

SKB P-24-08

ISSN 1651-4416

ID 2053481

April 2025

Upprymning och förslutning av KFR02 i SFR

Göran Nilsson
GNC AB

Nyckelord: Förslutning, Koppar, Bentonit, Betong, AP SFK-24-005

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

Data i SKB:s databas kan ändras av olika skäl. Mindre ändringar i SKB:s databas kommer inte nödvändigtvis att resultera i en reviderad rapport. Revideringar av data kan även presenteras som supplement, tillgängliga på www.skb.se.

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2025 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

Inför den planerade utbyggnaden av slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) i Forsmark i Östhammars kommun har ett stort antal undersökningsborrhål borrats i det aktuella området.

Beroende på den föreslagna utformningen av utbyggnaden bedöms det finnas åtta borrhål som påverkar utbyggnaden av SFR3. Av dessa är det ett borrhål, KFR02, som måste förslutas innan byggstart, eftersom det ligger endast 10 m från påslaget för den planerade utbyggnaden av SFR3 förvaret.

Förslutningen utfördes med den så kallade sandwich-tekniken, men som benämns som ”temporär förslutning”, eftersom teknikkonceptet ännu inte är verifierat. Sandwich-konceptet baseras på att borrhålet till stora delar fylls med sand, medan tätningssktioner bestående av högkompakterad bentonit placeras strategiskt i sektioner med bra berg. Betongsektioner är placerade på båda sidor om bentonitsektionerna och i alla övergångszoner mellan olika material finns kopparexpandrar installerade.

Arbetet inleddes med att rymma upp det 170 m långa borrhålet KFR02, från 56 mm diameter till 75,8 mm diameter, på grund av att de framtagna och testade förslutningskomponenterna bentonit och kopparexpandrar är designade för 76 mm borrhål.

Sand är den volymmässigt dominerande komponenten, och i detta fall fylldes 126 m av borrhålet med sand. Teknikutveckling har medfört att sand kan släppas ner i borrhålet och samtidigt packas utan att borrören behöver lyftas. Förutom att tidsåtgången för installationen av sanden kortas erhålls dessutom en god packningsgrad av materialet.

I borrhålet installerades tre tätningssktioner mellan borrhålsängder 140,27–127,28, 79,89–66,16 och 25,09–11,15 m BHL. Installationen av bentonitkolonnerna och kopparexpandern fungerade som planerat. Bentonitkolonnerna släpptes i fritt fall ner i borrhålet, medan kopparexpandern fördes ner med borrören och trycktes fast mot bergväggen med bormaskinen.

Av någon anledning var härdningstiden för Weber undervattensbetongen dubbelt så lång som observerats vid tidigare tester. Genom att använda en tätningssventil som placerades ovanpå cementen när den stelnat kunde kopparexpandern installeras därovanpå, varvid installationstiden därmed kortades med ett dygn per gjutning. Betongens egenskaper kommer att utredas vidare.

De gjorda erfarenheterna under förberedelserna och installationsarbetet har bidragit till ökad och mer spridd kunskap i SKB:s egen organisationen samt bidragit med dokumentation och underlag som underlättar efterföljande framtagande av verifieringen.

Abstract

Prior to the planned extension of the Final Repository for Short-Lived Radioactive Waste (SFR), located in Forsmark in Östhammar municipality, a large number of investigation boreholes have been drilled in the area in question. Depending on the planned design of the extension of the SFR repository, eight boreholes are assessed to interact with the extension. Of these boreholes, there is one borehole, KFR02, that needs to be sealed before starting the construction work, as it is located only 10 m from where buildup of the access tunnel to SFR3. KFR02 was therefore sealed by using the so-called Sandwich-concept.

This concept is based on that the main part of a borehole is filled with granular material (sand, crushed rock), while sealing sections consisting of highly compacted bentonite are positioned in selected borehole sections with good rock quality, i.e. there are no water bearing fractures present. Concrete is positioned on both sides of the bentonite. In addition, copper expanders are installed to separate the different types of materials.

The field work started with reaming of KFR02 from 56 mm diameter to 75.8 mm diameter so that the sealing components which are designed for 76 mm could fit in the borehole.

Sand is the dominant component by volume, and in this case 126 m of borehole KFR02 was filled with sand. Technological development has meant that sand is dropped into the borehole and can be compacted without the drill pipes having to be lifted. The working method provides higher efficiency and also a good degree of compaction of the material. In this borehole, three sealing sections were installed between borehole lengths 140.27–127.28, 79.89–66.16 and 25.09–11.15 m.

For some reason, the curing time of the Weber underwater concrete was twice as long as previously observed. By using a plastic plug that was placed on top of the cement when it solidified, copper expanders could be installed on top, thus shortening the installation time by one day per casting.

The experience gained during the preparation and fieldwork has contributed to increase the knowledge of sealing boreholes to SKB's organization in Forsmark, as well as added the amount of documentation that facilitates the coming production of the verification.

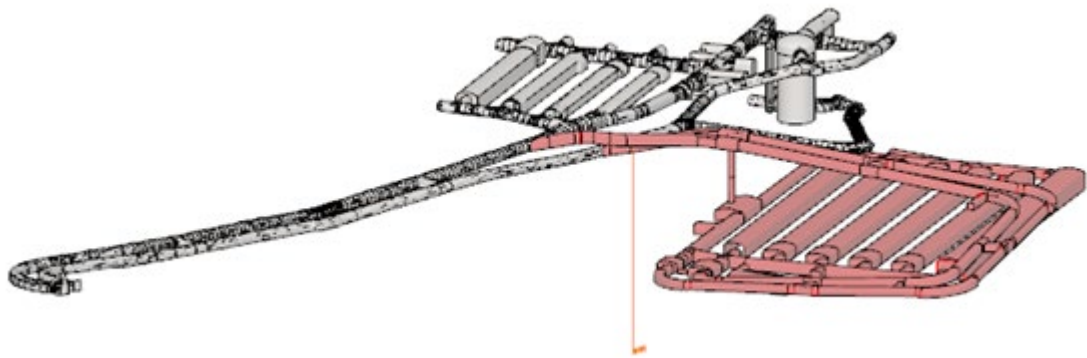
Innehåll

1	Inledning	4
2	Mål	5
2.1	Krav	5
3	Utrustning	6
3.1	Kärnborrhög	6
3.2	Överborrning foderrör och upprymning	6
3.3	Upprymningsverktyg	7
3.4	Förslutningsutrustning	8
3.4.1	Sand	8
3.4.2	Kopparexpander installationsrör	9
3.4.3	Installationsrör för betong	10
4	Utförande	11
4.1	Förberedelser	11
4.1.1	Etablering och upprymning	11
4.1.2	Etablering	12
4.2	Upprymning	13
4.2.1	Överborrning av foderrör	13
4.3	Upprymning från 56 till 75,8 mm.	14
4.3.1	OPTV-filmning	15
4.4	Bentonitpaket	16
4.4.1	Utformning och krav på bentonitpaketen	16
4.4.2	Material och tillverkning av bentonitpuckar	16
4.4.3	Montage av bentonitpaket	17
5	Resultat – Förslutning	18
5.1	Sand	19
5.2	Betong	20
5.3	Bentonitkolonner	22
5.4	Kopparexpander	23
5.5	Slutresultat	25
5.6	Återtag av förslutning	25
	Referenser	28

1 Inledning

Svensk Kärnbränslehantering (SKB) driver sedan mitten av 80-talet det underjordiska slutförvaret för låg- och medelaktivt radioaktivt avfall (SFR) vid Forsmark inom Östhammars kommun, se Figur 1-1. Under 2024 ska slutförvaret för det lågaktiva materialet byggas ut med flera stora bergsalar, SFR-3. Syftet med detta är i första hand att skapa nya utrymmen för rivningsavfallet från de nedstängda kärnkraftverken i Barsebäck, Ringhals och Oskarshamn.

Inför utbyggnaden av SFR med planerad byggstart i Q4 2024 behöver närliggande borrhål förslutas eller omhändertas på annat sätt för att inte orsaka problem för den planerade anläggningen. I projekt borrhålsförslutning (2023472 - Förstudie för förslutning av borrhål inför utbyggnationen av SFR) redovisas de borrhål som ska förslutas. Ett av dessa är KFR02. Borrhålet är cirka 170 m långt och 56 mm i diameter och är i princip vertikalt borrarat från botten av Byggtunnel (BT) cirka 10 m nedanför påslaget för framtida 2BT, se Figur 1-1. Programledningen för PSU har beslutat att KFR02 ska temporärt förslutas med den så kallade sandwichmetoden. För att förslutningsmaterialet ska passa i borrhålet måste KFR02 först upprymmas till 76 mm diameter. Denna rapport beskriver arbetet med upprymning och installation av förslutningsmaterial enligt designunderlag. Styrande dokument för aktiviteten framgår av Tabell 1-1.



