



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·



Rapport nr.: 2018.019	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen
Tittel: Måling av radioaktivitet ved Kvernsundtunnelen til i Bjarkøya i Troms.		
Forfatter: J. S. Rønning, A. Bjørlykke, H. Elvebakk, K. K. Herfindal & R. J. Watson	Oppdragsgiver: Vegdirektoratet / NGU	
Fylke: Troms	Kommune: Bjarkøya	
Kartblad (M=1:250.000) Narvik	Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1332 IV Harstad	
Forekomstens navn og koordinater: Bjarkøya 33 V 562750 - 7653200	Sidetail: 58 Kartbilag:	Pris: Kr 150,-
Feltarbeid utført: 19.10.2016	Rapportdato: 28.08.2017	Prosjektnr.: 329500
		Ansvarlig: <i>Marco Brønner</i>
<p>Sammendrag: Tunneldrift i bergarter med forhøyet innhold av de naturlige radioaktive elementene U, Th og K kan utgjøre et miljøproblem på flere måter. Det kan utsette tunnelarbeiderne for uheldige strålingsdoser, uheldige konsentrasjoner av radon og støv som setter seg på lungevev. I tillegg kan tunnelmassen etter forurensingsloven være deponeringspliktig. Utbygger plikter å holde den radioaktive eksponeringen så lav som mulig.</p> <p>Ved logging av borehull ved tunnelprosjektet på Bjarkøya (Kvernsundtunnelen) ble det stedvis påvist sterkt forhøyet total gammastråling. Oppfølgende undersøkelser med gamma-spektrometer viste at denne strålingen i hovedsak var forårsaket av uran, og at maksimal U-konsentrasjon var på i underkant av 1000 ppm. Modellering av anomaliformen fra loggingen av borehullene viste at sonen med den høyeste U-konsentrasjonen kunne være ca. 50 cm mektig. Berggrunnen på Bjarkøya består hovedsakelig av en tektonisert granittisk gneis men også noe amfibolitt.</p> <p>For å kunne avklare den geologiske historien og hvor uranet kom fra, utførte NGU en kort kjerneboring (13 m med kjerner) der en fra før visste det var radioaktivt materiale overflatenært. Analyser med bærbar XRF på kjernematerialet viste at U var anriket i tre nivåer som alle var ca. 2 m mektige. Høyeste målte urankonsentrasjon var på 535 ppm og denne var omkranset av uranverdier høyere enn 100 ppm i en total mektighet på ca. 10 cm.</p> <p>Logging av kjernene fra det korte borehullet viste at den opprinnelige granitten i markerte soner har blitt utsatt for en sterk skjærdeformasjon, både duktil og sprø deformasjon. Granitten har utviklet en markant skifrihet og dannelse av små skjærlinser. Bergarten er omvandlet i flere faser hvorav minst en har gitt en anrikning av uran i soner med mektighet opp mot 2 m langs borehullet. Denne type skjærsone i granittiske bergarter finnes over alt i Norge og spesielt i Nord-Norge, og en må være oppmerksom på at tilsvarende anrikninger av uran kan forekomme.</p> <p>Oppfølgende undersøkelser under drifvingen av Kvernsundtunnelen har stedvis påvist strålingsdoser over et anbefalt nivå. Radonkonsentrasjonen, i et område i tunnelen skjermet for effektiv ventilasjon, har også tidvis vært betydelig høyere enn det Statens strålevern og Helse og omsorgsdepartementet anbefaler. Bare tre av i alt 86 målinger med gammaspektrometer i tunnelen viste konsentrasjoner av U og Th over grenseverdien for deponeringsplikt. Siden det meste radioaktive materialet opptre i relativt tynne soner og at arbeiderne har oppholdt seg i relativt kort tid i tunnelen, er det rimelig å tro at arbeiderne ikke har vært utsatt for uakseptabel helserisiko. Tunnelmassene har heller ikke vært deponeringspliktig.</p> <p>Teoretiske vurderinger viser at å arbeide ett år i et materiale med 100 ppm U ikke gir en total strålingsdose som overstiger den årlige grensen på 20 mSv. Er urankonsentrasjonen 1000 ppm, noe som anses som meget høyt, vil den årlige strålingsdose ligge klart over grenseverdien, og mer enn halvparten skyldes innpusting av radon og radioaktivt støv. Intern strålingsdose på grunn av innånding av radioaktivt støv kan utgjøre en større strålingsdose enn ekstern gammastråling og bør søkes redusert.</p> <p>Ved tunnel-bygging i granittiske bergarter koblet til skjærsoner bør en være oppmerksom på mulige problemer knyttet til anrikninger av radioaktive elementer og spesielt uran.</p>		
Emneord:	Tunnel	Granittisk gneis
Skjærsone	Radioaktivitet	Urankonsentrasjon
Geofysikk	Gammaspektroskopi	Fagrapport

