatten och lösta ämnen. Att ha en god bild av hur sprickorna uppträder och interagerar med varandra i bergmassan är därmed nödvändigt för att kunna göra trovärdiga modeller för geomekaniska, hydrogeologiska, hydrogeokemiska och transportrelaterade frågor. SKB har, som en av flera konceptuella modeller, valt att betrakta bergmassan som ett medium genomkorsat av diskreta sprickor. Detta då konceptet är väl lämpat för att spegla uppmätta egenskaper för både geomekanik, hydrogeologi, hydrogeokemi och transport av lösta ämnen. Sprickegenskaper kan således ansättas utifrån behov från olika avnämare och vilken problemställning som är aktuell att lösa. Detta avsnitt avhandlar endast det geometriska ramverket medan appliceringen av konceptet redovisas i respektive avsnitt, se avsnitt 4.8.1 för geomekanik och 4.8.4 för hydrogeologi.

Diskreta sprickor modelleras oftast som plana ytor med olika egenskaper, såsom friktion, kohesion, apertur, transmissivitet, magasin kapacitet med mera, ansatta som parametrar. Dessa parametrar kan vara konstanta över sprickplanet eller variera med läget på ytan. Parametervariation kan ansättas enligt olika geostatistiska samband, eller genom att direkt utgå från sprickytans geometri, vilken genererar områden med större och mindre apertur samt kontaktyta. Sprickytans geometri, tillsammans med omgivande förhållande, exempelvis spänning och bergart, har således en direkt påverkan på beskrivningen av sprickans egenskaper.

Sammanlänkning av sprickor har betydelse för rörelse, flöde och ämnestransport. Historiskt har sprickors storlek oftast modellerats utifrån en förutbestämd fördelning. Alternativt kan olika angreppssätt tillämpas, såsom att en termineringsfrekvens ansätts, sprickpropagering och interaktion explicit modelleras, eller att sprickor utvecklas från frön vilka stannar i tillväxt utifrån ett regelverk, så kallade genetiska sprickor. Det senare angreppssättet är en enkel och effektiv metod för att generera stora spricknätverk som mer efterliknar mätta data än en förutbestämd storleksfördelning. Dock ger de nuvarande enkla regelbaserade algoritmerna olika resultat på flödesmönstret beroende på implementering.

Genom att betinga sprickor mot uppmätta sprickspår och inflöden ökar determinismen i spricknätverket. Den ökade determinismen medför att utfallsrummet minskar för hur flöde och transport kan ske i närzonen runt kapselpositioner, samt hur hållfasthet och stabilitet i deponeringshål och -tunnlar påverkas.

Sprickors existens och utbredning är ett utslag av materialegenskaper och historiska händelser, medan sprickornas nutida egenskaper i stort styrs av rådande förhållanden. Idag uppskattas egenskaperna från mätta data i borrhål och på hållar. Utifrån dessa data delas berget in i volymer som är statistiskt likartade, det vill säga sprickmodellerna är datadrivna. För att möjliggöra spatial eller temporal extrapolering av modeller behövs en konceptuell förståelse av samband mellan olika uppskattningsbara influensparametrar och sprickors existens och egenskaper.

Uppnådda resultat

Under den gångna Fud-perioden har bland annat följande studier genomförts för geometrisk spricknätverksmodellering:

- Hartley et al. (2024) har prövat delar av DFN-metodiken i Selroos et al. (2022).
- Stock och Frampton (2022, 2025) har utvärderat spricktytor och aperturer från Post-projektet och utvecklat metoder för att skapa syntetiska sprickor med liknande egenskaper.

- Libby et al. (2023) har studerat hur den ökade sammanlänkingsgraden, som uppstår med FracMans implementering av genetiska sprickor, påverkar det mekaniska beteendet och flödesegenskaperna i bergmassan.
- Inom ramen för Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (Task Force GWFTS) fortgår arbetet med att studera möjligheten att pragmatiskt validera sprickgeometrier utifrån skannade spricktytor samt flödes- och transportexperiment.
- Imperial College har utfört en förstudie om hur genetiska bränslesprickor interagerar, vilket kan ligga till grund för bättre utveckling av genetiska sprickmodeller.
- Bym och Hartley (2024) har redovisat implementeringen av betingade sprickor i programvaran FracMan.
- Itasca utvecklar programvaran dfn.lab för betingning av sprickor utifrån geometri och flödesdata.

Program

SKB planerar att under Fud-perioden fortsätta att utveckla geometrisk diskret spricknätverksmodellering inom följande forskningslinjer:

- Utveckla hur sprickytors geometri påverkar mekanik, flöde och transport i sprickigt berg.
- Utveckla det förenklade regelbaserade systemet för genetiska sprickors tillväxt och avstannande.
- Utveckla metoder för att betinga sprickor mot uppmätta data längs linjer och på ytor.
- Utveckla kunskapen om vilka influensparametrar som styr sprickigheten.

4.8.3 Seismisk påverkan på förvarens säkerhet

Den forskning om seismisk påverkan som bedrivs av SKB kan delas in i de delvis överlappande disciplinerna paleoseismologi, instrumentering och modellering. Forskningen ger förbättrat underlag för uppskattning av den seismiska risken och modellering av dess effekter på slutförvar. Syftet är att säkerställa att effekterna inte underskattas och att kunna utreda möjligheten till ett effektivare nyttjande av förvarsvolymen.

Jordskalv i SFK:s närområde skulle kunna orsaka skjuvrörelser längs sprickor som skär kapselpositioner. Om skalven är tillräckligt stora och sker tillräckligt nära förvaret, induceras sekundära skjuvrörelser. Dessa kan, om de sker längs ofördelaktigt belägna och orienterade sprickor, utsätta kapseln för skjuvlaster som kan påverka kapselns integritet.

Sambandet mellan jordskalvens frekvens och magnitud samt dess variabilitet under en glaciationscykel är behäftat med osäkerheter. SKB studerar fortsatt paleoseismiska händelser och mätta data från skalv för att minska osäkerheterna i jordskalvsprognoserna och för att öka förståelsen kring de mekanismer som driver glacialt inducerade jordskalv. Forskning kring jordskalvsfrekvens kopplar främst till säkerhetsanalysen för SFK, men kan även få betydelse för SFR och slutförvaring av långlivat avfall.

Metodiken för modellering av sekundära rörelser har utvecklats under lång tid (Fälth och Hökmark 2006, Fälth et al. 2007, 2008) och har efter omfattande tester (Fälth et al. 2014) och fallstudier (Fälth et al. 2016, 2017, Fälth 2018) nått en hög mognadsgrad (Hökmark et al. 2019). Det kan dock finnas möjligheter att ytterligare utveckla modelleringsmetodiken för att underbygga mindre försiktiga antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning för SFK.

Inga nya undersökningar kring jordskalvseffekter på SFR planeras under Fud-perioden. Dock kommer det lokala seismiska nätet i Forsmark även registrera seismiska händelser i SFR-området. För slutförvaring av långlivat avfall behöver möjliga konsekvenser av jordskalv utvärderas när plats och koncept för förvaret har valts.

Uppnådda resultat

- SKB fortsätter det långvariga samarbetet med Uppsala universitet och stöttar driften av det Svenska nationella seismiska nätet, SNSN.
- Datainsamlingen från det lokala seismiska nätet i Forsmark påbörjades i oktober 2023. Nätet täcker den planerade bergvolymen för SFK samt SFR. En rad kalibreringar har genomförts under 2024 för att konfigurera den automatiska dataanalysen och förbättra den seismiska hastighetsmodellen.
- Flertalet undersökningar i Hälsingland för att identifiera källan till observerad seismicitet har genomförts: i) seismisk övervakning med ett temporärt nät pågår sedan 2021 och planeras fortsätta till slutet av 2025; ii) 3D-strukturgeologisk modellering över undersökningsområdet (Luth et al. 2024); iii) kvartärgeologisk och geomorfologisk undersökning baserad på LiDAR-data (Öhrling 2025) samt iv) grävning tvärs över samt sedimentprovtagning från strategiskt utvalda linjära landformer som inte kunnat avfärdas som glacialt inducerade förkastningar.
- Studien kring erosionsytor i de östra delarna av Mellansverige publicerades (Smith och Öhrling 2022) med slutsatsen att det i nuläget inte finns tillförlitliga bevis för någon paleotsunami i Sverige.
- Tillämpning av en förfinad konceptualisering av förkastningarnas undulation och kanter på ett jordskalvsfall som är representativt för Forsmark har publicerats (Lönnqvist och Fälth 2023).
- I en ny rapport (Fälth 2022) sammanfattas resultat från olika modelleringsstudier: i) effekten av spänningsfältets variabilitet, både i riktning och magnitud, på beräknade sekundära skjuvbelopp; ii) undersökning av målsprickor med orienteringar som maximerar skjuvbeloppet i olika delar av förvarsvolymen; iii) sekundära rörelser på målsprickor nära (100–200 meter) och i anslutning till en förkastning; iv) stabiliteten hos branta, lokala deformationszoner i Forsmark, inklusive forebulge effekt på förkastningsstabilitet samt v) co-seismiska rörelser hos målsprickor för jordskalv på branta förkastningar.

Program

SKB fortsätter undersökningar kopplade till seismisk påverkan av slutförvaren:

- Under Fud-perioden planerar SKB att använda data som samlas in med Forsmarks lokala seismiska nät för karakterisering av seismiska förhållanden i Forsmark innan och under byggfasen för SFR-utbyggnad. Nätet utvecklas efter behov för kontinuerlig övervakning av byggfasen för SFK.
- Uppdatering av magnitud-frekvenssambandet samt kortsiktiga sannolikhetsberäkningar för jordskalv i Forsmark och Oskarshamn med nya jordskalvsdata som har tillkommit sedan de senaste beräkningarna (Böðvarsson et al. 2006).
- SKB planerar att färdigställa projektet i Hälsingland med analys och rapportering av seismiska data samt publicering av resultat från grävningar och sedimentprover. Även jordskalvsanalyser och numerisk modellering av Burträskförkastningen planeras publiceras.
- Omvärldsbevakning av forskning kring glacialt inducerade förkastningar och särskilt kring mycket unga seismiska händelser som till exempel upptäckts i Norge (Olesen et al. 2021). Vid behov initieras nya undersökningar kring utvecklingen av seismiciteten under en glacial cykel.
- Förkastningsstabilitet av branta och flacka förkastningar i Forsmark analyseras under spänningsförhållanden baserade på alternativa kombinationer av jord- och glaciationsmodeller. Därutöver finns planer på ytterligare jordskalvssimuleringar utifrån resultaten och analys av upprepade skalv i Forsmark.
- SKB planerar att undersöka om resultaten som presenterats för Olkiluoto (Fälth et al. 2019) även är applicerbara för Forsmark när det gäller modellering av sekundära rörelser vid ett jordskalv på en flackt stupande förkastning under den planerade bergvolymen för SFK.

4.8.4 Hydrogeologi

Hydrogeologi begränsas här till att handla om strömning av vatten i berg, specifikt i bergets sammanlänkade sprickor. Grundvattenströmning i det ytnära systemet behandlas i avsnitt 4.9.3.

Grundvattenströmning är viktig i säkerhetsanalysen av flera skäl. De tekniska barriärernas integritet beror direkt eller indirekt på grundvattenflödet. Dels kan ett högt vattenflöde i SFK försvåra placering av buffert i deponeringshålen, dels påverkar grundvattenflödet och sammansättningen både buffertens och kopparkapselns integritet. I SFR är betongbarriärernas degradering kopplad till grundvattenflödena. Vidare påverkar grundvattenflödet den geokemiska utvecklingen samt transport av lösta ämnen till och från förvaret. I vissa hydrogeologiska modeller ingår funktionalitet som kopplar till ämnestransport och resultat och program kopplade till dessa redovisas i detta avsnitt medan arbete som specifikt kopplar till ämnestransport redogörs för i avsnitt 4.8.5.

Uppnådda resultat

SKB har inom området hydrogeologi uppnått följande resultat under den gångna Fud-perioden.

- Ett projekt pågår där främst hydrogeologisk och hydrogeokemisk modelleringsmetodik och koder används och utvärderas som en förberedande övning inför säkerhetsanalyserna som ska redovisas i förnyad SAR SFK. Flera av de forskningsresultat som beskrivs nedan implementeras i denna övning.
- En rapport har tagits fram som visar hur det ekvivalenta flödet Q_{eq} , som används bland annat för radionuklidtransportberäkningar, kan beräknas i DarcyTools (Shahkarami och Ferry 2024).
- Ett projekt har genomförts med deltagare från akademi, industri och konsultföretag för att studera hur öppna borrhål bör implementeras i numeriska modeller för att ge resultat som kan jämföras med uppmätta data (Selroos et al. 2025).
- I SKB:s Task Force GWFTS ägnas den pågående Task 10 åt pragmatisk validering av grundvattenflödes- och transportmodeller (Finsterle och Lanyon 2022). I den första delen av Task 10 genomfördes ett laboratorieexperiment av flöde genom en naturlig spricka utsatt för olika normalspänningar (Jacobsson och Godio 2023). Uppgiften för modellörerna var att prediktera detta flöde; SKB:s modelleringsgrupps resultat finns beskriva i Trinchero et al. (2024). I Selroos och Gylling (2023) ges en sammanfattning över samtliga modelleringsuppgifter som gjorts inom ramen för Task Force GWFTS innan Task 10.
- Ett doktorandprojekt om vattenkällor i kontinuerlig permafrost har avslutats (Hornum 2023). Taliks och källor i permafrost utgör viktiga flödes- och transportvägar mellan grundvattnet under permafrosten och det ytliga systemet och är därför potentiellt viktiga i analysen av långsiktig säkerhet.
- Ett arbete pågår med att vidareutveckla hydrauliska acceptanskriterier för deponeringshåll. I en tidigare studie (Appleyard 2021) användes DFN-modellen från F-PSAR som underlag; i nu pågående studie används den så kallade Baseline-modellen (Hartley et al. 2024) som inkorporerar nya konceptualiseringar baserat på Selroos et al. (2022).

Redan i Fud-program 2022 redovisades en ny metodik för DFN (Selroos et al. 2022); det bör här poängteras att denna nya metodik omfattar både den konceptualisering som använts i tidigare analyser som F-PSAR och PSAR samt olika alternativa konceptualiseringar. Denna utökade metodik berör även hydrogeologisk DFN-modellering samt modellering av transport av lösta ämnen. I följande fem punkter listas ett antal studier som adresserat olika aspekter av den nya DFN-metodiken.

- Ett arbete har genomförts för att undersöka om och hur olika konceptuella DFN-modeller kan förkastas vid jämförelse mot flödesloggningsdata (Davy et al. 2023). I denna studie användes både klassiska DFN-modeller såsom de som använts i F-PSAR och PSAR, samt alternativa konceptuella modeller; framför allt genetiska sprickor och hydromekanisk koppling studerades. Resultaten visar att dessa nya konceptuella modeller kan beskriva flödesloggningsdata minst lika bra som de gamla modellerna.
- I Doolaeghe et al. (2023) studeras vilka faktorer som primärt styr sprickors öppenhet genom att analysera Forsmarksdata. Studien visade att normalspänningen är en starkt styrande faktor som därmed motiverar inkludering av en hydromekanisk koppling i grundvattenflödesmodeller.
- I Zou et al. (2022) undersöktes i laboratorieskala hur skjuvspänning påverkar en sprickas apertur och transportegenskaper.

- En studie har genomförts som visar hur DFN-modeller med ökande konceptuell komplexitet resulterar i kanaliserat flöde samt i vissa fall även i så kallade anomaliska transportegenskaper (Davy et al. 2024).
- Den nya DFN-metodiken öppnar även upp för kanalnätverksmodeller som en alternativ beskrivning av flöde och transport i diskreta spricknätverk. En studie har genomförts där man dels utvecklat en kanalnätverksmodell baserat på underliggande DFN-beskrivning, dels visat hur denna modell kan kalibreras mot mätta data för att vara konsistent med DFN-modellen (Zou et al. 2023).

Program

SKB planerar att under Fud-perioden fortsätta utveckla olika metodiker och koder för simulering av grundvattenflöde i sprickigt berg. Exempel på aktiviteter ges i följande punktlista.

- SKB planerar fortsatt arbete med hydro-mekanisk och hydro-geokemisk modellering i enskilda sprickor och spricknätverk. Exempelvis kopplat till nedträngning av jonsvaga vatten till förvarsdjup.
- SKB planerar fortsatta insatser kopplade till DFN-modellering, exempelvis nästlad DFN kontinuum-modellering och uppskalning från DFN till kontinuum av både flödes- och transportegenskaper. SKB planerar även aktiviteter kopplade till modellering av transport i transienta flödesfält. Arbete som har genomförts kopplat till multi-rate och klassiska Fickiska matrisdiffusionsmodeller i DarcyTools planeras att publiceras.
- Arbetet med utveckling av hydrauliska acceptanskriterier för deponeringshål planeras att fortsätta.
- SKB planerar fortsätta arbete där nedträngning av jonsvaga vatten modelleras i en diskret spricknätverksmodell och jämförs med motsvarande resultat från en uppskalad kontinuum-modell. Syftet är att jämföra dessa resultat med de förenklade endimensionella modellerna för nedträngning av jonsvaga vatten som användes i F-PSAR och PSAR.
- Internationellt arbete planeras fortsätta, exempelvis inom Task Force GWFTS.

4.8.5 Transport av lösta ämnen

Ämnestransport innefattar transport av lösta ämnen till och från förvaret och inkluderar både processförståelse samt bestämning av transportegenskaper, såväl som modellering av främst radionuklidtransport. De processer som påverkar transporten är advektiv transport, matrisutbyte, samt sorption. Utöver det beaktas även bergets egenskaper som påverkar matrisutbytet, såsom porositet och perikonktivitet. Transportegenskaperna inkluderar porositet (inklusive porstorleksfördelning), diffusivitet (inklusive anjonexklusion), sorption samt andra processer som kan påverka transporten, såsom transport med kolloider.

Uppnådda resultat

SKB har inom området ämnestransport uppnått följande resultat under den gångna Fud-perioden.

- Marfa-koden utvecklas och uppdateras kontinuerligt. Pågående utveckling inkluderar upprättandet av ett Marfa-bibliotek där alla retentionsfunktioner samlas så att de kan anropas av valfri grundvattenflödeskod. Planen är att på detta sätt integrera Marfa med DarcyTools (Marfa-DT) och sålunda till exempel kunna modellera radionuklidtransport i transienta flödesfält.
- Koden som användes för modellering av nedträngning av jonsvaga vatten i PSAR har verifierats och dokumenterats (Shahkarami 2025).
- Ett doktorandarbete pågår där effekterna av hydromekaniska och kemiska (HMC) processer studeras med avseende på transport och retention i enskilda sprickor och spricknätverk. Inom detta doktorandprojekt har bland annat en utvärdering gjorts av retentionseffekten av diffusion in i stagnanta vattenzoner i sprickplanet (Sanglas et al. 2024).
- Ett doktorandprojekt inom Eurad med fokus på sorption av radium har avslutats (Fabritius 2025). Radium och dess döttrar är dosbidragande nuklider som har studerats på platsspecifikt material med batchsorption, sorption på tunnslip samt diffusion (Fabritius et al. 2024a). Även effekten av medfällning, vilket kan ytterligare skapa retention utöver linjärt K_d , har både studerats experimentellt och modellerats (Fabritius et al. 2024b).

- Sorptionsstudier pågår, inklusive identifiering av vilka ämnen som är prioriterade att undersökas vidare, bland annat utifrån Crawford (2022). Baserat på en litteraturstudie för molybden konstaterades att Mo bör studeras på platsspecifikt material. Sorption av Mo har studerats på representativa prover samt vatten för SFR (Li et al 2024a). Studien inkluderade även effekten av förhöjt pH, vilket planeras för samtliga framtida sorptionsstudier. Arbete pågår med framtagning av uppdaterad metodik för utvärdering av sorptionsmätningar. En rapport om potentiell sorption på korrosionsprodukter i ett slutförvar för långlivat avfall har avslutats (Crawford et al. 2023).
- I syfte att utveckla verktyg för modellering av diffusion, med både jonmigration och representation av en heterogen bergmatris, har arbete börjat med utveckling av en konceptuell mikrostrukturell por-nätverksmodell som flexibelt ska kunna simulera hydraulisk permeabilitet, genom diffusion och elektromigrationsexperiment (Shahkarami 2024).
- En analytisk modell som kan användas för exempelvis jämförande beräkningar och förankring av K_d -värden mot naturliga analoger har publicerats. Modellen inkluderar transport av både antropogena och naturligt förekommande nuklider med diffusion i en bergmatris med heterogena lager. Med modellen kan hänsyn tas till arbiträr längd på sönderfallskedjan, olika geologiska lager i bergmatrisen, produktion av naturligt förekommande nuklider som tillförs porvatten genom alfa-rekyl samt simultan transport av antropogena och naturligt förekommande nuklider (Mahmoudzadeh och Crawford 2023).

Program

Under Fud-perioden planerar SKB att fortsätta med metodutveckling samt pågående undersökningar av transportegenskaper på platsspecifikt material genom

- att ta fram underlag inför beslut om eventuella experimentella in-situ undersökningar av bergets transportegenskaper i förvarsvolymen för SFK,
- metodutveckling och undersökningar på platsspecifika prover utifrån undersökningar av diffusion på platsspecifikt material med varierande vattensammansättningar för att få ökat underlag avseende jonstyrkans effekt på anjonexklusionen,
- fortsatt metodutveckling av desorption av naturligt förekommande ämnen för att möjliggöra förankring av K_d utifrån naturliga K_d samt att kunna särskilja mellan sorptionsmekanismer med varierande desorptionsmedel,
- metodutveckling inom området elektriska metoder framför allt för undersökning av diffusivitet och konnekterad porositet med hjälp av metoder såsom resistivitetsmätningar och elektromigration, både i laboratorium och in-situ,
- fördjupad porositetskaraktisering med olika mätmetoder med fokus på huvudbergarter och omvandlat material. Även fortsatta diffusionsmätningar på platsspecifika prover med ökat fokus på omvandlat material planeras. SKB avser att förbereda och ta fram metodbeskrivningar för att utföra fler permeabilitetsmätningar på platsspecifikt material från förvarsdjup.

Inom området ämnestransport planeras därutöver följande insatser under Fud-perioden.

- Fortsatt arbete med utveckling av mikrostrukturell modell.
- Fortsatta sorptionsstudier på platsspecifikt material med olika metoder. K_d avses beräknas utifrån resultat från platsspecifika mätningar samt termodynamiska modeller, tillsammans med litteraturläsa och analogier.
- Framtagning en uppdaterad kunskapssammanställning avseende kolloidtransport.
- Baserat på den föreslagna metodiken avser SKB att fortsätta ta fram underlag för framtagning av transportegenskaper som kan variera rumsligt och tidsmässigt med ett koncept med transportklasser och att genomföra testmodelleringar inom ramen för säkerhetsanalysarbetet.
- Slutföra en artikel som sammanställer resultat från 40 års studier av matrisutbyte i samarbete med Posiva.
- Internationellt arbete planeras fortsätta inom Eurad-2 Rampec (Radionuclide mobility under perturbed conditions).

4.8.6 Hydrogeokemi

Den hydrogeokemiska miljön i SFK påverkas av ett antal olika processer, som kan ha betydelse för förvarets säkerhet efter förslutning, till exempel vittring och mikrobiell aktivitet. Både vittringsprocesser och mikrobiell sulfidbildning i geosfären såväl som i ingenjörbarriärerna, kan påverka förutsättningarna för korrosion av kopparkapseln. Frågor kopplade till dessa processer är därför fortsatt prioriterade. För SFR är en av säkerhetsfunktionerna kopplad till fördelaktiga hydrogeokemiska förhållanden och SKB bedömer förståelsen för förhållandena vara god.