Figur 1-1. Placeringen av KFR02 i byggtunneln i SFR.

Tabell 1-1. Styrande interna dokument för genomförandet av rymning och förslutningsaktiviteten

Aktivetsplan	SKB dokument id	Version
AP SFK-24-005 Rymning och förslutning av KFR02	2035078	1.0
Metodbeskrivning	SKB dokument id	Version
Metodbeskrivning för förslutning av undersökningsborrhål i SFR	2040254	0.8
Borrhålsförslutning KFR02, system projektering	2036651	1.0

2 Mål

Projektets mål är att försluta borrhål inför utbyggnaden av SFR-3. Kraven som förslutningen ska uppfylla är listade i de styrande dokumenten 2040254 och 2042890. En sammanfattning av funktionskraven redovisas i sektion 2-1.

- Rymma upp KFR02 från 56 mm till 75,8 mm.
- Försluta KFR02 temporärt med den så kallade sandwich-metoden.
- Designen ska även göra det möjligt att borra bort förslutningsmaterialen om metoden inte blir godkänd i samband med verifieringen.

2.1 Krav

- Borrhålsförslutningen ska förhindra att grundvattenflödet genom förvarsdelarna ökar så att hastigheten för betongdegradering överskrider den hastighet som antas i analysen av förvarets säkerhet efter förslutning.
- Borrhålsförslutningen ska förhindra att grundvattenflödet genom förvarsdelarna ökar så att utflödet av radionuklider ökar och att förvaret därmed inte uppfyller riskkriteriet.
- Borrhålsförslutningen ska förhindra att grundvattenflödet påverkas så att för säkerhetsanalysen ogynnsamma transportvägar från förvarsdelarna till ytan skapas.
- Borrhålsförslutningen ska förhindra att grundvattenflödet påverkas så att transporttiden från förvarsdelarna till ytan minskar och att sorptionsförmågan i omgivande berg därmed inte motsvarar antaganden gjorda i säkerhetsanalysen.
- Borrhålsförslutningen ska förhindra att grundvattenflödet påverkas så att den kemiska miljön i förvaret ändras så att de antaganden om reducerande förhållanden som gjorts i säkerhetsanalysen inte längre är giltiga.
- Borrhålsförslutningen ska säkerställa att berget kan uppfylla krav på barriäregenskaper under hela den tid som krävs med hänsyn till slutförvarets strålsäkerhet.

3 Utrustning

3.1 Kärnborrigg

Vid förslutningsarbetet installeras de olika förslutningsmaterialen med borrhörens. Detta innebär att borrhörens måste lyftas upp och ner i borrhålet ett stort antal gånger. Detta tunga arbete underlättas om bormaskinen har ett digitalt styrsystem vilket framförallt underlättar rörhanteringen då borrhörpersonalen kan byta av varandra med att lyfta rören, eftersom matning och gängning styrs med automatik. För KFR02 valdes därför en Diamec Smart 6 bormaskin från Epiroc till förslutningsarbetet. För i-hålet-utrustning användes borrhör i N-dimension, se Figur 3-1. För att dokumentera spolvattenförbrukningen passerade det ingående vattnet genom en mätcontainer och under upprymningen pumpades returvattnet och borrhör till två sedimentationscontainrar, se Figur 3-1.



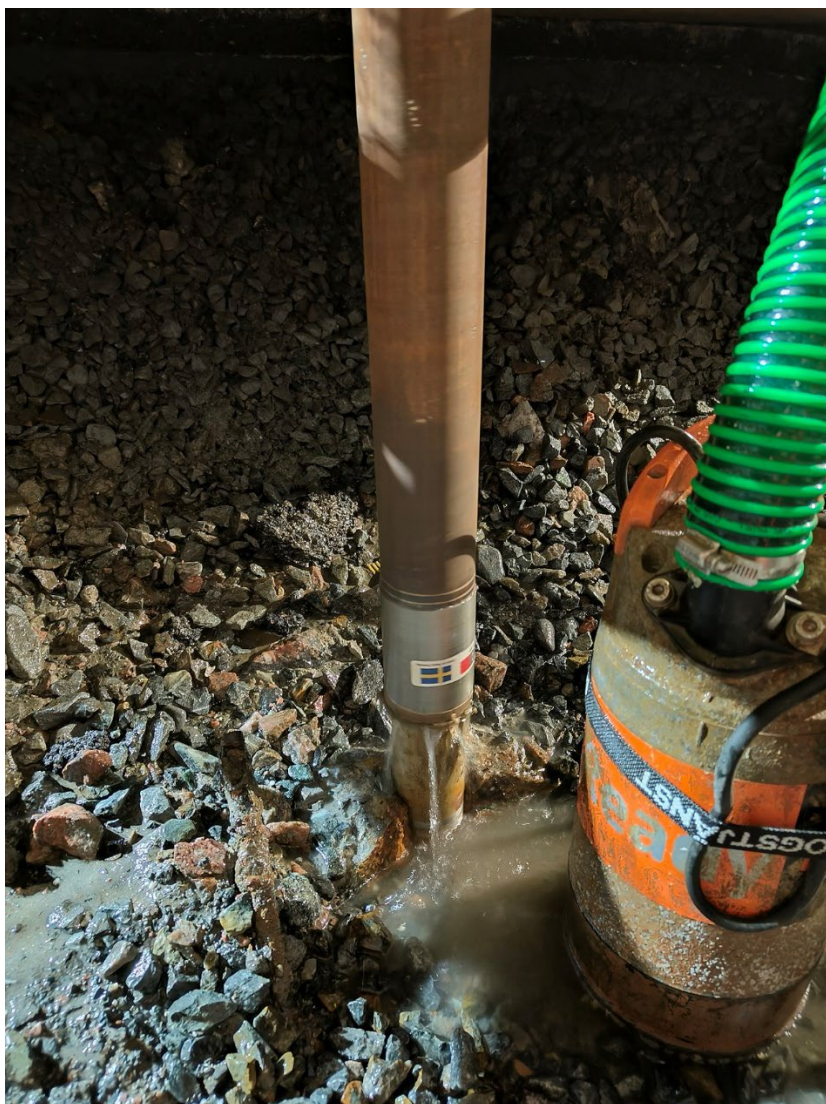
Figur 3-1. T.v.: Bormaskin Diamec Smart 6 med styrpulpeten i förgrunden. T.h.: Mätcontainern med spolvattentank ovanpå taket. I bakgrunden syns två sedimentationscontainrar.

3.2 Överbörning foderrör och upprymning

KFR02 borrades under 1980-talet när en vanlig dimension för undersökningskärnborrhål var 56 mm i diameter. Det innebar också att i den övre delen av borrhålet installerades ett foderrör i dimension $\text{Ø}64/57$ mm. När SFR klassades som kärnteknisk anläggning, medförde det också att utökad hydrogeologisk monitoring initierades i SFR. I de tidigt borrade borrhålen blev foderrören så småningom kraftigt rostangripna, varför flera borrhål senare renoverades genom att de skadade foderrören byttes mot rör i rostfritt och syrafast stål i dimension $63/57$ mm. För att kunna rymma upp kärnborrhålet KFR02 till 76 mm måste först foderrören överborras och ett nytt grövre foderrör installeras. Överbörningen av foderrören måste vara helt centrerad så att kärnborrhålet (56 mm) är i centrum. I annat fall är inte upprymning av borrhålet möjlig.

För att kunna överborra det rostfria röret tillverkades ett specialrör med 64 mm innerdiameter och 74 mm ytterdiameter på rör och borrhörkrona, se Figur 3-2.

Efter att det gamla foderröret överborrats, gjordes en ny överborring med ett standard NW-foderrör med dimensionen $\text{Ø}89/77$ mm diameter, vilket borrades ner till den tidigare överborrade längden, 1,55 m. Därefter lyftes nu de två inre rören upp, och därmed var KFR02 klart för upprymning, se även Figur 4-6.



Figur 3-2. Överborring av det rostfria foderröret i KFR02.

3.3 Upprymningsverktyg

Ett rymningsverktyg med en pilotstyrning med 56 mm borrhkrona och N-dimension på rymningsborrkronan (75,8 mm) togs fram. För att säkerställa att rymningsborrkronan centrerades i 56 mm borrhålet förlängdes piloten med 0,7 m, se Figur 3-3.



Figur 3-3. Pilotborrkrona för upprymning av KFR02 från 56 mm till 75,8 mm diameter.

3.4 Förslutningsutrustning

Sandwichförslutningen innebär att olika komponenter installeras i borrhålet. För dessa material, betong, kopparexpander, fingrus och tätningsventiler, har speciell teknik och utrustning utvecklats för vilket redovisas nedan.