Innhold

1. INNLEDNING	7
2. MULIGE MILJØPROBLEMER KNYTTET TIL RADIOAKTIVE BERGARTER	8
2.1 Uakseptable strålingsdoser fra gammastråling.....	8
2.2 Radongass i tunnelluft	9
2.3 Radioaktivitet knyttet til støv i tunnelluft.....	10
2.4 Deponeringspliktig radioaktivt avfall	10
3. GEOLOGI OG TIDLIGERE UNDERSØKELSER PÅ BJARKØYA.....	11
4. GEOFYSISK LOGGING AV BOREHULLENE PÅ BJARKØYA	12
4.1 Tidligere logging av total gammastråling	12
4.2 Ny logging med gammaspektrometer	19
4.2.1 Målemetode og utførelse	19
4.2.2 Resultater fra målinger med gammaspektrometer	19
4.2.3 Vurdering av måledata	20
5. MODELLERING AV DE RADIOAKTIVE SONENES BREDDE	24
5.1 Beskrivelse av modellen	24
5.2 Resultater fra modelleringen	25
5.3 Diskusjon og konklusjon	26
6. RESULTATER FRA ET NYTT KJERNE-BOREHULL	27
6.1 Borelokaltet og utførelse	27
6.2 Geokjemiske analyser	28
6.3 Geologisk beskrivelse av borekjernene	30
6.4 Potensielle problematiske uranførende bergarter andre steder.....	32
7. REGISTRERINGER FORETATT UNDER TUNNELDRIVING	32
7.1 Målte konsentrasjoner av U, Th og K på stuff.....	32
7.2 Måling av doserate	34
7.3 Måling av radon i luft	35
7.4 Radioaktivt støv	36
7.5 Deponeringspliktig radioaktivt avfall	36
7.6 Oppsummering og konklusjon	36
8. LITTERATURSTUDIE AV RADIOAKTIVITET I BERGROM.....	38
8.1 Bakgrunn	38
8.2 Doserater fra naturlige isotoper	38
8.3 Studier av doserater i tunneler og bergrom	39
8.4 Oppsummering og konklusjoner	39
9. KONKLUSJONER	40
10. REFERANSER	42

VEDLEGG:

Vedlegg 1: Spektral gammalogg i hele borebrønnene Bh 3 ufiltrert.....	44
Vedlegg 2: Spektral gammalogg i hele borebrønnene Bh 4 ufiltrert.....	45
Vedlegg 3: Konsentrasjonen av U, Th og K samt doserate målt på tunnelstuff	46
Vedlegg 4: Målt radonkonsentrasjon i tunnelluft på utvalgte tider og steder	48
Vedlegg 5: Bilder av kjernematerialet fra KH-3.....	50
Vedlegg 6: Konsentrasjonen av U, Th og K målt med bærbar XRF (NITON XL 3T) på kjernene fra KH-3 på Bjarkøya.....	52

1. INNLEDNING

NGU har tidligere utført undersøkelser i forbindelse med tunnelarbeider på Bjarkøya i Troms (Dalsegg & Elvebakk 2012, Elvebakk et al. 2014). Disse undersøkelsene gikk først og fremst på kartlegging av forvitret fjell. Under dette arbeidet, ble det påvist til dels meget høy radioaktiv totalstråling i tre borehull på Bjarkøya. I det ene (Bh 3) påvises den høyeste totalstråling NGU har målt i borehull, riktignok i en begrenset del av borehullet. Dette var opp mot tre ganger så høy totalstråling som fra alunskiferen på Tøyen i Oslo (Elvebakk 2013) og 12 ganger så høy som i alunskiferen ved Hamar (Elvebakk 2008). Den aktuelle sonen ligger i dette hullet i nivå med tunnelen og det var en viss mulighet for at tunnelen kunne komme i kontakt med sonen.