Uppnådda resultat

- Under den gångna Fud-perioden rapporterades resultat från en studie rörande karakterisering och kvantifiering av organiskt material i olika typer av grundvatten i Äspötunneln (Osterholz et al. 2022). Slutsatser från denna studie är att det organiska materialet (DOM) som transporteras ned i den djupa kontinentala berggrunden huvudsakligen har terrestriskt ursprung och är svårtillgängligt för biologisk nedbrytning. Detta har lett till en mikrobiell population som livnär sig på en liten andel av lättillgängliga energikällor, såsom geogaser och nekromassa (döda celler) som återfinns i de äldsta salina vattnen. I en fortsättning på denna studie har effekten av tillsatser av tre olika källor av substrat till sulfatreducerande bakterier (SRB) gjorts för att undersöka om man kan stimulera mikrobiell aktivitet och därmed simulera hur en störning av systemet skulle kunna påverka sulfidbildning på förvarsdjup: i) uppkoncentrerad naturlig DOM från två av borrhålen på Äspö, ii) tillsats av acetat iii) - tillsats av nekromassa.
- Förstudie rörande acetogener och metanogener på förvarsdjup med syftet att bedöma heterotrofa respektive autotrofa processers betydelser för omsättning av gaser och organisk kol såsom acetat har genomförts och rapportering pågår.
- Effekten av tillförsel av acetat på mikrobiell uranreduktion har undersökts i grundvatten från Forsmark som innehåller ~150 µg U/L. Efter inkubationsperioden hade urankoncentrationerna minskat med 30–99 procent. Uranisotoper och röntgenabsorptionsspektroskopi (XAS) resultat bekräftar kemisk reduktion av U(VI) till U(IV). Graden av uranreduktionen berodde på vilken mikrobiell specie som tillväxte under inkubationsperioden. Rapportering av resultaten pågår och inkluderar en diskussion om abiotiska och biotiska mekanismer för reduktion av uran.
- Studier rörande matrisporvattnets kemiska sammansättning och isotopgeokemi har genomförts inom platsprogrammet för Forsmark. Data från lakningsexperiment kan användas till att verifiera diffusion i bergmatrisen, men även för att underbygga grundvattnets paleohydrogeologiska utveckling. Studier med lakning av neutronaktiverade bergprover har genomförts på Helsingfors universitet. Resultat från dessa indikerar möjligheten att utveckla indirekta metoder som skulle kunna ge ytterligare information om saltkoncentrationen i matrisporvattnet. Kompletterande analyser av mineralogin har genomförts och rapporteras tillsammans med experimentdata för anjoner och för de viktigaste katjonerna i matrisporvatten.
- För att undersöka tillgänglighet av Fe(II), som kan motverka syre- och sulfid i bergmatrisen, har SKB tillsammans med forskare på Chalmers och Linnéuniversitetet genomfört anaeroba lakningsförsök med biotit. Experimenten visade att upplösningshastigheterna för biotit liknade de litteraturvärden som tidigare erhållits under aeroba förhållanden (Holgersson et al. 2024). Stabila järnisotoper i grundvatten från Forsmark har analyserats i syfte att fastställa järnets ursprung.
- Informationsutbytesprojektet SIEP (Sulfide Information Exchange Project) avslutades 2022. Syftet var att samla kvarstående frågor rörande sulfid i SFK i såväl geosfären (se aktiviteter rörande DOM, Fe(II) och effekt av tillfört acetat på mikrobiell reduktion av uran ovan), och aktiviteter som rör sulfat i buffert och återfyllning (beskrivet i avsnitt 4.7). Resultaten från projekt som ingick i SIEP redovisas i separata rapporter och artiklar (Osterholz et al. 2022, Holgersson et al 2024).
- Resultaten från utvecklingen av beräkningsverktyg för att modellera heliumflöde och därmed stödjande datering av djupa grundvatten har publicerats (Trincherio et al. 2022, Shahkarami och Sidborn, 2023).

Program

SKB planerar att under Fud-perioden fortsätta fördjupa kunskapen inom processer som kan påverka den kemiska miljön under slutförvarsliknande förhållanden.

- Fortsatt arbete med att studera mikrobiella processer och deras betydelse för omsättning av organiskt kol och sulfidbildning i Forsmark.
- Då Fe(II) potentiellt utgör huvudsaklig sänka för syre och sulfid i grundvattnet planeras bland annat experimentella studier rörande biotit.
- Modellutveckling för att beskriva sulfidomsättningen i berget, det vill säga både sulfatreduktion, lakning av Fe(II) från mineral samt utfällning av järnsulfid, planeras. SKB planerar även modellutveckling för att beskriva nedträngning av såväl jonsvaga vatten som löst syre i berget.
- Utvärdera resultaten från uranexperimenten med mikrober (SRB) med avseende på hur de skulle kunna ha betydelse för säkerhetsanalyserna för SFK.

4.9 Ytekosystem

SKB:s forskningsprogram för ytekosystem syftar till att skapa underlag för beräkningar av potentiell radioaktiv dos till människa och miljö i analysen av de olika förvarens säkerhet efter förslutning. Det bidrar också till ett långsiktigt bevarande av kompetens inom området. Kunskaperna används också som underlag till miljökonsekvensbedömningar, miljöövervakning och för analysen av säkerheten i anläggningar i drift. Forskningsfrågorna för de olika förvaren överlappar till stor del varandra.

Nedan redovisas i korthet de frågor som bedöms vara viktigast under Fud-perioden samt vilka planer SKB har för att arbeta med dessa frågor. En komplett redovisning av hur resultaten från de senaste årens forskning och utveckling har använts i analyserna av säkerhet efter förslutning återfinns i biosärsyntesrapporten från den senaste säkerhetsanalysen, till exempel PSAR SFR (SKB TR-23-06). Detaljerade planer för forskning och utveckling återges i ansökan om godkännande av PSAR SFK. I den redovisningen ingår även beskrivningar som kopplar till PSAR SFR och den genomförda säkerhetsvärderingen för ett förvarskoncept för långlivat avfall eftersom ytekosystemet hanteras likartat i analyserna av säkerhet efter förslutning.

4.9.1 Uptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer

När det gäller människan utgörs den viktigaste exponeringsvägen för radionuklider från ett förvar av intag via mat och dryck. Uptaget av radionuklider i organismer är oftast avgörande för hur stort dosbidraget blir till både människor och biota.

Vid dosberäkningar används traditionellt koncentrationsfaktorer (CR), vilka beskriver koncentrationen av ett ämne i organismen jämfört med den i födan eller i omgivande media (vatten, jord eller sediment).

De empiriskt bestämda CR-värdena är behäftade med osäkerheter och SKB har därför arbetat långsiktigt med att utveckla metoder för att uppskatta radionuklidupptag i organismer.

Uppnådda resultat

- Under 2020 inledde SKB odlingsförsök av olika jordbruksprodukter på olika marktyper vid Byle gård i Uppland (Grolander et al. 2024). Byle gård utgör en naturlig analog till ett framtida Forsmark, där en sjö har dikats ut och odling sker på de delvis kalkrika jordarterna (Sohlenius och Tröjbom 2025).
- I samarbete med SLU i Umeå är SKB delaktiga i en omfattande analys av mark- och växtkoncentrationer av element i ett 40-tal myrar av varierande ålder mellan Bottenhavskusten och inlandet. Resultaten ökar förståelsen om framtida förhållanden i Forsmark och om hur förutsättningarna för växtupptag och CR-värden påverkas av en miljö i långsam förändring, vilket resulterat i en avhandling samt flera artiklar (Ehnvall 2023, 2024, Ehnvall et al. 2023a, b, 2024, Peura et al. 2024).
- Rinnande vatten liknar på många sätt sjöekosystemen, men skillnader när det gäller till exempel hydrologin, förutsättningar för kemisk utfällning av olika ämnen och biologiska upptagsmekanismer kan ge andra förutsättningar för ackumulation av radionuklider. Ett doktorandarbete finansierat av SKB har simulerat transport av olika ämnen beroende på hydrologin i en bäcknära omgivning (Jutebring Sterte 2021, Jutebring Sterte et al. 2022).

- Vid arbetet med säkerhetsanalysen för SFR har inlagring av organiskt kol, gastransport och upptag av koldioxid via rötter bedömts som viktiga för att beskriva omsättningen av kol-14 (Majlesi et al. 2025). Dessutom gjordes en sammanställning av upptag och omsättningen av kol i sjöar (Martin 2023). SKB deltar aktivt i den internationella arbetsgruppen för kol-14 i Bioprotas (Thorne et al. 2023).
- SKB har genom Linköpings universitet låtit undersöka metanflöden i bäcksystem (Balathandayuthabani et al. 2023, 2024). Resultaten visar att det metan som tillförs den undersökta bäckfåran i Forsmark till ungefär hälften härstammar från grundvatten och till andra hälften från metanproduktion i sedimenten. Metanoxidation omvandlar mer än 97 procent till koldioxid innan det når atmosfären.
- I naturliga system förekommer klor ofta som den relativt mobila kloridjonen, men klor kan också tas upp av växter eller omvandlas till organiska klorföreningar. Undersökningar har visat att det finns stora förråd av organiskt klor i marken i Forsmark. Ju fuktigare och blötare miljöerna är desto mer ökar kloromsättningen och växtupptaget medan andelen organiskt klor minskar (Svensson et al. 2023b).
- I samarbete med Posiva har SKB analyserat vatten- och fiskkoncentrationer från SKB:s och Posivas tidigare arbeten i syfte att räkna fram CR värden för fisk i söt- och havsvatten samt för att utvärdera olika analogalternativ för data som saknas (Saetre et al. 2025).
- SKB har deltagit aktivt i IAEA-projektet Modaria II och i Bioprotas i en revidering av IAEA:s BIOMASS-metodik (Thorne et al. 2022, IAEA 2024) samt arbetsgrupper om andra organismer än människan (IAEA 2021).

Program

Under Fud-perioden planeras följande aktiviteter:

- Analys av grödor odlade i olika jordbruksjordar för upptag av olika ämnen samt koordinerade provtagningar av växt- och jordprover i Forsmark med fokus på våtmarker med utströmning av djupt grundvatten.
- Fortsatt följa internationella utvecklingen inom Bioprotas och IAEA Mereia samt av skyddet av andra organismer än människan inom IAEA och ICRP.

4.9.2 Temporal och spatial heterogenitet i landskapet

Landskapets utseende och utveckling är viktiga faktorer för beräkning av dos vid ett utsläpp av radionuklider. Beroende på vilken typ av ekosystem ett utsläpp sker till och vilka egenskaper ekosystemet har kan den beräknade dosen påverkas flera storleksordningar.

I säkerhetsanalysen identifieras potentiella utsläppsområden (biosfärsobjekt) inom vilka dos till människa och biota beräknas. Biosfärsobjekten avgränsas med hjälp av landskapets geometri. Landskapets och biosfärsobjektens egenskaper påverkar hydrologin, transport- och ackumulation i olika marklager (regoliten), liksom förutsättningarna för radionuklidupptag och exponering av miljö och människa.

Uppnådda resultat

- Studier har genomförts för att undersöka hur ett avrinningsområdes storlek påverkar dess egenskaper och de våtmarker som ligger inom det. Resultaten har sammanställts i ett antal publikationer (Ehnavall 2023, 2024, Ehnavall et al. 2023a, b, 2024).
- SKB har undersökt hur topografiskt baserade GIS-analyser kan användas för att förutsäga utvecklingen och förekomsten av framtida våtmarker (Mayotte och Strömberg 2023).
- För det viktigaste utströmningsområdet för SFR har påverkan av småskalig variation i topografi och jordlagertjocklekar på transport simulerats med Comsol (Sampietro et al. 2025).
- Det finns ny platsinformation från en dykundersökning vid potentiella utströmningsområden (Borgiel et al. 2022).

- För att förstå landskapets inverkan på grundvattenrörelser och ämnestransport under ett kallt klimattillstånd har ett område på Grönland framför isranden studerats inom Grasp (Rydberg et al. 2023, 2025).
- SKB har även beskrivit en framtida analog i Byle Gård som kan representera Forsmark om cirka 3 000–4 000 år (Sohlenius och Tröjbom 2025).

Program

Under Fud-perioden planeras följande aktiviteter:

- Kompletterande platsundersökningar när det gäller regolitens stratigrafi och fysikaliska och kemiska egenskaper i potentiella utströmningsområden. Data utnyttjas exempelvis för att studera effekten av heterogena regolitlager.
- Undersökningar för att bättre kunna beskriva utvecklingen av vikar, sjöar och myrar i Forsmarksområdet samt utveckling av metoder för att beskriva förekomsten av framtida våtmarker i Forsmarksområdet.

4.9.3 Transport- och ackumulationsprocesser

Med transportprocesser avses här framför allt abiotisk transport som sker med vatten, partiklar och i viss mån med gas. Med ackumulationsprocesser avses processer som beskriver fastläggning i lösa avlagringar, till exempel via sorption, utfällning eller inlagring i markens organiska material.

Hydrologin påverkar vilka områden som kan komma att beröras av ett eventuellt utsläpp, vilka mängder av nuklider som når dessa områden, samt hur miljökoncentrationer påverkas av utspädning. Fastläggningen avgör hur mycket som kan ackumuleras i marklagren eller associeras till partiklar exempelvis vid sorption. Osäkerheterna i parametervärden som beskriver sorptionen är ofta betydande.

Uppnådda resultat

- För att kunna hantera hydrologiska parameterosäkerheter i BioTex-modellen gjordes en genomgång av förenklade hydrologiska modeller med HYPE (Koutsouris 2024), samt en studie som syftar till att minska beräkningstiden för MIKE SHE (Mayotte och Sassner 2023).
- SKB har påbörjat en validering av ytnära hydrologiska modeller genom att använda CFC (freoner) för att bestämma grundvattnets ålder (Kolbe och Bishop 2024, Jutebring Sterte 2025).
- Den senaste kombinerade transport- och exponeringsmodellen BioTE_x har högre diskretisering av de djupare regolitlagren vilket redovisats i PSAR SFR, tillsammans med andra utvecklingar av BioTE_x (SKB TR-23-06).
- Comsol ger möjligheten att i detalj studera mekanismer som drivs av fysikaliska, kemiska och biologiska processer, samtidigt som man kan använda landskapet som en drivande faktor för vattenflöden. Radionuklidtransporten detaljstuderas i det objekt i för SFR som gav högst doser genom beräkning av vattenflöden och sorption i olika regolitlager i en tredimensionell Comsol-modell (Sampietro et al. 2025).
- Vid Byle gård i Uppland har omfattande prover på regolitegenskaper tagits (Grolander et al. 2024) som underlag för att beräkna K_d .
- I Krycklan har fortsatta undersökningar genomförts för att belysa transport av olika ämnen i landskapet, exempelvis ackumulation av sällsynta jordartsmetaller (där fler intressanta radionuklider finns) med stark ackumulation i torv (Skerlep et al. 2025).

Program

Följande aktiviteter planeras under Fud-perioden:

- Högupplöst numerisk modellering för att förstå fastläggningsprocesser, exempelvis i rinnande vatten, men även för att underbygga stokastiska tillämpningar med förenklade modeller med minskade beräkningstider.
- Analyser med platskalibrerade hydrologiska modeller för att utröna osäkerheters påverkan för radionuklidtransporten i ytekosystemen.

4.9.4 Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos betydelsefulla ämnen

Förutom att olika ämnen tas upp i olika organismer och näringskedjor och transporteras och ackumuleras på olika sätt i lösa avlagringar, så har de också olika kemiska och radiologiska egenskaper. Dessa egenskaper, i samverkan med den kemiska miljön som ämnena befinner sig i, påverkar både deras mobilitet och radiotoxicitet.

Uppnådda resultat

- CR och K_d som användes i analysen av ytnära ekosystem i Forsmark redovisades i PSAR SFR (SKB TR-23-06). Värdena baseras i första hand på mätningar från platsen och i andra hand på tillgängliga internationella data. Till denna databas tillförs Posivas omfattande kemidata från ytnära ekosystem i Finland. För att förbättra underlaget, förstå osäkerheterna samt förstå sambanden mellan olika biogeokemiska miljöer analyseras denna sammanlagda databas med olika statistiska metoder.
- Vidare har förekomsten, transport och ackumulation i relation till den biogeokemiska miljön sammanställts för molybden samt cesium ifrån Forsmark samt Krycklan (Lidman 2025a, b).

Program

En stor del av aktiviteterna samordnas med sorptions- och upptagsstudierna som redovisats i avsnitt 4.9.1 och 4.9.3. Följande aktiviteter planeras under Fud-perioden:

- Komplettering av databaserna för K_d och CR i syfte att förbättra parametriseringen i konsekvensanalysberäkningarna och förståelsen för hur kemiska betingelser på platsen och lagningsmetoder påverkar. Detta planeras innefatta provtagning, analyser och metodikutveckling för parameterintervalen, bland annat baserat på data från Byle gård (Grolander et al. 2024, avsnitt 9.4.3) och planerade nya provtagningar ifrån djupa sediment i sjöar runt Forsmark.
- Studier av viktiga radionuklidens fördelningsmönster i landskapet innefattande urlakning och anrikning av olika ämnen, exempelvis utifrån de naturliga sönderfallskedjorna.

4.10 Klimat och klimatrelaterade processer

Det övergripande målet med insatserna inom klimat är att kvantifiera utvecklingen av klimat och klimatrelaterade processer av relevans för säkerhet efter förslutning för SFK, SFR och ett framtida slutförvar för långlivat avfall. I detta ingår att minska osäkerheterna i beskrivningen av processerna och framtida klimat. Resultaten av dessa insatser återspeglas i den uppsättning representativa klimatutvecklingar som används i analyserna av säkerhet efter förslutning.

SKB:s arbete med klimatfrågor omfattar forskning, utveckling och omvärldsbevakning inom fem forskningsområden: klimatförändringar, inlandsisutveckling, permafrostutveckling, relativ havsnivå och denudation. Forskningen inom dessa områden, inklusive de aktiviteter som genomfördes under den gångna Fud-perioden, har bidragit till en god förståelse av de osäkerheter som påverkar säkerhet efter förslutning, samt storleken på dessa. Klimatarbetet har därför gradvis övergått från ett forskningsorienterat fokus till en mer bevakande verksamhet.

Omvärldsbevakningen inom klimatfrågor är omfattande, särskilt vad gäller varma klimat och dess konsekvenser (exempelvis stigande havsnivåer) eftersom det pågår intensiv forskning kring dessa frågor i omvärlden. Bevakningen är även viktig för frågor kopplade till kalla klimat, framför allt för att säkerställa att de parameteriseringar och antaganden som gjorts i SKB:s tidigare modellering av inlandsis- och permafrostutveckling fortfarande är lämpliga. Målet med omvärldsbevakningen är att SKB:s dokumentation om klimat och klimatrelaterade processer ska vara adekvat uppdaterad inför kommande säkerhetsanalyser för SFK och utbyggt SFR. Dokumentationen är även av värde för slutförvaring av långlivat avfall, men eftersom förvarskoncept och förvarsplats ännu inte har valts kan ytterligare insatser vara påkallade när valen har skett.

Uppnådda resultat

- Kunskapsläget om människans utsläpp av växthusgaser och dess påverkan på klimatet och havsnivåerna i Forsmark, både på kort och lång sikt, har uppdaterats enligt senaste vetenskapliga rön, inklusive den senaste sammanställningsrapporten från FN:s klimatpanel IPCC (2021). Underlaget redovisas i kapitel 2, 3 och 5 i Liakka och Näslund (2025).

- En systematisk sammanställning har genomförts av historiska klimat- och miljöförhållanden under senaste istiden (Weichsel), innevarande värmeperiod (holocen), samt föregående värmeperiod (Eem), erhållna från geologiska studier som SKB finansierat på platsen Sokli i norra Fennoskandia (Helmens et al. 2024). Resultaten stödjer befintliga klimatutvecklingar i säkerhetsanalyserna för SFK.
- Möjligheten att iskanten stannar vid Forsmark när inlandsisen når sin maximala utbredning ingår nu i analysen av hur länge iskanten tillfälligt kan stanna över Forsmark (kapitel 4 i Liakka och Näslund (2025)).
- 90 globala klimatsimuleringar för kommande en miljon åren (Lord et al. 2019) har skalats ner till Forsmarksplatsen. En utvärdering av osäkerheter och extremer hos klimatet har genomförts baserat på dessa data (Williams et al. 2022).
- De globala klimatsimuleringarna från Lord et al. (2019) har även använts för att genomföra en systemisk analys av osäkerheter i frekvens och längd av nedisningsperioder i Forsmark kommande en miljon åren (Liakka et al. 2024 och Liakka och Näslund 2025). Analysen är av vikt för de hydrologiska, kemiska och mekaniska förhållandena i geosfären samt för det framtida denudationsdjupet i Forsmark (se nästa punkt).
- Den uppskattade frekvensen och längden av framtida nedisningsperioder har använts för att uppdatera denudationsberäkningarna för Forsmark kommande en miljon åren, enligt den metodik som presenteras i Hall et al. (2019). Resultaten från de uppdaterade beräkningarna är i linje med tidigare resultat (kapitel 7 i Liakka och Näslund 2025).
- Hur processer och förhållanden som studerats på Grönland inom ramen för de tidigare SKB-finansierade projekten GAP och Grasp kan överföras till Forsmark har analyserats (Claesson-Liljedahl et al. 2025).

En rad avslutande studier kring osäkerheter kopplade till denudation/glacial erosion har genomförts under den gångna Fud-perioden:

- Potentialen för så kallad bakåtgripande erosion (headward erosion) och associerad potentiell framtida lateral tillväxt av område med kraftigare historisk glacial erosion sydost om Forsmark har analyserats (Hall et al. 2022). Analysen visar att den laterala tillväxten av området med kraftig erosion kan påverka Forsmark tidigast om en miljon år.
- Omfattning och påverkan på erosionsdjupet i Forsmark av denudationsprocessen glacial ripping har analyserats (Krabbendam et al. 2022). Slutsatsen är att glacial ripping är en lokalt fokuserad process samt att djupet hos berget som lokalt påverkats av desintegration genom glacial ripping under den senaste fasen av nedisning är 1–4 m.
- Kartering av glaciala erosionsformer på hällar (genom användande av sedan tidigare insamlade LiDAR-data) har genomförts och analyserats (Krabbendam et al. 2023). Resultaten från denna analys visar dock inga signifikanta skillnader i historisk glacial erosion jämfört med tidigare studier (Hall et al. 2019, Krabbendam et al. 2022).
- Osäkerheter kopplade till den metodik som användes för att uppskatta historisk denudation i Hall et al. (2019) har utvärderats i Goodfellow et al. (2023) och Hall et al. (2023). Utfallet av dessa analyser ändrar inga slutsatser kring omfattningen av framtida denudation i Forsmark som redovisades i Hall et al. (2019).

Program

SKB har i dagsläget tillräcklig kunskap om de osäkerheter i klimat och klimatrelaterade processer som är av relevans för säkerhet efter förslutning för SFK och SFR. Inga tillkommande forskningsfrågor är således planerade att utredas under Fud-perioden. De klimatfrågor som är viktiga för säkerhet efter förslutning kommer att bevakas aktivt och det vetenskapliga underlaget kommer att uppdateras i den utsträckning som behövs för säkerhetsanalyserna.

4.11 Avslutande av fältförsök i Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet togs i rutinmässig drift 1995 och har varit en viktig del i SKB:s utvecklingsarbete för utformning, byggande och drift av slutförvar. Efter tre decennier av forskning och utveckling vid Äspö är de ursprungliga målen med berglaboratoriet uppfylla. Äspölaboratoriet som anläggning beskrivs närmare i avsnitt 5.4.1

4.11.1 Genomförda brytningar under den gångna Fud-perioden

De sista kvarvarande långtidsförsöken i Äspölaboratoriet avslutades planenligt under den gångna Fud-perioden.

Prototypförvaret

Prototypförvaret har varit ett fullskaleförsök installerat på 450 meters djup med kapslar och buffert av liknande referensutformning som i det planerade slutförvaret. Försöksgalleriet bestod ursprungligen av två sektioner, en yttre sektion med två deponeringshåll som återtog i början av 2010-talet, och en inre sektion med fyra deponeringshåll som avslutades och återtog under 2023–2025. Resultat från brytningen av den yttre sektionen har redovisats av Svemar et al. (2016). Prover tagna från brytningen av den inre sektionen kommer fortsätta analyseras, utvärderas och rapporteras inom Fud-perioden.

Kapslarna i Prototypförvaret har varit försedda med värmare för att simulera resteffekt från det använda kärnbränslet. Försöket har utformats för att kunna studera kopplade processer på ett sätt som inte är möjligt i mer specialiserade försök och den stora skalan innebär att rand- samt uppskalningseffekter blir betydelsefulla. Enligt de ursprungliga planerna avsågs Prototypförvaret att vara i drift i upp till 20 år så att resultat från försöket kunde utgöra underlag för drifttillstånd för SFK. Ett av de övergripande målen med försöket är att bekräfta att systemet fungerar som avsett och att utvecklingen kan förstås med de modeller och verktyg som används vid modellering av säkerhet efter förslutning. Modelleringsarbetet är omfattande och fortsätter inom Fud-perioden, se vidare avsnitt 4.7.

För att på bästa sätt stödja resonemang i en kommande säkerhetsredovisning, kommer genomförandet och redovisningen av analysarbetet att till stora delar struktureras på liknande sätt som relevanta delar av referensutvecklingen i analysen av säkerhet efter förslutning i PSAR SFK.

Minican

Försöket Minican installerades 2007 och innehöll då fem miniatyrkapslar med längden 31 centimeter och diametern 14,5 centimeter. De installerades i nästan horisontella borrhåll på 450 meters djup i berget. Kopparkvaliteten i Minican-kapslarna är densamma som för kapslarna till SFK. Fyra av de fem kapslarna har varit monterade i paket tillsammans med bentonitlera. Hos tre av paketen hade leran låg täthet, medan den fjärde hade bentonit med hög täthet. Variationen i lerans förekomst och täthet ger möjligheter att studera just lerans funktion för kapseln. Med hjälp av mätinstrument och regelbunden vattenprovtagning har en rad parametrar mätts under försökets gång, till exempel grundvattenkemi, mikrobiologi, redox-potential, pH, korrosionshastigheter och dragspänningar i kapselmaterialet.

De två sista experimentkapslarna från Minican-försöket togs upp under 2025 efter drygt 15 år i berget. Dessa kapslar hade lågkompakterad bentonit runt sig och liknar mest den kapseln som togs upp 2010. Analyser och utvärdering utförs under Fud-perioden, se vidare avsnitt 4.5.

Long-term test of buffer materials

LOT syftar till att identifiera och kvantifiera mineralogiska förändringar i bentoniten som kan tänkas uppkomma till följd av exponering för en förvarsliknande miljö. Dessutom undersöks relaterade processer i bentoniten som rör kopparkorrosion, diffusion av katjoner samt överlevnad och aktivitet hos bakterier. Totalt installerades sju försökspaket, vilka innehöll ett centralt cirka fyra meter långt kopparrör omgivet av cylinderringar av kompakterad bentonit. En elektrisk värmare inne i kopparröret användes för att simulera resteffekten från det använda kärnbränslet. Temperatur, totaltryck, vattentryck och fuktighet mättes via givare som placerats i bentoniten.