3.4.1 Sand

I förberedelserna inför projektet ingick att utveckla en mer effektiv metod för sandinstallationen, vilken gick ut på att sanden släpps ner i borrhålet under samtidig packning av sanden, det vill säga utan att borrhöret behöver lyftas. Utvecklingen mynnade ut i en konstruktion av en stamp på den nedre delen av borrhöret vilken visas i Figur 3-4 (röret till höger). I originalversionen var stampen rund, men modifierades något efter att den första (nedersta) sektionen sand installerats. Modifieringen gjordes genom att tre spår slipades i den runda delen för att sanden lättare skulle kunna rinna ut genom röret, (röret till vänster) i Figur 3-4.



Figur 3-4. Monteringsrör för sandinstallationen.

3.4.2 Kopparexpander installationsrör

Ett monteringsrör för kopparexpandern är anpassat efter den övre delen av expandern. Den brytpinne som låser fast kopparexpandern i rörgången tills den sänkts till den nivå där den ska installeras utgörs av en 8 mm massiv kopparstång. Med 1,5 tons tryck från bormaskinen pressas expandern så att brytpinnen skjivas av, varvid den konformade övre delen expanderar ut den undre glödgade delen av expandern mot borrhålsväggen. De tätningselement som också används för att avgränsa betongen monteras med samma monteringsrör.



Figur 3-5. Monteringsrör för kopparexpander och tätningselement.

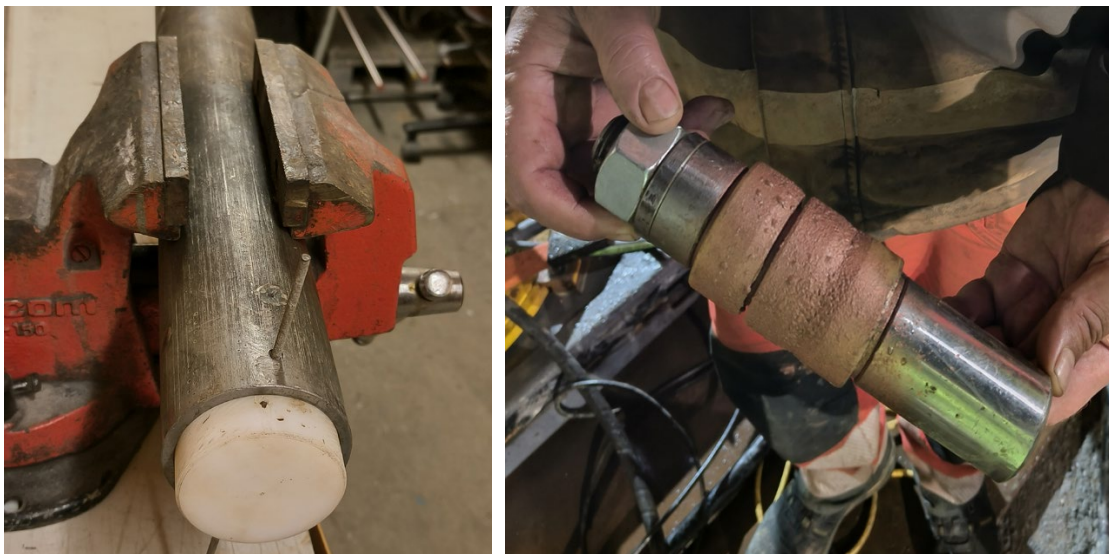
3.4.3 Installationsrör för betong

Betongen som ingår i förslutningskonceptet utgörs av Weber undervattensbetong. Eftersom detta är en ballastbetong och förs ner i borrhålet över långa sträckkor går den inte att pumpa utan måste transporteras ner i borrhålet med hjälp av borrhörens.

För att hålla kvar betongen i borrhörens sitter ett monteringsrör längst ner på borrhörens, se Figur 3-6. I botten på monteringsröret placeras en bottenplugg som låses fast med en brytpinne. Denna brytpinne måste dimensioneras utgående från det vertikaldjup där cementen ska placeras. I KFR02 som är 170 m långt valdes en brytpinne som går av vid 22 bars övertryck. Betongen fylls sedan upp i borrhörens, och ovanpå betongen sätts en topplugg som trycker ut betongen när borrhörens är vid rätt nivå. När den beslutade nivån har nåtts fylls röret med vatten innan en vattenleka skruvas på. Vattentrycket ökas tills den nedre brytpinnen går av så att cementen kan pumpas ut i borrhålet. Samtidig lyfts röret sakta så att borrhålet helt fylls upp med betong. När toppluggen landar mot en kant i monteringsröret stiger vattentrycket vilket ger borrhörens en indikation på att all cement har pumpats ut. Röret kan då lyftas upp och rengöras.

Bottenpluggen kan vara tillverkad av koppar eller plast. Mindre mängder av plast är tillåtet att användas vid förslutning av borrhålen i SFR, enligt dokument id 2031876. Eftersom plastpluggar är billiga och lätta att tillverka valdes sådana vid installationen av betong i KFR02.

Toppluggen är försedd med samma tätningar som sitter på det fångstverktyg som hämtar innertuben i WL-systemet. Tätningarna är anpassade till borrhörens och ger därmed en god tätande funktion när vattnet utövar tryck på pluggen, som därvid trycker ut cementen ur borrhörens.



Figur 3-6. T.v. Monteringsrör för betong. Bottenpluggen fästes med brytpinne i nedre delen av röret. T.h. Ovanpå betongen som fyllts upp i borrhörens sätts en topplugg. Med ökat vattentryck går brytpinnen av och betongen trycks ut ur borrhörens av toppluggen, som landar mot en kant längst ner i monteringsröret när all betong har tryckts ut.

4 Utförande

Byggstarten för utbyggnaden av SFR-3 är planerad till Q4 2024. Dessförinnan måste ett antal borrhål i och omkring SFR-anläggningen förslutas. Det första av dessa är KFR02 som ligger endast 10 m från påslaget för SFR3.

I och med beslut om förslutningen av KFR02 har borrhålsförslutning gått från intermittenta FoU-insatser under tre decennier till skarpt läge på kort tid. När planeringsarbetet påbörjades i oktober 2023 uppmärksammades att projektet omfattas av krav på långsiktig säkerhet, vilket innebär att alla processer i sandwich-tekniken måste vara kvalificerade. Kvalificering innebär att en detaljerad och spårbar dokumentation av teknik och material som ingår i förslutningsprojektet måste tas fram. Eftersom detta arbete beräknades ta upp till ett år att utföra, måste ett nytt beslut tas för förslutningen av KFR02. Programledningen för PSU beslutade att en temporär förslutning av KFR02 utförs enligt sandwich-metoden, men installationen måste också anpassas så att borrhålet kan borras upp om så krävs i det eventuella fallet att kraven i kvalificeringen inte uppfyllts. En översiktlig tidplan för projektets genomförande redovisas i Figur 4-1.

Översiktlig tidplan förslutning KFR02									
	2023			2024					
	Okt	Nov	Dec	Jan	Feb	Mars	April	Maj	Juni
Planering									
Förberedelser									
Upphandling									
Utförande									
Dokumentation									

Figur 4-1. Översiktlig tidplan för förslutningen av KFR02.

4.1 Förberedelser

Förberedelserna inleddes med att nödvändiga styrdokument togs fram. Vid upphandlingen ställdes krav på att anlitad personal hade tidigare erfarenhet av förslutningsarbeten. Detta resulterade i att ett norskt borrhålsbolag med det svenska dotterbolaget Norse Diamond Drilling AB anlätades för att utföra upprymningen och förslutningen av KFR02. Eftersom SFR klassas som en kärnteknisk anläggning krävdes säkerhetsprövning, läkarintyg avseende drogprov samt intyg beträffande personalens tillförlitlighet samt nödvändiga utbildningar innan tillträde till anläggningen beviljades.

Arbetet med KFR02 indelas i tre moment:

- Upprymning från 56 mm till 75,8 mm borrhålsdiameter.
- OPTV-filmning av det upprymda borrhålet.
- Förslutning enligt sandwich-metoden.

4.1.1 Etablering och upprymning

Styrande aktivitet för tidplanen var att byggtreprenören Skanska skulle få tillträde till arbetsplatsen under jord i SFR den 1 juni 2024 för att hinna med förberedande arbeten i byggtunneln innan byggstart för utbyggnationen av anläggningen. När tillverkning och leverans av kopparexpandrar och bentonitkolonner blev klar under mitten av april kunde borrhålsutrustningen etableras till Forsmark.

