

SKB P-24-11

ISSN 1651-4416 ID 2055415 Oktober 2024

Geofysisk borrhålsloggning i KFR90 och KFR91

Resultat från borrhålsloggning i KFR90 och KFR91 i SFR, Forsmark

Andrée Kindlund GeoVista AB

Nyckelord: P-rapport, Geofysik, Borrhålsloggning, SFR, Forsmark, Gamma-gamma-densitetsloggning, Fullvågs-sonic, Resistivitet, Magnetisk susceptibilit

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas 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

© 2024 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

Geofysiska borrhålsmätningar har utförts i borrhålen KFR90 och KFR91 inne i drifttunneln på SFR, Forsmark. Mätning av naturliga gammastrålning, magnetisk susceptibilitet, fokuserad resistivitet, fullvågs-sonic, akustisk televiewer och gamma-gamma-densitet utfördes i fem omgångar i varje borrhål. På grund av ett oväntat stopp i borrhål KFR90 kunde sonden för fokuserad resistivitet inte föras ned till det maximala borrhålsdjupet. Inskjutningen avbröts och mätning påbörjades från ca 415 meter i stället för 450 meter.

Fem sektioner har valts ut i varje borrhål för en närmare diskussion. Sektionerna påvisar i regel avvikande berghastigheter och sänkt resistivitet som korrelerar med ökad sprickighet eller större öppna sprickor. Magnetisk susceptibilitet är mycket låg i båda borrhålen men inslag av förhöjd suscpetibilitet förekommer. Uppmätt naturlig gammastrålning är på en förhållandevis jämn nivå bortsett från enskilda större spikar. I allmänhet bedöms sprickigheten vara låg i båda borrhålen. Förekommande låghastighetszoner är begränsade i antal och utsträckning.

Summary

A geophysical borehole survey has been carried out in two boreholes located in the tunnel of SFR, Forsmark. Five runs were conducted in each borehole, utilising 6 different survey sondes, including natural gamma radiation, magnetic susceptibility, focused resistivity, full waveform sonic and gamma-gamma density. The descent of the focused resistivity sonde in KFR90 was terminated at 415 meter instead of the targeted 450 meter because of an unexpected obstruction in the borehole.

A total of five sections were selected for further discussion. The sections typically displayed deviations in estimated rock velocities and decreased resistivity, that correlated to increased fracturing of the rock. Magnetic susceptibility is very low in both boreholes except for few sections with elevated values. The fracturing of the rock is in general, interpreted as low in both boreholes. Isolated low-velocity zones exist but they are limited in both numbers and extent.

Innehåll

| 1 | Introduktion |
|-------|---|
| 2 | Metod och utförande |
| 2.1 | Naturlig gammastrålning QL40-GRA |
| 2.2 | Magnetisk susceptibilitet QL40-MAGSUS |
| 2.3 | Fokuserad resistivitet DLL3 |
| 2.4 | Fullvågs-sonic QL40-FWS-S |
| 2.5 | Densitet (gamma-gamma) QL40-DEN |
| 2.6 | Akustisk televiewer QL40-ABI-2G |
| 2.7 | Avvikelser |
| _ | |
| 3 | Databearbetning |
| 3.1 | Korrigering av magnetisk susceptibilitet |
| 3.2 | Uppskattning av borrhålets diameter från akustiska data |
| 3.3 | Bearbetning av data från fullvågs-sonic |
| 3.4 | Kalibrering av naturlig gammastrålning |
| 3.5 | Fokuserad resistivitet |
| 3.6 | Djupkorrigering |
| 4 | Resultat |
| 41 | KFR90 11 |
| 4.2 | KFR91 |
| | |
| 5 | Diskussion och slutsatser14 |
| 5.1 | KFR9014 |
| 5.2 | KFR9114 |
| 5.3 | Slutsatser |
| Refe | renser15 |
| Bilag | ga A16 |
| Bilag | ga B17 |

1 Introduktion

GeoVista AB har på uppdrag av SKB utfört geofysisk borrhålsloggning i två borrhål placerade i drifttunneln i SFR, Forsmark (Tabell 1-1 och figur 1-1). Mätningarna genomfördes i två omgångar under 2023 mellan den 7–16 november och mellan den 27 november–4 december.