Tre av försökspaketen (S1 till S3) har varit utsatta för typiska KBS-3-förhållanden med en maximal temperatur som understiger 100 °C, och fyra försökspaket (A0 till A3) har varit utsatta för speciellt ogynnsamma förhållanden, framför allt förhöjd temperatur till maximalt cirka 140 °C. Sex av paketen har återtagits tidigare och bentonitleran har analyserats grundligt, vilket har redovisats i ett flertal

rapporter. De två senaste, S2 och A3, återtog 2019 och utvärderades bland annat av Svensson et al. (2024). Det sista försökspaketet S3 återtog 2025, efter att försöket pågått i cirka 25 år, se vidare avsnitt 4.7.

Alternative buffer materials

Försöken ABM var likt LOT-försöken konstruerade för att studera långsiktig stabilitet av bentonitbufferten. De största skillnaderna har bestått av att i ABM är ett stort antal olika bentonitleror inkluderade (istället för bara MX80) och värmaren är av stål istället för av koppar. I övrigt är designen snarlik LOT och måltemperaturen i ABM har varit cirka 130 °C, med undantaget av ABM5 som avsiktligt var betydligt varmare. ABM-försöken avslutades genom att de tre sista paketen togs upp från Äspölaboratoriet under 2025. Provtagning och analys av dessa planeras, se vidare avsnitt 4.7.

Concrete and Clay

De första experimentpaketen inom projekt Concrete and Clay installerades i Äspölaboratoriet under 2010 (Mårtensson 2015) och sedan dess har ytterligare provkroppar installerats. Flera återtag och analyser har genomförts. Projektets huvudsyfte har varit att under realistiska slutförvarsbetingelser studera interaktioner mellan de olika typer av material som kan förekomma i slutförvar för låg- och medelaktivt avfall. Det inkluderar studier av interaktioner mellan såväl olika barriärmaterial som mellan barriärer och materialprover representativa för låg- och medelaktivt avfall.

Genomförandet av detta projekt motiveras av ett behov av studier under relevanta förvarsbetingelser som ett komplement till de ofta accelererade laboratiestudier, som utgör en majoritet av det underlag som används inom säkerhetsanalysarbetet. Resultat från analys av återtagna prover har även utgjort underlag vid utformning av kompletterande laboratorieexperiment för ökad processförståelse. Återtag av de sista kvarvarande provkropparna genomfördes under den gångna Fud-perioden. Under Fud-perioden kommer proverna att analyseras och slutrapportering ske varefter projektet avslutas, se vidare avsnitt 4.6.

Långtidsutveckling av återfyllningsmaterial för SFR

Ett långtidsförsök med makadamåterfyllning i SFR-liknande förhållanden har pågått sedan 2020 med syftet att studera hur dess egenskaper påverkas över tid av mikrobiell tillväxt. Försöket avslutades under 2025, se vidare avsnitt 4.6.

4.11.2 Avslut av nya fältförsök

Under den gångna Fud-perioden har fältförsök genomförts i Äspölaboratoriet. Två fullskaliga tester med segmenterad buffert har utförts (Hermansson et al. 2024). Syftet var att få fram ny kunskap om buffertbeteendet under installationen. Testerna pekar på att det är möjligt att använda extruderade pellets i bufferten, eftersom deras beteende inte skiljde sig nämnvärt från de rullkompakterade pellets som använts tidigare. Vidare visar testerna att det är möjligt att installera bufferten under det största tillåtna inflödet till ett deponeringshål, 0,1 l/min. Detta har bäring på tillgängliga tiderna för buffertinstallation vid olika vatteninflöden. Se vidare avsnitt 4.7.1.

4.12 Övervakning och undersökningar under uppförande och drift

SKB:s övervakning bedrivs brett och beskrivs i olika övervaknings- och undersökningsprogram.

Programmen rör enbart de aktiviteter som företas inför och under uppförande och drift av anläggningen. Syftet är att ytterligare stödja tilltron till säkerhet efter förslutning och fokuserar på det urval av parametrar som kommer att övervakas kopplat till barriären berg. Därmed utgör de en del av de åtgärder som SKB vidtar för att bekräfta slutförvarets prestanda före och efter förslutning.

Undersökningsprogrammets insamlande av data ligger till grund för kommande uppdatering av platsmodellen för Forsmark. För SFK utgör undersökningarna en del av uppförande och drift och bidrar där med underlag till förvarets löpande platsanpassning.

Befintlig teknik och metodik för övervakning och undersökningar kommer att värderas utifrån förhållandena i respektive slutförvarsanläggning samt anpassas och revideras inför drift av anläggningarna.

4.12.1 Övervakningsprogram

Program för övervakning under uppförande och drift har tagits fram inför uppförandet av SFK och ingår som underlag i ansökan om godkännande av PSAR SFK.

Pågående platsövervakning i Forsmark beskrivs i ett program som omfattar, ekologisk övervakning, hydrologisk, hydrogeologisk och meteorologisk övervakning, hydrokemisk övervakning, geologisk och geofysisk övervakning samt drift och underhåll av mätpunkter och utrustning.

Kommande övervakning beskrivs i ett program för övervakning av SFK avseende säkerhet efter förslutning med syftet att

- ge kompletterande underlag för att verifiera de antaganden om platsens beskaffenhet som ligger till grund för platsmodellen som i sin tur är grund för säkerhetsanalysen,
- ytterligare öka förtroendet för analys och förståelse av förvarets utveckling,
- ge underlag till om det skulle finnas tidigare okända egenskaper, händelser eller processer som skulle kunna påverka säkerheten.

Bedömningen av säkerhet efter förslutning bygger på förståelsen för de termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som styr slutförvarens utveckling. Den utgör underlag för att demonstrera förvarets förmåga att innesluta eller fördröja spridningen av radioaktiva ämnen och för verifiering av att de installerade barriärerna, tunnlar och bergrum uppfyller de tekniska utformningskraven.

Planen för de bergtekniska åtgärder och kontrollprogram som syftar till att verifiera att konstruktionsförutsättningarna i analysen av säkerhet efter förslutning uppfylls under uppförandet och driften av SFK beskrivs i SKB:s ansökan om godkännande av PSAR SFK i produktionsrapport berg och stödjande dokument i form av en plan för fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete fram till drifttagande samt ett program för undersökningar och övervakning under uppförande och drift. Det dataunderlag som SKB har byggt upp genom årtionden av forskning, kommer att kompletteras med resultat från detaljundersökningsprogrammet som är anpassat till de specifika förhållandena på den valda platsen.

4.12.2 Övervakning av barriärer

Övervakning som kan ge information om barriärernas utveckling vid förvarsplatsen, men som inte äventyrar säkerheten har i tidigare Fud-program beskrivits som möjlig. En sådan möjlighet som övervägs är, att i SFK installera långtidsförsök nere i berget. SKB kommer under uppförandet av SFK genomföra en utredning om långtidsförsök i SFK. Fokus i utredningen kommer att vara på syftet med installationer av långtidsförsök, på vilka aspekter hos de tekniska barriärerna som kan belysas, samt när och i vilken del av förvaret försök kan installeras. I utredningen kommer kunskap från tidigare genomförda fältförsök i till exempel Äspölaboratoriet och hos Posiva att tas tillvara.

4.12.3 Internationell utveckling

SKB följer internationellt arbete inom övervakning och har varit direkt engagerat genom stöd till och deltagande i olika EU-projekt. Det senaste är arbetspaketet MODATS som drivs inom EU-programmet Eurad.

I MODATS, som avslutades under 2024, konsoliderades strategier för implementering av övervakningssystem för slutförvarets ingenjörbarriärer genom utveckling av metoder för att stödja tilltro till insamlade övervakningsdata. Som ett led i att utveckla denna ambition fokuserade forskningen och utvecklingen på datahantering (inhämtning, kvalitetssäkring och kvalitetskontroll, redovisning) samt nyttjande av övervakningsdata som underlag för förståelse av multibarriärssystemet. Dessutom utfördes även forskning, utveckling och kvalificering avseende vissa sensorer (direkta och indirekta) för övervakning av ingenjörbarriärer samt riktlinjer för utförande av teknikutveckling.

Specifika utfall och lärdomar från MODATS för SKB inkluderar fastställande av state-of-the-art samt erfarenhetsåterföring/lärdomar avseende övervakning ifrån olika Underground Research Laboratory (URL)-experiment, generella riktlinjer för framtagning av kvalitetsplan för övervakning,

vokabulär/formalism/algorithm för kvalitetskontroll av tidserier. Dessutom erhöles konkret och praktisk insikt avseende nyttjande av maskininlärning och digitala tvillingar baserade på övervakningsdata, med specifik tillämpning på data från URL-experiment. Ytterligare mervärde erhöles genom den forskning som utfördes om huruvida förhållanden, händelser och processer (FEP, Features Events and Processes) kan nyttjas som underlag för bedömning av övervakningssystemets potentiella påverkan på säkerheten efter förslutning. Konkret fastställdes ett antal övervaknings-FEP som potentiellt kan ha relevans/påverkan på den långsiktiga säkerheten.

SKB:s engagemang inom övervakning omfattar ett flertal ämnesområden som utförs ifrån markytan och ifrån bergutrymmen under jord. Det utgör en delmängd av platsundersökningar som tillgodoser underlag för karakterisering, modellering och förståelse men även som underlag för förvarssystemets omgivningspåverkan. Övervakningen är relativt väletablerad och kommer att fortgå men även utvecklas under längre tid. SKB kommer under Fud-perioden fortsätta följa utvecklingen inom övervakning. Detta sker som

- underlag till potentiell anpassning av SKB:s egen övervakningsmetodik och teknik,
- möjlighet till implementering av ny metodik och teknik,
- ett led i SKB:s kompetenshållning.

4.13 Avveckling

Avveckling av kärnkraftreaktorer pågår på alla svenska kärnkraftverk förutom i Forsmark.

Utvecklingsarbetet rörande avveckling av kärntekniska anläggningar bedrivs gemensamt av SKB och kärnkraftsföretagen. Merparten av det utvecklingsarbete som sker inom SKB är inte enbart kopplat till avveckling, utan till avfallshantering generellt. Utvecklingsområdena är till stor del gemensamma för reaktorinnehavarna och relaterar mest till att få fastställda förutsättningar för avfallshantering och avbördningsvägar. Arbetet under Fud-perioden handlar bland annat om att

- ta fram och utveckla acceptanskriterier för kommande slutförvar,
- få god kännedom om det avfall som uppstår, avseende innehåll av radionuklider och material,
- finna möjliga sätt att minska avfallsvolymer.

Ett gemensamt intresse hos Vattenfall och Uniper är att genomföra avvecklingsprogrammen så säkert och kostnadseffektivt som möjligt varför stor vikt läggs på erfarenhetsåterföring från de genomförda eller pågående avvecklingsprogrammen, som grund för kontinuerligt förbättringsarbete samt till nytta för de återstående avvecklingsprogrammen. De områden som berörs är exempelvis:

- Arbetsätt kopplat till ledning och styrning av anläggningsavveckling med fokus på effektivitet med bibehållen säker arbetsmiljö.
- Metoder som innefattar artificiell intelligens (AI)-verktyg samt automation av avancerade rivningsmoment med målsättning att minska dosbelastning till personal.
- Material- och avfallshantering med fokus på friklassning och volymoptimering kopplat till slutförvarssäkerhet och systemutnyttjande.

4.14 Bevarande av information och kunskap över generationer

Det finns två grundläggande principer för hur information om slutförvaren kan föras vidare till framtida generationer – successiv informationsöverföring och information direkt till en avlägsen framtid. SKB har under många år arbetat med frågeställningar kring arkivering och bevarande av kunskap och information om slutförvaren, både under deras drifttid som omfattar ett par generationer och på betydligt längre sikt efter deras förslutning. Syftet med arbetet har varit att försöka skapa så goda förutsättningar som möjligt att bevara väsentlig information.

I regeringsbeslutet om ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle från 2022 skriver regeringen att frågan om kunskaps- och informationsöverföring är en viktig del i den fortsatta stegvisa tillståndprocessen och att den utgör en del av Fud-programmet. I miljödom från mark- och miljödomstolen i oktober 2024 fastställdes villkoret: ”SKB ska under tiden fram till förslutning av

Kärnbränsleförvaret bedriva en strukturerad omvärldsbevakning rörande slutförvaring av använt kärnbränsle, informationsbevarande samt övervakning av slutförvar efter förslutning. SKB ska minst vart femte år informera tillsynsmyndigheterna och Östhammars kommun om resultatet av omvärldsbevakningen samt vilka förberedelser som vidtagits beträffande informationsbevarande och eventuell övervakning efter förslutning.” Motsvarande villkor finns även i miljödomen för utbyggnaden av SFR från december 2021. SKB avser att även fortsättningsvis bedriva insatser och följa utvecklingen samt redovisa arbetet till berörda myndigheter.

I det dagliga arbetet och fram till förslutningen av slutförvaren, förvaltar och bevarar SKB dokument, data och information i enlighet med externa krav från SSM och Riksarkivet. Vissa av dessa krav innebär förvaring utan tydligt slutdatum. Enligt SSM:s föreskrifter om arkivering vid kärntekniska anläggningar, SSMFS 2008:38, ska en arkivförteckning lämnas in till SSM när en verksamhet upphört. Det strukturerade arbetssätt som SKB tillämpar idag vad gäller förvaltning och bevarande av dokument, data och information inom ramen för ordinarie arbete med säkerhetsredovisningar är en central och värdefull utgångspunkt för den framtida bedömningen och valet av vilken information som behöver bevaras efter förslutning. Arbetet styrs redan enligt SKB:s ledningssystem och avses kompletteras med arbetssätt för sortering och märkning kopplat till bevarandestatus (fram till eller efter förslutning). Rutiner för hantering av dokumentation rörande vägval av teknik, strategier, arbetssätt planeras vidareutvecklas under Fud-perioden.

Rent praktiskt behöver lösningarna för bevarandet av information om förvarens existens finnas på plats först i samband med att ett slutförvar försluts. Det är inte möjligt, för vare sig SKB, myndigheter eller andra delar av samhället, att idag definitivt bestämma hur man ska gå tillväga med något som ska ske så långt fram i tiden. SKB behöver redan under uppförandet av slutförvaren ta fram strategier för det egna arbetet med bevarande av data och information om förvaren och dess innehåll fram till förslutning. Långsiktigt ska SKB uppnå ett läge så att det vid överlämning av ett förslutet slutförvar till en ny ägare (staten) kan överlämnas relevant information och kunskap (till innehåll och mängd) i ett format som går att läsa och förstå.

Informationsbevarande är inte enbart en fråga för det kärntekniska området. Behoven är likartade även för andra typer av farligt avfall och förorenade områden och är dessutom en gemensam internationell angelägenhet. Utifrån detta kommer SKB att under slutförvarens drifttid fortsätta delta i nationella och internationella forum och arbetsgrupper där dessa frågor adresseras. Syftet är att ha kännedom om det aktuella kunskapsläget, bidra till att ändamålsenliga principer, metoder och verktyg utvecklas liksom att lämpliga insatser vidtas.

Uppnådda resultat och program

En övergripande plan för SKB:s arbete med kunskaps- och informationsbevarande fastställdes 2023. Planen beskriver hur SKB under tillståndsskedet och uppförandeskeden ska arbeta med området. Frågor som berörs är var SKB lägger tyngdpunkten i arbetet, var SKB är drivande och hur omvärldsbevakning genomförs.

SKB har tidigare deltagit i de internationella initiativen Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M) och Assembling Alternative Futures for Heritage, vilka presenterades i Fud-program 2019. Slutrapporten från OECD/NEA:s arbete RK&M publicerades 2019 (OECD NEA 2019) och pekade på en bevarandestrategi som involverar flera olika metoder som är verksamma på olika tidskalor, består av olika medium och innehåll, använder sig av olika överföringsmetoder, involverar olika aktörer samt förläggs till flera olika platser. Att välja en diversifierad bevarandestrategi anses ge förutsättningar för informations- och kunskapsbevarande över generationer.

En aktiv del av arbetet är att identifiera den tekniska informationsmängd (fysiska objekt, grunddata, modeller, anläggningsbeskrivningar) som behöver bevaras i ett långsiktigt perspektiv. Specifikt kommer SKB tillämpa metodiken för Set of Essential Records (SER) steg för steg för tekniska informationsmängder. Metodikens utveckling och möjliga AI-tillämpningar ska även följas inom OECD/NEA:s IDKM EGAAP 2025–2027.

Inom det internationella samarbetet har ett förslag tagits fram på en Key Information File (KIF), som ett format och kortfattat dokument som syftar till att göra det möjligt för samhället att förstå avsikten med slutförvaret och att minska sannolikheten för onödigt mänskligt intrång. 2021 påbörjades ett forskningsprojekt vid Linköpings universitet delvis finansierat av SKB, med metodutveckling och

skrivande av en KIF för SFK. Arbetet har till stor del utgått från de principer som OECD/NEA har tagit fram om hur en KIF definieras, med anpassning för att SFK ännu inte är uppfört. Forskningsprojektet är nu avslutat och ett första exempel på en KIF (Keating och Storm 2025a) för ett slutförvar för använt kärnbränsle finns framme tillsammans med erfarenheter till nytta för det fortsatta arbetet. I detta exempel på en KIF har en metod kallad Shire method (Share – Imagine – Renew) använts vilken bland annat pekar på mottagarens/läsarens ansvar att vidta åtgärder för att säkra fortsatt uppdatering av dokumentet om det övergripande ansvaret inte är tydligt vid aktuell tidpunkt. Bland erhållna erfarenheter att ta med i fortsättningen har särskilt frågor kring tidshorisont, målgrupp och detaljnivå, val av språk, ansvarsförhållanden för dokumentet, dokumentformat, illustrationer och typ av publicering varit framträdande (Keating och Storm 2025b).

Internationell samverkan

Som en fortsättning på OECD/NEA:s arbete RK&M initierade NEA:s Radioactive Waste Management Committee (RWMC) 2019 ett så kallat Working Party on Information, Data and Knowledge Management (WP-IDKM) med bredare fokus på information, data and kunskapsbevarande.

Ambitionen på lång sikt är att ge deltagande organisationer inom IDKM mogna standarder, verktyg och tekniker med avsikt att kunna skapa system för att effektivt fånga och bevara information, data och kunskap. Detta tillsammans med historisk information där så behövs. Genom mogna processer kan väsentliga SER upprättas och skapande av en KIF kan påbörjas enligt en internationellt föreslagen struktur. Vidare betonar IDKM behovet av att nationella strategier utarbetas för hur man bevarar medvetenheten över generationer om förslutna förvar för radioaktivt avfall, utarbetade i samarbete med olika aktörer i samhället. En sådan strategi omfattar även internationellt samarbete. Tillämpning av modern datavetenskap, maskininlärning och andra framväxande metoder ska ske och utvärderas för att underlätta effektiv kunskaps- och informationsinsamling. Insatserna är indelade i fyra arbetsområden genom tre expertgrupper: safety case, knowledge management, archiving and awareness preservation. Bland resultaten kan nämnas genomlysning av implementering av KIF baserat på tillgängliga exempel från olika organisationer, utveckling och testning av SER, framtagande av myndighetskatalog kring lagstiftning, förordning och vägledning som styr bevarandet av register och kunskap för slutförvar av radioaktivt avfall samt praktisk implementering av verktyg för kunskapsbevarande.

SKB avser att aktivt delta i den under 2025 initierade särskilda arbetsgruppen EGAAP (Expert Group on Archiving och Awareness) under NEA vilken fokuserar på uppgiften att bevara data, information, register och medvetenhet under långa tider. Inriktningen är att ytterligare förbättra urvals- och utvecklingsprocesser för de ovan nämnda sammanfattningsdokumenten SER och KIF, utveckla verktyg för arkivering och skapa utbyte av erfarenheter och lärdomar inom dessa områden. Sedan 2022 deltar SKB även i arbetsgruppen om Knowledge Management, se vidare avsnitt 5.6.3. Inom pågående Eurad-samarbete är också Knowledge Management en ingående viktig komponent.

5 Arbetssätt, kompetens och resurser

För att kunna ta hand om kärnavfall och använt kärnbränsle på ett säkert och kostnadseffektivt sätt har SKB ett systematiskt arbetssätt för genomförandet av den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna uppföra och ta i drift de nya anläggningarna. För tillståndsgivna anläggningar gäller SSM:s föreskrifter och hur dessa tillämpas avseende arbetssätt, resurser och kompetens redovisas inte här. Kapitlet fokuserar på den iterativa processen att utveckla, implementera och utvärdera slutförvar för kärnavfall och använt kärnbränsle, vilket innefattar forskning och teknikutveckling samt utvärdering av säkerhet under drift och efter förslutning. Här beskrivs även översiktligt hur SKB tillförsäkrar sig att den kompetens, de resurser och de verktyg som behövs finns tillgängliga.

5.1 Fud-programmets roll för öppenhet och insyn

SKB kan konstatera att Fud-processen har utgjort en viktig del av den kontinuerliga kunskapsuppbyggnaden och de successiva vägval som gjorts för frågor kring utveckling av slutförvarssystem. Universitet/högskolor, miljögrupper, kommuner och samhället i övrigt har kunnat följa Fud-processen och har genom denna påverkat utvecklingen av kärnavfallsprogrammet under de decennier som passerat. Fud-programmet, och processen kring detta, har medverkat till öppenhet och insyn i forsknings- och utvecklingsfrågor för de slutförvarssystem reaktorinnehavarna ansvarar för att, genom SKB, implementera. Regeringen konstaterar också avseende Fud-program 2022 att ”Regeringen finner också, i likhet med Strålsäkerhetsmyndigheten, att redovisningen i Fud-program 2022 ger förståelse för SKB:s och reaktorinnehavarnas övergripande planer och medger den öppenhet och insyn i SKB:s planer och program som lagstiftningen syftar till.”

Regeringen återkopplar vidare angående Fud-program 2022 att ”Liksom Kärnavfallsrådet anser regeringen att en fortsatt öppenhet och insyn är av stor betydelse.” SKB kommer att medverka vid ett informationsmöte om Fud-program 2025 med remissinstanser, arrangerat av SSM, samt presentera innehållet för granskningsgruppen inom SSM.

SKB publicerar löpande relevanta resultat från forskningen i vetenskapliga och andra tidskrifter och uppmuntrar egen personal, forskningsinstitutioner och konsulter som SKB samarbetar med, till att publicera. SKB:s resultat presenteras och diskuteras även öppet på vetenskapliga konferenser och redovisas i konferensdokumentationen. Det internationella samarbetet har haft och har en särskild betydelse för att pröva resultat av experiment och analyser i en konstruktiv teknisk och vetenskaplig anda. Utbytet är också en källa för nya idéer och uppslag för fortsatt arbete.

SKB arbetar även för att sprida forskningsresultat utanför vetenskapsvärlden, se avsnitt 5.2.2.

5.2 Forskning

5.2.1 Forskningens framtida inriktning

Syftet med förvaren är att långsiktigt skydda människor och miljön från radiologiska skadeverkningar av kärnavfallet och det använda kärnbränslet, och säkerheten efter förslutning är därför central för utformning, lokalisering, uppförande och drift av förvaren. Formellt avgörs om ett förvar har en acceptabel grad av säkerhet genom att myndigheter bedömer SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning. Allt SKB:s arbete inom detta område har dock sin grund i att SKB självt måste skaffa sig en övertygelse om att föreslagna förvarskoncept är säkra på lång sikt. SKB:s forskningsprogram drivs därför i hög grad utifrån behovet av att analysera förvarens säkerhet efter förslutning. En viktig del i varje sådan analys är utvärderingen av kunskapsunderlaget, både för processer och för data som ingår i analysen. Resultaten av dessa utvärderingar samt granskningen av SKB:s tillståndsansökningar ligger väsentligen till grund för forskningsinsatserna som planeras i detta Fud-program.

De forskningsinsatser som planeras rör främst SKB:s befintliga och planerade slutförvar för kärnavfall och använt kärnbränsle. I och med att uppförandet av de nya anläggningarna påbörjas, flyttas fokus i arbetet från forskning och principlösningar till teknikutveckling av kvalitetsstyrda industrialiserade system. Forskningsinsatser och säkerhetsvärderingar kommer att behövas som stöd till teknikutvecklingen och då särskilt för framtagandet av praktiskt användbara konstruktionsförutsättningar (krav) på slutförvaren samt för att kunna verifiera att framtagna tekniska lösningar uppfyller dessa krav.

Även om det idag finns en omfattande kunskap inom alla de områden som är av betydelse för säkerheten efter förslutning, kan man förvänta sig att nya frågor tillkommer. Ursprunget till frågor som kan komma att kräva forskningsinsatser är av flera slag:

- Internt hos SKB vid utveckling av förvarskoncept och i samband med genomförande av analyser av säkerheten under drift och efter förslutning. Även platsundersökningar kan generera nya frågor och i takt med att en plats undersöks alltmer i detalj. Nya eller förändrade avfallstyper kan också leda till nya frågor.
- Från omvärlden, till exempel inom det vetenskapliga samfundet och inom kärnavfallsorganisationer i andra länder.
- Från SSM och remissinstanser i samband med granskningar av Fud-program och underlag i tillståndsprövningar.

I SKB:s uppgift ingår även kunskapsbevakning av närliggande områden som kan ha betydelse för kärnavfallsprogrammet i framtiden. Det rör framför allt utvecklingen av metoder för behandling och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle. Detta sker i huvudsak genom upprätthållande av internationella kontakter och genom att följa branschtidskrifter.