Tidplan etablering och upprymning KFR02								
April	22	23	24	25	26	27	28	29
Etablering	■							
Överborring foderrör				■				
Upprymning					■			

Figur 4-2. Tidplan för etablering och upprymning av KFR02.

4.1.2 Etablering

Efter att bormaskinen etablerats till borrhålets plats och el-anslutningen till hydraulaggregatet var utförd ställdes bormaskinen på en körplåt, varefter underredet svetsades fast i körplåten. För att hålla körplåten (och bormaskinen) förankrad mot sulan ställdes ett 4-tons betongfundament på plåten bakom bormaskinen, se Figur 4-3.

Innan upprymningen startade utfördes rengöring av borrhålets utrustning som används i borrhålet, se Figur 4-4. Eftersom nya borrhör alltid är rostskyddade måste de rengöras med avfettning och hetvatten för att bli helt rena från rostskyddsmedel och därmed förhindra att rören ger avlagringar på borrhålsväggen.



Figur 4-3. Bormaskin på plats. Betongblocket stabiliserar körplåten i vilket bormaskinen är fastsvetsad.



Figur 4-4. Alla nya borrör är rostskyddade varför det är viktigt att avfetta och hetvattenvätta rören innan de ska användas i borrhålet.

4.2 Upprymning

När KFR02 borrades under början av 1980-talet var den vanligaste dimensionen för undersökningsborrhål $\text{Ø}56$ mm. Vid mitten av 1990-talet introducerades WL-teknik för kärnbörning i Sverige och då ändrades också standarddimensionen för SKB:s undersökningsborrhål till $\text{Ø}76$ mm.

I platsundersökningar som genomfördes i Forsmark och Oskarshamn har alla kärnborrhål borrats med $\text{Ø}76$ mm diameter. Det har naturligtvis också inneburit att teknik och material vid utvecklingen av förslutningskonceptet har dimensionerats för 76 mm borrhål och därför måste KFR02 inledningsvis rymmas upp till 76 mm diameter.

4.2.1 Överbörning av foderrör

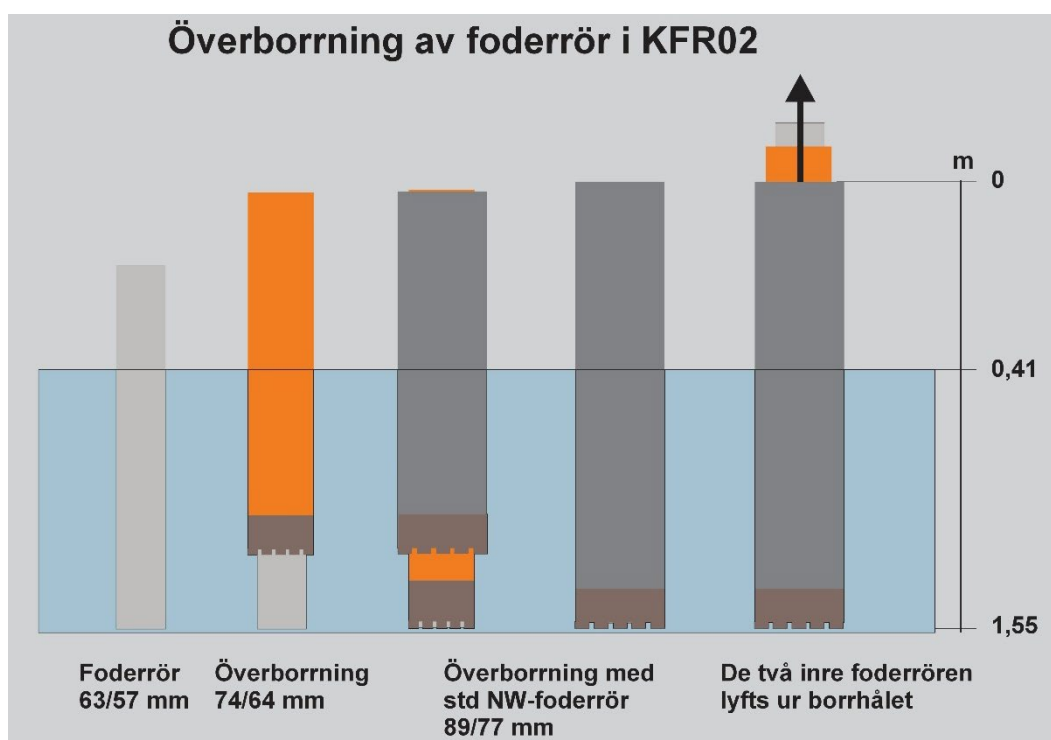
Det absolut viktigaste momentet i överbörningen är att bormaskinen är centrerad över det befintliga foderröret. Finjusteringen av bormaskinen utfördes genom att flytta hela körplåten med den fastsvetsade bormaskin tills rätt startriktning uppnåtts, se Figur 4-5. När överbörningsröret lätt kan roteras över det befintliga foderröret i KFR02, är maskinen centrerad.

För den första överbörningen användes ett specialgjort rör och borkrona med 64 mm innerdiameter och 74 mm ytterdiameter. Med de snäva toleranserna måste bormaskinen stå helt rätt för att maskinen ska orka rotera röret över det befintliga foderröret som har 63 mm ytterdiameter.

Därefter monterades ett standard NW-foderrör (89/77 mm) som nu överbörade bägge foderrören som var kvar i borrhålet. Dessa foderrör kunde nu lyftas bort och därmed var hålet dukat för upprymning, se Figur 4-6.



Figur 4-5. T.v.: Med grävmaskin rensades asfalt och grus bort runt borrhålet ner till sulan och när den manschett som fanns i hålet öppnades var flödet ca 9 L/min. T.h.: Det rostfria foderröret överborrades med ett specialtillverkat rör och borkrona med dimensionen $\text{Ø } 64/74 \text{ mm}$.



Figur 4-6. Bilden visar de olika stegen för att överborra foderröret i KFR02.

4.3 Upprymning från 56 till 75,8 mm.

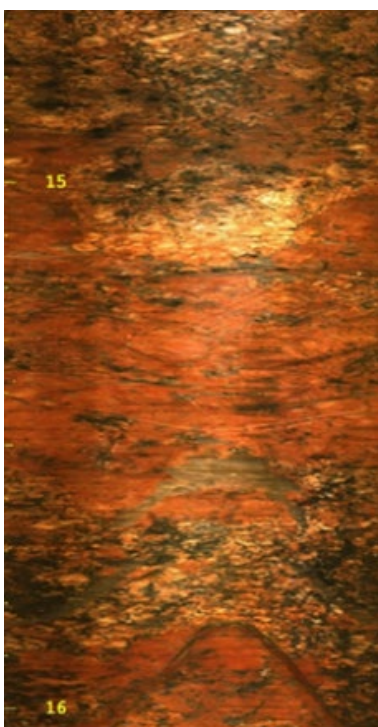
Efter att NW-foderröret installerats kunde upprymningen påbörjas. Sjunkhastigheten vid upprymning kan jämföras med vanlig kärnborrning (15–20 cm/min), men vid upprymning pågår borrningen hela tiden tills borkronan är utnött och måste bytas ut, se Figur 4-7. För upprymningen av KFR02 användes 4 stycken N-borkronor. Sammanfattningsvis tog etableringen 3 dagar och upprymningen 4 dagar att utföra.



Figur 4-7. T.v.: Rymningsverkyget har en pilot försedd med en 56 mm borrhkrona medan rymningsborrkronan är en standard borrhkrona i N-dimension (75,8 mm). T.h.: Borrhkronan slits i den yttre delen vid upprymningen.

4.3.1 OPTV-filmning

Eftersom KFR02 var ett av de tidigaste hålen som borrades i SFR saknas också en stor del av sådana mätningar som ger underlag för bedömning av bergkvalitet, vilka har varit standard i de senare borrarde hålen. Därför beslutades att utföra en OPTV-filmning av det upprymda borrhålet främst för att få en bild över bergkvaliteten, speciellt där kopparexpanderna planerades att sitta, eftersom det är viktigt att de placeras och expanderas fast i stabilt berg. OPTV filmades fyra dagar efter att upprymningen utförts och gav en bild av borrhålsväggen med hög kvalitet. Resultatet från OPTV visade att ingen förändring av den planerade förslutningsdesignen behövde göras, se Figur 4-8.



Figur 4-8. OPTV-bild vid 14–16 m visar på helt berg där en kopparexpander sitter (14,77–14,89).

4.4 Bentonitpaket

4.4.1 Utformning och krav på bentonitpaketen

Bentonitpaketen utgör den tätande kärnan i borrhålstätningarna som installeras i borrhålen, se Figur 4-9. Bentonitpaketen utgörs av en central kopparstång var på bentonitpuckar träas. Distansbrickor av koppar monterar med ett visst mellanrum (var åttonde bentonitpuck), och har funktionen att förhindra mekanisk nötning från borrhålsväggen vid installation. De monterade bentonitpaketen lackas för att skydda från erosion när de förs ned igenom vattenfyllda borrhål. Lacken spricker senare upp.