Tabell 1-1. Lista över undersökta borrhål. Koordinater i SWEREF99 18 00 och höjd i RH2000.

| Borrhålsp | lorrhålsparametrar | | | | | | | | | |
|-----------|--------------------|-----------|----------|-----------|------------|---------|---------------------|--|--|--|
| ID | East (m) | North (m) | Höjd (m) | Längd (m) | Azimut (°) | Dip (°) | Håldiameter (mm) | | | |
| KFR90 | 161982,6 | 6700011,5 | -86,8 | 450 | 114,00 | 4,00 | 75,8 | | | |
| KFR91 | 161891,9 | 6699939,9 | -79,9 | 340 | 133,83 | 5,09 | 75,8 | | | |

Syftet med undersökningarna är att samla in geofysisk information för att bland annat användas som underlag i en *single hole intrepretation* (SHI) för en utvärdering av bergets mekaniska och geologiska egenskaper inför en utökning av det befintliga tunnelsystemet (Tabell 1-2).



Figur 1-1. Översiktsbild som visar borrhålen läge och riktning i drifttunneln i SFR. Streckskuggat område visar existerande tunnelsystem tillsammans med det planerade tunnelsystemet som ska konstrueras. Bild hämtad från arbetets aktivitetsplan AP SFK-23-008 (SKBdoc 2001413 ver. 1.0, internt dokument).

| Tabell 1-2. St | yrande interna | dokument för | aktivitetsutförande |
|----------------|----------------|--------------|---------------------|
|----------------|----------------|--------------|---------------------|

| Dokument | | |
|---|----------------|---------|
| Benämning | Nummer | Version |
| Geophysical logging in boreholes KFR90 and KFR91 | AP SFK-23-008 | 1.0 |
| Benämning | Nummer | Version |
| Metodbeskrivning för geofysisk borrhålsloggning – mätning, bearbetning och tolkning | SKB MD 221.002 | 5.0 |

2 Metod och utförande

Geofysisk borrhålsloggning har utförts med sonder från ALT/Mount Sopris samt GeoVista UK Ltd. Sonderna kopplades till en Mount Sopris-vinsch via en ScoutPro (ALT) datainsamlingsenhet och till en dator som är inställd att samla in mätpunkter medan vinschens vajer matas in. Samtliga borrhål var vattenfyllda och stängda med ett avtagbart tätningslock. För varje nedvinschning monterades tätningslocket av och sonden fördes till botten av borrhålet med hjälp av stålstänger som matades in av en inskjutningsrigg tillhandahållen av SKB. Stängerna matades sedan ut så att borrhålet återigen kunde stängas och tätas. När stängerna tagits ut och borrhålet var tätat påbörjades mätningen medan sonden vinschades upp i borrhålet. Tidpunkt för öppning och stängning av tätningslock noterades.

Naturlig gammastrålning mättes tillsammans med samtliga sonder för att korrigera för djupvariationer, förutom för fokuserad resistivitet, då denna sond var producerad av en annan tillverkare och de två sonderna är inte kompatibla med varandra.

Alla sonder har kalibrerats efter tillverkarens instruktion några dagar innan mätningarna utfördes.

2.1 Naturlig gammastrålning QL40-GRA

Sonden är utrustad med en NaI(TI)-detektor. När detektorn träffas av gammastrålar avger den pulser av ljus. Ljuspulserna omvandlas till elektriska pulser via en fotomultiplikator. Antalet pulser räknas och skickas upp till datainsamlingsenheten.

2.2 Magnetisk susceptibilitet QL40-MAGSUS

Sonden är utrustad med en Bartington-sensor beståendes av en oscillator med en AC-induktionsspole. När spolen placeras nära en bergart kommer bergets magnetiska egenskaper att påverka frekvensen på signalen i spolen, som då kan räknas om till magnetisk susceptibilitet.

2.3 Fokuserad resistivitet DLL3

DLL3-sonden mäter resistiviteten med olika genomträngningsdjup genom ett par elektroder placerade på olika avstånd från injektionselektroden. Strömmen väljer att färdas den enklaste vägen vilket kan resultera i att den injekterade strömmen undviker områden med högre resistivitet och i stället färdas genom ett område med lägre resistivitet bortom den aktuella mätpunkten. Genom att omge injektionselektroden med två skyddselektroder fokuseras strömmen vinkelrätt från injektionselektroden vilket minimerar effekten av att strömmen undviker högresistiva områden.

2.4 Fullvågs-sonic QL40-FWS-S

Fullvågs-sonic (FWS) används för att uppskatta porositet, permeabilitet och bergmekaniska egenskaper i berget. Sonden skickar ut en piezoelektrisk puls som sedan mäts upp vid tre olika mottagare med olika avstånd från pulskällan. Den akustiska vågen ankommer till de olika mottagarna vid olika ankomsttider och utsätts för dispersion (spridning) och dämpning efter att ha färdats genom vätskan och borrhålsväggen. Sonden förseddes med mässingfjädrar med en teflonbeläggning för att säkerställa en korrekt centrering i borrhålet och minimera brus som uppstår från friktion mellan fjädrar och bergvägg.