5.2.2 Granskning, öppenhet och insyn

Grundprincipen är att SKB:s forskningsresultat ska publiceras i öppen litteratur för att extern granskning ska underlättas. Forskningsresultat har sedan forskningsprogrammet inleddes på 1970-talet publicerats, och kommer även fortsättningsvis att publiceras i SKB:s rapportserier som är tillgängliga via SKB:s webbplats. Innan de publiceras har rapporterna genomgått intern och/eller extern granskning i enlighet med fastställda rutiner. Kvalitetssäkrade data från SKB:s platsundersökningar, teknikutveckling och forskning sparas i databaser och är tillgängliga för myndigheterna i deras granskning.

SKB strävar även efter att publicera relevanta resultat i vetenskapliga tidskrifter. Resultaten genomgår då en oberoende referentgranskning (peer review) som sker innan publicering. Under åren 2022 till 2024 publicerade SKB:s medarbetare och forskare som är finansierade av SKB närmare 100 vetenskapliga artiklar och drygt 30 andra publikationer (böcker och konferensbidrag).

Utöver att själva publicera eller finansiera forskning har SKB delat med sig av data till andra forskare/institut som efterfrågat det för sin forskning. Exempel på detta är att data från SKB:s forskning på Grönland som finns tillgänglig i öppna databaser, kemidata från Forsmarksområdet som har delats med SMHI och med Svealands kustvattenvårdsförbund, bergspänningsdata från Forsmarksområdet samt materialprover på koppar och bentonit som delats med andra forskargrupper.

SKB arbetar även för att sprida forskningsresultat utanför vetenskapsvärlden, exempelvis genom publicering i populärvetenskapliga tidskrifter och publicering på SKB:s webbplats. Medarbetare på SKB deltar också på olika branschdagar för att få och ge information inom sina specialområden.

5.3 Teknikutveckling

Målet med teknikutvecklingen är att se till att det finns styrande krav och konstruktionsföresättningar samt härleda specifikationer på slutförvaren. Teknikutvecklingen ska också säkerställa att de processer, system och utrustningar som behövs för att omhänderta kärnavfallet och det använda kärnbränslet finns tillgängliga när anläggningarna ska tas i drift. Processtegen omfattar i allmänhet någon form av produktionsprocess och någon form av mätprocess för att kvalitetssäkra produktionsprocessens utfall.

Hantering och slutförvaring av avfallet ska ske på ett styrt, kontrollerat och rationellt sätt samtidigt som krav på säkerhet efter förslutning, låg stråldos vid drift av anläggningarna samt begränsad miljö- och klimatpåverkan uppfylls.

5.3.1 Styrning av teknikutveckling

Styrningen av teknikutvecklingen utgår från en strategisk teknikutvecklingsplan. Till den knyts genomförandeplaner som tydliggör och motiverar vilken teknikutveckling som behövs per slutförvarssystem, produktionslinje och teknikområde ända fram till driftsatt produktion.

Genomförandeplanerna utgår från vad som behöver vara klart vid de milstolpar som identifierats för de olika anläggningsprogrammen som redovisas i kapitel 3.

Genomförandeplanerna beskriver vägen fram till att den grundläggande teknikutvecklingen är färdig (beslutad referensutformning). Efterföljande realisering av utvald teknik och metoder (vidareutveckling/optimering, konstruktion och införande) och slutligen de anpassade valideringsaktiviteter som behöver göras vid uppförandet (av bergutrymmen och tekniska barriärer) eller inför provdriften av alla produktions- och mätprocesser, styrs via programplaner i enlighet med ledningssystemet.

Validering betraktas som genomförd i samband med godkännande av SAR för rutinmässig drift och att provdriftsfasen därmed avslutas.

5.3.2 Teknikutvecklingsprocess

SKB har en övergripande systematik för utveckling av produktionslinjer inkluderat teknisk utrustning och metoder som används och som utgår från SKB:s ledningssystem. Målet med systematiken är att skapa förutsättningar för att identifiera, planera och genomföra alla de detaljerade aktiviteter och åtgärder som krävs för att det uppförda slutförvaret ska kunna drivas på ett sådant sätt att alla tillämpliga krav på de tekniska barriärerna och bergutrymmen, inklusive de som berör säkerheten efter förslutning, uppfylls.

Processen för styrning av teknikutveckling börjar med idéer om olika koncept och slutar med att system och metoder tas i drift i aktuell anläggning. Den delas in i följande faser:

- Utveckla konceptförslag (kravbild och funktionalitet).
- Utveckla konceptbeskrivning (detaljer, simulering och validering i laboriemiljö).
- Utveckla referensutformning (demonstration och utvärdering).
- Realisera teknisk lösning (detaljkonstruktion, optimering och införande).
- Validering och kvalificering (samfunktion av processer).
- Verifiering av kravuppfyllnad.

Initialt sker utvecklingen med stort fokus på säkerheten efter förslutning då sådan kravuppfyllnad är det huvudsakliga målet för utvecklingen av slutförvar. Andra kravområden behöver dock också beaktas för att sammantaget säkerställa en robust anläggning som är möjlig att driva effektivt samtidigt som den producerar ett acceptabelt slutförvar. Exempel på andra kravområden är god säkerhet och arbetsmiljö under drift, underhållsaspekter, anpassning till människans förmåga, låg påverkan på yttre miljö samt rimliga investerings- och livscykelkostnader.

För varje utvecklingsfas för respektive produkt eller process, finns en övergripande styrning för vad som ska uppnås och således vilket underlag som ska finnas inför beslut om att gå vidare med nästa fas i utvecklingen.

Processen omfattar på en övergripande nivå vad som ska göras i respektive fas och vad som ska levereras. Genomförande av teknikutveckling (obeaktat fas och om arbetet spänner över en eller flera faser) beskrivs i SKB:s ledningssystem för styrning av uppdrag eller projekt.

Uppförandetiden för SFK är lång vilket medför att teknikutvecklingen kommer att fortsätta under uppförandet. Planer för teknikutvecklingen under SFK:s uppförande beskrivs i ansökan om godkännande av PSAR SFK.

5.3.3 Gränssnitt mellan teknikutveckling och konstruktion

Teknikutvecklingsprocessen knyter an till SKB:s konstruktionsstyrmodell som beskrivs i ledningssystemet och som tillämpas vid projektering av nya anläggningar. Konstruktionsstyrmodellen omfattar följande principiella faser:

- Anläggningskonfiguration.
- Anläggningskonstruktion.

- Systemkonstruktion.
- Detaljkonstruktion.
- Genomföra tillverkning och montage.
- Genomföra provning och driftsättning.
- Sluddokumentation.

Processkartläggningar för de olika processerna i slutförvaren tydliggör gränssnitten mellan teknikutveckling och konstruktion.

5.3.4 Kvalitetssäkring, styrning och kontroll

Ett viktigt mål för teknikutvecklingen är att det ska gå att verifiera att de tekniska lösningar som tas fram uppfyller de krav som ställs. Med kvalitetssäkring, styrning och kontroll avses de åtgärder som behöver utföras för att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på anläggningarna under drift och efter förslutning av slutförvarsanläggningarna uppfylls. Erhållna resultat ska uppfylla de acceptabla värdena för egenskaper som bidrar till säkerhet och strålskydd.

SKB tillämpar en systematisk kravhantering som styrs av ledningssystemet. Författningar, tillstånd, villkor och interna krav identifieras och bryts ned till krav på anläggning, system och komponent så att de kan utgöra grund för verifiering och validering. Detta gäller såväl enskilda krav som samordning av dem så att olika krav kan uppfyllas som helhet.

Den tekniska lösning som fastställs vid utvecklingsarbetet ska kunna produceras så att den färdiga produkten överensstämmer med den fastställda utformningen. Innan produktionen kan inledas ska de tillverkningsprocesser och provningsmetoder som SKB avser tillämpa, visas vara stabila. Mät- och produktionssystemets förmåga att åstadkomma och kvalitetssäkra fysiska objekt som överensstämmer med specifikation demonstreras i kvalificeringar och valideringar.

Kvalificeringen av varje mät- och produktionssystem anpassas till den tillverkade eller provade delens betydelse för säkerheten efter förslutning, tillgänglig beprövad teknik, tillgängliga standarder och normer samt de förhållanden som kommer att råda, såväl fysiska som organisatoriska, vid genomförandet i den planerade produktionen. Det innebär att varje kvalificering är unik, där några i princip enbart pekar på de standarder och normer som ska tillämpas medan andra kräver omfattande analyser och genomförande av demonstrationer.

Det kommer även att genomföras provning och kontroller vid uppförandet av anläggningarna för att bekräfta att uppförandet fungerar som det ska och säkerställa att inga fel eller avvikelser kvarstår som har betydelse för säkerheten efter förslutning. Kontroller inordnas i kontrollprogram vars utformning och innehåll beror av vilken typ av krav som ska verifieras, till exempel kontrollprogram för yttre miljö, program för undersökningar av berg, program för bergteknisk kontroll och program för kontroll av arbetsmiljö.

5.4 SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

5.4.1 Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet anlades under perioden 1990–1995 och verksamheten har varit en vidareutveckling av det arbete som tidigare bedrevs i Stripa gruva i Bergslagen. Laboratoriet är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk. Den under mark förlagda delen består av en tunnel från Simpevarpshalvön, där Oskarshamns kärnkraftverk ligger, till södra delen av Äspö. Under Äspö fortsätter huvudtunneln i två spiralvarv ned till ett djup av 460 meter. De olika experimenten och demonstrationsförsöken har ägt rum i nischer och korta tunnlar som grenar ut från huvudtunneln. SKB:s verksamhet i undermarksanläggningen avslutades under 2025 när alla ursprungligt satta mål för berglaboratoriet hade uppfyllts.

Äspölaboratoriet har haft en central betydelse avseende utveckling, test och verifiering av teknik och metoder för de platsundersökningar som genomförts i Laxemar och Forsmark samt för genomförande av undersökningar under pågående byggnation. Dessa erfarenheter har tillvartagits

för de kommande detaljundersökningarna för SFK och utbyggnaden av SFR i Forsmark samt för lokalisering, utformning och uppförande av ett slutförvar för långlivat avfall.

Bergets egenskaper och de hydrokemiska processer som sker i berget studerades grundligt under byggandet av anläggningen och det första decenniet laboratoriet var i drift. Resultat och kunskap från dessa insatser har legat till grund för att definiera bergets (säkerhetsmässiga) funktion relativt de övriga barriärerna.

Efter driftstarten 1995 påbörjades successivt experiment för att undersöka hur barriärerna och de övriga delarna i SFK (kapsel, buffert, återfyllning, plugg och förslutning) kan utformas och installeras för att ge en optimal funktion. Det har också lagts kraft på att utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva SFK. Tester har genomförts av i stort sett KBS-3-metodens alla delsystem i realistisk miljö, ett flertal av dem i full skala. Resultaten från flera av dessa experiment utgjorde viktigt underlag till SKB:s ansökningar om KBS-3-systemet.

SKB har nu inlett avveckling/frånträde av berglaboratoriet och avser inte att använda det framgent. Äspölaboratoriets anläggningar på markytan – Vattenkemilaboratoriet, Material- och forskningslaboratoriet, Testhallen samt vissa kontor och förråd kommer fortsatt nyttjas av SKB under Fud-perioden.

Vattenkemilaboratoriet

I Vattenkemilaboratoriet som är ackrediterat enligt SS-EN ISO/IEC 17025:2018, analyseras de kemiska komponenterna i grundvatten som är av särskild betydelse för slutförvarens funktion efter förslutning. Under platsundersökningsskedet genomfördes samtliga analyser och resultatsammanställningar för platsundersökningarna i både Forsmark och Laxemar i laboratoriet. Den samlade kompetensen i laboratoriet har nyttjats för att etablera och ackreditera motsvarande laboratorium i Forsmark. Vattenkemiverksamheten planeras att flyttas över i sin helhet från Äspö till Forsmark under Fud-perioden, se avsnitt 5.4.2.

Material- och forskningslaboratoriet

SKB driver en laboratorieverksamhet som fokuserar på forskning om lermaterialens fysikaliska och kemiska egenskaper, främst när det gäller frågor som har betydelse för pågående och kommande säkerhetsanalyser. I laboratoriet utvecklas också standardiserade test- och analysmetoder som ska användas vid kontroll av bentonitleveranser under SFK:s driftskede.

Under den gångna Fud-perioden etablerades dessutom metoder för bestämning av spårämnen i kopparmaterial, två instrument för spårämnesanalys i kopparmaterial har driftsatts. Det ena analyserar halten av väte och syre i vikt-ppm med smältextraktion och det andra analyserar halten av femton andra föroreningar i vikt-ppm genom optisk emissionsspektrometri med gnista.

Material- och forskningslaboratoriet är idag inrymt i samma byggnad som vattenkemilaboratoriet på Äspö.

Testhallen

Sedan 2007 bedriver SKB forskning och utveckling i det som nu benämns Testhallen och som ligger i direkt anslutning till Vattenkemi- och Material- och forskningslaboratoriet på Äspö. Försöken i Testhallen kompletterar de försök som har gjorts under mark samt i de andra laboratorierna på Äspö.

I Testhallen genomför SKB undersökningar av bentonitens egenskaper bland annat genom att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt. Där utvecklas även installationsmetoder och storskaliga konceptuella utrustningar för att fylla igen förvarets tunnlar med återfyllningsmaterial och pluggkomponenter för att försluta deponeringstunnlar och borrhål testas.

Vidare finns också utrustning och utrymme för mottagning av bentonitleveranser och blandning av bentonit till önskat vatteninnehåll samt en pelletspress.

5.4.2 Vattenkemilaboratorium i Forsmark

Vattenkemilaboratoriet är ackrediterat enligt SS-EN ISO/IEC 17025:2018 och sedan 2025 beläget i Geologibygnaden. Laboratoriet är anpassat för den verksamhet som bedrivs i Forsmark vilket bland annat omfattar kemiska analyser av grundvatten från undersökningsborrhål runt slutförvaren samt

omgivningskontroller av ytvatten och nederbörd. Laboratoriet använder en databas, LabWareLIMS, för resultathantering av både egna och externt utförda analyser.

5.4.3 Kapsellaboratoriet i Oskarshamn

Kapsellaboratoriet ligger inom hamnområdet i Oskarshamn och byggdes under perioden 1996–1998. På Kapsellaboratoriet utvecklas bland annat tekniken för att svetsa kapselns botten och försluta locket på den. Även kapselns olika komponenter, före och efter svetsning kontrolleras och provas här. De flesta försöken görs i full skala.

Utvecklingen av tillverkningsmetoder för kapselns alla komponenter leds av SKB och tillverkningsförsök genomförs hos externa leverantörer. Efterföljande undersökning och utvärdering av tillverkade komponenter sker till stor del på Kapsellaboratoriet. Målet är att utveckla metoder för tillverkning samt tekniker för kontroll och provning. Dessa metoder och tekniker ska uppfylla fastställda kvalitetskrav samt ha tillräckligt hög tillförlitlighet för att användas i kapselproduktionen och i Clink. I laboratoriet finns utrustningar och system för FSW, oförstörande provning med röntgen, ultraljud och virvelström samt dragprovning och kemiska analyser av koppar. Där finns också ljusoptiskt mikroskop och elektronmikroskop samt hanteringsutrustning för fullstora kapslar.

SKB har sedan 2024 ett avtal med Posiva om att under de kommande fem åren svetsa bottenar till deras kopparkapslar. För att kunna leverera godkända kapslar för deponering hos Posiva har svetsprocessen på Kapsellaboratoriet kvalificerats enligt ISO 3834.

5.5 IT-arbetsverktyg

Genomförande av det forsknings-, utvecklings- och projekteringsarbete som behövs för att utveckla kärnkraftverken och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet kräver tillgång till kraftfulla och relevanta IT-arbetsverktyg. SKB och reaktorinnehavarna har utvecklat eller införskaffat en uppsättning sådana verktyg. I detta avsnitt ges en överblick av förvaltning och utveckling av de databaser, modell- och beräkningsverktyg samt undersökningsmetoder och instrument för platsmodellering som används.

I och med att samtliga reaktorinnehavare lyder under samma övergripande krav från lagstiftning och myndigheten, så finns goda möjligheter för samordning av IT-lösningar, men även forum för gemensam samordning av planering, strategiska frågor, kravtolkning med mera.

5.5.1 Databaser

Hantering av radioaktivt avfall, främst kärnavfall, och använt kärnbränsle medför hantering av stora mängder data som samlas och struktureras i databaser. IT-området utvecklas snabbt vilket medför att verktyg och databaser tillkommer, förvaltas och byts ut fortlöpande för att följa utvecklingen gällande både säkerhet och funktionalitet. Databaser förvaltas och integreras mot system i SKB:s driftverksamhet, forskning och utveckling samt de byggprogram och projekt som nu genomförs och planeras framöver.

SKB använder databaserna Dark och PlutoWeb för använt kärnbränsle och långlivat kärnavfall som mellanlagras i Clab samt Gadd (gemensam avfallsdrift-databas) för allt låg- och medelaktivt avfall som deponerats i SFR. Databasen Gadd har utvecklats i etapper. Inom forskning och för att genomföra säkerhetsanalyser används ett flertal databaser med data hämtade från egna forskningsexperiment, men även från publika källor med till exempel radionukliddata och termodynamiska data. Primärdata från platsundersökningar och vissa laboratorieanalyser lagras i databasen Sicada och för geografisk informationshantering och modellering används en GIS-databas. Krav som identifierats och tillämpas enligt SKB:s systematiska hantering (avsnitt 5.3.4) dokumenteras och följs upp i databasen Doors NG.

Modeller relevanta för SKB:s verksamhet inom säkerhetsanalyser sparas i en egenutvecklad modelldatabas. Databasen möjliggör versionshantering samt bevarande av använda modeller använda i tidigare utförda säkerhetsanalyser.

För dokumentation av tekniken tillämpas flera applikationer och systemlösningar för att stödja olika verksamheter inom företaget. Exempel på applikation som dokumenterar anläggningarnas konstruktion är Autodesk Autocad. Det finns även databaser av mer administrativ karaktär såsom Bibas som är SKB:s biblioteks-databas och SKBdoc som är dokumenthanteringssystemet.

5.5.2 Modellerings- och beräkningsverktyg

Modelleringar och beräkningar är en central del av arbetet med konstruktion samt utvärdering och analyser av säkerhet under drift och efter förslutning. För att kunna genomföra alla de analyser och beräkningar som erfordras för att hantera kärnavfallet och det använda kärnbränslet, använder SKB såväl egenutvecklade modell- och beräkningsverktyg som kommersiella verktyg som vid behov anpassats för SKB:s tillämpning. Data läses företrädesvis från de databaser som beskrivs i avsnitt 5.5.1.

Vid genomförande av analyserna av säkerheten efter förslutning för SFK och för det utbyggda SFR användes ett stort antal modell- och beräkningsverktyg (SKB TR-10-51, TR-23-11).

Beräkningsverktygen omfattar både kommersiella datorprogram med hundratusentals användare och program speciellt utvecklade för säkerhetsanalyser med uppskattningsvis bara några tiotal aktiva användare och utvecklare. För att programvaror ska få användas som en del i säkerhetsanalyserna har SKB kvalitetskrav som beräkningsverktygen ska uppfylla. Enligt dessa krav (kapitel 2 i SKB TR-10-51) ska det finnas dokumentation som styrker att

- programvaran är lämplig för sin uppgift i säkerhetsanalysen,
- programvaran har utvecklats på ett ändamålsenligt sätt och beräkningarna ger korrekta resultat,
- programvaran har använts på ett korrekt sätt och att det finns en beskrivning över hur data överförs mellan olika beräkningsuppgifter.

Modell- och beräkningsverktygen underhålls och uppdateras löpande i takt med den allmänna utvecklingen av dator- och operativsystem. SKB:s beräkningskapacitet förbättras också löpande för att möta de ökande beräknings- och datalagringsbehoven.

SKB strävar efter att ha egen kompetens när det gäller samtliga programvaror som används i säkerhetsanalyser och bedriver ett utvecklingsarbete för att optimera vissa av de kommersiella verktygen för säkerhetsanalysernas behov. Det sker också en fortlöpande utveckling av egna beräkningsverktyg.

5.5.3 Artificiell intelligens

Under den gångna Fud-perioden har användningen av AI ökat inom många områden i samhället liksom inom kärnavfallsområdet.

SKB har några modeller som går under AI-paraplyet som både är under utveckling men även fungerande modeller som används för olika utvärderingar. Exempelvis används ett tränat neuralt nätverk för kategorisering av vattenprover till vattentyper med koppling till uppehållstider och historiskt ursprung av vattnet. SKB undersöker även möjligheterna att använda sig av neurala nätverk för att bistå vid kartering av sprickor från fotografier.

Inom SKB:s interna arbetsnätverk för AI och digitalisering hålls frekventa möten vid vilka kompetenser inom forskning, konstruktion, teknikutveckling och IT gemensamt arbetar för att med hjälp av främst maskininlärning men även generativ AI effektivisera arbete och arbetssätt i vid bemärkelse.

Två gånger per år anordnar SKB även workshopen AI-Net som är en mötesplats för att informera om pågående och planerade AI-initiativ, framför allt inom SKB, men till vilken även externa bjuds in för att presentera pågående AI-projekt samt delta i diskussioner om samarbetsmöjligheter kring framtida AI-utveckling och dess utmaningar och möjligheter. Vid de AI-Net-tillfällen som genomfördes under 2024 deltog exempelvis Uppsala universitet, Vattenfall, Nagra, PSI (Paul Scherrer Institute) och ETH Zürich.

Ett särskilt möte mellan Nagra och SKB hölls under 2024 med syftet att jämföra strategier för AI-användning och AI-utveckling och för att identifiera fortsatt samarbetspotential.

5.5.4 Undersökningsmetoder och instrument för platsmodellering

För att samla in de data som behövs för att modellera och värdera säkerheten hos ett slutförvar har SKB, i många fall tillsammans med systerorganisationer och samarbetspartner, utvecklat speciella undersökningsmetoder och instrument, som vidareutvecklas i mån av behov. SKB förvaltar en uppsättning mätinstrument primärt för genomförande av planerade detaljundersökningar kopplat till utbyggnad och uppförande av slutförvar i Forsmark. Dessa instrument förvaras idag i Instrument-

förrådet som ligger i anslutning till Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. SKB planerar att under 2025 flytta instrumentförrådet och dess verksamhet till Forsmark för att effektivisera och förbättra stödet till pågående projekt och program.

En platsbeskrivande modell är en integrerad beskrivning av platsen för förvaret och dess omgivning. Modellen utgör en sammanställning av mätdata och olika modeller (geologi, geomekanik, hydrologi, geokemi, ytekologi med flera) som beskriver platsen och dess utveckling fram till idag. En platsbeskrivande modell är en av grundstenarna för förvarsutformning, miljökonsekvensanalyser och för analysen av säkerheten efter förslutning för ett förvar.

Genom att Forsmark valts som plats för SFR och SFK anses det idag enbart motiverat att uppdatera de ämnesspecifika modellerna för Forsmark.

I Forsmark pågår, sedan platsundersökningarna avslutades, ett övervakningsprogram (se avsnitt 4.12) där data samlas in om grundvattentryck, grundvattnets sammansättning, seismiska händelser, nederbörd, temperatur, utveckling av ekosystem med mera. Det innebär att nya data successivt tillförs som kan användas för uppdatering av den platsbeskrivande modellen. Den ligger bland annat till grund för projektering och kommer att uppdateras i samband med uppförandet av förvaren. Under Fud-perioden kommer nya platsdata samlas in och utveckling av platsmodellen för Forsmark att göras som underlag för kommande säkerhetsanalyser för SFR och SFK. Större uppdateringar kommer att göras om det finns väsentlig ny information inför förnyade säkerhetsredovisningar i enlighet med aktivitets- och milstolpeplanen som redovisas i kapitel 3.

5.5.5 Kvalitetssäkring

För att se till att resultat från forskning och teknikutveckling är korrekta och håller hög kvalitet har SKB rutiner för kvalitetssäkring av resultaten. I SKB:s ledningssystem ingår bland annat rutiner för upphandling, godkännande av att leverantörer har rätt kompetens och kan leva upp till SKB:s krav, godkännande av innehåll i databaser, godkännande av modell- och beräkningsverktyg samt godkännande av indata till modeller och beräkningsresultat.

Resultat från SKB:s forskning och utveckling redovisas i allmänhet i SKB:s rapportserier eller i vetenskapliga publikationer. De rapporter och övriga dokument av betydelse för säkerheten som SKB tar fram genomgår en dokumenterad granskningsprocess, enligt SKB:s ledningssystem, se avsnitt 5.2.2. Granskning sker för att säkerställa att dokumenten uppfyller ställda krav vad gäller omfattning och innehåll samt att den information som lämnats är sakligt korrekt och baserad på godkända källor och beräkningsverktyg.

5.6 Kompetens, resurser och samarbeten

SKB:s breda och mångfacetterade verksamhet medför att företaget behöver tillgång till kompetens inom många olika områden. En stor del av den kunskap och teknik som SKB behöver ingår i den allmänna naturvetenskapliga kunskapsmassan och utvecklas inom vetenskapssamhället, medan andra delar är specifikt kopplade till hantering och slutförvaring av kärnavfall och använt kärnbränsle. Det gäller till exempel stora delar av den detaljerade kunskapen om funktionen hos förvarens barriärer i en geologisk miljö. Den är så specifik för kärnavfallsområdet att kunskapen behöver genereras av SKB självt eller i samarbete med andra aktörer.