NGU har tidligere gjort forsøk på å finne ut hva slags materiale som var årsak til den høye radioaktive strålingen, men dette har ikke lyktes. Borekjerner mangler i de aktuelle hullene, og analyse av prøvetatt borkaks gav ikke noe utslag på målinger med gammaspesktrometer. NGU har studert film tatt opp med "Optisk televiewer" (OPTV) for å se om det kan påvises pegmatittganger i områder med høy radioaktivitet, men her påvises stedvis bare en svak rødfarging av bergarten som er en granittisk gneis (Iversen 2012). I Bh 3, som har den radioaktive sonen i tunnelnivå, var vannet i borehullet grumset og det var ikke mulig å benytte OPTV. Før undersøkelsen som rapporteres her ble utført, var det derfor uklart hvilket materiale som gav så høy radioaktivitet kunne være. En kjente heller ikke til hvilke miljøproblemer dette kunne skape ved tunneldriving og senere i tunnelens driftsfase.

Dersom dette materialet med totalstråling opp mot 12.000 cps (counts per second, API-standard) opptrer i store volum, kunne arbeidere bli utsatt for uakseptable strålingsdoser. Statens vegvesen Region Nord leide inn et gammaspesktrometer for å overvåke doserater og konsentrasjonen av naturlige radioaktive isotoper ved tunneldrivingen. Dersom det opprinnelige påviste radioaktive materialet besto av mye uran, kunne dette skape et radonproblem som kunne kreve spesielle tiltak i byggefasen. Radoninnhold i tunnelufta ble også overvåket i avslutningsfasen av driftsperioden. I verste fall kunne det høye strålingsnivået føre til at tunnelmassen måtte karakteriseres som spesialavfall (deponeringspliktig radioaktivt avfall).

I Norge har det vært lite fokus på problematikken knyttet til radioaktivitet i berggrunn utenom alunskiferen på Østlandet (se bl.a. Fjermestad m. fl. 2018), og NGU mener det er viktig å få avklart hva for type materiale det er som gir den høye strålingen. På denne bakgrunn foreslo NGU overfor Statens vegvesen Vegdirektoratet en begrenset studie som omhandler tre oppgaver:

- 1. Logging av deler av de tre borehullene hvor det er påvist forhøyet stråling med gammaspesktrometer. Dette vil gi svar på konsentrasjoner av de tre naturlige forekomne radioisotopene uran, thorium og kalium.*
- 2. Dersom tunnelarbeidene kommer i kontakt med det radioaktive materialet, vil tunneldriver prøveta og sende materialet til NGU for videre analyse. Dette vil gi svar på hva slags materiale dette er.*
- 3. Foreta en litteraturstudie på tilsvarende problemstilling internasjonalt. Dette vil trolig kunne avklare omfanget av problemet radioaktive bergarter i tunnel-sammenheng kan skape.*

Forventet resultat: *En bedre forståelse av hvordan den radioaktive bergarten ved Bjarkøya opptrer, hva den består av og hvilke problemer de kan skape for tunnelarbeidene og i tunnelens driftsfase. Det er også av interesse å avklare om radioaktive masser som først indikert ved tunnelen til Bjarkøya kan finnes andre steder.*

Svikt i kommunikasjonen førte til at NGU ikke fikk tilgang på radioaktivt materiale fra tunnelnivå. I stedet fikk NGU kjerneboret mot en kjent anomali i juni 2018 slik at materialet med forhøyet uraninnhold kunne studeres.

Forfatterne retter en takk til:

- Finn Sverre Karlsen (Statens vegvesen Region nord) for at han interesserte seg for problematikken slik at undersøkelsen ble mulig, og for konstruktive innspill til rapportteksten
- Jomar Gellein og Geir Viken (NGU) for at de utvidet en allerede lang feltperiode slik at boringen av KH-3 på Bjarkøya kunne gjennomføres
- Tor Erik Finne (NGU) for grundig innføring i bruken av bærbar XRF.
- Per Hagelia, Mona Lindstrøm og Anette Wold ved Statens vegvesen Vegdirektoratet for konstruktive innspill til rapportteksten.