2.5 Densitet (gamma-gamma) QL40-DEN

Sonden för mätning av gamma-gamma-densitet använder en radioaktiv källa (Co-60) och två strålningsdetektorer som reagerar på gammapartiklar med en energi över 200 keV. Detektorerna består av två scintillationskristaller och två fotomultiplikatorrör med olika längd och avstånd från strålningskällan. Detektorerna är avskärmade på så vis att de endast reagerar på gammastrålning som kommer från samma sida som den radioaktiva källan utstrålar från. Radioaktiv strålning penetrerar bergväggen och når sedan detektorerna via Comptonspridning. Sonden mäter också borrhålets diameter med en (enarmad) mekanisk arm.

2.6 Akustisk televiewer QL40-ABI-2G

Den akustiska sonden skickar ut en ultraljudspuls och registrerar restiden efter att pulsen reflekterats från borrhålsväggens yta till en mottagare. Sonden är utrustad med en triaxiell accelerometer och triaxiell magnetometer vilket gör det möjligt att mäta sondens orientering i borrhålet (lutning, magnetisk azimut och roll). Sonden förseddes med mässingsfjädrar för att säkerställa en korrekt centrering i borrhålet.

2.7 Avvikelser

I båda borrhålen inträffade det att sonden för mätning av fokuserad resistivitet stannade innan den nått botten. I båda fallen var stoppet så pass plötsligt och oväntat att stången hoppade ur låsningsmekanismen vilket resulterade i att stången böjdes kraftigt. Inskjutningsriggens och vinschens djupräkneverk fortsatte att räkna medan sonden stod still. Problemet upptäcktes då lösa varv bildades på vinschens hjul varpå vinschen och inskjutningsriggen stängdes av omedelbart. Överflödig vajer spolades in och djupmått före och efter uppvinschning noterades. Inskjutningen avbröts och mätning påbörjades från djupet där sonden stannade. Problemet tros ha orsakats av att den 7 meter långa kabeln som håller referenselektroden till sonden kilat fast stången i hålet. Efter denna händelse lyftes ett förslag att utnyttja inskjutningsriggens lastgivare till att slå ifrån vid onormalt höga laster.

Vid uppvinschning av främst de tyngre sonderna och de försedda med centreringsfjädrar har det inträffat att vinschen gjort små förflyttningar på ca 1–3 cm direkt när uppvinschning påbörjats. Detta eftersom motståndet blir högre än vinschens egenvikt. Tätningslocket bidrar också till ett ökat motstånd. Detta inträffade främst i det djupare borrhålet KFR90 vilket sedan motverkades genom att spänna fast vinschen med ett spännband i dragkroken på en bil. Då den initiala djupreferensen är upprättad utifrån vinschens placering till bergväggen kan senare förflyttningar av vinschen påverka djupmåttet.

3 Databearbetning

Bearbetning av loggningsdata har i huvudsak utförts i programvarorna WellCAD (ALT) och Grapher (Golden Software).

3.1 Korrigering av magnetisk susceptibilitet

För att korrigera för kapacitivitetseffekten och tryckökning som uppstår då sonden kommer i kontakt med vatten kan nollnivån behöva justeras. Nollnivån bestämdes kvalitativt genom att välja ut 4–5 punkter längs respektive borrhål som linjäranpassades och adderades på uppmätta värden. För att få en noggrann kontroll på susceptibilitetsdata krävs kalibrering mot labprover från borrkärna från borrhålet. En konvertering från uppmätt magnetisk susceptibilitet i 10-5 CGS till 10-5 SI gjordes enligt (Dentith & Mudge, 2014):

$$\chi = \chi_{rådata} \times 4\pi$$

 $[10^{-5} \times SI]$ (3-1)



Figur 3-1. Kalibreringsdiagram för KFR90. Röda symboler visar rådata för uppmätt magnetisk susceptibilitet, svarta punkter med heldragen linje visar linjäranpassad nollnivå för rådata och blåa punkter visar kalibrerade data. Diagrammet visar kalibrerade data i enheten CGS men i resultatet presenteras magnetisk susceptibilitet i SI-enheter.