Figur 4-9. T.v.: foto på en bentonitpuck med borrar centrumhål. T.h.: foto på ett lackat bentonitpaket. Bentonitpaketet utgörs av 32 stycken bentonitpuckar, trädda på en kopparstång.

4.4.2 Material och tillverkning av bentonitpuckar

Materialet som används i bentonitpuckarna är en standardprodukt från Wyoming som SKB har stor erfarenhet av och som återkommande uppvisar likvärdiga egenskaper. Materialet köps in med en vattenkvot och granulstorleksfördelning som möjliggör direkt pressning av bentonitpuckar utan att materialet bearbetas. För att säkerställa att SKB:s kravbild uppfylls så analyseras materialet enligt ett standardprogram innefattande ett flertal analyser som SKB tillämpar på material som ska användas vid borrhålsförslutning. Genomförda analyser visade att det material som köpts in till KFR02 uppfyller hela kravbilden.

Bentonitpuckarna tillverkas industriellt i en större hydraulisk press med en specialtillverkad pressform som producerade fyra bentonitpuckar vid varje presscykel, se Figur 4-10. Produktion och kontrollprogram följer SKB:s standardiserade metodbeskrivning för produktion av bentonitpuckar.

Inför aktuellt program där ett flertal borrhål ska förslutas, inklusive KFR02, tillverkades cirka 6 000 bentonitpuckar. Massa och dimension kontrollerades på ungefär var hundra bentonitpuck och mätdata visar att samtliga krav uppfylldes på dessa stickprov. Även förstörande provning genomfördes på ett antal slumpvis utvalda bentonitpuckar och vattenkvoten bestämdes till 10,9 % och torrdensiteten till cirka 1870 kg/m³.



Figur 4-10. T.v.: Foto som visar pressen som använts vid tillverkningen (SACMI 1000 ton). Fyra bentonitpuckar pressas i varje presscykel. T.h.: Bentonitpuckarna staplas i pallar och försluts med plast (foto från tillverkning 2021).

4.4.3 Montage av bentonitpaket

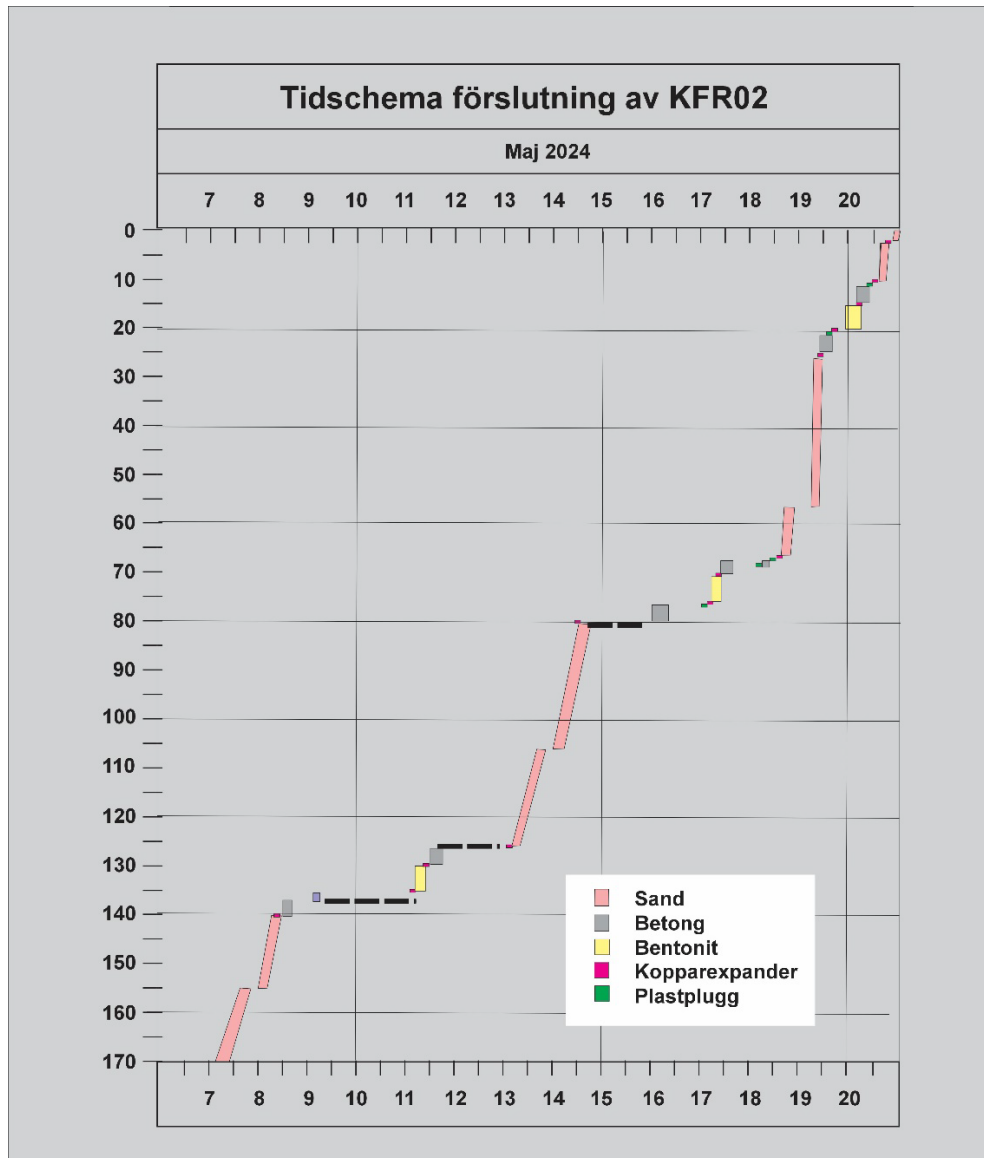
Montaget av bentonitpaket genomförs i inomhusmiljö enligt med SKB:s standardiserade metodbeskrivning och kontrollprogram. Ett centrumhål borrar i en svarv och 32 stycken bentonitpuckar vägs upp. Deras totala massa (32 st) vid en vattenkvot på 10,9 % ska vara >12,75 kg, vilket även uppnåddes med god marginal för samtliga bentonitpaket. Efter montage lackades bentonitpaketen med schellack, se Figur 4-11. Totalt monterades 12 bentonitpaket till KFR02. Dessa plastades in och förpackades i en specialbyggd transportbox inför transport till Forsmark, se Figur 4-11.



Figur 4-11. T.v.: Lackning av färdigmonterade bentonitpaket. T.h.: Inplastade och förpackade bentonitpaket till KFR02.

5 Resultat – Förslutning

I detta kapitel presenteras resultat från installationen av förslutningsmaterialen som utfördes i KFR02. Projektet startade den 7 maj och avslutades den 20 maj, se tidplanen i Figur 5-1. Efter upprymningen gjordes en OPTV-filmning av borrhålsväggen som användes för att i första hand kontrollera att kopparexpandrarna blev placerade i helt berg. Designen för installationen i KFR02 kunde efter granskning av OPTV-filmningen den 6 maj fastställas.



Figur 5-1. Tidschema med materialredovisning längs borrhålet vid förslutningen av KFR02.

5.1 Sand

Sanden är ett stödjande material och måste därför packas under installationen för att minimera sättningar i sektionen. Sandinstallationerna i KFR02 var de första där nu nyutvecklade teknik tillämpades för att föra ner sanden under samtidig packning utan att borrhörens behövde tas upp, se även avsnitt 3.4.1.