2. MULIGE MILJØPROBLEMER KNYTTET TIL RADIOAKTIVE BERGARTER

Mulige miljøproblemer knyttet til radioaktivitet i tunneler og bergrom kan være:

1. Arbeiderne utsettes for uakseptable strålingsdoser
2. Arbeiderne utsettes for uakseptable konsentrasjoner av radongass
3. Arbeiderne utsettes for radioaktivitet i støv
4. Tunnelmassen kan være deponeringspliktig.

2.1 Uakseptable strålingsdoser fra gammastråling

Kapittel IV av Strålevernforskriften, sist oppdatert 15. september 2017, omhandler «Bestemmelser om yrkeseksponering for ioniserende stråling» (Helse- og omsorgsdepartement 2017). I tillegg til klassifisering av arbeidsplassen og inndeling av yrkeseksponerte arbeidstakere beskriver forskriften dosegrenser. I § 32 beskrives dosegrenser som følger:

Virksomheten skal sørge for at all stråleeksponering holdes så lav som praktisk mulig, og at følgende dosegrenser ikke overskrides:

- a) *Effektiv dose for yrkeseksponerte arbeidstakere, lærlinger og studenter over 18 år skal ikke overstige 20 mSv per år. Statens strålevern kan gi dispensasjon for enkeltpersoner, der det av hensyn til arbeidets art ikke er praktisk mulig å fastsette en årlig grense på 20 mSv. Det kan i slike tilfeller gis tillatelse til å praktisere en grense på 100 mSv over en sammenhengende periode på fem år, under forutsetning av at dosen ikke overstiger 50 mSv i noe enkelt år.*

- b) *Ekvivalent dose til øyelinsen for yrkeseksponerte arbeidstakere, lærlinger og studenter over 18 år skal ikke overstige 20 mSv per år, eller 100 mSv for en sammenhengende periode på fem år så lenge dosen i et enkelt år ikke overstiger 50 mSv.*
- c) *Ekvivalent dose til huden for yrkeseksponerte arbeidstakere, lærlinger og studenter over 18 år skal ikke overstige 500 mSv per år. Dosegrensen gjelder for middelverdien av dosen målt eller beregnet over et vilkårlig hudareal på 1 cm². Ekvivalent dose for ekstremitetene skal ikke overstige 500 mSv per år.*
- d) *Ekvivalent dose til fosteret for gravide yrkeseksponerte arbeidstakere, lærlinger og studenter skal ikke overstige 1 mSv for den resterende delen av svangerskapet, dvs. etter at graviditet er kjent.*

Her er det strålingsdose for yrkeseksponerte arbeidstakere som gjelder, og denne skal ikke overstige 20 mSv/år (milliSievert pr. år). Med 1800 arbeidstimer i året tilsvarer dette en akkumulert strålingsdose på 11,1 µSv/t. I kapittel 8 skal vi se på hvilke konsentrasjoner av bl.a. uran som skal til for å oppnå en slik doserate.

2.2 Radongass i tunnelluft

Problemer knyttet til den fargeløse og luktfrie radioaktive edelgassen radon er beskrevet på Strålevernets nettsider (www.nrpa.no/radon). Regjeringen vedtok i 2009 en strategi for å redusere radoneksponeringen i Norge med varighet fram til 2015. Denne strategien videreføres i perioden 2015 – 2020. Som en del av dette arbeidet er det også sett på radoneksponering ved arbeidsplasser under jord (Arbeidstilsynet 2018).

For boligrom anbefaler Statens strålevern at radonnivået i inneluft bør holdes så lavt som mulig. Tiltak for å redusere nivået bør iverksettes dersom det overstiger tiltaks-grensen på 100 Bq/m³. Radonnivået bør uansett alltid være under grenseverdien på 200 Bq/m³. Siden radonnivået bør holdes så lavt som mulig, kan det være behov for tiltak selv om konsentrasjon er under tiltaksgrensen. Grenseverdiene gjelder oppholdsrom og radonnivået er gitt som årsmiddelverdi.

Ideelt sett bør det være et mål om at de generelle anbefalingene for boligrom følges også i tunneler og bergrom (Arbeidstilsynet 2018). I tunneler under bygging kan dette være en utfordring. Porøse svakhetssoner i fjellet og knusningen av berget ved sprengning gjør at radon lettere frigis og kommer inn i tunnelen. I tillegg kan radon løst i inn-lekkende grunnvann bidra til økt radonkonsentrasjon. Fordelen med tunneler under arbeid er at det her vanligvis er god ventilasjon og radonnivået kan holdes under kontroll.