Figur 3-2. Kalibreringsdiagram för KFR91. Röda symboler visar rådata för uppmätt magnetisk susceptibilitet, svarta punkter med heldragen linje visar linjäranpassad nollnivå för rådata och blåa punkter visar kalibrerade data. Diagrammet visar kalibrerade data i enheten CGS men i resultatet presenteras magnetisk susceptibilitet i SI-enheter.

3.2 Uppskattning av borrhålets diameter från akustiska data

För att beräkna borrhålsdiametern från akustiska data behöver våghastigheten i borrhålsvätskan vara känd. Genom att jämföra en känd punkt för borrhålets diameter med gångtiden som det tar för den akustiska pulsen att studsa från bergväggen tillbaka till mottagaren går det att bestämma utbredningshastigheten i borrhålsvätskan längs borrhålet. När borrhålsvätskans hastighet är bestämd går det därefter att beräkna borrhålets diameter. För beräkningen av borrhålsvätskans hastighet användes utvalda punkter med ca 10 meter provtagningsfrekvens från en enarmad kaliper som mättes med densitetssonden. Ett minimum, maximum och genomsnitt för borrhålsdiametern räknades ut med verktyg i WellCAD.

3.3 Bearbetning av data från fullvågs-sonic

För att uppskatta P- och S-vågshastigheter samt hastighet för "tubewave" användes semblance-analys i programvaran WellCAD. Ankomsttiden t för P-, S- och "tubewave" beräknades enligt följande:

$$t = \sigma \times \mathbf{x} \qquad [\mu s] \qquad (3-2)$$

där σ är inversen av berghastigheten i µs/m ("slowness") och x är avståndet mellan mottagare och sändare i m. Amplituden A för de olika vågorna σp , σs och $\sigma tubewave$ extraherades sedan vid olika ankomsttiderna för mottagare 1 (x1=0.6 m) och mottagare 3 (x3=1.2 m). Dämpningen för de olika vågamplituderna mellan första och sista mottagaren beräknades sedan enligt (SEG, 2021):

$$\alpha = \ln\left(\frac{A_1}{A_3} \times \frac{x_1}{x_3} \times \frac{1}{0.6}\right) \tag{3-3}$$

3.4 Kalibrering av naturlig gammastrålning

Uppmätt naturlig gammastrålning i API konverterades till μ R/h genom samband enligt (Bradel 1985, Schön 1996):

$$\gamma = \gamma_{radata} \times 7,2 \qquad \qquad [\mu R/h] \qquad (3-4)$$

3.5 Fokuserad resistivitet

Ett viktat medelvärdesfilter med 100 punkter applicerades på uppmätta resistiviteter. Uppmätt resistivitet presenteras tillsammans med en färgrepresentation för genomsnittlig resistivitet.

3.6 Djupkorrigering

För de metoder där naturlig gammastrålning mättes samtidigt korrelerades uppmätt naturlig gammastrålning mot en referenslogg tillhandahållen av SKB AB. För fokuserad resistivitet korrelerades i stället spikar med låg resistivitet mot fullvågs-sonic-data, akustisk amplitud och beräknad borrhålsdiameter då större vattenförande sprickor ofta associeras med sänkt resistivitet.

4 Resultat

På följande sidor presenteras resultat för mätningarna i form av diagram och bilder. Se kapitel 5 för kommentarer och diskussion. De fullständiga bilderna från de akustiska mätningarna presenteras inte i denna rapport. En sektion från varje borrhål presenteras som bilagor (Bilaga A och Bilaga B). Referenser och hänvisningar i texten görs utifrån det levererade materialet till SKB.

Båda borrhålen uppvisar områden med kraftigt ökad naturlig gammastrålning. Magnetisk susceptibilitet är i allmänhet mycket låg men kortare sektioner med förhöjd susceptibilitet förekommer. Uppmätt densitet för KFR90 är i genomsnitt 2677 kg/m3 (short-spaced) och 2602 kg/m3 (long-spaced). Naturlig gammastrålning uppgår i genomsnitt till 96,81 μR/h. Genomsnittlig hastighet för kompression-, skjuv- och tubvågor uppgår till Vp=5440,5 m/s, Vs=3250,4 m/s och Vrtw=1982,1 m/s (Tabell 4-1).

| Geofysiska pa | rametrar | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|---|---|---|-------------|-------------|---------------------------|
| | Naturlig gammastrålning (µR/h) | Magnetisk susceptibilitet (10 ⁻⁵ SI) | Densitet, short- spaced (kg/m ³) | Densitet, long spaced (kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | V _{rtw} (m/s) |
| Medel | 96,81 | 0,000866 | 2677,11 | 2601,74 | 5440,49 | 3250,41 | 1982,10 |
| Median | 92,53 | 0,000091 | 2668,28 | 2594,31 | 5473,17 | 3271,43 | 1994,22 |
| Min | 51,38 | 0,000000 | 2369,80 | 2398,41 | 3982,61 | 2538,46 | 1615,93 |
| Max | 281,19 | 0,037815 | 3279,04 | 2962,20 | 5984,85 | 3690,79 | 2169,81 |

Tabell 4-1. Geofysiska parametrar för KFR90. Tabellen visar värden längs hela borrhålet.