SKB behöver säkerställa att företaget har tillräcklig egen kompetens för att kunna tillgodogöra sig den kunskap som finns i forskarsamhället och som har betydelse för hantering och slutförvaring av avfall. Det behöver också finnas tillräcklig kompetens för att identifiera nya forskningsbehov och vara en kompetent beställare av forskningsinsatser. Det är därför nödvändigt att det finns en sammanhållen grupp av personer med kunskap om metodiken för analys av säkerhet efter förslutning och med en bred och tvärvetenskaplig insikt om hur de olika förhållanden, händelser och processer som påverkar förvarets säkerhet samverkar. I gruppen behövs också personer med djup kunskap om de ämnesområden som påverkar säkerheten. Genom att SKB driver egen forskning säkerställs denna kompetenshållning.

Behovet av kompetens för att styra och genomföra teknikutveckling utgår från de planer som tas fram (avsnitt 5.3.2). För att kunna värdera vilken utveckling som behövs och för att kunna styra den behöver SKB expertkunskap inom respektive produktionslinje. Utvecklingen kan i många fall utföras

av olika forskningsinstitut eller konsultbolag, men inom vissa områden där det finns få andra köpare av den kompetens som SKB efterfrågar, behöver SKB egen kompetens. Det gäller speciellt inom områdena kärnavfall, använt kärnbränsle, konstruktion av kapslar, utveckling av cementbaserade material och lerbarriärer samt metodik för undersökning av berget. SKB:s process för kompetensförsörjning syftar till att säkerställa att kompetensen inom dessa områden finns och utvecklas, både på kort och lång sikt.

För att stärka den industrigensamma kompetensen samt samordningen och optimeringen av systemet för omhändertagande av kärnavfall så att det blir robust, kostnadseffektivt och transparent har reaktorinnehavarna, dess ägare och SKB skapat en Virtuellt avfallsorganisation (VAO). Optimeringsarbetet görs ur ett helhetsperspektiv för systemets bästa, med bred förankring samordnat mellan parterna, med SKB som sammanhållande och ansvarig för framdriften.

För att kunna genomföra vissa uppgifter av betydelse för SKB:s verksamhet behövs tillgång till speciella laboratorier och speciella instrument eller verktyg, till exempel SKB:s Material- och forskningslaboratorium för genomförande av särskilda analyser av bentonit samt Kapsellaboratoriet (avsnitt 5.4).

Den personal som medverkar vid utförandet av transporter utbildas speciellt inom områdena strålskydd, fysiskt skydd, åtgärder i händelse av olycka samt sådan utbildning som krävs enligt MSB:s föreskrifter om transport av farligt gods. Dessutom säkerställs att personal som deltar i transporter har kännedom om SKB:s transportsystem och är förtrogen med såväl SKB:s transporthandböcker som SKB:s transportdokument samt lokalt utarbetade instruktioner kopplat till transporter.

5.6.1 Kompetens och samarbeten inom avfallshantering och slutförvaring

De grundläggande behoven av kompetens inom forskning, säkerhetsanalys och teknikutveckling tillgodoses av SKB-anställd personal. Inom flera av dessa områden finns också behov av fördjupad kompetens och tillgång till större personella resurser för forsknings- och utvecklingsinsatser. För detta anlitas externa specialister, ofta från nationella och internationella universitet och högskolor, forskningsinstitut och konsultbolag, men även från SKB:s systerorganisationer i andra länder. Många har i varierande utsträckning varit knutna till SKB:s verksamhet i tiotals år. För tillfälliga behov av kompetens och resurser, till exempel för större uppdrag avseende projektering och konstruktion av anläggningar, anlitas i allmänhet externa leverantörer. SKB:s ägare är också en viktig resurs.

Uppbyggnad, utveckling och bevarande av kompetens

SKB är som verksamhetsutövare skyldig att tillse att uppgifter löses av personer med erforderlig kompetens. Om den kompetensen ska tillgodoses med egen personal eller genom externa leverantörer eller konsulter är till viss del en taktisk fråga. Den avvägning som görs baseras både på en bedömning av vilka uppgifter som är av sådan strategisk eller säkerhetsmässig betydelse att de bör skötas av egen personal, risker med att vara beroende av externa leverantörer och ekonomiska överväganden. Utfallet av bedömningar kring kompetensbehov och avvägningen mellan egen personal och externa leverantörer kan variera över tid.

SKB:s strategi är att ha egen personal med kompetens för att kunna styra och leda arbetet med forskning, utveckling och drift av system för omhändertagande av kärnavfall och använt kärnbränsle. I den ingår att SKB ska ha erforderlig kompetens för att upphandla och värdera de tjänster och varor SKB beställer av externa leverantörer. SKB:s inriktning är att egna resurser ska besitta den kompetens som behövs och utföra de arbetsuppgifter som är av strategisk betydelse för strålsäkerheten. Exempel är säkerhetsanalysmetodik och utveckling av kapslar för använt kärnbränsle där SKB valt att till stor del ha egna resurser för att på lång sikt bygga och bibehålla kompetens inom företaget. Om produkter eller tjänster i övrigt finns hos SKB:s ägare eller är kommersiellt tillgängliga så är den allmänna inriktningen att använda dessa.

SKB har i ledningssystemet en fastställd process för kompetensförsörjning. Den är uppbyggd enligt IAEA:s så kallade SAT-modell (Systematic approach to training) som innebär ett utvecklat arbetssätt för kvalifikation med kravnivåer, kompetensbedömningar och utbildningar kopplat till områden och hantering av gap. Processen medför att SKB har ett systematiskt arbetssätt för att efterleva interna och externa krav för att säkerställa att tillräckligt med kompetens finns tillgänglig för att upprätthålla en hög säkerhet och nå verksamhetens mål på kort och lång sikt. I kompetenssäkringen ingår även att förbereda för kommande förändringar i verksamhet och yttre krav.

Löpande analyser av kompetensbehov, kompetensutveckling och planeringarna görs både på individ- och gruppnivå och med en tidshorisont på fyra till fem år. Med tanke på den tid det tar att utveckla kompetens så är framtidsperspektivet alltid väsentligt. Även strategiska kompetensanalyser med en tidshorisont på cirka tio år görs regelbundet. Utbildnings- och kompetensöverföringsprogram upprättas vid behov för individer och grupper. Här kan till exempel nämnas att program för att säkra kompetensöverföring inom områdena hydrogeokemi och säkerhetsanalysmetodik för SFK har genomförts under den gångna Fud-perioden.

För att lagra och bevara den information som identifieras för att säkerställa kompetens och bemanning på kort och lång sikt använder SKB stödsystemet Competence Tool (CT). Till CT länkas dokument från SKB:s dokumenthanteringssystem som gäller kompetensanalyser, kvalifikationer (kompetensbeskrivningar), befattnings- och rollbeskrivningar, utbildningar, stöddokument. Mål- och utvecklingssamtal samt kompetensbedömningar både för individ och grupp inom organisationen följs upp i CT.

Samarbeten med universitet, högskolor och forskningsinstitut

SKB samarbetar med ett stort antal svenska och internationella universitet, högskolor och forskningsinstitut för att erhålla kritisk kunskap inom områden där sådan saknas. Genom detta har SKB utvecklat ett brett kompetensnätverk med djupa kunskaper inom flera centrala områden. Tillgången till sådan expertkompetens har i många fall varit, och kommer även fortsättningsvis att vara, en nyckelfaktor för att kunna lösa kritiska forsknings- och utredningsfrågor. Samarbetet kan handla om både kortare, fokuserade forskningsuppdrag och längre uppdrag vilka kan ske inom ramen för en post doc-anställning eller ett doktorandarbete.

SKB-finansierade doktorander utgör en presumtiv kompetensreserv för SKB och andra i branschen. För närvarande finansierar eller delfinansierar SKB ett tiotal doktorandprojekt. Under den gångna Fud-perioden har sju SKB-finansierade doktorander slutfört sina studier och doktorerat, och genom åren har SKB finansierat eller delfinansierat betydligt fler än 100 doktorander. Många av dessa har under forskarutbildningen och efter doktorsexamen haft nyckelroller i framdriften av SKB:s arbete. Idag är ett tiotal tidigare SKB-finansierade doktorander anställda av SKB.

Samarbeten med branschorganisationer och externa leverantörer

SKB samarbetar med andra avfallsorganisationer runt om i världen. Dessa samarbeten har varit och kommer fortsättningsvis vara viktiga för att säkerställa tillgång till kompetens och erfarenheter från motsvarande utvecklingsarbeten i andra länder. Samarbetet sker både bilateralt och i konstellationer med flera organisationer. Ett exempel är det nu avslutade projektet GAP, ett samarbete mellan SKB, Posiva i Finland och NWMO i Kanada, som omfattade studier av hur en kommande inlandsis kan påverka ett slutförvar för använt kärnbränsle. Inom kopparområdet samarbetar SKB med NWMO i Kanada, både i specifika forskningsuppdrag och i internationella samarbeten där NWMO har en drivande roll, till exempel i MICA-projektet (Michigan International Copper Analogue) och forskningskonsortiet vid Canmet MATERIALS. Ett ytterligare exempel är Post-projektet som fokuserar på experimentella studier av mekaniska egenskaper för sprickor där samarbete sker med NWMO och Posiva samt där forskningsinstitutet RISE ingår.

Det finns särskilda forum där specialister och modelleringsgrupper från flera länder samarbetar kring utvalda frågor som har betydelse för slutförvaring av kärnavfall. Två forum finns etablerade inom grundvatten- och transportmodellering respektive tekniska barriärer: SKB Task Force GWFTS och SKB Task Force EBS. Dessa samarbeten syftar till att utvärdera olika koncept och modelleringsmetoder samt främja samverkan mellan experimenterare och modellörer. SKB Task Force EBS kommer att avslutas vid årsskiftet 2025/2026.

Inom ytekosystem samarbetar flera organisationer i Bioprota med att utveckla metodik, sammanställa data och jämföra modeller för att beräkna konsekvenser på människor och miljön.

Edram är en internationell sammanslutning för organisationer som ansvarar för hanteringen av radioaktivt avfall. Det är ett forum vars främsta syfte är att främja utbyte av kunskap, erfarenheter och information mellan medlemmarna. Sammanslutningens mål är att utgöra ett forum där beslutsfattare kan diskutera bland annat strategiska frågor av gemensam karaktär i syfte att främja förståelsen för avfallshantering och de internationellt erkända principer som gäller för detta samt stimulera och främja samordning av forskning och utveckling. Diskussionerna leder till utbyten på olika nivåer i organisationerna, till exempel har SKB haft en medarbetare från Nagra på rotation i tre månader.

För att säkerställa tillgång till nödvändig kompetens och tillräckliga resurser under perioder med hög arbetsbelastning, framför allt under pågående analyser av säkerhet efter förslutning för de olika förvararna, samarbetar SKB med flera konsultbolag från såväl Sverige, Europa som Nordamerika. Flera av dessa samarbeten har pågått under lång tid och experter inom dessa konsultbolag utgör en viktig del av SKB:s kompetensnätverk.

Omvärldsbevakning och samverkan inom kärnkraftsbranschen med inriktning mot kompetens och utbildningsfrågor pågår inom Nationellt kompetensforum där representanter från SKB, FKA, RAB, OKG, KSU samt Vattenfall deltar. När kompetensfrågor har en tydlig koppling mot säkerhetsfrågor tas även stöd av Kärnkraftindustrins säkerhetskoordineringsgrupp (KSKG).

Samarbete med Posiva

SKB har sedan många år ett fördjupat samarbete med sin systerorganisation Posiva i Finland. Posiva har valt att utforma sitt slutförvar för använt kärnbränsle enligt SKB:s KBS-3-metod. År 2001 ratificerade Finlands riksdag den finska regeringens principbeslut om metod och plats för det finska slutförvaret. Posiva började 2004 uppföra en berganläggning (Onkalo) i Olkiluoto och den har använts och används fortfarande för forskning och utveckling.

År 2012 lämnade Posiva in en ansökan om tillstånd för att uppföra en inkapslings- och slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden och 2015 gav finska regeringen tillstånd för detta. Posiva har sedan dess uppfört nya schakt, de första deponeringstunnlarna samt inkapslingsanläggningen, och avser kunna påbörja drift, när tillstånd för detta ges. Beslutet om drifttillstånd fattas av den finska regeringen, men först krävs ett positivt utlåtande från Strålsäkerhetscentralen (STUK). Utlåtandet från STUK kommer senast i slutet av 2025.

Förutom de effektivitetsvinster som detta samarbete för med sig förstärks även SKB:s förmåga att genomföra forskning och utveckling. Framtagandet av gemensamma planer och gemensamma projekt innebär att dessa får en bredare och mer allsidig beredning och granskning än om SKB drev detta arbete på egen hand. SKB får genom samarbetet tillgång till Posivas anläggningar, speciellt Onkalo, och får även tillgång till de experter som Posiva samarbetar med. Samarbetet har även betydelse för den framtida kompetensförsörjningen.

Innan deponeringen påbörjas i Onkalo genomför Posiva ett test inför ett slutligt funktionsprov av centrala delar i anläggningen. Provkörningen startade 2024. SKB deltar i testet för att erhålla kunskaper och erfarenheter inför en realisering av KBS-3-systemet. Viktiga lärdomar erhålls bland annat avseende planering inför produktionslinjetester och samfunktionsprov.

Samarbeten inom EU, IAEA och OECD/NEA

SKB deltar sedan många år aktivt i internationella samarbeten via projekt och arbetsgrupper inom EU, OECD/NEA och IAEA.

EU:s arbete inom kärnenergiområdet regleras av Euratomfördraget. EU-kommissionen strävar bland annat efter att harmonisera kärnavfallshanteringen i Europa och har tagit fram direktiv om både kärnsäkerhet och avfallshantering. Forskning inom kärnavfallsområdet har varit en del av EU:s forskningsprogram i många år. Omkring 2000 beslutades att urvalet av forskningsprojekt på ett tydligare sätt skulle kopplas till behoven hos de ledande kärnavfallsorganisationerna i Europa. Målsättningen från kommissionens sida var att på sikt outsourca styrningen av EU:s forskningsfinansiering inom kärnavfallsområdet till dem som behövde forskningen i en så kallad Joint Programming. Detta ledde fram till ett programförslag, Eurad, med en EU-finansiering för perioden 2019–2024. Målsättningen var att det arbete som genomförs inom Eurad ska vara till nytta såväl för mogna kärnavfallsprogram som för mindre utvecklade program, samt för såväl kärnavfallsorganisationer som myndigheternas tekniska stödorganisationer. Då Eurad främst sysslar med slutförvarings- och strategifrågor uppstod även ett behov att inkludera avfallsbehandling och karakterisering med mera, varför ett kompletterande projekt PREDIS finansierades för samma tidsperiod. Första fasen av Eurad avslutades under 2024 och en femårig fortsättning, Eurad-2, har påbörjats. Inom detta har Eurad-1 och PREDIS slagits ihop. Eurad-2 inkluderar 21 europeiska länder, sammanlagt cirka 140 organisationer och omfattar 18 olika projekt för perioden 2024–2029. Arbetet inom Eurad-2 är uppdelat på strategiska studier, kärnavfallsforskning, avfallsbehandling, knowledge management med konkreta projekt i så kallade arbetspaket. Knowledge management har stor

betydelse i arbetet, dels genom att göra kunskapssammanställningar, dels genom att involvera unga forskare och tekniker i arbetet.

SKB deltar aktivt i Eurad-2, bland annat i ett flertal delprojekt och leder delprojektet SAREC som behandlar bränsleupplösning. Detta ger ett brett internationellt sammanhang med slutförvarsorganisationer och ämnesexperter och erbjuder påverkansmöjligheter, nätverksbyggande samt kunskap om bäst internationell praxis vid sidan av delad finansiering.

SKB har en aktiv roll inom IGD-TP vilket är avfallsorganisationernas part inom Eurad-programmet. Plattformen har varit betydelsefull för inriktningen av EU:s forskningsprogram. Medlemmar i plattformens styrgrupp är organisationer med ansvar för avfallsprogram i de elva länderna, ONDRAF/NIRAS (Belgien), Posiva (Finland), Andra (Frankrike), BGE (Tyskland), Enresa (Spanien), SKB (Sverige), Nagra (Schweiz), NWS (Storbritannien), Puram (Ungern), Covra (Nederländerna) och Surao (Tjeckien). Förutom att vara en aktiv part inom Eurad-samarbetet så bedriver IGD-TP egna forsknings- och utvecklingsprojekt.

Samarbetet inom OECD/NEA är inte direkt inriktat på forskning utan syftar snarare till att ta fram gemensamma synpunkter och ståndpunkter inom olika områden som berör användningen av kärnteknik, samt att utbyta erfarenheter. NEA är organiserat i en steering committee och ett antal tekniska underkommittéer varav SKB deltar aktivt inom RWMC och Committee on Decommissioning and Legacy Management (CDLM) som består av företrädare från myndigheter och avfallsorganisationer. Betydelsefulla expertgrupper eller arbetsgrupper under dessa är för SKB:s del Integration Group for the Safety Case (IGSC) och Working Party on Information, Data and Knowledge Management.

IAEA håller också i ett antal projekt och grupper där SKB och dess ägare deltar i flera projekt inom såväl slutförvars- som avvecklingsfrågor.

Sverige har ratificerat IAEA:s avfallskonvention (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management) och SKB bidrar till den nationella rapport som SSM, i enlighet med konventionen, tar fram vart tredje år.

5.6.2 Kompetens och samarbeten inom avveckling

Uppbyggnad, utveckling och bevarande av kompetens

Avveckling av reaktorinnehavarnas och SKB:s kärntekniska anläggningar kommer att pågå ända fram till 2070-talet, då anläggningarna för omhändertagande av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle planeras att avvecklas. Avvecklingen kommer inte ske i ett jämt flöde utan kommer, enligt nuvarande planering, genomföras i tre huvudsakliga etapper: en på 2020-talet (nu), en på 2040-talet och den slutliga på 2070-talet. En utmaning är därmed att säkerställa tillgång till kompetens för alla tre avvecklingsetapperna, eftersom behovet av avvecklingskompetens mellan etapperna kommer vara begränsat i Sverige.

Att säkra kompetens inom området kommer vara en för bolagen strategiskt viktig fråga, på både kort och lång sikt. Inom landet kommer ett samarbete med universitet och högskolor vara en del i den långsiktiga kompetensförsörjningen, liksom att fortsätta uppmuntra samarbete inom branschen för att både behålla och attrahera ny personal inom dessa områden. Etableringen av Nordic Nuclear Trainee Program (NNTP) är ytterligare ett steg för att möta kommande behov.

För att klara den första etappen är det nödvändigt att arbeta strukturerat med kompetensuppbyggnad och erfarenhetsåterföring inom avvecklingsområdet. En viktig del är att bevara den nyckelinformation och nyckelkompetens som erhållits vid de tidiga avvecklingsprojekten, genom att den dokumenteras och därmed kan nyttjas i kommande etapper.

På motsvarande sätt är det betydelsefullt att ha ett löpande utbyte inom och mellan bolagens tyska och svenska verksamheter, i syfte att säkerställa överföring av relevanta (då avvecklingsprojekten har olika förutsättningar) erfarenheter och lösningar för en säker och effektiv avveckling. Bolagen har etablerade kontakter med internationella leverantörer med betydande erfarenhet av praktisk avvecklingsverksamhet, även utanför den traditionella kärnkraftssfären. Dessutom har olika former av samverkan initierats med syfte att inhämta och bygga upp kompetens.

På dessa sätt möjliggörs att erfarenheter och kompetens successivt byggs upp och säkras inom branschen till slutfasen av den första avvecklingsetappen.

Ett annat exempel är den utbildningsverksamhet som branschen etablerat inom KSU.

En viktig beståndsdel i arbetet med att säkra kompetens till kommande etapper av avvecklingen är, att noggsamt och strukturerat dokumentera de praktiska erfarenheter som bolagen gör under de tidiga avvecklingsprojekten. Det innebär att tydligt beskriva hur organisation och styrning lämpligen bör utformas beroende på arbetsuppgiften, hur en anläggning i drift bäst kan förberedas inför rivning till exempel vad gäller dokumentation, vilka olika former av avvecklingskoncept som finns, vilka erfarenheter som finns kopplat till dessa samt vilka koncept som fungerar relaterat till olika typer av anläggningar och i olika kontext. Förenklat kan detta sammanfattas med att efter att denna avvecklingsetapp är avslutad, har branschen etablerat ett arbetssätt över hur avveckling bäst planeras, styrs och genomförs med hänsyn till säkerhet och effektivitet.

Utöver detta är det givetvis kritiskt att anläggningskännedom samt formell kompetens inom till exempel strålskydd långsiktigt säkerställs. Detta kräver såväl ett branschgemensamt samarbete som en samverkan med utbildningsväsendet. En del i detta är också SSM:s nationella strategi för Sveriges kompetensförsörjning inom strålsäkerhetsområdet.

Ett exempel på ett branschgemensamt samarbete är SKC, en centrumbildning där SSM, kärnkraftverken och Westinghouse Electric Sweden AB tillsammans med KTH, Chalmers och Uppsala universitet sedan 30 år stödjer utbildning, forskning och utveckling inom kärntekniska tillämpningar vid högskolor och universitet i Sverige.

Det är slutligen viktigt att notera att även om behovet av avvecklingskompetens inom Sverige kommer att vara begränsat mellan avvecklingsetapperna, kommer det internationellt att pågå avvecklingsverksamhet i stor skala och under lång tid. Därmed kommer behovet av kompetens att vara stort över tid, vilket innebär att motivet att etablera och bevara kompetens kommer att vara betydande, vilket med hög sannolikhet innebär att relevant kompetens kommer att finnas tillgänglig internationellt under hela den svenska avvecklingsperioden.

Industrigemensamma samarbeten

Ur en nationell synvinkel behövs en samordning av avvecklingsfrågorna, både inom kärnkraftsföretagen och mellan reaktorinnehavarna och SKB samt övriga tillståndshavare för att kunna säkerställa att hela kedjan från avvecklingsplanering till slutförvaring av avfallet sker på ett optimerat sätt. Olika fora finns för att stödja detta, där även en del internationella forum är betydelsefulla.

På nationell nivå finns SKB:s Fud- och plangrupp där reaktorinnehavarna och SKB:s ägare ingår. Gruppens uppgift är att vara rådgivande till SKB i frågor avseende Fud-program och Planrapporter och inom området utgöra ett kontaktorgan. Medlemmarna i gruppen förankrar inom de egna bolagen och svarar för att hålla ihop respektive reaktorinnehavares och ägares synpunkter på SKB:s Fud-program och Planrapporter.

Uniper och Vattenfall samverkar i syfte att stödja SKB i industrins totala utmaningar kopplat till bland annat avveckling och avfallshantering och deltar i flera samverkansforum för att ge stöd för branschens utveckling. För att ytterligare stödja linjechefer inom SKB och reaktorinnehavarna, finns ett specifikt forum för avfallschefer etablerat inom VAO där SKB är sammankallande. Deltagarna har mandat att fatta beslut och prioritera åtgärder som SKB och reaktorinnehavarna ska genomföra.

SKB och reaktorinnehavarna deltar även i internationella forum inom området avveckling som arrangeras av bland annat IAEA, OECD/NEA respektive EU-kommissionen. Samverkan sker bland annat genom deltagande i OECD:s samarbetsorganisation för kärnenergifrågor NEA och Eurad. Inom NEA sker deltagande i CDLM, som består av företrädare från myndigheter och avfallsorganisationer samt i grupper under CDLM, se även avsnitt 5.6.1. Deltagande i Eurad och dess aktiviteter handlar bland annat om att inhämta och dela erfarenheter inom avfall- och avvecklingsområdet mellan länder i Europa.

Samarbeten inom Uniper

Uniper har under de senaste åren etablerat en intern samordning av rivningsverksamheten. Först genom att utforma ett gemensamt rivningsprogram som ansvarar för rivningen av anläggningarna på OKG och BKAB. Denna samverkan har formaliserats genom en etablering av affärsdriven rivningsverksamhet inom Uniper Nuclear Services.

Inom ramen för programmet har OKG och BKAB sedan 2021 ett internt avtal med Sydkraft Nuclear Services AB för leverans av det tekniska genomförandet av rivning och avfallshantering av de ingående arbetspaketen vid respektive anläggning. Arbetet sker på uppdrag av reaktorinnehavarna OKG och BKAB som ansvarar för att verksamheten på anläggningarna följer aktuella tillstånd.

Inom rivningsprogrammet sker aktiv erfarenhetsåterföring och kompetensöverföring i syfte att hitta och tillvarata synergier genom den sekventiella rivningen.

OKG och BKAB har anpassat organisationerna för rivnings- och avvecklingsarbetet. De kärntekniska tillstånden ligger kvar hos OKG och BKAB och därmed ansvaret för avvecklingen och kärnavfallet.

Inom Uniper möts Uniper Nuclear Services, OKG och BKAB för att hantera frågeställningar för att underlätta den pågående avvecklingen.

Samarbeten inom Vattenfall

Avvecklingen av R1 och R2 samordnas i ett avvecklingsprogram som delvis resurssätts från den avdelning som samlar avvecklingskompetensen inom Vattenfall Power Solutions. Många medarbetare har tidigare erfarenhet från avvecklingen av forskningsreaktorn i Studsvik och avvecklingen av Ågestareaktorn.

Inom Vattenfall bedrivs koncernintern samverkan inom olika områden. Strategiskt forum för avfallshantering och avveckling (Strata) har bildats för att säkerställa att olika verksamheters strategier och planer för avveckling och avfallshantering samordnas och optimeras. Detta utifrån olika aspekter såsom säkerhet, myndighetskrav, kostnadseffektivitet och andra externa och interna intressenters krav.