Det er ikke konsentrasjonen av radon i tunnelluft som er avgjørende men eksponeringen, dvs. konsentrasjon av radon ganget med tid, målt i MBqt/m³ (Mega Bequerel-timer pr. kubikkmeter). Arbeidsgruppen som har arbeidet med radon på arbeidsplasser under jord, anbefaler en firetrinns tilnærming til problemet (utdrag fra Arbeidstilsynet 2018):

- Radonnivået holdes så lavt som mulig. Tiltak bør gjennomføres dersom nivået overstiger 100 Bq/m^3 . Etter tiltak bør nivået være så lavt som praktisk mulig og under grenseverdien på 200 Bq/m^3 .
- Dersom de generelle anbefalingene (pkt. 1) ikke kan oppfylles, bør arbeidernes reelle radoneksponering vurderes. Er den årlige radoneksponeringen til arbeiderne under $0,36 \text{ MBq/m}^3$ (1800 timer med 200 Bq/m^3), behøves ingen ytterligere tiltak. Overstiger radoneksponeringen $0,36 \text{ MBq/m}^3$ skal arbeidstakerne ha informasjon om dette.
- Arbeidsgiver bør identifisere arbeidstagere i gruver, tunneler og andre uinnredede bergrom som risikerer å kunne få en årlig samlet radoneksponering over $0,72 \text{ MBq/m}^3$ (1800 timer med 400 Bq/m^3). Dette kan gjøres gjennom persondosimetri eller andre målemetoder som gir tilstrekkelig god fastsettelse av individuell radoneksponering.
- For arbeidstakere i tunneler, gruver og andre uinnredede bergrom er en radoneksponering på $2,1 \text{ MBq/m}^3$ (1800 timer med 1200 Bq/m^3) den øvre anbefalte grensen, og denne bør derfor aldri overstiges.

En merker seg her, at med få unntak, er det ikke noen absolutte krav til radonnivå i gruver, tunneler og uinnredede bergrom.

2.3 Radioaktivitet knyttet til støv i tunnelluft

Radioaktivitet knyttet til støv og aerosoler i tunnelluft er lite påaktet av strålingsmyndighetene. Støvet kan inneholde både de naturlige radioaktive elementene (U^{235} , U^{238} og Th^{232}) og døtrene fra disse. I tillegg finnes K^{40} som gir β - og γ -stråling. Støv som inneholder uran og thorium kan være en større kilde til uheldig stråling på lungevev enn det radon utgjør. Dersom støvpartikler med de nevnte naturlige elementene fester seg i lungene vil alle datterprodukter fra uran og thorium bidra med α -, β - og γ -stråling direkte i lungene på tunnelarbeidere. Det er altså ikke bare datterproduktene av radon; polonium (Po), vismut (Bi) og bly (Pb) som bidrar, men også mødrene protactinium (Pa^{231}), thorium (Th^{230}), radium (Ra^{223} , Ra^{224} , Ra^{226}) og aktinium (Ac^{227}) som alle produserer den farlige α -strålingen og i tillegg til β - og γ -stråling.

I tillegg til rene strålingsskader på grunn av strålingen på lungevevet kan uran gi forgiftningsskader når de først er kommet inn i kroppen. Uran er et giftig stoff som akkumuleres i beinbygning (<https://no.wikipedia.org/wiki/Uran>).

2.4 Deponeringspliktig radioaktivt avfall

I forskrift om forurensingslovens anvendelse på radioaktiv forurensning og radioaktivt avfall (Lovdata 2010) gjelder forurensingslovens anvendelse på stråling fra radioaktive stoffer som er eller kan være til skade eller ulempe for miljøet. Forskriften som er gjeldende fra 1. januar 2011, skiller mellom radioaktivt avfall og deponeringspliktig radioaktivt avfall. Nedre grenser oppgis i aktivitet (Bq/g) som kan konverteres til konsentrasjoner gjennom følgende relasjoner (IAEA 2003):

1% K in rock	= 313	Bq/kg	⁴⁰ K
1 ppm U in rock	= 12.35	Bq/kg	²³⁸ U, or ²²⁶ Ra
1 ppm Th in rock	= 4.06	Bq/kg	²³² Th

Forskriften (Lovdata 2010) vedlegg 1a og 1b, definerer grenseverdier for radioaktivt avfall og deponeringspliktig radioaktivt avfall uttrykt i spesifikk aktivitet. I tabell 1 er grenseverdiene også omregnet til konsentrasjon.