Motsvarande parametrar för KFR91 visar en genomsnittlig densitet 2632 kg/m3 (short-spaced) och 2590 kg/m3 (long-spaced), en genomsnittlig naturlig gammastrålning på 66,4 µR/h samt berghastigheterna Vp=5424,0 m/s, Vs=3168,2 m/s och Vrtw=1993,1 m/s (Tabell 4-2).

| Geofysiska p | parametrar | | | | | | |
|--------------|--------------------------------------|---|---|---|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | Naturlig gammastrålning (μR/h) | Magnetisk susceptibilitet (10 ⁻⁵ SI) | Densitet, short- spaced (kg/m ³) | Densitet, long spaced (kg/m ³) | V _p (m/s) | V _s (m/s) | V _{rtw} (m/s) |
| Medel | 64,40 | 0,000894 | 2632,82 | 2590,10 | 5423,96 | 3168,23 | 1993,14 |
| Median | 57,85 | 0,000083 | 2623,67 | 2582,16 | 5442,57 | 3198,94 | 2000,00 |
| Min | 23,46 | 0,000000 | 1591,50 | 2265,02 | 3987,62 | 2351,82 | 1585,98 |
| Max | 285,67 | 0,038102 | 3109,08 | 3002,43 | 5922,79 | 3502,17 | 2192,98 |

Tabell 4-2. Geofysiska parametrar för KFR91. Tabellen visar värden längs hela borrhålet.

4.1 KFR90

| | | | | | | | | | Hole | id: KFR9 | 0 |
|---------------------------|------------------------|------------|---|--|---|----------------|--|-----------------|--|----------------|------------|
| Depth 1.2000 | | Nat. gamma | Mag. Sus. | Density | F | ull Wave | form Soni | ic | Focused I | Resistivity | Caliper |
| | J | 0 uR/1 300 | 0 6-5 51 0.04 | Long-Spaced | Velocities | Rock I | Mechanical Pr | operties | Short | Deep | Mechanical |
| | | | | Short-Spaced | V_p | Bulk Mod. | Shear Mod. | Bulk Comp. | Resistivity | Resistivity | Acoustic |
| | | | | 2200 kg/m3 3200 | 1000 m/s 7000 | 20 GPa 70 | 10 GPa 40 | 0.01 1/GPa 0.07 | 20 Ohm.m 20000 | 20 Ohm.m 20000 | 65 mm 90 |
| | | | | | s | Poisson R. | Young's Mod. | | Weighted Avg | Weighted Avg |] |
| | | | | | 1000 m/s 7000 V rtw | 0 0.5 | 30 GPa 90 | | 20 Ohm.m 20000 | 20 Ohm.m 20000 | |
| | | | | | | | | | | | |
| | _ | 2 | - | 2 | 133 | ~ | > | \$ | | | |
| | 18.64 | Ę | £ | * | <u>بالج الج ا</u> | <u>_</u> | | £ | Ē | Ē | |