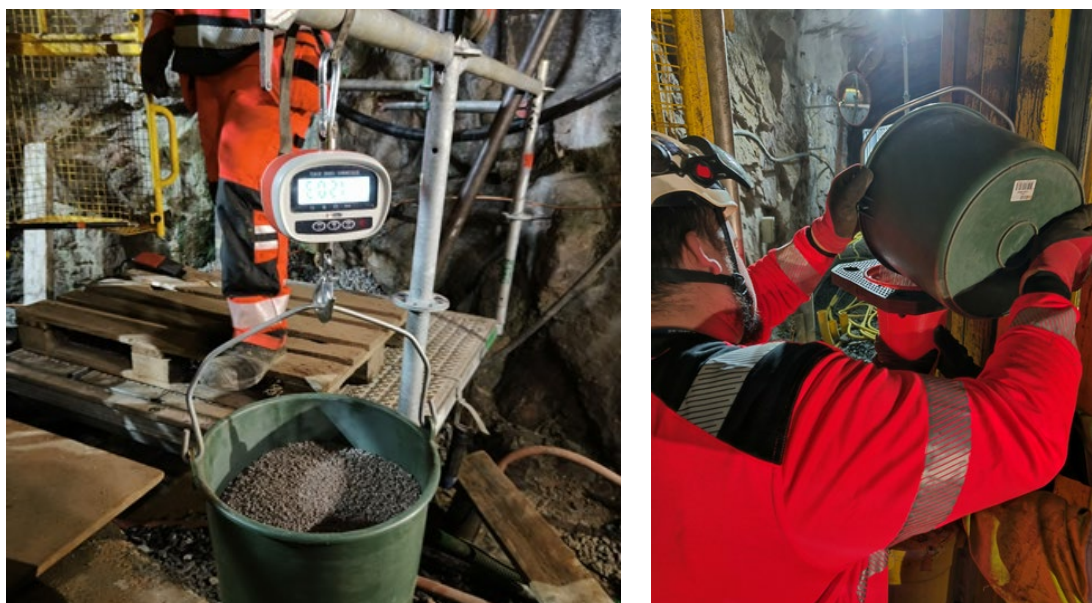
Sanden vägdes upp i satsar om cirka 15 kg som hölls ner i borrhörens, se Figur 5-2. I den nedersta sektionen från hålbotten vid 170,67 m var transporttiden cirka 10–15 min innan materialet nådde botten på röret och ytterligare några minuter innan sanden runnit ut genom installationsverktyget och ut i borrhålet. Packningen utfördes genom att rörgången lyftes cirka 15 cm och därefter släpptes ner i fritt fall så att den monterade stampen tryckte på sanden. Den första bottensektionen mellan 170,67–140,39 m kunde packas så att en medeldensitet för sektionen på 1,56 kg/dm³ uppnåddes.

Vid installationen i den andra sektionen som började vid 127,08 m packades sanden med upp till 50 slag per 15 kg sand genom att rörgången släpptes enligt beskrivningen ovan. Tester under installationerna visade att med cirka 30 slag på hela sektionen uppnåddes en mycket god packningsgrad. Den andra sektionen mellan 127,08–80,01 m kunde packas så att en medeldensitet på 1,64 kg/dm³ erhöles.

I den tredje sektion med början vid 65,92 m packades all sand med 30 slag per sats. Eftersom effekten av slagen är beroende av rörvikten och slaghöjden, så minskar effekten när man kommer högre upp i borrhålet. I de nedre sektionerna släpptes rören från cirka 15 cm höjd, medan rören i den tredje, ytligare sektionen släpptes från cirka 0,5 m. Sektionen mellan 65,92–25,23 m packades så att medeldensiteten blev 1,56 kg/dm³.

Den fjärde och mest ytliga sektionen mellan 10,91–2,44 m packades till en medeldensitet av 1,45 kg/dm³, vilket är godkänt men som synes lägre än i de andra sektionerna på grund av låg slageffekt vid packningen. Slutligen hölls sand även högst upp i borrhålet mellan 0–2,32 m. Genom detta förfarande kan en bormaskin riktas upp och borra bort förslutningsmaterialet om så bedöms nödvändigt.

Totalt fylldes 126,51 meter av KFR02 med mekaniskt stabilt material i form av sand/fingrus (fraktion 2–4 mm). I Tabell 5-1 redovisas data för sandinstallationen i KFR02.



Figur 5-2. Varje sats med sand vägs innan den hålls ner i borrhörens.

Tabell 5-1. Data för sandinstallationen i KFR02

Från (m)	Till (m)	Sektionslängd	Sand (kg)	Bh-volym (dm ³)	Densitet (kg/dm ³)	Krav	Kommentar
170,67	140,39	30,28	212,6	136,57	1,56	1,4	Godkänt
127,08	80,01	47,07	347,28	212,30	1,64	1,4	Godkänt
65,92	25,21	40,71	287,08	183,53	1,56	1,4	Godkänd
10,91	2,44	8,47	55,56	38,20	1,45	1,4	Godkänt
2,32	0,00	2,32	15				Ej packad

5.2 Betong

Betongen är en del av tätningspluggen som omger bentonitkolonnerna på ömse sidor. Vid tidigare försök och testinstallationer har det visat sig att Weber undervattensbetong har fungerat väl. Speciellt viktigt är att betongen härdat efter 14–16 timmar och har tillräcklig hållfasthet för att kopparexpandern ska kunna monteras och expanderas ovanpå betongen dagen efter en installation.

Receptet för undervattensbetongen är 2,7 L vatten per 20 kg säck, och blandningen roterades i minst 10 minuter i cementblandaren innan användning, se Figur 5-3. I samtliga gjutningar som gjordes för installationerna i KFR02 blev härdningstiden i stället ungefär dubbelt så lång jämfört med vid tidigare användning, snarare 24–36 timmar, innan betongen härdat så att kopparexpandern kunde pressas på plats. Provtagning av betongen visade att proverna var mjuka dagen efter gjutningen och gick att skära med kniv. Efter två dygn hade betongen emellertid hårdnat. Flytsättsmått för betongen varierade mellan 45–59 cm, se Figur 5-4.

Vid den första gjutningen användes brandvatten, det vill säga det vatten som finns tillgängligt i ledningsnätet under jord i SFR. Vid de efterföljande gjutningarna användes rent dricksvatten, men inte heller vattenbytet förkortade härdningstiden. Kontroll av pallen med betong som levererades från byggvaruhus visade att betongen var tillverkad i januari 2024 vilket indikerar att betongen rimligtvis inte var för gammal.

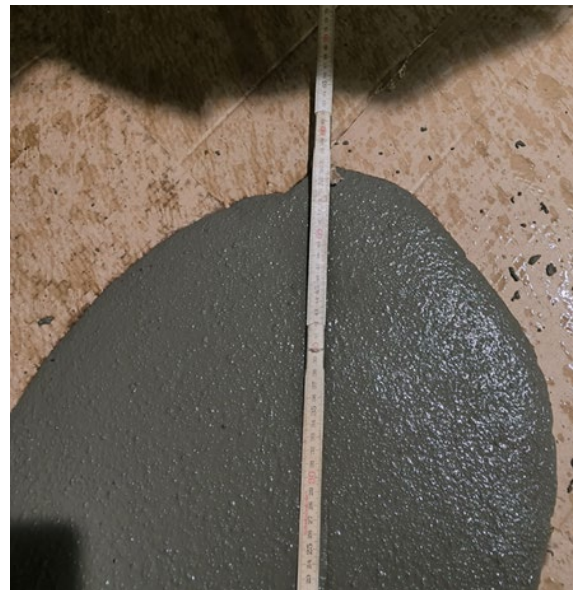
Eftersom ingen förklaring till varför betongens härdningstid blev betydligt längre än vid tidigare tester uppnåddes, fattade projektgruppen beslutet att använda en tätningsventil som sattes ovanpå den mjuka betongen, som då fungerade som ett mothåll vid montage av kopparexpandern ovanpå tätningsventilen. Normalt används denna typ av ventil för att tätta bort läckande grundvatten från borrhål i gruvor. Det visade sig att tätningsventilen kunde sättas ovanpå betongen efter några timmar eller dagen efter installationen, och därefter kunde kopparexpandern tryckas fast ovanpå tätningsventilen utan att sjunka ner i betongen. Åtgärden förkortade installationstiden avsevärt. Ytterligare utredning inom projektet med ny Weber undervattensbetong kommer att göras under sensommaren.