Tabell 1: Grenser for hva som er definert som radioaktivt avfall og deponeringspliktig radioaktivt avfall uttrykt i spesifikk aktivitet og omregnet til konsentrasjon for naturlig U, Th og K (Lovdata 2010, vedl. I).

Naturlig element	U (Bq/g)	U (ppm)	Th (Bq/g)	Th (ppm)	K ⁴⁰ (Bq/g)	K (%)
Radioaktivt avfall	1	81	1	246	10	32
Deponeringspliktig radioaktivt avfall	1	81	1	246	100	320

Dersom avfallet inneholder flere radionuklider, er avfallet å betrakte som radioaktivt eller deponeringspliktig radioaktivt avfall dersom summen av forholdet mellom spesifikk aktivitet (konsentrasjon) for hver radionuklide og den tilsvarende verdien i tabell 1 er større enn 1. For at deponeringsplikten skal aktiveres må også en total årlig aktivitet for deponert masse overstiges. For kalium er denne 1 mill. Bq/år, naturlig uran 1000 Bq/år og for naturlig thorium 1000 Bq/år. I praksis er dette så lavt at det er den spesifikke aktiviteten (konsentrasjonen) som er avgjørende.

Dersom den totale aktiviteten for uttak/deponering av radioaktivt materiale overstiger en årlig totalaktivitet eller spesifikk aktivitet, skal det alltid søkes Statens strålevern om tillatelse til tiltaket. Tabell 2 viser disse grenseverdiene (fra Lovdata 2010, vedlegg II). Omregnet til konsentrasjoner betyr dette at materiale som inneholder mer enn 8 ppm U eller 25 ppm Th etter forskriften (Lovdata 2010) ikke kan «tilføres» dvs. flyttes uten tillatelse etter forurensningslovens § 11.

Tabell 2: Grenser for hva som er definert som søknadspliktig radioaktivt avfall uttrykt i total aktivitet i Bq/år og spesifikk aktivitet i Bq/g for naturlig U, naturlig Th og K⁴⁰ (Lovdata 2010, vedlegg II).

Naturlig element	U (Bq/år)	U (Bq/g)	Th (Bq/år)	Th (Bq/g)	K ⁴⁰ (Bq/år)	K ⁴⁰ (Bq/g)
Søknadspliktig radioaktivt avfall	100	0,1	100	0,1	100000	10

3. GEOLOGI OG TIDLIGERE UNDERSØKELSER PÅ BJARKØYA

Berggrunnsgeologien på Bjarkøya er oppsummert av Iversen (2012) samt Karlsen og Iversen (2013). Her finnes i hovedsak en deformert granittisk gneis men også noe amfibolitt. Den granittiske gneisen er svakt foliert, stedvis sterkt tektonisert og karakteriseres da som granittisk breksje. Amfibolitten inneholder stedvis porfyrer og er

betydelig mer foliert enn granitten spesielt i kontaktsonen mot granitten. Bergartene har vært utsatt for både duktil og sprø deformasjon.

Det er imidlertid påvist en betydelig forvitring i området, og dette var grunnen til at NGU engasjerte seg i prosjektet høsten 2011. Det ble da utført resistivitetsmålinger langs to profiler og 6 borebrønner ble boret og logget geofysisk og med Optisk televiewer (Dalsegg & Elvebakk 2012). Det ble senere boret to kjerneborehull, hvorav ett er logget geofysisk. NGU inspiserte også kjernene med henblikk på forvitningsprodukter, noe som var negativt (Elvebakk m. fl. 2014).

Total gammastråling i tre av de brønnene som ble logget viste høye verdier, og i den ene (Bh 3) det høyeste nivået NGU har målt i borehull, opptil 12.000 cps API-standard (American Petroleum Institute). Sonen med den høyeste radioaktiviteten lå i samme nivå som tunnelen og dette skapte bekymring blant enkelte geologer ved Statens vegvesen Region nord, noe som trigget NGU til å se nærmere på problematikken.