| | S1 32.54 | Ę | • | | 333 | <u>-</u> | 3 | - | 4 | 4 | |
| | | ~ | • | - 5 | | | - | F | | 글 | |
| ◀ 50 ▶ | | - F | | 1 and a second s | | - - | Z | ş | 1 | 2 | |
| | | 3 | | <u>\$</u> | | 2 | | \$ | - A | - A | |
| | - | - <u>{</u> | | 5 | } | | - > | \$ | | Ţ | |
| | | F | | 3 | | 5 | Ž | Z | 1 | 1 | |
| ◀ 100 ► | | - E | | <u>{</u> | $\{\{\}\}$ | 3 | $\boldsymbol{\langle}$ | ł | 5 | 5 | |
| | - | E. | | 1 | 13 S | 5 | 5 | Ę | 3 | 3 | |
| | | -{ | | - | | 3 | ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | Ę | | | - I |
| | | E | - | 3 | 11 5 | | - É | ž | The second secon | 3 | |
| ▲ 150 ▶ | 160 14 | | 1 | | रेई ई | | Ę | 2 | र्दे | 3 | |
| | S2 170.09 | | 5 | - X | { 🗧 🗧 | | ×. | 7 | - Z | - | |
| | | <u> </u> | | 2 | }} | 4 | ž | <u>z</u> | | Š | |
| | | | | 1 i | | | | - | | | |
| < 200 ► | | ł | | 3 | | 3 | 5 | ۲ ۲ | | | |
| | 216.64 | Ę | | 1 A | | | <u>}</u> | ÷. | ž | ž | |
| | 230.54 | | 3 | 5 | | <u> </u> | - ` ` ` | <u> </u> | 7 | 1 | E |
| | | 5 | | 8 | | - - | - Š | ş | 3 | | |
| 4 250 ▶ | • | 7 | | | | 1 | Z | 1 | 1 | <u> </u> | |
| | | 3 | | - <mark>Č</mark> | 12 2 | 4 | Ž | 2 | 1 | | |
| | | <u>k</u> | 4 | ž | 13 | 1 | - Ż | ž | 3 | 彦 | |
| | | -E | | . | 1 3 5 | Z | | - | ال م ا | Ę | |
| ∢ 300 ⊧ | 312.00 | 2 | ÷ | 1 | | | | 5 | | | |
| | S12.09 S4 318.94 | Ę | <u></u> | - | \$ \$ | 2 | Ś | 3 | - Š | Ś | |
| | 0.04 | <u>ج</u> | 4 | - BE | , { | - | E Contraction of the second se | ≩ | - | - | |
| | - | <u> </u> | | Ę | <u>`{</u> | 2 | Ţ | 3 | × | E S | |
| ∢ 350 ▶ | • | t | F | <u> </u> | 1 5 5 | | | Ł | 5 | 5 | |
| | | - F | - | 4 | | 3 | 5 | Ę | Ĩ, | - Mark | |
| | - | 1 | | 1 | | 1 | 2 | Ę. | 4 | | |
| | 302.44 | 5 | | 2 | { } { | < | ž | 3 | - 2 | - A | |
| 4 00 ► | 355.14 | | | 2 | £ 1 | ~ | E | \$ | 1 | 1 | |
| | 65 | 1 | le la | 5 | 1 | | | 5 | | | |
| | 50 | | 2 | 5 | | | 3 | | | | |
| | 450.45 | -{ | E. | ¥ | | | \$ | | | | |
| 4 450 ▶ | 450.19 | 1 | <u></u> | | 2 | | | | | | |