Tabell 5-2. Sektioner av betong som omger bentoniten i tätpluggen

Från (m)	Till (m)	Sektionslängd (m)	Längd betong (m)	
140,27	137,02	3,25	6,23	
130,26	127,28	2,98		
79,89	76,52	3,37	6,84	
69,63	66,16	3,47		
25,09	21,64	3,45	7,07	
14,77	11,15	3,62		



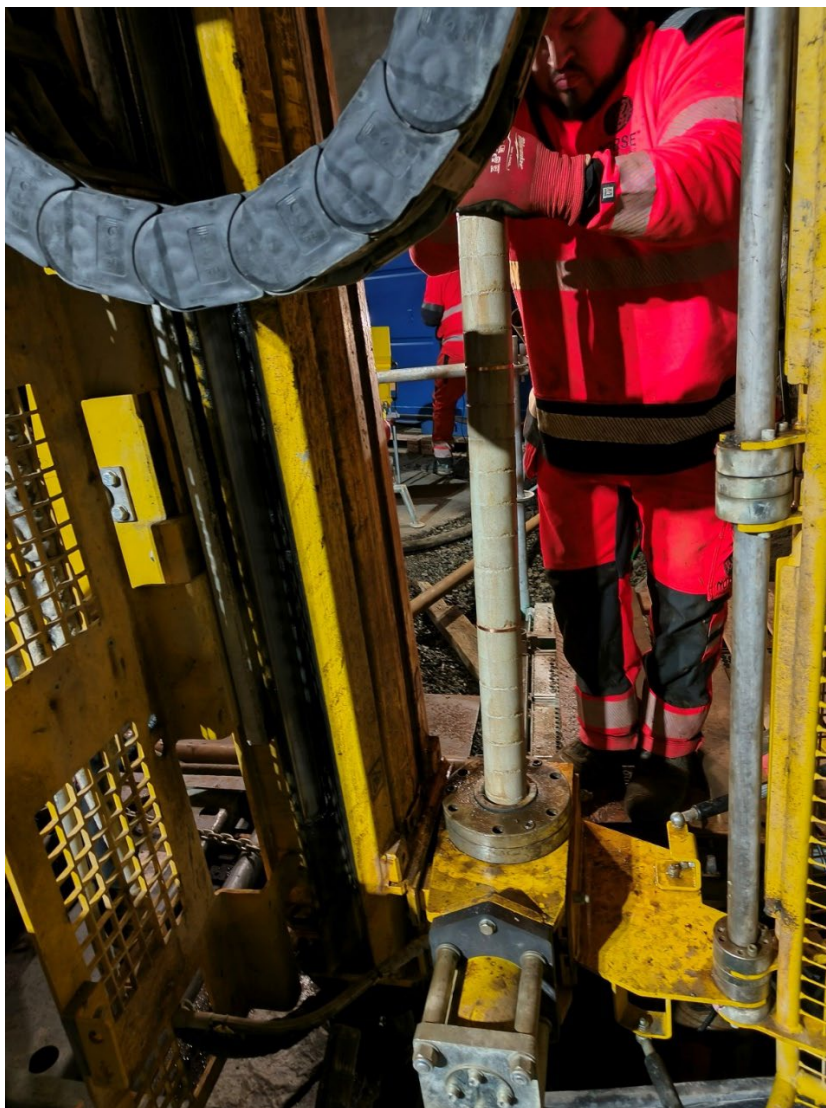
Figur 5-3. Betongen blandas enligt recept med 2,7 L vatten per 20 kg säck. Efter 10 minuter i blandaren är betongen färdig och fylls på i borrör i den volym som har beslutats att fyllas upp i borrhålet.



Figur 5-4. Prov togs ut på varje sats som blandades och flytsättsmått uppmättes.

5.3 Bentonitkolonner

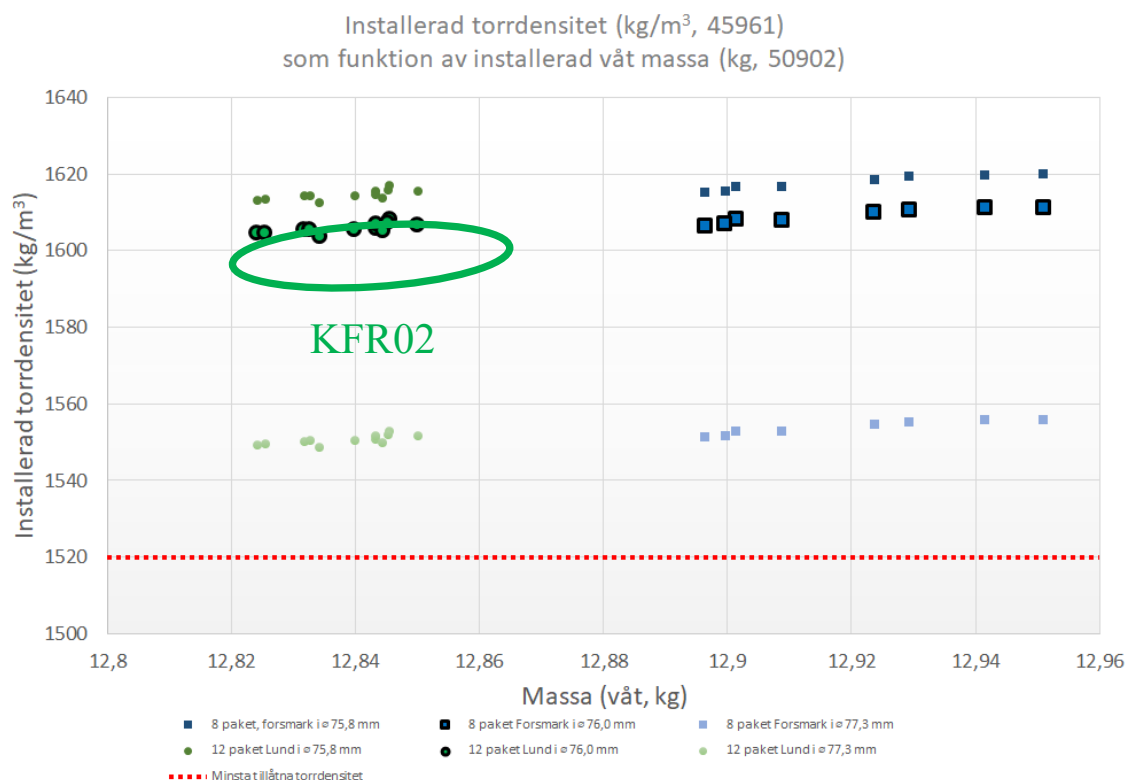
Installationen av bentonitkolonner är det allra enklaste momentet i förslutningen. Borrhålen i Forsmark är generellt av god kvalitet. Att det borrhål som man arbetar med är fritt verifieras då rörgången transporteras upp och ner i borrhålet ett flertal gånger. Därför kunde bentonitkolonnerna utan fara för skador helt enkelt släppas ner med fritt fall i borrhålet, totalt fyra stycken kolonner i en tätplugg, se Figur 5-5. Efter kolonnerna monterades en kopparexpander som när den expanderar trycker ihop kolonnerna något, så att grundvattnet gör att bentoniten börjar expandera mellan kopparexpanderna. En kolonn väger 14,9 kg och är 164 cm lång.



Figur 5-5. Bentonitpaketen släpps helt enkelt ner i borrhålet. Eftersom en tätplugg har fyra bentonitpaket så sätts det ner cirka 6,56 m bentonit i borrhålet (per sektion).

Installerad torrdensitet bentonit i KFR02

Figur 5-6 visar den installerade massan och torrdensiteten per bentonitpaket (cirka 1,64 m). Den installerade massan i bentonitpaketen är i storleksordning 12,85 kg vilket uppfyller kravet som är >12,75 kg massa bentonit per bentonitpaket. Detta motsvarar en installerad torrdensiteten runt 1610 kg/m³ i KFR02 för en borrhålsdiameter om 75,8 mm, att jämföra med kravet på >1520 kg/m³. Den installerade torrdensiteten bentonit kommer att säkerställa en mycket låg hydraulisk konduktivitet i samtliga borrhålstätningar i KFR02.



Figur 5-6. Installerad torrdensitet (kg/m³) som funktion av installerad massa (kg, våt) för bentonitpaket vid olika borrhålsdiametrar. KFR02 är nyligen upprymt till 75,8 mm och inringat i figuren, 12 paket Lund i ø 76,0 mm. Forsmark (SKB) utgör ett senare installerat borrhål.

5.4 Kopparexpander

Kopparexpandern ansluts till ett monteringsrör med en 8 mm brytpinne, se Figur 5-7. Expandern förs sedan ner i borrhålet tills den når den översta nivån på det tidigare installerade förslutningsmaterialet. Med hjälp av bormaskinen appliceras en tryckkraft på borrhöret vilket resulterar i att brytpinnen går av, varefter den övre delen av expandern trycks ner i den glödgade undre delen som då expanderar tills den når borrhållsväggen. Den kraft som behövs för att skjuva av brytpinnen är cirka 6 kN, och för expansionen krävs mellan 10 och 20 kN (Sandén et al 2018). Efter installationen får rörgången vila mot expandern och nivån i borrhålet kan dokumenteras. Kopparexpandern väger 3,85 kg och är 15 cm lång, men efter kompressionen i borrhålet blir den cirka 12 cm i höjd.

Sammanlagt monterades det 13 expander i borrhålet, se Tabell 5-3. Expandern som monterades ovanpå betongen vid 127,28 m delade på sig, och den undre koppen blev kvar i borrhålet. Därför monterades ytterligare en expander ovanpå denna, vilket medför att det är 20 cm koppar mellan 127,28–127,08 m som fungerar avskiljare mellan betongen och sanden.



Figur 5-7. Kopparexpandern ansluts till monteringsröret med en 8 mm brytpinne, också den av koppar.