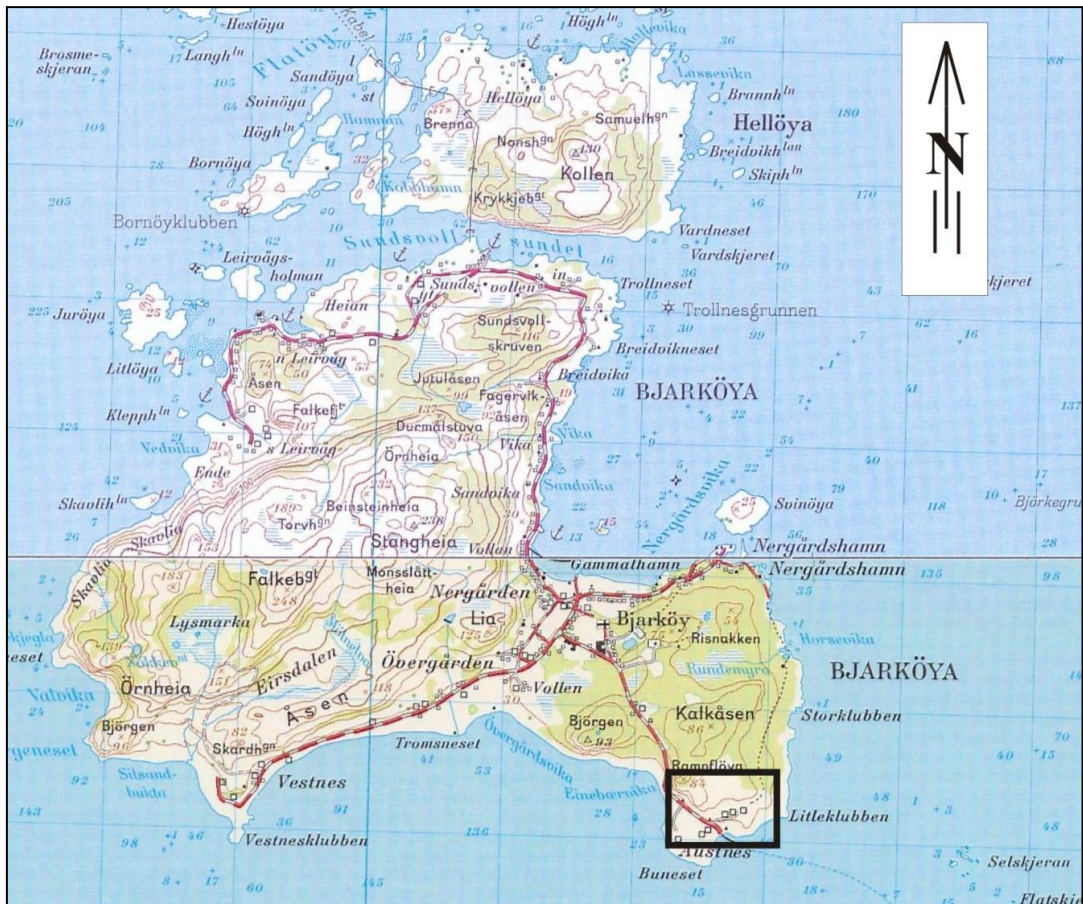
Det er ellers foretatt seismiske målinger både på land og i sjøen mellom Bjarkøya og Grytøya. Referanser til disse undersøkelsene er gitt i prosjektrapporter fra Vegdirektoratet (Iversen 2012, Karlsen og Iversen 2013).