Figur 4-1. Borrhålsdiagram för KFR90. Diagrammet visar från vänster naturlig gammastrålning, magnetisk susceptibilitet, densitet uppmätt med två olika avstånd (short-spaced och long-spaced) mellan strålkälla och mottagare, överlappande hastigheter där V_p är kompressionshastigheten, V_s skjuvhastigheten och V_r tw är reflekterade tubvågor, bergmekaniska egenskaper, resistivitet och borrhålsdiameter där den mekaniska diametern har uppmätts med densitetssondens kaliperarm och den akustiska diametern som beräknats utifrån akustisk reflektion.



Figur 4-2. Borrhålsdiagram för KFR90 mellan 365.0–450.2 m. Diagrammet visar P, S och tubvågsamplituder vid den första och sista mottagaren samt dämpningen i dB/m i amplitud mellan mottagarna. Längst till höger syns semblanceanalysen med överlappande berghastigheter uttryckt i tröghet, µs/m.

4.2 KFR91

| | | | | | | | | Hole | eid: KFR9 |)1 |
|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|--|---------------|---------------|-----------------|---|----------------|--------------|
| Depth 1:2000 | Nat. gam | Mag. Sus. | Density | i | - ull Wave | eform Son | ic | Focused I | Resistivity | Caliper |
| 1.2000 | 0 uRm | 300 0 e-5 SI 0.04 | Long-Spaced | Velocities | Rock | Mechanical Pi | roperties | Short | Deep | Mechanical |
| | | | Short-Spaced | V_p | Bulk Mod. | Shear Mod. | Bulk Comp. | Weighted Avg | Weighted Avg | Acoustic |
| | | | 2200 kg/m3 3200 | 1000 m/s 7000 | 20 GPa 70 | 10 GPa 40 | 0.01 1/GPa 0.07 | 20 Ohm.m 20000 | 20 Ohm.m 20000 | 65 mm 9 |
| | | | | V_s | Poisson R. | Young's Mod. | | Resistivity | Resistivity | sus_export_e |
| | | | | 1000 m/s 7000 | 0 0.5 | 30 GPa 90 | | 20 Ohm.m 20000 | 20 Ohm.m 20000 | 0 e-5 SI 0.0 |
| | | | | V_rtw | | | | | | - |
| | | | | 1000 m/s 7000 | | | | | | |
| | F | • | | | _ | | | | | |
| | ≥ | . | 1 | | 1 | | 3 | 3 | | \$- }- |
| | 2 | | l l | | * | Ę | \$ · | 쿡 | 쿡 | |
| | 2 | | 5 | { }] | 1 | 5 | 1 | | Ę | |
| 50 - | (| 2 | 3 | 33 3 | 3 | 3 | F | | | 2 |
| 50 - | t | - | 5 | | * | 3 | 2 | 1 | 1 | |
| _ | E E | | 3 | | 3 | 2 | 1 | ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | 2 | |
| _ | 2 | - | 5 | | 2 | <u></u> | 5 | 1 | Ĵ | _ |
| _ | <u>ج</u> | | 1 | 11 2 | | | 5 | | Ŧ | |
| 100 | - E | | | 33 | <u> </u> | <u></u> | - E | | | |
| | 5 | | } | 13 3 | ÷. | 2 | <u>\$</u> | | -5 | |
| | ح | | 5 | | 5 | 5 | 3 | | | ĺ. |
| | C | r | 1 | | 3 | 7 | ŧ | 1 | Ĩ | 7- |
| 1 | 138.99 | | | 555 | 2 | 5 | 3 | 3 | 3 | |
| 150 1 | S1 | | 5 | 22 | 3 | | 3 | | 3 | |
| | ξ | | | | 3 | <u></u> | ٤ | 3 | 3 | 2 |
| _ 1 | 171 29 | | - | ्र् | Z | 5 | Ę | Ę | Ę | A |
| | S2 | | . 🌫 | <u>`</u> { | 3 | - 25 | ŧ | | Ę | |
| | 179.99 | | 1 | $\left \left\{ \right\} \right \left\{ \right\}$ | र | 5 | Ş | | ź | |
| 200 ► | <u></u> | | 4 | 13 5 | Ž | <u> </u> | 3 | | 3 | |
| 2 | 213.49 | - | - <u>}</u> | | Σ | 2 | 1 | 3 | ž | |
| 2 | S3 | - | | | | | 2 | -3- | -3 | |
| 2 | 229.49 | | 1 | 12 5 | | 5 | 2 | <u> </u> | <u> </u> | |
| 2 | 233.69 | | 3 | 13 3 | Z | 3 | 2 | ž | ž | |
| 250 N S | 243.19 | | <u>}</u> | 33 3 | Ŧ | 2 | | <u> </u> | Ę | |
| 2 | 247.69 | | | <u></u> | 1 | <u>5</u> | 3 | - I | Ę | |
| | <u> </u> | - | 1 🖇 👘 | j] 🕴 | Ź | | \$ | 3 | 3 | |
| | 3 | ► - | 1 | } { \$ | 5 | <u></u> | 7 | 2 | 2 | |
| | | | - E | ¦} § | ş | - 5 | Ę | 3 | 3 | |
| 300 ► | <u> </u> | - | <u> </u> | . { € | 3 | _ | ٤ | - Z | $-\frac{1}{2}$ | > |
| _ | 1 | | 1 \$ | 2 [\$ | 3 | - 7 | Ę | ÷ | | |
| _ | | | § | <u>, </u> | -2 | 2 | 5 | 3 | | |
| _ | <u> </u> | | 3 | ;} ┥ | - <u>E</u> - | 3 | <u>}</u> | -\$ | -\$ | |
| | ξ | | 1 💈 | j] { | | 4 | 3 | | - | |

Figur 4-3. Borrhålsdiagram för KFR91. Diagrammet visar från vänster naturlig gammastrålning, magnetisk susceptibilitet, densitet uppmätt med två olika avstånd mellan strålkälla och mottagare, överlappande hastigheter där V_p är kompressionshastigheten, V_S skjuvhastigheten och V_rtw är reflekterade tubvågor, bergmekaniska egenskaper, resistivitet och borrhålsdiameter där den mekaniska diametern har uppmätts med densitetssondens kaliperarm och den akustiska diametern som beräknats utifrån akustisk reflektion.