Samverkan sker också på operativ nivå inom avfalls- och avvecklingsområdet, till exempel vad gäller friklassning, avfallsdokumentation och generellt erfarenhetsutbyte.

Avvecklingsprogrammen inom Vattenfallkoncernen (Vattenfall/Ågesta och Ringhals) är medlemmar i OECD/NEA:s Co-operative Programme for the Exchange of Scientific and Technical Information concerning Nuclear Installation Decommissioning Projects (CPD) med dess undergrupp Technical Advisory Group (TAG). Programmet syftar till att underlätta utbyte av information och erfarenheter vid avveckling av kärntekniska anläggningar. Utbytet främjar tillämpningen av säkra, miljöanpassade och kostnadseffektiva metoder i avvecklingsprojekten.

5.6.3 Närliggande utmaningar och upprätthållande av kompetens på längre sikt

SSM skickade hösten 2021 en remiss gällande Nationell strategi för kompetensförsörjning inom strålsäkerhet, där SKB fick möjlighet att svara. I sitt yttrande lyfte SKB fram flera olika områden som kan utvecklas. Det är av stor vikt med en samordning på nationell nivå och att hela branschen arbetar tillsammans för att lyckas med en långsiktig kompetensförsörjning. SKB har tillsammans med ägarna av reaktorerna och andra kärntekniska anläggningar tagit en ledande roll i detta arbete.

Allmänna och grundläggande förutsättningar

SKB har behov av kompetens inom många områden med en viktning mot personer utbildade inom naturvetenskap och teknik. De områden inom vilka SKB fortsatt kommer att behöva kompetens är forskning och teknikutveckling och det tillkommer behov av kompetens för uppförande, drift och avveckling av anläggningar.

Allmänt sett är den nationella trenden med vikande intresse för tekniska och naturvetenskapliga utbildningar ett problem för SKB, liksom för svensk industri som helhet. Förutom att detta kan leda till brist på examinerade inom relevanta områden, så har det negativa effekter på lärosätenas möjligheter att bedriva utbildningsprogram inom relativt sett smala områden som kärnteknik och bibehålla viktiga forskningsmiljöer. Det är således en gemensam viktig fråga för flera aktörer, att öka intresset för naturvetenskap och teknik så att tillräckligt många personer kan utexamineras.

Att säkra kompetens inom områden viktiga för slutförvaring av kärnavfall och avveckling av kärntekniska anläggningar, är en för SKB och dess ägarbolag en strategiskt viktig fråga på både kort och lång sikt. Slutförvaring och avveckling innebär ett brett behov av kompetens som förutom kärnteknik och strålskydd omfattar geovetenskap, geoteknik, materialfrågor, anläggningsteknik, instrument- och mätteknik samt kompetens om klimatutveckling. Utgångspunkten är att det är

samhällets ansvar att tillhandahålla grundutbildning av till exempel civilingenjörer och upprätthålla grundkompetens inom relevanta områden, men industrin kommer även att behöva göra särskilda insatser. För att säkra kompetens inom landet kommer samarbete med universitet och högskolor att vara en del i den långsiktiga kompetensförsörjningen, samt att fortsatt uppmuntra samarbete inom branschen för att både behålla och attrahera ny personal inom dessa områden.

SKB arbetar tillsammans med ägarna för att öka branschens attraktionskraft och avser fortsätta arbetet med att stärka förtroendet för SKB:s uppdrag genom att lyfta fram de många intressanta och utmanande uppgifter och roller som behövs för att lösa uppdraget. SKB samverkar med företag och skolor, i första hand på de orter där SKB är verksamt samt deltar vid arbetsmarknadsdagar, mässor och olika branschevenemang.

Allmänt sett och i det längre tidsperspektivet räknar SKB med att huvuddelen av personalbehovet kan tillgodoses av personal med för uppgiften relevant grundutbildning (gymnasium, högskola eller universitet) inom ämnesområdet, som sedan vidareutbildas av SKB för de företagsspecifika tillämpningarna. Därutöver behövs ett mindre antal personer med djup kompetens, till exempel forskarutbildade, kombinerat med lång erfarenhet av för SKB viktiga områden.

Pågående och planerade aktiviteter

SKB fortsätter med att bidra till olika professurer och platser på högskolor och universitet samt med att informera om uppdraget och vilka kompetenser som kommer att vara eftertraktade på universitet och högskolor som har relevanta utbildningar för att säkra långsiktig kompetensförsörjning. Där det är lämpligt och finns förutsättningar att agera stöder SKB doktorandprojekt som kan bidra till uppbyggnad och bevarande av goda forskningsmiljöer. Förutom att utveckla kunskapen i frågor av betydelse för slutförvaring av avfall blir de doktorander SKB finansierar ett betydande tillskott till kompetensförsörjningen, framför allt av expertkompetens, för SKB såväl som för andra aktörer inom området.

Även andra delar av branschen främjar utbildning inom teknikområdet. Till exempel stödjer Vattenfall finansiellt ett högskoleingenjörsprogram inriktat på kärnkraft vid Uppsala universitet samt Vattenfallgymnasiet i Forsmark för att säkra tillgång till kvalificerad kompetens långt in på 2040-talet. Dessutom finansierar FKA, RAB, OKG och Westinghouse Electric Sweden AB SKC, som stödjer utbildning, forskning och utveckling inom kärntekniska tillämpningar vid högskolor och universitet i Sverige.

På lokal nivå, på de platser SKB har verksamhet, är SKB med och bidrar med kompetens och utrustning till Teknikcollege som erbjuder extra kurser. Dessa kan läsas på gymnasium, framför allt genom de tekniska programmen. Via Teknikcollege samverkar SKB med andra Teknikcollegeanslutna företag i ett antal olika aktiviteter med gemensamt syfte att industri- och teknikföretagen ska kunna rekrytera kompetent personal på kort och lång sikt.

För smala kompetensområden där det kanske finns någon enstaka expert på SKB eller ibland i Sverige är det internationella samarbetet SKB har med andra avfallsorganisationer väsentligt. SKB har genom det möjlighet att anlita experter från dessa organisationer antingen för att genomföra uppdrag åt SKB eller för att utbilda personal inom SKB. Det i avsnitt 5.6.1 nämnda samarbetet med Posiva, har bland annat som syfte att upprätthålla kompetens och stötta respektive organisation inom smala kompetensområden.

Det kan även noteras att frågor om kompetenshållning diskuteras ingående internationellt inom bland annat IAEA, NEA och EU samt bland andra kärnavfallsorganisationer. SKB bedömer det internationella samarbetet som viktigt för att utveckla och säkra kompetensen på lång sikt.

Närliggande utmaningar

En närliggande utmaning för SKB är uppförandet av de nya anläggningar som sedan ska drivas under lång tid. SKB har byggt upp och vidareutvecklar nu en beställarorganisation för att upphandla, styra och följa upp de entreprenader som uppförandet av respektive anläggning kommer att delas upp i. Då uppförandet av anläggningarna i huvudsak omfattar tillämpning av väl etablerad teknik räknar SKB med att anlita etablerade leverantörer (entreprenörer) med erforderlig kompetens.

En av svårigheterna med att hitta lämpliga leverantörer för anläggningsprogrammen är konkurrensen om personal från andra stora infrastrukturprojekt men även konkurrensen från andra

kärnkraftsrelaterade projekt kan bli kännbar under de kommande decennierna. En annan kan bli tillgången på den seniora kompetens som behövs, med tanke på den generationsväxling som nu sker när många av de som byggt upp det svenska kärnavfallsprogrammet snart går eller har gått i pension.

Utmaningar på längre sikt

När det gäller kompetensförsörjning på mycket lång sikt, det vill säga 50–100 årsperspektivet, så finns två viktiga förutsättningar som behöver beaktas:

- SKB:s verksamhet planeras pågå fram till cirka 2090 och behöver redan nu ha en framförhållning för vilka kompetenser som är viktiga i det långsiktiga perspektivet.
- SKB är dominerande aktör i Sverige när det gäller hantering av kärnavfall.

Det långa tidsperspektivet kan vara en fördel, eftersom kompetensutveckling och kompetensförsörjning kan planeras på lång sikt på ett sätt som få andra företag kan. SKB har väl utvecklade processer för kompetensutveckling och kompetensförsörjning, se avsnitt 5.6.1 och 5.6.2, som ger en god grund för att SKB ska ha den kompetens som behövs för att genomföra den planerade verksamheten enligt ställda interna och externa krav.

En aspekt som särskilt behöver beaktas under anläggningarnas hela livstid är att ha medarbetare med anläggningskännedom och för slutförvaren även kännedom om det omgivande berget. Särskilda insatser kommer att behövas när det gäller bevarande av kunskap och kompetens avseende dessa områden såsom god dokumentation, utbildning av personal och redundant bemanning. Ett arbete med att ta fram processer och rutiner för överföring av kunskap och erfarenheter mellan medarbetare och till nyanställda (knowledge management) där fokus ligger långt fram i tid pågår på SKB, se avsnitt 4.14.

SKB:s roll som den huvudsakliga arbetsgivaren när det gäller hantering av kärnavfall gör företaget känsligt för den allmänna trend med ökad rörlighet på arbetsmarknaden som finns i dagens samhälle. När någon slutar kan det vara svårt att hitta ersättare med rätt kompetens. SKB är dock inte den enda arbetsgivaren inom området utan motsvarande kompetenser antas fortsatt även finnas hos SKB:s ägarbolag samt leverantörer, konsultföretag och myndigheter.

En risk som SKB identifierat är om det av någon anledning blir uppehåll i någon del av verksamheten och de problem som då kan uppstå med att behålla kompetens inom olika områden. Uppehåll i en verksamhet kan vara planerad eller oplanerad. Planerade uppehåll i en verksamhet kan till exempel vara platsundersökningar som redan genomförts för SFK och SFR-utbyggnaden och som inom ett antal år ska genomföras för ett slutförvar för långlivat avfall. Ett uppehåll inom en del av SKB:s verksamhet leder normalt till behov av omplacering av personal, men kan även leda till uppsägningar. Förutsättningarna för omplacering av personal beror naturligtvis på kompetensområde. SKB ser relativt goda förutsättningar att bibehålla bemanning och kompetens hos experterna som arbetar med säkerhetsanalyser. Säkerhetsanalyser ska genomföras med jämna mellanrum som en del i den stegvisa prövningen för de olika slutförvaren. De som arbetar med forskning och teknikutveckling kan även i utökad omfattning arbeta inom internationella projekt eller via SKB International lånas ut till avfallsorganisationer i andra länder. För andra personalkategorier, till exempel operativ driftpersonal, kan finnas möjligheter att låna ut personal till SKB:s ägare där likartade arbetsuppgifter förekommer.

SKB bedömer eventuella problem som hanterbara och ser det som möjligt att genom att tillämpa och vidareutveckla rutinerna för kompetensutveckling och kompetensförsörjning slutföra SKB:s uppdrag med att slutförvara det använda kärnbränslet och kärnavfallet från kärnkraftverken med bibehållen kompetens.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Aaltonen I, Bornhorst T J, Liu X, Reijonen H, Ruskeeniemi T, 2023. Michigan International Copper Analogue (MICA) project – Phase I. GTK Open File Research Report 22/2023, Geological survey of Finland.

Ahlford K, Andgren K, 2024. Fastställande av svärmätbara nuklider i vektorbestämt avfall. SKBdoc 1935344 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Alexander W R (editor), Andersson U B (editor), Bernier-Latmani R, Delbos E M, Elliott W C, Fujimura T, Gilg H A, Goto T, Jakus N, Kikuchi R, Kiviranta L, Kumpulainen S, Leupin O X, Nemoto S, Otake T, Ozigbo C, Pendowski H A, Sato T, Schneeberger R, Sellin P, Stein H, Suzuki S, Svensson D, Villa I M, Wampler J M, Zimmerman A, 2024. KINA (Kiruna Natural Analogue) Project. Final report. SKB TR-24-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson T, Lindroos M, Pohja R, Biswas A, Nandy S, Pakarinen J, Rantala J, 2023. Crystal plasticity model for creep and relaxation deformation of OFP copper. *Materials at High Temperatures* 41, 51–60. <https://doi.org/10.1080/09603409.2023.2278232>

Andersson-Östling H C M, Vuoristo T, 2022. Creep behaviour of Cu-OFP with increased content of Zn-Bi-Te. *Swerim. SKBdoc 1975930 ver 1.0*, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Angele K, Lundqvist P, Sundberg M, Wik A, 2022. Provning av betongtank för radioaktivt avfall. VRD-R36:2022. Vattenfall AB. SKBdoc 2004996 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Appleyard P, 2021. Discrete fracture network simulations in support of hydraulic rejection criteria for deposition holes. Posiva SKB report 11, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Balathandayuthabani S, Wallin M B, Klemedtsson L, Crill P, Bastviken D, 2023. Aquatic carbon fluxes in a hemiboreal catchment are predictable from landscape morphology, temperature, and runoff. *Limnology and Oceanography Letters* 8, 313-322. <https://doi.org/10.1002/lol2.10312>

Balathandayuthabani S, Panneer Selvam B, Gålfalk M, Saetre P, Peura S, Kautsky U, Klemedtsson L, Arunachalam L, Vellingiri G, Bastviken D, 2024. Methane in two stream networks: similar contributions from groundwater and local sediments while oxidation was a large sink controlling atmospheric emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129, e2023JG007836. <https://doi.org/10.1029/2023JG007836>

Berglund J-Å, Lorenz H, De la Gardie F, Herschend B, 2016. Friklassning vid nedmontering och rivning av kärntekniska anläggningar. SKB R-16-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Björklund V, Hänninen H, Bossuyt S, 2024. Effects of static strain aging on mechanical performance of ductile cast iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09716-9>

Bojinov M, Ikäläinen T, Zaiqing Q, Saario T, 2023. Effect of sulfide on de-passivation and re-passivation of copper in borate buffer solution. *Corrosion Science* 218, 111201. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111201>

Bojinov M, Goel S, Ikäläinen T, Saario T, 2024. Effect of sulfide addition on the corrosion mechanism of copper in saline groundwater solution. *Journal of the Electrochemical Society* 171, 41505. <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ad3fed>

Borgiel M, Sohlenius G, Kristofferson Å, Grolander S, 2022. Dykundersökning av område 157_2 och provtagning av regolitens kemiska och fysikaliska egenskaper. SKB P-22-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Briggs S, Lilja C, King F, 2024. Probabilistic model for the pitting of copper canisters during the early aerobic, unsaturated transient period of the repository evolution. SKB TR-24-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Bultmark F, 2023.** Mekaniska och korrosionsrelaterade krav som ställs på avfallet i förvarsdelarna 1-2BTF. SKBdoc 2003105 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bultmark F, Maier A, Wolniewicz P, 2023.** Metod för att beräkna gasbildningshastighet till följd av bestrålning av organiska material. SKBdoc 1996747 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bym T, Hartley L, 2024.** Development of new methods to build progressively more deterministic DFN models using data from underground construction and operations. SKB R-23-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Böövarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, 2006.** Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cabrera V, Demirev E, Coene E, Pont A, Idiart A, 2023.** Prototype Repository. Modelling cation exchange in deposition hole 1. SKB P-23-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Chen J, Pan X, Martino T, Lilja C, Behazin M, Binns J, Keech P G, Noël J J, Shoesmith D W, 2023.** The effects of chloride and sulphate on the growth of sulphide films on copper in anoxic sulphide solutions. *Materials and Corrosion* 74, 1665–1676. <https://doi.org/10.1002/maco.202313766>
- Chen J, Pan X, Nie H Y, Kobe B, Bergendal E, Lilja C, Behazin M, Shoesmith D W, Noël J J, 2025.** Topographical and statistical studies of the corrosion damage underneath the sulfide film formed on a Cu surface. *Corrosion Science* 248, 112801. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112801>
- Claesson-Liljedahl L, Rydberg J, Liakka J, 2025.** Insights from the Greenland projects and their applicability to the Forsmark site. SKB R-25-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, 2022.** Project NukPrio – Identification of elements with greatest sorption data needs for the KBS-3 repository. SKB R-20-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, Keith-Roach M, Höglund L O, 2023.** Scoping study concerning sorption of radionuclides to iron corrosion products in SFL. Kemakta konsult. SKBdoc 2020637 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Darcel C, Le Goc R, Lavoine E, Davy P, Mas Ivars D, Sykes E, Kasani H A, 2024.** Coupling stress and transmissivity to define equivalent directional hydraulic conductivity of fractured rocks. *Engineering Geology* 342, 107739. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107739>.
- Davy P, Le Goc R, Darcel C, Selroos J-O, 2023.** Scaling of fractured rock flow. Proposition of indicators for selection of DFN based flow models, *Comptes Rendus Geoscience* 355, 667-690. <https://doi.org/10.5802/crgeos.174>
- Davy P, Le Goc R, Darcel C, Pinier B, Selroos J-O, Le Borgne T, 2024.** Structural and hydrodynamic controls on fluid travel time distributions across fracture networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2414901121>
- De Simone S, Darcel C, Kasani H A, Mas Ivars D, Davy P, 2023.** Equivalent Biot and Skempton poroelastic coefficients for a fractured rock mass from a DFN approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 56, 8907-8925. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03515-9>
- De Simone S, Darcel C, Kasani H A, Mas Ivars D, Davy P, 2024.** The impact of size-dependent and stress-dependent fracture properties on the Biot and Skempton coefficients of fractured rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 57, 8929-8950. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04038-7>
- Doolaege D, Darcel C, Selroos J-O, Mas Ivars D, Davy P, 2023.** Controls on fracture openness and reactivation in Forsmark, Sweden. *Scientific Reports, Nature* 13, 6686. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33619-9>.
- Dueck A, Nilsson U, Jensen V, Börjesson L, 2022.** Compressive strength of bentonites. Factors influencing results from unconfined compression tests. SKB TR-21-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Edelborg M, Anunti Å, Oliver L, Lundkvist N, Leveau N, 2014.** Decommissioning study of Clink. SKB R-13-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Ehnvall B, 2023.** Catchment controls on mire properties in the post-glacial landscape. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, 2023:73. Swedish University of Agricultural Sciences.
<http://dx.doi.org/10.54612/a.2hq3ebpddu>
- Ehnvall B, 2024.** Catchment characteristics and their long-term effects on lateral and vertical peat accumulation in boreal and boreonemoral landscapes. A comparison between mire-catchment interactions in the Sävär Rising Coastline Mire Chronosequence in Westrobothnia and the Forsmark area in Uppland. SKB TR-24-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ehnvall B, Ratcliffe J L, Bohlin E, Nilsson M B, Öquist M G, Sponseller R A, Grabs T, 2023a.** Landscape constraints on mire lateral expansion. *Quaternary Science Reviews* 302, 107961.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.107961>
- Ehnvall B, Ågren A M, Nilsson M B, Ratcliffe J L, Noumonvi K D, Peichl M, Lidberg W, Giesler R, Mörtz C-M, Öquist M G, 2023b.** Catchment characteristics control boreal mire nutrient regime and vegetation patterns over ~5000 years of landscape development. *Science of The Total Environment* 895, 165132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165132>
- Ehnvall B, Ratcliffe J L, Nilsson M B, Öquist M G, Sponseller R A, Grabs T, 2024.** Topography and Time Shape Mire Morphometry and Large-Scale Mire Distribution Patterns in the Northern Boreal Landscape. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface* 129, e2023JF007324.
<https://doi.org/10.1029/2023JF007324>
- El Jamal G, Gouder T, Eloirdi R, Jonsson M, 2022.** Monitoring the gradual change in oxidation state during surface oxidation or reduction of uranium oxides by photoemission spectroscopy of the 5f states. *Journal of Nuclear Materials* 560, 153504. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153504>
- EPRI, 2024.** Spent Fuel Decay Heat Measurements at Clab: Description of Decay Heat Measurements from 2003–2021 Under EPRI-SKB Collaboration. EPRI, Palo Alto, CA, 3002026549.
- Eriksson D, 2022.** Betongtankar i SFR 1-2BTF: Sprickflöden och mekanisk respons efter tryckutjämning. Vattenfall Fuel, Engineering and Projects DMG1159601 V1.0, Vattenfall AB. SKBdoc 2000080 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson P, 2022.** Modellering av BTF-tankar med hål. SKBdoc 1999397 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Evins L Z, Askeljung C, Barreiro Fidalgo, A, Puranen A, Roth O, Spahiu K, 2025.** Radionuclide release from spent nuclear fuel in sealed glass ampoules. *Applied geochemistry* 178, 106234.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106234>
- Faber W, Verwerft M, Pakarinen J, Rirschl C, 2020.** The scientific backing of the German Quiver project, ATW, *Internat. J. Nucl. Power*, 65, 561-570.
- Fabritius O, 2025.** Radium Sorption on Crystalline Rock: Laboratory Studies and Modeling Interpretation. PhD dissertation, Helsingfors universitet. <http://hdl.handle.net/10138/593401>
- Fabritius O, Fabritius A, Hellings M, Sorokina T, Sjoakka T, Jakobsson A-M, Li X, Sammaljärvi J, Siitari-Kauppi M, 2024a.** Radium sorption on crystalline rock; spatial distribution and sorption modeling study, *Applied Geochemistry* 162, 105930. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.105930>
- Fabritius O, Li X, Sorokina T, Jakobsson A-M, Sojakka T, Siitari-Kauppi M, 2024b.** Radium and barium sorption and precipitation on crystalline rock; experimental results and modeling development. JRNC-D-24-00505, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 334, 1417-1431.
<https://doi.org/10.1007/s10967-024-09966-w>
- Fernández A M, Marco, J F, Nieto P, León F J, Robredo L M, Clavero M Á, Cardona, A I, Fernández S, Svensson D, Sellin P, 2022.** Characterization of Bentonites from the In Situ ABM5 Heater Experiment at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *Minerals* 12, 471.
<https://doi.org/10.3390/min12040471>
- Finsterle S, Lanyon B, 2022.** Pragmatic validation of numerical models used for the assessment of radioactive waste repositories: A perspective. *Energies*, 15, 3585. <https://doi.org/10.3390/en15103585>
- Fälth B, 2018.** Simulating earthquake rupture and near-fault fracture response. Doktorsavhandling. Uppsala universitet. <https://orcid.org/0000-0002-3300-2104>