Tabell 5-3. Placeringen av de 13 kopparexpanderna i KFR02

Nr	Material	Från (m)	Till (m)	Längd (m)
1	Cu	140,39	140,27	0,12
2	Cu	137,02	136,90	0,12
3	Cu	130,38	130,26	0,12
4*	Cu (1½)	127,28	127,08	0,2
5	Cu	80,01	79,89	0,12
6	Cu	76,4	76,28	0,12
7	Cu	69,75	69,63	0,12
8	Cu	66,04	65,92	0,12
9	Cu	25,21	25,09	0,12
10	Cu	21,52	21,4	0,12
11	Cu	14,89	14,77	0,12
12	Cu	11,03	10,91	0,12
13	Cu	2,44	2,32	0,12

*Kopparexpandern delade sig och den undre delen (8 cm) blev kvar och därför installerades ytterligare expander ovanpå den undre delen, vilket medför att den totala längden på koppar i den sektionen blir 20 cm.

5.5 Slutresultat

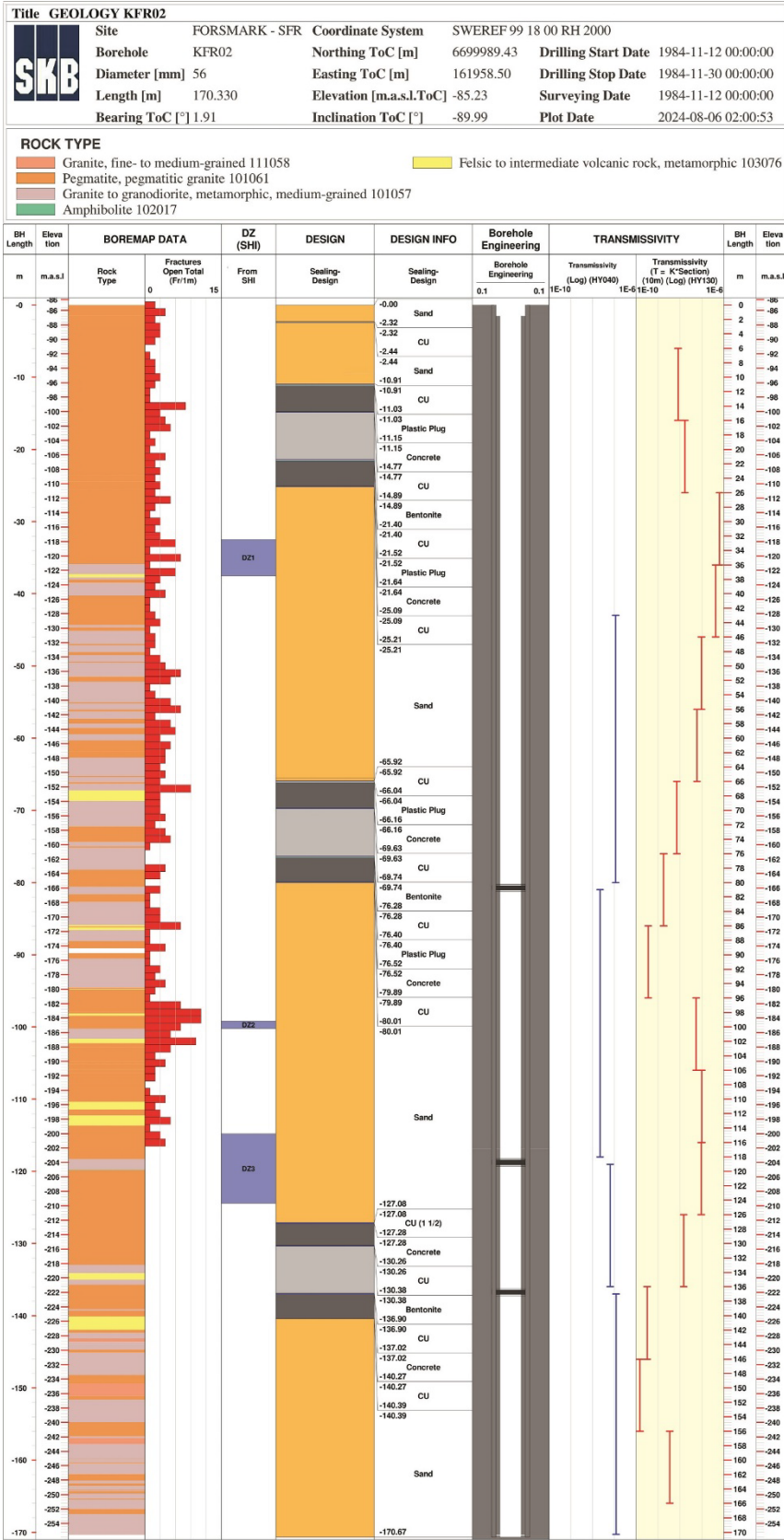
Det slutliga resultatet av installationen av de olika förslutningsmaterialen i KFR02 redovisas i Tabell 5-4 och Figur 5-8. I diskussionerna innan installationsarbetena gällande långsiktig säkerhet framkom att materialen i tätningspluggen med standardcement och bentonit inte är optimala ur degenereringssynpunkt. Tidigare tester med att använda låg-pH betong visade dock att materialen separerade under transporten i borrhölen och tappade därmed sin förmåga att innesluta och skydda bentonittätningen. Ett sätt att hantera detta blev att öka antalet bentonitkolonner och krympa något på längderna av betong, vilket medför att i en tätningsplugg är längden av bentonit och betong ungefär lika.

I de tre tätningspluggarna i KFR02 är bentonitlängden mellan 6,51–6,53 m då de trycks ihop något (från 6,64 m) vid belastningen av kopparexpandern. Totala längden på betongsektionerna som omger bentoniten var mellan 6,23–7,07 m, se även Tabell 5-2.

Eftersom kvalificeringen av förslutningsprocessen inte blir klar förrän under våren 2025 benämns utförandet i insatsen i KFR02 som temporär förslutning. Med detta avses att om förslutningen visar sig ej överensstämma med kraven i kvalificeringen måste KFR02 kunna borraras upp igen.

5.6 Återtag av förslutning

De översta 2,32 m i borrhålet har fyllts med sand, och om hålet ska borraras upp är det viktigt att kunna rikta upp bormaskinen innan uppborrningen påbörjas. Sanden kan därvid enkelt blåsas bort med en luftkompressor, varefter bormaskinen kan riktas in med hjälp av borrhöret i den övre delen av hålet. Bortborrning av koppar är inte svårare än att borra i berg. Om expandern roterar med så fastnar den mjuka metallen i borkronan och följer men när rören lyfts upp. Även bentoniten med koppardetaljerna går bra att borra bort, och bentoniten kan troligen även spolas bort med vatten. Den använda betongen är en ballastbetong med hög hållfasthet, men längden på betongsektionerna är inte mer än 3–3,6 m. Betongen måste borraras bort med försiktig matning för att inte riskera urborrning ur borrhålet. De långa sandsektionerna går inte att borra bort utan måste blåsas upp ur hålet med en luftkompressor. För att lyckas med det i ett 170 m långt borrhål krävs en stor kompressor.



Figur 5-8. Design av installationerna i KFR02.

Tabell 5-4. Material och nivåer för installationen i KFR02

Material	Från	Till	Längd		Material	Från	Till	Längd
Sand	170,67	140,39	30,28		Tättningsventil	66,16	66,04	0,12
Cu	140,39	140,27	0,12		Cu	66,04	65,92	0,12
Betong	140,27	137,02	3,25		Sand	65,92	25,21	40,71
Cu	137,02	136,90	0,12		Cu	25,21	25,09	0,12
Bentonit	136,9	130,38	6,52		Betong	25,09	21,64	3,45
Cu	130,38	130,26	0,12		Tättningsventil	21,64	21,52	0,12
Betong	130,26	127,28	2,98		Cu	21,52	21,4	0,12
Cu (1½)	127,28	127,08	0,2		Bentonit	21,4	14,89	6,51
Sand	127,08	80,01	47,07		Cu	14,89	14,77	0,12
Cu	80,01	79,89	0,12		Betong	14,77	11,15	3,62
Betong	79,89	76,52	3,37		Tättningsventil	11,15	11,03	0,12
Tättningsventil	76,52	76,4	0,12		Cu	11,03	10,91	0,12
Cu	76,4	76,28	0,12		Sand	10,91	2,44	8,47
Bentonit	76,28	69,75	6,53		Cu	2,44	2,32	0,12
Cu	69,75	69,63	0,12		Sand	2,32	0	2,32
Betong	69,63	66,16	3,37					

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

Sandén T, Nilsson U, Johannesson, L-E, Hagman P, Nilsson G, 2018. Sealing of investigation boreholes. Full scale field test and large-scale laboratory test. SKB TR-18-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.