5 Diskussion och slutsatser

5.1 KFR90

Sektion S1 och S2 karaktäriseras av sänkt resistivitet och berghastighet (f). Enskilda större öppna sprickor sammanfaller med kraftigt sänkt resistivitet och ökad borrhålsdiameter. I allmänhet syns en ökad sprickighet i området utifrån den akustiska bilden vilket korrelerar väl med stora förändringar i bergmekaniska egenskaper. Naturlig gammastrålning är tillfälligt lägre i S1 än omgivande delar av borrhålet vilket indikerar en övergång till en annan bergart. Däremot är förändringen i naturlig gammastrålning inte lika tydlig i S2.

I sektion S3 syns tydliga spår efter borrningen i den akustiska bilden och vilket förklarar avvikelsen i borrhålsdiameter i detta område. S4 urskiljer sig från övriga sektioner där förändringar i bergmekaniska egenskaper beror på mineralogiska förändringar och högre grad magnetiska mineral. Högre grad av magnetiska mineral associeras med ökad densitet, sannolikt kopplade till basiska gångar.

I sektion S5 är signalen för fullvågs-sonic mycket svag vilket begränsar möjligheten att uppskatta berghastigheter. Amplituden för S-hastigheten minskar avsevärt mot slutet av sektionen (Figur 4-2). Utifrån den akustiska bilden bedöms sprickigheten inte vara förhöjd vilket inte förklarar den svaga signalen för fullvågs-sonic. Inte heller syns det tydliga avvikelser i borrhålsdiameter bortsett från enstaka mindre spikar men däremot ökar magnetisk susceptibilitet. Flera sektioner med hög densitet framträder också mot slutet av borrhålet. Dämpningen av signalen för fullvågs-sonic kan dock orsakas av kraftiga flöden av vatten från sprickor i borrhålet eller av ökad inblandning av borrslam i borrhålsvätskan.

5.2 KFR91

I sektion S1 (Figur 4-3) karaktäriseras av ökad magnetisk susceptibilitet och sänkta berghastigheter, resistiviteter och naturlig gammastrålning vilket indikerar en distinkt bergart med högre inblandning av magnetiska mineral och ökad sprickighet. Liknande trend syns i S2 dock utan märkbart ökad sprickighet i den akustiska bilden. I S3 syns stora avvikelser i både akustisk och mekaniskt uppmätt borrhålsdiameter. Förändringarna i resistivitet och bergmekaniska egenskaper är marginella men däremot visar den akustiska bilden en distinkt öppen spricka. Sektion S4 påvisar liknande karaktär som S1 med ökad sprickighet, sänkt berghastighet och resistivitet. Däremot är magnetisk susceptibilitet minimal i S4 jämfört med S1.

Sektion S5 visar likartat mönster i borrhålsdiameter som sektion S3 i borrhål KFR90 vilket ytterligare indikerar att avvikelsen i borrhålsdiameter är orsakad av borrningen.

5.3 Slutsatser

Sektioner med kraftigt sänkt resistivitet, borrhålsdiameter och bergmekaniska egenskaper har valts ut för borrhålen KFR90 och KFR91. Ökad sprickighet eller större öppna sprickor är den främsta anledningen till förändringarna men i enstaka fall beror förändringarna till stor del på mineralogiska förändringar i berget. Sektionernas längd varierar mellan 10–15 meter vilket kan betraktas korta sträckor i sammanhanget. Hastigheten för kompressions- och skjuvvågor håller förhållandevis jämna nivåer längs borrhålen bortsett från begränsade lokala avvikelser. Naturlig gammastrålning är i genomsnitt hög i båda borrhålen där KFR90 har en exceptionellt höga värden på 96,8 μ R/h i genomsnitt. I KFR91 är den genomsnittlig nivån lägre, 66,4 μ R/h.

Referenser

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

Bradel E, 1985. Bohrlochgeophysik. In Bender, F. (Ed.). Angewandte Geowissenschaften, Vol. II, Ferd. Enke Verlag, Stuttgart.

Dentith M, Mudge S T, 2014. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. New York: Cambridge University Press.

SEG, 2021. The Society of Exploration Geophysics. [Online] Available at: <u>https://wiki.seg.org/wiki/Attenuation</u> [Använd Januari 2024].

Schön J. 1996. Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. Volume 18. Handbook of geophysical exploration: Seismic Exploration. (Eds. Helbig, K and Treitel, S.). Pergamon.

Bilaga A

Akustisk bild för KFR90

Bilden är uppvikt med borrhålets undersida i mitten (*High-Side*) och visar sektionen mellan 26.5 - 33.0 meter.



Bilaga B

Akustisk bild för KFR91

Bilden är uppvikt med borrhålets undersida i mitten (*High-Side*) och visar sektionen mellan 229.0 - 234.0 meter.