- Fälth B, 2022.** Deformation zone stability and co-seismic secondary fracture displacements at Forsmark. SKB TR-22-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, 2023.** Benchmark of FLAC3D. Comparison with 3DEC and other numerical simulation tools. SKB R-23-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, 2006.** Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2007.** Seismically Induced Shear Displacements in Repository Host Rock Fractures. I Proceedings of the 9th Canadian conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Canada, 26–29 June 2007.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2008.** Seismically induced slip on rock fractures – expanded study with particular account of large earthquakes. I Proceedings of the 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium, San Francisco, Californian, 29 June–2 July 2008.
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, Mai P M, Roberts R, Munier R, 2014.** Simulating earthquake rupture and off-fault fracture response: Application to the safety assessment of the Swedish nuclear waste repository. Bulletin of the Seismological Society of America 105, 134–151.
<https://doi.org/10.1785/0120140090>
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, 2016.** Simulation of co-seismic secondary fracture displacements for different earthquake rupture scenarios at the proposed nuclear waste repository site in Forsmark. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 84, 142–158.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.02.009>
- Fälth B, Lund B, Hökmark H, 2017.** Simulation of co-seismic off-fault stress effects: influence of fault roughness and pore pressure coupling. I Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, Louisiana, 11–15 December 2017.
- Fälth B, Lönnqvist M, Hökmark H, 2019.** Co-seismic secondary fracture displacements under different stress conditions. Posiva Working Report 2019-10, Posiva Oy, Finland.
- Gens A, Alcoverro J, Sawada M, Kröhn K-P, Ghiadistri G M, Zdravkovic L, Potts D M, Tsiampousi A, Hadgu T, Dewers T, Gomez S, Matteo E, Kristensson O, Hokr M, Rálek P, Landa J, Hančilová I, Rodríguez-Dono A, 2023.** Task Force on Engineered Barrier System (EBS). Task 9 FEBEX in situ test – Final Report. SKB TR-22-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Goel S, Ikäläinen T, Saario T, 2023.** Surface microcracks in Cu-OFP exposed to air or water with sulphides. VTT Research report VTT-R-00761-23. VTT, Finland.
- Gómez L F, 2024.** A Review and Detailed Investigation of Continuum-Based Numerical Modelling Methods for the Simulation of Brittle Rock Failure Around Underground Excavations. Master Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, July 2024. <http://hdl.handle.net/10222/84394>
- Goodfellow B W, Stroeve A P, Lewerentz A, Hippe K, Heyman J, Lifton N A, Caffee M W, 2023.** Evaluation of shoreline displacement and glacial erosion at Forsmark using in situ ¹⁴C in quartz. SKB TR-23-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grolander S, Kristoffersson Å, Tröjbom M, 2024.** Soil and plant sampling and cultivation experiments at Byle gård and Forsmark 2020–2022. SKB P-23-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hagström J, 2023.** Microstructure, crystallography and CSL grain boundaries in copper canisters for nuclear waste disposal. SKB TR-23-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hagström J, Sandström R, Sarnet J, 2022.** Microstructure and crystallographic variations in different positions in OFP copper outer shell of canisters for spent nuclear fuel storage. In Copper Alloys 2022 Proceedings, 16-19, Düsseldorf, 22–23 November 2022.
- Hakami E, Mas Ivars D, Darcel C, 2022.** Methodology for rock mechanics modelling of the Forsmark site. SKB R-20-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hall A M, Ebert K, Goodfellow B W, Hättestrand C, Heyman J, Krabbendam M, Moon S, Stroeve A P, 2019.** Past and future impact of glacial erosion in Forsmark and Uppland. Final report. SKB TR-19-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Hall A M, Krabbendam M, van Boeckel M, 2022.** Glacial erosion in the Öregrund archipelago. Potential for headward erosion towards Forsmark in future glaciations? SKB TR-22-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hall A M, Heyman J, Hein A, 2023.** Glacial erosion rates at Forsmark derived from Terrestrial Cosmogenic Nuclides - additional results. SKB TR-23-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hanby-Ratio V, Isotahdon E, Yue X, Malmberg P, Leygraf C, Pan J, Huttunen-Saarivirta E, 2023.** Characterization of surface films that develop on pre-oxidized copper in anoxic simulated groundwater with sulphide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 676, 132214. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132214>
- Hansson N L, 2022.** Oxidative Dissolution of UO₂ by α -Radiolysis. Chalmers Tekniska Högskola, Sweden.
- Hansson N L, Jonsson M, 2023.** Exploring H₂-effects on radiation-induced oxidative dissolution of UO₂-based spent nuclear fuel using numerical simulations. *Radiation Physics and Chemistry* 210, 111055. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111055>
- Hansson N L, Jonsson M, Ekberg C, Spahiu K, 2022.** Geometrical aspects of alpha dose rates from UO₂ based fuels. *Radiation Physics and Chemistry* 199, 110336. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110336>
- Hansson N L, Jonsson M, Ekberg C, Spahiu K, 2023a.** Modelling radiation-induced oxidative dissolution of UO₂-based spent nuclear fuel on the basis of the hydroxyl radical mediated surface mechanism: Exploring the impact of surface reaction mechanism and spatial and temporal resolution. *Journal of Nuclear Materials* 578, 154369. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154369>
- Hansson N L, Saleh M, Tam P L, Holgersson S, Spahiu K, Ekberg C, 2023b.** Influence of groundwater composition on the reductive precipitation of U (VI) on corroding iron foil surfaces. *Journal of Nuclear Materials* 577, 154324. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154324>
- Hartley L, Libby S, Bym T, Carty J, Cottrell M, Mosley K, 2024.** Baseline Forsmark – A discrete fracture network (DFN) model applying grown fractures and hydromechanical (HM) coupling. SKB R-23-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Haynes H, Uthayakumaran S, Rance A, Reddy B, Hesketh J, 2024.** Corrosion of copper in unsaturated bentonite clay as a function of oxygen consumption. SKB R-24-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, 2024.** Modelling of radiation enhanced Cu cluster formation in Fe. SKBdoc 2037360, ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, Lilja C, King F, Shoesmith D W, Keech P G, 2023.** Comment on “Penetration of corrosive species into copper exposed to simulated O₂-free groundwater by time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS)”. *Corrosion Science* 217, 111136. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111136>
- Hedin A, Alvestav A, Eriksson P, Zetterströms Evins L, Johansson J, Lilja C, Ronneteg U, Sarnet J, Spahiu K, Mångård D, Öbrink E, 2025.** Post-closure safety evaluations of alternative KBS-3 canister insert designs. SKB TR-25-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedström S, 2023.** Riktvärden för material i avfall till SFR1 utifrån säkerhetsanalys och rådande förhållanden. SKBdoc 2023065 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedström S, 2024.** Beräkning av komplexbildande oligoaminer i rostskyddsfärg. SKBdoc 1892917 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, Engels S, Salonen J S, Väliiranta M, 2024.** The late Quaternary of Fennoscandia revisited. 15 years of collaborative research at Sokli in northern Finland - a complete overview. SKB TR-23-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Henshaw J, Evins L Z, 2023.** Radiolysis calculations of gases in a KBS-3 canister. SKB TR-22-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Henshaw J, Spahiu K, 2021. Radiolysis calculations of air, argon and water mixtures in a KBS-3 canister. SKB TR-21-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hermansson F, Eriksson P, Fritzell A, 2024. Full scale tests of the early THM behaviour of the KBS-3 buffer. SKB TR-23-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hesketh J, Johansson A J, 2024. Evaluation of microstructural defects in wedge-open loaded stress corrosion cracking specimens from the MiniCan field test. SKB TR-24-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Holgersson S, Drake H, Karlsson A, Krall L, 2024. Biotite dissolution kinetics at pH 4 and 6.5 under anaerobic conditions and the release of dissolved Fe(II). Chemical Geology 662, 122204. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122204>

Hornum M T, 2023. Groundwater springs in continuous permafrost. Department of Geosciences and Natural Resource Management, Faculty of Science, University of Copenhagen, 128, Research output, Book/Report › Ph.D. thesis.

Hultgren P, Petersson J, 2022. DMS Baseline Forsmark v1 Surface.dgn, version 1.0. Model id:1968355. Forsmark. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hökmark H, Fälth B, Lönnqvist M, Munier R, 2019. Earthquake simulations performed to assess the long-term safety of a KBS-3 repository. Overview and evaluation of results produced after SR-Site. SKB TR-19-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

IAEA, 2021. Radiation Protection of Wildlife: Modelling the Exposure and Effects. Joint Summary Report of Working Groups 8 and 9 (MODARIA I) and Working Group 5 (MODARIA II) Modelling and Data for Radiological Impact Assessments (MODARIA) Programme. IAEA-TECDOC-1986

IAEA, 2025. The BIOMASS Methodology - Biosphere Modelling for Long Term Safety Assessments of Solid Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA Safety Reports Series No. 126.

Idiart A, Laviña M, Cabrera V, 2024. Final report – 1BMA sulfates. Modelling the impact of sulfates on 1BMA concrete barriers. Swelling waste. Activity 1.6. Updated concrete development in 1BMA. SKBdoc 2030503 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ikäläinen T, Saario T, Que Z, 2023a. Creep of Cu-OFP in presence of sulphides. SKB TR-23-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ikäläinen T, Rantala J, Sahiluoma P, Saario T, Yagodzinskyi Y, 2023b. Hydrogen analyses of FSW Cu-OFP tested under creep conditions in sulphide environment. VTT Research report VTT-R-00924-22. VTT, Finland.

IPCC, 2021. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Itasca, 2020. 3DEC – 3-Dimensional Distinct Element Code, version 7. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, MN, Itasca Consulting Group, Inc.

Itasca, 2022. FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, version 9. Minneapolis, MN, Itasca Consulting Group, Inc.

Jacobsson L, Godio M, 2023. Measuring the hydraulic transmissivity of a rock joint under varying normal load. Eurock 2022 - Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1124, 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012050>

Jacobsson L, Larsson J, Flansbjer M, Mas-Ivars D, Kasani H A, Johansson F, 2024. Mechanical properties of large rock joints. Bergdagarna 2024, Stockholm, Sweden.

Javaid M A, Harrison J P, Kasani H A, Mas Ivars D, 2023. Analyzing in situ stress: challenges in quantifying stress domains. Published in the proceedings of GeoSaskatoon. October 2023, Saskatoon, Canada.

- Javaid M A, Harrison J P, Mas Ivars D, Kasani H A, 2024a.** A method for quantifying uncertainty in stress domain boundaries. Eurock 2024, July 2024, Alicante, Spain.
- Javaid M A, Harrison J P, Kasani H A, Mas Ivars D, 2024b.** An investigation on the correlation properties of variable in situ stress in rocks. Submitted to GeoMontréal 2024, September 15–18, 2024 Montréal, Quebec, Canada.
- Johansson F, Zetterström P, Spahiu K, 2024.** Criticality effects of long-term changes in material compositions and geometry in disposal canisters with insert Rebus Concept 1 P355N and P460N. SKB TR-23-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, 2022.** Assessment of homogeneous processes and parameters to be used in models for radiation induced dissolution of spent nuclear fuel. SKB R-22-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, 2023a.** Assessment of heterogeneous processes and parameters to be used in models for radiation induced dissolution of spent nuclear fuel. SKB R-23-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, 2023b.** Exploring the impact of groundwater constituents and irradiation conditions on radiation-induced corrosion of copper. Radiation Physics and Chemistry 211, 111048. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111048>
- Jutebring Sterte E, 2021.** Hydrology and water chemistry in a heterogeneous landscape: process-based modelling of coupled surface water and groundwater flow across contrasting boreal catchments. 2021:57, Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Jutebring Sterte E, 2025.** Modelling CFC concentrations in MIKE SHE: attempting to recreate estimated groundwater age distributions using limited concentration data. SKB R-24-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jutebring Sterte E, Lidman F, Sjöberg Y, Ploum S W, Laudon H, 2022.** Groundwater travel times predict DOC in streams and riparian soils across a heterogeneous boreal landscape. Science of The Total Environment 849, 157398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157398>
- Kaufhold S, Dohrmann R, Ufer K, Svensson D, Sellin P, 2021.** Mineralogical Analysis of Bentonite from the ABM5 Heater Experiment at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. Minerals 11, 669. <https://doi.org/10.3390/min11070669>
- Keating T P, Storm A, 2025a.** Key Information File. Essential Information on the Spent Nuclear Fuel Repository in Forsmark, Sweden. Linköpings universitet, Sverige. <https://doi.org/10.3384/9789180758581>
- Keating T P, Storm A, 2025b.** Writing the Forsmark Key Information File: Concluding Report. Tema T Rapport 52, Linköpings universitet, Sverige. <https://doi.org/10.3384/9789181181036>
- Kolbe T, Bishop K, 2024.** Estimating groundwater and stream water ages with chlorofluorocarbons. SKB P-24-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Koutsouris A, 2024.** Semi-distributed hydrological modelling of Lake Eckarfjärden drainage basin. Water flux estimations based on HYPE-modelling. SKB R-24-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Krabbendam M, Hall A M, Palamakumbura R, Finlayson A, Diogardi F, Arnhardt C, 2022.** Glacial ripping as a significant erosion mechanism in eastern Sweden - Field evidence and modelling. SKB TR-22-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Krabbendam M, Finlayson A, Palamakumbura R, Hall A M, 2023.** Quantifying the contribution of abrasion versus block removal to subglacial erosion on basement rocks. Very-high resolution DSM analysis at Forsmark, east Sweden. SKB TR-23-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kristensson O, 2022.** Modelling buffer upwards expansion. SKB P-22-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kristensson O, 2023.** HM-COMSOL status report 2022. SKB P-23-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kristensson O, Malmberg D, Åkesson M, 2022.** EBS TF – THM modelling. Water transport in pellets-filled slots – modelling of Subtask B. SKB P-22-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kärnavfallsrådet, 2022. Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2022. Dnr Komm2022/00816/M 1992.

Könönen M, Malm R, 2021. Hållfasthetsutredning Betongtankar BTF (SFR-SKB). Vattenfall Fuel, Engineering and Projects DMG1008901 V2.0, Vattenfall AB. SKBdoc 1942553 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Larsson J, Johansson F, Mas Ivars D, Johnson E, Flansbjer M, Portal N W, 2023a. A novel method for geometric quality assurance of rock joint replicas in direct shear testing – Part 1: derivation of quality assurance parameters and geometric reproducibility. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15, 2193-2208. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.011>

Larsson J, Johansson F, Mas Ivars D, Johnson E, Flansbjer M, Portal N W, 2023b. A novel method for geometric quality assurance of rock joint replicas in direct shear testing – Part 2: validation and mechanical replicability. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15, 2209-2223. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.012>

Lavoine E, Davy P, Darcel C, Mas Ivars D, Kasani H A, 2023. Assessing Stress Variability in Fractured Rock Masses with Frictional Properties and Power Law Fracture Size Distributions. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 57, 2407-2420. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03683-8>

Leal Olloqui M, Sellin P, Kronberg H, Bladström T, 2024. Exploring bentonite sedimentation dynamics 2019–2021. SKB P-23-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Li J, 2023. Stability of UO₂ in systems containing radiolytic oxidants: The role of uranyl peroxide species. Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology.

Li J, Szabó Z, Jonsson M, 2022. Stability of Studtite in Saline Solution: Identification of Uranyl–Peroxo–Halo Complex. *Inorganic Chemistry*, 61(22), 8455-8466. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c00233>

Li J, Liu X, Jonsson M, 2023. Exploring the Change in Redox Reactivity of UO₂ Induced by Exposure to Oxidants in HCO₃[–] Solution. *Inorganic Chemistry*, 62(19), 7413-7423. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c00682>

Li X, Sammaljärvi J, Siitari-Kauppi M, 2024a. Mo sorption behaviour study on Forsmark rocks. Batch sorption experiments of 4 types of Forsmark rock samples and 3 types of groundwaters. University of Helsinki, Finland. SKBdoc 2067721 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Li J, Liu X, Jonsson M, 2024b. UO₂ dissolution in aqueous halide solutions exposed to ionizing radiation. *Applied Surface Science* 646, 158955. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158955>

Liakka J, Näslund J-O, 2025. Climate and climate-related issues for Forsmark. State of knowledge report 2025. SKB TR-25-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Liakka J, Lord N S, Kennedy-Asser A, Lunt D J, Williams C J, Näslund J O, 2024. Assessing future ice-sheet variability for long-term safety of deep geological repositories. *Advances in Geosciences* 65, 71-81. <https://doi.org/10.5194/adgeo-65-71-2024>

Libby S, Hartley L, Turnbull R, Cottrell M, Bym T, Josephson N, Munier R, Selroos J-O, Mas Ivars D, 2023. Exploring the impact of fracture interaction on connectivity and flow channelling using grown fracture networks. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 57 (1), qjagh2023-010. <https://doi.org/10.1144/qjagh2023-010>

Lisjak A, Mahabadi O, Ha J, Mas Ivars D, 2023. Analysis of thermo-mechanical damage around tunnel and deposition boreholes of an underground nuclear waste disposal facility at the Forsmark site (Sweden) by 3D coupled FDEM simulations. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 171, 105586. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105586>

Lord N S, Lunt D, Thorne M, 2019. Modelling changes in climate over the next 1 million years. SKB TR-19-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Lousada C M, Korzhavyi P A, 2022. Single vacancies at $\Sigma 5$, $\Sigma 9$ and $\Sigma 11$ grain boundaries of copper and the geometrical factors that affect their site preference. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 169, 110833. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110833>

- Lousada C M, Korzhavyi P A, 2023.** Pathways of hydrogen atom diffusion at fcc Cu: $\Sigma 9$ and $\Sigma 5$ grain boundaries vs single crystal. *Journal of Material Science* 58, 17004–17018. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09032-y>
- Lousada C M, Korzhavyi P A, 2024.** Segregation of P and S to frequently occurring grain boundaries of Cu: Single atoms and cooperative effects. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 193, 112124. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.112124>
- Lousada C M, Korzhavyi P A, 2025.** The Correlation Factors and Mechanisms of Diffusion for P and S in the Cu Single Crystal. *Applied Science* 2025, 15, 3305. <http://dx.doi.org/10.3390/app15063305>
- Luth S, Hedin P, Bergman S, 2024.** 3D geophysical and geological modelling for investigation of the Hudiksvall earthquake cluster. WP2 final report in the project “What is the cause of the Hudiksvall earthquake activity?”. SKB R-23-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lönnqvist M, Fälth B, 2023.** Approach to assessing the influence of roughness on fracture shear displacements. SKB TR-23-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mahmoudzadeh B, Crawford J, 2023.** Modelling simultaneous transport of natural and anthropogenic radionuclides in fractured media – Diffusion into the heterogeneous layered rock matrix for an arbitrary length decay chain, *Journal of Contaminant Hydrology* 256, 104138. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104138>.
- Maier A, Bultmark F, 2023.** Gasbildande processer och volymer i SFR. SKBdoc 2020536 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Majlesi S, Kou D, Biasi C, 2025.** Root uptake of carbon from soil. SKB TR-24-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Malmberg D, Åkesson M, 2022.** Pre-dismantling Thermo-Hydraulic modelling of the buffer in the Prototype Repository. SKB P-22-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martin G, 2023.** Carbon Uptake in Lakes. SKB TR-23-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moya Núñez A, Taxén C, 2023.** SSRT testing of copper in sulfide solutions. SKB TR-23-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moya Núñez A, Pahverk, H, Sainis S, Taxén C, Wang X, Persson D, Dobryden I, 2025.** Evaluation and analysis of Cu samples exposed at elevated temperature to various bentonites. SKB R-25-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mayotte J, Sassner M, 2023.** Investigation of how changes in model structure affect runtimes and model performance for the MIKE SHE hydrological model of Forsmark. SKB P-23-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mayotte J, Strömberg M, 2023.** WIM Forsmark 1.1. A GIS-based machine-learning tool for predicting wetland extent. SKB P-23-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, 2015.** Äspö Hard Rock laboratory. Concrete and Clay. installation report. SKB P-15-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, 2021.** PSU-17: Undersökning av formstagslösning samt material och metod för fyllning av hål i skyddsror för formstag i 2BMA. SKBdoc 1921349 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, 2024.** Cementitious materials and components in SFR. Synthesis report. SKB TR-23-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson K-F, Lofaj F, Burström M, Andersson C-G, 2005.** Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups. SKB TR-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ning Z, Wen D, Zhou Q, Li N, Macdonald D D, 2024.** Theoretical explanation of passivation behaviour in OFP-Cu and OF-Cu. *Acta Materialia* 271, 119882. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119882>

- OECD NEA, 2019.** Preservation of records, knowledge and memory (RK&M) across generations. Final report of the RK&M initiative. OECD Nuclear Energy Agency.
<https://doi.org/10.1787/50292bbb-en>
- Olesen O, Olsen L, Gibbons S J, Ruud B O, Høgaas F, Johansen T A, Kværna T, 2021.** Postglacial faulting in Norway. Large magnitude earthquakes of the late Holocene age. Glacially-Triggered Faulting. Cambridge University Press, 198–217. <https://doi.org/10.1017/9781108779906.015>
- Olsson D, Li J, Jonsson, M, 2022.** Kinetic Effects of H₂O₂ Speciation on the Overall Peroxide Consumption at UO₂–Water Interfaces. ACS omega, 7(18), 15929-15935.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01048>
- Olsson D, Aydogan H, Jonsson M, 2024.** The influence of bicarbonate concentration and ionic strength on peroxide speciation and overall reactivity towards UO₂. RSC Advances 14, 16248-16254.
<https://doi.org/10.1039/D4RA02281E>
- Osterholz H, Turner S, Alakangas L J, Tullborg E-L, Dittmar T, Kalinowski B E, Dopson M, 2022.** Terrigenous dissolved organic matter persists in the energy-limited deep groundwaters of the Fennoscandian Shield. Nature Communications 13, 4837. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32457-z>
- Pan J, Yue X, Malmberg P, Isotahdon E, Ratia-Hanby V, Huttunen-Saarivirta E, Leygraf C, 2023.** Reply to comment on “Penetration of corrosive species into copper exposed to simulated O₂-free groundwater by time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS)”. Corrosion Science 217, 111137. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111137>
- Pedersen K, Bengtsson A, Taborowski T, Svensson D, 2025.** Method development for assessing conditions for exclusion of bacterial sulphide production in bentonite clays. SKB TR-25-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pérez Rey I, Johansson F, Mas Ivars D, Kasani H, Larsson J, Jacobsson L and Flansbjer M, 2024.** Fracture parametrisation for repository design and post-closure analysis (Post), phase 2, 3 and 4 – Final Report. SKB R-24-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Peura S, Saetre P, Ehnvall B, Nilsson MB, Öquist MG, 2024.** Plant functional type and peat properties determine elemental transfer in boreal mire vegetation. Heliyon 10, e38925.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38925>
- Pintado X, 2022.** Parameter study of buffer upwards expansion into backfill. Buffer swelling against the backfill. SKB P-22-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pintado X, Kanerva N, Leino T, 2022.** Determination of the water retention curve of bentonite from Georgia and from Wyoming (United States). Experimental results using the jar method and assessment of available techniques for suction control and measurement. SKB P-22-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pohja R, Auerkari P, Vilça P, 2022.** Modelling for creep cavitation damage and life of three metallic materials. Materials at High Temperatures 39, 86–96.
<https://doi.org/10.1080/09603409.2021.2024420>
- Pont A, 2023.** POSKBAR-Bentonite Erosion Project. Optimization and validation of a model for quantifying bentonite buffer mass losses due to expansion, erosion, and sedimentation. SKB P-23-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Potyondy D O, Fu W, 2024.** A 3D Subspring Network Breakable Voronoi Model for Rock: Laboratory-Scale Behavior, submitted as paper ARMA 24-493 in Proceedings of 58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Golden, Colorado, USA, 23–26 June 2024.
<https://doi.org/10.56952/ARMA-2024-0493>
- Potyondy D O, Purvance M, 2024.** “A 3D Subspring Network Breakable Voronoi Model for Rock: Grain-Breakage Scheme,” paper 04-01 in Proceedings of the Sixth Itasca Symposium on Applied Numerical Modeling – 2024 (Toronto, Canada, 3–6 June 2024). J Hazzard, T Katsaga, J Sanftenberg and M Nelson Eds. ISBN 978-0-9767577-6-4. Minneapolis, Itasca International, 2024.
- Potyondy D O, Fu W, Emam S, 2024.** Micromechanical Spalling Model: Subspring Network Breakable Voronoi Material. Itasca Consulting Group Inc. ICG Ref. 2-5732-03:23R57, February 23, 2024.

- Puranen A, Evins, L Z, Barreiro A, Roth O, Spahiu K, 2022.** Very high burnup spent fuel corrosion & leaching under hydrogen conditions. *Journal of Nuclear Materials*, 572, p.154027. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.154027>
- Ramamurthy S, Chen J, Zagidulin D, Henderson J D, Lilja C, Bergendal E, Behazin M, Diomidis N, Keech P G, Noël J J, Shoesmith D W, 2024.** The influences of traces of oxygen and Sulfide on the Corrosion of Copper in Concentrated Chloride Solutions. *Corrosion Science* 233, 112047. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112047>
- Rand M, Palmer D A, Fuger J, Gajda T, 2024.** Selected Ancillary Compounds of Interest to Radioactive Waste Management. *Chemical Thermodynamics* 15, OECD-NEA, OECD Publishing, Paris.
- Rantala J, Pohja R, 2023.** Behaviour of Copper under Load Transients. VTT Research Report No. VTT-R-00131-23. Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland.
- Rodríguez-Villagra N, Riba O, Milena-Pérez A, Cobos J, Jimenez-Bonales L, Fernández-Carretero S, Coene E, Silva O, Duro L, 2022.** Dopant effect on the spent fuel matrix dissolution of new advanced fuels: Cr-doped UO₂ and Cr/Al-doped UO₂. *Journal of Nuclear Materials* 568, p.153880. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153880>
- Rosdahl J, Bultmark F, 2023.** Svällande cementkonditionerad kornformig jonbyttarmassa i Silo. SKBdoc 2022233 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Roth O, Askeljung C, Puranen A, Johnson K, Jädnäs D, Barreiro-Fidalgo A, Evins L Z, Spahiu K, 2021.** Investigation of secondary phases formed during long-term aqueous leaching of spent nuclear fuel. *MRS Advances* 6, 90-94. <https://doi.org/10.1557/s43580-021-00039-8>
- Roth O, Johnson K D, Jädnäs D, Barreiro Fidalgo A, Askeljung C, Evins L Z, 2024.** Advanced characterization of secondary phases formed during long-term aqueous leaching of spent nuclear fuel. *MRS Advances* 9, 357-362. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00793-5>
- Rydberg J, Lindborg T, Lidman F, Tröjbm M, Berglund S, Lindborg E, Kautsky U, Laudon H, 2023.** Biogeochemical cycling in a periglacial environment – A multi-element mass-balance budget for a catchment in West Greenland. *CATENA* 231, 107311. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107311>
- Rydberg J, Lindborg E, Bonde C, Fischer B M C, Lindborg T, Sjöberg Y, 2025.** The coupling between hydrology, the development of the active layer and the chemical signature of surface water in a periglacial catchment in West Greenland. *EGU sphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-4207>
- Saceanu M C, 2023.** Modelling of Rock Spalling in a Geological Disposal Facility for Nuclear Waste. Doktorsavhandling, Imperial College London.
- Saceanu M C, Paluszny A, Zimmerman R W, Mas Ivars D, 2023.** Evolution of spalling-inducing fractures around a deep geological repository for nuclear waste during glaciations and their effect on the long-term repository stability. Published in the proceedings of 15th ISRM International Congress on Rock Mechanics Symposium, October 2023, Salzburg, Austria.
- Saceanu M C, Paluszny A, Mas Ivars D, Zimmerman R W, 2024.** Thermo-mechanical modelling of spalling around the deposition boreholes in an underground nuclear waste repository during its thermal phase. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 183 (2024) 105898. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105898>
- Saetre P, Hjerne O, Ikonen A T K, Parviainen L, Kautsky U, Peura S, 2025.** Concentration ratios in fish, their natural variation, and extrapolation of missing values, *Journal of Environmental Radioactivity* 285, 107672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107672>
- Sainz-Garcia A, Sampietro D, Abarca E, Molinero J, 2022.** Potential effects of concrete plugs on the near-field flow in SFR. SKB R-21-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Saleh M, Hedberg M, Tam P L, Spahiu K, Persson I, Ekberg C, 2024.** Coprecipitation of Ce (III) oxide with UO₂. *Synchrotron Radiation* 31(6). <https://doi.org/10.1107/S1600577524008336>
- Salehi Alaei E, 2024.** The transition from used fuel container corrosion under oxic conditions to corrosion in an anoxic environment. Doktorsavhandling. The University of Western Ontario, Kanada.

Salehi Alaei E, Guo M, Chen J, Behazin M, Bergendal E, Lilja C, Showsmith W D, Noël J J, 2023. The transition from used fuel container corrosion under oxic conditions to corrosion in an anoxic environment. *Materials and Corrosion* 74, 1690. <https://doi.org/10.1002/maco.202313757>

Sampietro D, Abarca E, Molinero J, 2022a. iCP version 2.0 – A numerical tool for solving reactive transport in fractured media. SKB R-21-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sampietro D, Pool M, Abarca E, Molinero J, 2022b. iCP version 2.0 – A numerical tool for solving reactive transport in discrete fractures with matrix diffusion. SKB R-21-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sampietro D, Abarca E, Sáinz-García Á, Molinero J, 2022c. A combined hydrogeology and radionuclide transport model of the SFL near-field. SKB R-21-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Marjavaara P, Fritzell A, 2018. Water handling during backfilling. Development report. Posiva SKB Report 05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Nilsson U, Åkesson M, 2024. Vapor circulation in a buffer-backfill system. Laboratory tests. SKB R-24-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Nilsson U, Åkesson M, 2025a. Water uptake of buffer and backfill. Laboratory tests. SKB R-25-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Nilsson U, Åkesson M, 2025b. Piping and erosion in buffer and backfill. Scale tests in laboratory. SKB R-25-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandström R, 2022. Formation of cells and subgrains and its influence on properties. *Metals* 12, 497. <https://doi.org/10.3390/met12030497>

Sandström R, 2023a. Basic modelling of general strength and creep properties for alloys. *Crystals* 14, 21. <https://doi.org/10.3390/cryst14010021>

Sandström R, 2023b. Primary creep at low stresses in copper. *Materials Science and Engineering: A*, 873, 144950. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144950>

Sandström R, 2023c. Basic analytical modeling of creep strain curves. *Materials* 16, 3542. <https://doi.org/10.3390/ma16093542>

Sandström R, 2024. Basic modeling and theory of creep of metallic materials. 1st ed. Cham, Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49507-6>

Sandström R, He J-J, 2022. Prediction of creep ductility for austenitic stainless steels and copper, *Materials High Temperature* 39, 427-435. <https://doi.org/10.1080/09603409.2022.2039497>

Sanglas J, Trincherio P, Painter S L, Cvetkovic V, Poteri A, Selroos J-O, Zou L, 2024. Significance of low-velocity zones on solute retention in rough fractures, *Water Resources Research*, 60, e2023WR036221. <https://doi.org/10.1029/2023WR036221>

Sarnet J, 2022. Några mätningar av segjärns åldring. SKB R-22-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sarnet J, 2024. Some measurements of the ageing of a carbon steel. SKB R-24-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Selroos J-O, Gylling B, 2023. How findings from a multi-annual international modeling initiative are implemented in a nuclear waste management organization, *Energies* 16, 684. <https://doi.org/10.3390/en16020684>

Selroos J-O, Mas Ivars D, Munier R, Hartley L, Libby S, Davy P, Darcel C, Trincherio P, 2022. Methodology for discrete fracture network modelling of the Forsmark site. Part 1 – concepts, data and interpretation methods. SKB R-20-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Selroos J-O, Claesson Liljedahl L, Abarca E, Ericsson L O, Haaf E, Lindborg E, Ploum S, Pool M, Sterte-Jutebring E, Sundell J, 2025. Groundwater levels of open boreholes in bedrock versus modelling results – A numerical study on borehole representation. BeFo report 254, Stiftelsen Bergteknisk forskning.

- Senior N, Martino T, Keech P G, Binns J W, Diomidis N, Lilja C, 2023.** The use of hydrogen in monitoring the anoxic corrosion of copper. *Materials and Corrosion* 74, 1645–1655. <https://doi.org/10.1002/maco.202313769>
- Shahkarami P, 2024.** Verification of a model for calculating the dilute water penetration in fractured rock - a MATLAB implementation. SKB R-24-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shahkarami P, 2025.** Modelling Electrohydrodynamics in Porous Media. Fundamentals and Model Selection. SKB R-24-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shahkarami P, Ferry M, 2024.** Implementation of the equivalent flow rate model in DarcyTools for estimating solute transport from a damaged canister. SKB R-23-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shahkarami P, Sidborn M, 2023.** Simulation of Helium transport in fractured rocks: Implementation of a dual continuum model in DarcyTools. *Journal of Contaminant Hydrology* 253, 104123. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104123>
- Shang H, Fernández-Caballero A, Elmukashfi E, Martin T L, Hallam K R, Cocks A C F, Flewitt P E J, 2023.** Creep cavitation evolution in polycrystalline copper under conditions of stress relaxation. *Materials Science and Engineering A* 869, 144784. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144784>
- Situm A, Bahadormanesh B, Bannenberg L, Ooms F, Feltham H A, Popov G, Behazin M, Goncharova L V, Noël J J, 2023.** In situ measurement of hydrogen absorption into copper-coated titanium using neutron reflectometry and electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of the Electrochemical Society* 170, 41503. <https://doi.org/10.1149/MA2023-02121103mtgabs>
- Siren T, Hakala M, Valli J, Christiansson R, Mas Ivars D, Lam T, Mattila J, Suikkanen J, 2017.** Parametrisation of fractures – Final Report. Posiva 2017-01. Posiva OY.
- Sjöberg J, Figueiredo B, Hakala M, 2025.** Reliability ranking of overcoring stress measurements at Forsmark. SKB R-21-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sjöland A, Christensen P, Evins L Z, Bosbach D, Duro L, Farnan I, Metz V, Zencker U, Ruiz-Hervias J, Rodríguez-Villagra N, Király M, Schillebeeckx P, Rochman D, Seidl M, Dagan R, Verwerft M, Herranz Puebla L E, Hordynskyi D, Feria F, Vlassopoulos E, 2023.** Spent nuclear fuel management, characterisation, and dissolution behaviour: progress and achievement from SFC and DisCo. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 9, 13. <https://doi.org/10.1051/epjn/2022029>
- SKB, 2010.** Fud-program 2010. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2019.** Fud-program 2019. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2022.** Fud-program 2022. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-10-51.** SKB 2010. Model summary report for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-19-01.** SKB 2019. Post-closure safety for a proposed repository concept for SFL. Main report for the safety evaluation SE-SFL. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-23-06.** SKB, 2023. Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Biosphere synthesis report, PSAR version. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-23-11.** SKB 2023. Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Model tools summary report, PSAR version. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Skerlep M, Laudon H, Lidman F, Engström E, Rodushkin I, Sponseller R, 2025.** Patterns and controls of rare earth element (REE) dynamics across a boreal stream network. *Water research*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123237>
- Smith C A, Öhrling C, 2022.** Assessing the validity of proposed paleo-tsunami deposits in Sweden. *Quaternary Science Reviews* 298, 107849. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107849>

- Smith H, Townsend L T, Mohun R, Cordara T, Stennett M C, Mosselmans J F W, Kvashnina K, Corkhill C L, 2022.** Cr²⁺ solid solution in UO₂ evidenced by advanced spectroscopy. *Communications Chemistry* 5(1), 163. <https://doi.org/10.1038/s42004-022-00784-3>
- SSM, 2020.** Beslut rörande uppdaterade acceptanskriterier för avfall till SFR-1. SSM2012-4914-68, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2021.** Riktvärden för material i avfall till SFR1. SSM2020-3814-1, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2023.** Granskning och utvärdering av Fud-program 2022. SSM2022-4764-4, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2024.** Villkor för kapslar i kärnbränsleförvaret. SSM2024-4122-20, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Stock B, Frampton A, 2022.** Processing and Conversion of Raw Point-Cloud Laser Measurements and Auxiliary Data of Rough-Surfaced Fractures To Generate Corresponding Fracture Aperture Fields. 3rd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, Santa Fe, New Mexico, USA, June 2022, OnePetro. <https://doi.org/10.56952/ARMA-DFNE-22-0020>
- Stock B, Frampton A, 2025.** Analysis and Generation of Rough-Surfaced Fractures with Variable Aperture Based on Self-Affine Methods Using Surface Scan Measurements. *Rock Mech Rock Eng.* <https://doi.org/z10.1007/s00603-024-04381-9>
- Sudheer Kumar R, Podlech C, Grathoff G, Warr L N, Svensson D, 2021.** Thermally Induced Bentonite Alterations in the SKB ABM5 Hot Bentonite Experiment. *Minerals* 11, 1017. <https://doi.org/10.3390/min11091017>
- Sundström R, Andersson-Östling H C M, 2023.** Phosphorus in creep tested copper – Studies in Auger electron spectroscopy and Transmission Electron Microscopy. SKB TR-23-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundström R, Hagström C, Andersson-Östling H C M, 2024.** Recrystallisation kinetics of copper with phosphorus – experiments and modelling. SKB R-24-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svemar C, Johannesson L-E, Graham P, Svensson D, Kristensson O, Lönnqvist M, Nilsson U, 2016.** Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report. SKB TR-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Bladström T, Sandén T, Dueck A, Nilsson U, Jensen V, 2023a.** Alternative Buffer Material (ABM) experiment. Investigations of test packages ABM2 and ABM5. SKB TR-23-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson T, Löfgren A, Sætre P, Kautsky U, Bastviken D, 2023b.** Chlorine Distribution in Soil and Vegetation in Boreal Habitats along a Moisture Gradient from Upland Forest to Lake Margin Wetlands. *Environmental Science and Technology* 57, 11067–11074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09571>
- Svensson D, Bladström T, Dueck A, Nilsson U, Jensen V, Lindén J, Lindroos F, Turner S, Hillier S, 2024.** Long term test of bentonite buffer (LOT) at the Äspö HRL. Evaluating bentonite stability in the LOT A3 and S2 experiments after 20 years of heating. SKB TR-24-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Szabó P G, 2023.** Impact of the degradation products of an ion exchange resin (UP2W) on the uptake of radionuclides by cement. Doktorsavhandling. Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000161654>
- Szabó Z, Dvinskikh S, Emmer Å, Svenberg L, Wold S, Mårtensson P, 2020.** Äspö Hard Rock Laboratory. Project Concrete and Clay. Degradation of organic materials in cementitious environments. SKB TR-20-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Szabo P G, Tasi A G, Gaona X, Polly R, Maier A C, Hedström S, Altmaier M, Geckeis H, 2022.** Solubility of Ca(II), Ni(II), Nd(III) and Pu(IV) in the presence of proxy ligands for the degradation of polyacrylonitrile in cementitious system. *Dalton Transactions* 51, 9432-9444. <https://doi.org/10.1039/D2DT01409B>
- Szabo P G, Tasi A G, Gaona X, Maier A C, Hedström S, Altmaier M, Geckeis H. 2023a.** Uptake of Ni(II), Eu(III) and Pu(III/IV) by hardened cement paste in the presence of proxy ligands for the degradation of polyacrylonitrile. *Frontiers in Nuclear Engineering* 2, 1117413. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1117413>
- Szabo P G, Tasi A G, Gaona X, Maier A C, Hedström S, Altmaier M, Geckeis H, 2023b.** Impact of the degradation leachate of the polyacrylonitrile-based material UP2W on the retention of Ni(II), Eu(III) and Pu(IV) by cement. *Dalton Transactions* 52, 13324–13331. <https://doi.org/10.1039/D3DT02122J>
- Tasi A G, Szabo P G, Gaona X, Bouby M, Sittel T, Schild D, Maier A C, Hedström S, Altmaier M, Geckeis H, 2024.** Degradation of the polyacrylonitrile-based UP2W material under cementitious conditions. *Applied Geochemistry* 169, 106015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106015>
- Taxén C, Moya Núñez A, Lilja C, 2023.** Stress corrosion of copper in sulfide solutions: Variations in pH-buffer, strain rate, and temperature. *Materials and Corrosion* 74, 1632–1644. <https://doi.org/10.1002/maco.202313759>
- Tits J, Kunz D, Lechleitner F, Szidat S, Guillemot T, 2023.** 2nd annual report of the IGD-TP Project: “Long-term Monitoring of C-14 compounds released during corrosion of IRradiated steel” (LOMIR). IGD-TP. SKBdoc 2067915 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tits J, Kunz D, Lechleitner F, Szidat S, Guillemot T, 2024.** 3rd annual report of the IGD-TP Project: “Long-term Monitoring of C-14 compounds released during corrosion of IRradiated steel” (LOMIR). IGD-TP. SKBdoc 2070853 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thorne M C, Lindborg T, Brown J, Ikonen A T K, Smith G M, Smith K, Walke R, 2022.** A research and development roadmap to support applications of the enhanced BIOMASS methodology. *Journal of Radiological Protection* 42, 020508. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac66a3>
- Thorne M, Ikonen A T K, Smith K, 2023.** Transport of C-14 in terrestrial and aquatic environments. BIOPROTA project report. SKB TR-23-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Trinchero P, Sanglas J, Iraola A, Bosbach D, Deissman G, 2022.** On the parameterisation of dual-continuum models for reactive transport modelling in fractured media. *Journal of Hydrology* 615, 128691. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128691>
- Trinchero P, Zou L, de La Iglesia M, Iraola A, Bruines P, Deissmann G, 2024.** Experimental and numerical analysis of flow through a natural rough fracture subject to normal loading, *Scientific Reports* 14, 5587. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55751-w>
- Valli J, Hakala M, Mattila J, Winderholler R, 2023.** Control of deterministically modelled structures on the stress variability at Forsmark. SKB R-23-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Valmalle M, Widell K, Iiola R, Bossuyt S, 2024.** DIC analyses and parameter calibration of a strain aging sensitive ductile cast iron. *Comptes Rendus Mécanique* 352, 1–17. <https://doi.org/10.5802/crmeca.235>
- Wessely O, 2023.** Beräkning av gasproduktionens inverkan på trycket i silon. SKBdoc 2018519 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Williams C J R, Lunt D J, Kennedy-Asser A T, Lord N S, 2022.** Uncertainties in modelled climate changes at Forsmark over the next 1 million years. SKB TR-22-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Yang Q, 2022.** Modelling of radiation damage and positron annihilation in metallic materials. Doktorsavhandling. KTH Royal Institute of Technology, Sverige. <https://orcid.org/0000-0002-2808-9372>

- Yang X, Zhang P, Korzhavyi P, 2023.** Hybrid-density functional calculations of structural, electronic, magnetic, and thermodynamic properties of α -Cu₂P₂O₇. *Applied Sciences* 13, 498. <https://doi.org/10.3390/app13010498>
- Yue X, Malmberg P, Isotahdon E, Ratia.Hanby V, Huttunen-Saarivirta E, Leygraf C, Pan J, 2023.** Penetration of corrosive species into copper exposed to simulated O₂-free groundwater by time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS). *Corrosion Science* 210, 110833. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110833>
- Zou L, Mas Ivars D, Larsson J, Selroos J-O, Cvetkovic V, 2022.** Impact of shear displacement on advective transport in a laboratory-scale fracture, *Geomechanics for Energy and the Environment* 31, 100278. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100278>
- Zou L, Selroos J-O, Poteri A, Cvetkovic V, 2023.** Parameterization of a channel network model for groundwater flow in crystalline rock using geological and hydraulic test data. *Engineering Geology* 317, 107060. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107060>
- Zou L, Johansson F, Mas Ivars D, Cvetkovic V, 2024.** Analysis of repeated direct shear on a mated rock fracture. *Eurock 2024*, July 2024, Alicante, Spain.
- Åkesson M, 2022.** Prototype Repository. Estimation of the buffer homogenisation. SKB P-22-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, 2023.** EBS TF – THM modelling. Water transport in pellets-filled slots – evaluation of Subtask B and final evaluation. SKB TR-22-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Kristensson O, Malmberg D, 2023.** A hydromechanical material model for compacted bentonite. *Applied Clay Science* 245, 107122. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107122>
- Öhrling C, 2025** Detailed geomorphological analysis in the search for indicators of glacially induced faulting along the ‘Hudiksvall-seismic cluster’, Bothnian coast. SKB R-24-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bilaga

Förkortningar och förklaringar

AB Svafo	Företag i Vattenfallkoncernen med uppgift att avveckla kärntekniska anläggningar från tidigare forsknings- och utvecklingsverksamhet.
ABM	Alternative buffer materials. Alternativa buffertmaterial. Experiment i Äspölaboratoriet där möjliga buffertmaterial undersöks.
AI	Artificiell intelligens.
Alara	As low as reasonably achievable. Begränsning av stråldoser så långt detta rimligen kan åstadkommas med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhälleliga faktorer.
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Frankrike.
ATB	Avfallstransportbehållare.
B1	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 1.
B2	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 2.
BAT	Best Available Technology. Bästa möjliga teknik.
BFA	Bergrum för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall på Simpevarpshalvön i Oskarshamn.
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung. Företag som, på uppdrag av regeringen i Tyskland, ansvarar för slutförvaring av radioaktivt avfall.
BIOMASS	Biosphere modelling and assessment. IAEA-program.
Bioprota	Internationellt samarbetsforum utformat för att stödja analys av långsiktiga biosfärskonsekvenser.
BKAB	Barsebäck Kraft AB.
BLA	Bergssal för lågaktivt avfall i SFR. I SFR finns en bergssal för lågaktivt avfall (1BLA) och ytterligare fyra bergssalar (2–5BLA) uppförs i den utbyggda delen av SFR.
BMA	Bergssal för medelaktivt avfall i SFR. I SFR finns en bergssal för medelaktivt avfall (1BMA) och ytterligare en bergssal (2BMA) uppförs i den utbyggda delen av SFR.
BRT	Bergssal för reaktortankar i SFR.
BTF	Betongtankförvar i SFR, främst avsett för avvattnad jonbytarmassa.
BWR	Boiling water reactor. Kokvattenreaktor. Reaktorerna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och reaktor 1 i Ringhals är kokvattenreaktorer.
Canmet MATERIALS	Canmet MATERIALS Technology Laboratory i Kanada.
CDLM	Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management.
Chalmers	Chalmers tekniska högskola.

Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Clink	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle.
Cmsol	Beräkningsverktyg för modellering och simulering av komplexa fysikbaserade system. Cmsol Inc.
Covra	The central organisation for radioactive waste. Företag med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Nederländerna.
CR	Koncentrationsfaktor som beskriver koncentrationen av ett ämne i en organism jämfört med den i födan eller i omgivande media (vatten, jord eller sediment).
Cu-OFP	Oxygen-free phosphorus-containing copper. Syrefri koppar med en låg tillsats av fosfor.
DarcyTools	Numerisk grundvattenkod som ägs och utvecklas av SKB.
DDSI	Differential Die-away Self-interrogation. Neutronmätning.
DFN	Discrete fracture network. Diskret spricknätverk.
DisCo	Modern spent fuel dissolution and chemistry in failed container conditions. EU-projekt.
EDZ	Excavation Damaged Zone.
Enresa	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall samt avveckling av kärnkraftverken i Spanien.
EPRI	Electric Power Research Institute. Amerikansk organisation som bedriver forskning och utveckling relaterad till produktion, leverans och användning av el.
EU	Europeiska unionen.
Eurad	European Joint Research Programme on Radioactive Waste Management. EU-program.
Euratom	Europeiska atomenergigemenskapen, European Atomic Energy Community.
F1	Kärnkraftsreaktor Forsmark 1.
F2	Kärnkraftsreaktor Forsmark 2.
F3	Kärnkraftsreaktor Forsmark 3.
Febex	Full-scale Engineered Barriers Experiment. Fullskaligt demonstrationsförsök genomfört i undermarkslaboratoriet i Grimsel, Schweiz.
FKA	Forsmarks Kraftgrupp AB.
FLAC3D	Modelleringsprogramvara designad för analys av geoteknisk och bergmekanik i tre dimensioner.
F-PSAR	Förberedande preliminär säkerhetsredovisning.
FSW	Friction stir welding. Friktionsomrörningssvetsning.
GAP	Greenland Analogue Project.
GIS	Geographic information system. Geografiskt informationssystem.
Grasp	Greenland Analogue Surface Project.
HBM	Hysteresbaserade materialmodellen för bentonit.

IAEA	International Atomic Energy Agency, Internationella atomenergiorganet.
IGD-TP	Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform.
ISO	International Organization for Standardization, Internationella standardiseringsorganisationen.
ISO-container	Behållare i storlekar standardiserade av Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) vilka kan lastas på järnvägsvagnar, lastbilar och fraktfartyg.
KBS-3-metoden	Metod för slutförvaring av det använda kärnbränslet som bygger på tre skyddsbarriärer: kopparkapslar, bentonitlera och det svenska urberget. KBS-3-metoden har fått sitt namn då den bygger på den tredje rapporten i projektet KärnbränsleSäkerhet.
KBS-3-systemet	De kärntekniska anläggningar med mera som behövs för att genomföra slutförvaring av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. KBS-3-systemet består av en gemensam anläggning för mellanlagring och inkapsling av det använda kärnbränslet, ett transportsystem för transporter av det inkapslade bränslet och en slutförvarsanläggning.
K_d	Sorptionskoefficient, fördelningskoefficient.
KSU	Kärnkraftsäkerhet och Utbildning. Utbildningsföretag för drift och underhållspersonal inom kärnkraft.
KTB	Transportbehållare för kapslar med använt kärnbränsle.
KTH	Kungliga Tekniska högskolan.
KTL	Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen).
LiDAR	Light Detection and Ranging. Laserbaserad teknik som använder ljuspulser för att mäta avståndet mellan sensorn och omgivningen.
LOT	Long-term test of buffer materials. Experiment i Äspölaboratoriet med syfte att ta reda på hur i första hand bentonitlera uppför sig vid förhållanden som liknar dem i ett slutförvar för använt kärnbränsle.
Marfa	Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field. Beräkningsverktyg för modellering av radionuklidtransport.
MB	Miljöbalk (1998:808).
MIKE SHE	Integrated catchment hydrological modelling software designed to simulate surface water and groundwater interactions.
MiniCan	Miniature Canister Corrosion Experiment. Experiment i Äspölaboratoriet.
MKB	Miljökonsekvensbeskrivning.
MLA3	Markförvar för mycket lågaktivt avfall vid Oskarshamnsverket.
MMD	Mark- och miljödomstolen.
Modaria	Modelling and Data for Radiological Impact Assessments. IAEA-projekt.
MODATS	Monitoring Equipment and Data Treatment for Safe Repository Operation and Staged Closure.
Mox	Mixed oxide fuel. Blandoxidbränsle.
MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Schweiz.
NEA	Nuclear Energy Agency. Ett samarbetsorgan för kärnenergifrågor inom OECD.
NoR	Nedmontering och rivning.
NWMO	Nuclear Waste Management Organization. Organisation med ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle i Kanada.
NWS	Nuclear Waste Services in the United Kingdom.
O0	Gemensamma serviceanläggningar på Oskarshamnsverket.
O1	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 1.
O2	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 2.
O3	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 3.
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development.
OKG	OKG Aktiebolag.
ONDRAF/NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Belgien.
Onkalo	Den berganläggning som Posiva uppför i Olkiluoto sedan 2004. Onkalo används för forskning och utveckling, men utgör också tillfarten till själva slutförvaret.
Posiva	Posiva Oy. Organisation med ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle i Finland.
PSAR	Preliminär säkerhetsredovisning inför uppförande.
PSI	Paul Scherrer Institute, Schweiz.
Puram	Public Limited Company for Radioactive Waste Management. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Ungern.
PWR	Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor. Reaktorerna R2, R3 och R4 i Ringhals samt Ågestareaktorn är tryckvattenreaktorer.
R1	Kärnkraftsreaktor Ringhals 1.
R2	Kärnkraftsreaktor Ringhals 2.
R3	Kärnkraftsreaktor Ringhals 3.
R4	Kärnkraftsreaktor Ringhals 4.
RAB	Ringhals AB.
RWMC	Radioactive Waste Management Committee. OECD/NEA.
SAR	Säkerhetsredovisning.
SAREC	Release of safety relevant radionuclides from spent nuclear fuel under deep disposal conditions (part of Eurad-2)
SFK	Slutförvaret för använt kärnbränsle. I denna rapport används detta begrepp för både den kärntekniska anläggningen under uppförande eller i drift (i andra dokument ofta benämnt Kärnbränsleförvaret) och det förslutna slutförvaret för använt kärnbränsle.

SFR	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall.
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKC	Svenskt Kärntekniskt Centrum.
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut.
SRB	Sulfatreducerande bakterier.
SR-Site	Redovisning av säkerhet efter förslutning av Slutförvaret för använt kärnbränsle, publicerad av SKB i mars 2011. Site efter engelskans "site" (plats).
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten.
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling.
SUDOKU	Near-surface disposal optimisation based on knowledge and understanding.
Surao	Správa úložišť radioaktivních odpadů. Statlig organisation med ansvar för radioaktivt avfall i Tjeckien.
Task Force EBS	Task Force on Engineered Barrier Systems. Internationellt samarbete mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om de tekniska barriärerna i det framtida slutförvaret.
Task Force GWFTS	Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. Internationellt samarbete mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om grundvattenflöde och transport av lösta ämnen i berget.
TDB	Thermochemical database. NEA-projekt.
Uniper	Tyskt energiföretag som är huvudägare för OKG och BKAB.
VAO	Virtuell avfallsorganisation. Organisation uppbyggd av SKB, Vattenfall och Uniper samt avfallsproducenterna RAB, FKA, OKG och BKAB, där varje ingående part är delaktig i att genomföra branschgemensamma ärenden, bidra med resurser, ge förslag på förbättringar med syfte att vidmakthålla ett branschgemensamt och optimerat kärnavfallssystem som är robust, kostnadseffektivt och transparent.
VTT	Technical Research Centre of Finland Ltd. Teknologiska forskningscentralen VTT. Forskningsinstitut som ägs och kontrolleras av den finska staten.