4. GEOFYSISK LOGGING AV BOREHULLENE PÅ BJARKØYA

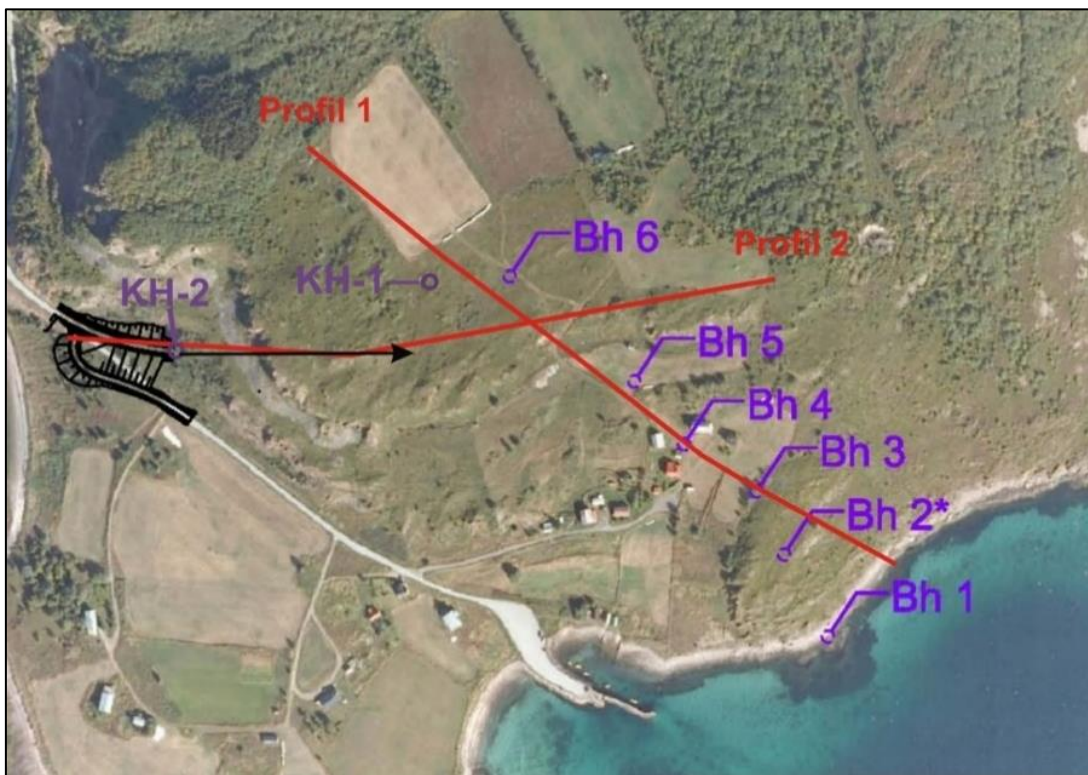
I dette kapitlet gis det en kortfattet oppsummering av tidligere undersøkelser av borehull på Bjarkøya og en mer utførlig beskrivelse av målinger med gamma-spektrometer høsten 2016.

4.1 Tidligere logging av total gammastråling

NGU har tidligere utført resistivitetsmålinger på bakken og geofysisk logging av seks brønner og ett kjerneborehull på Bjarkøya (Dalsegg & Elvebakk 2012, Elvebakk m. fl. 2014). Undersøkt område samt plassering av målelinjer og loggede borehull fremgår av figurene 1 og 2.



Figur 1: Plassering av undersøkt område på sørenden av Bjarkøya.



Figur 2: Lokalisering av seks brønner (Bh 1 – 6), 2 kjerneborehull (KH-1 og KH-2) og 2 resistivetsprofiler på Bjarkøya (Profil 1 og 2). Tunnelpåhugg er vist i svart og kjerneborehull 2 (KH-2) med svart pil. Det nye kjerneborehullet KH-3 er lokalisert like ved Bh 4. Tunnelen dreier sørover, og går ut under sjøen ca. ved Bh 1.

De seks brønnene er boret vertikalt til dyp fra 65 (Bh1) til ca. 75 m. Kjerneborehull KH-1 er boret vertikalt til 80 meter mens kjerneborehull KH-2 er boret nær horisontalt langs tunneltracéen til 200 meter (Karlsen og Iversen 2013). Alle de seks brønnene og KH-1 ble logget med geofysiske metoder: total gammastråling, resistivitet og seismisk hastigheter i tillegg til optisk eller akustisk televiwer (Elvebakk & Dalsegg 2012, Elvebakk m. fl. 2014). Sonde for å måle spektral gammastråling med beregning av konsentrasjoner av eU, eTh og K var ikke tilgjengelig for NGU ved første loggerunder. KH-2 ble ikke logget geofysisk på grunn av dårlig fjellkvalitet kombinert med slakt fall, noe som gir stor risiko for tap av utstyr. Kjernene fra KH-1 og KH-2 er logget av Iversen (2012) og inspisert med hensyn på forvitningsprodukter av NGU (Elvebakk m. fl. 2014).

All geofysisk logging er utført med utstyr fra Robertsson Geologging Inc. (<http://www.geologging.com>). Loggemetoder og utførelse er detaljert beskrevet i tidligere rapporter (Dalsegg & Elvebakk 2012 og Elvebakk m. fl. 2014) og på NGUs nettsider <http://www.ngu.no/emne/geofysiske-metoder>

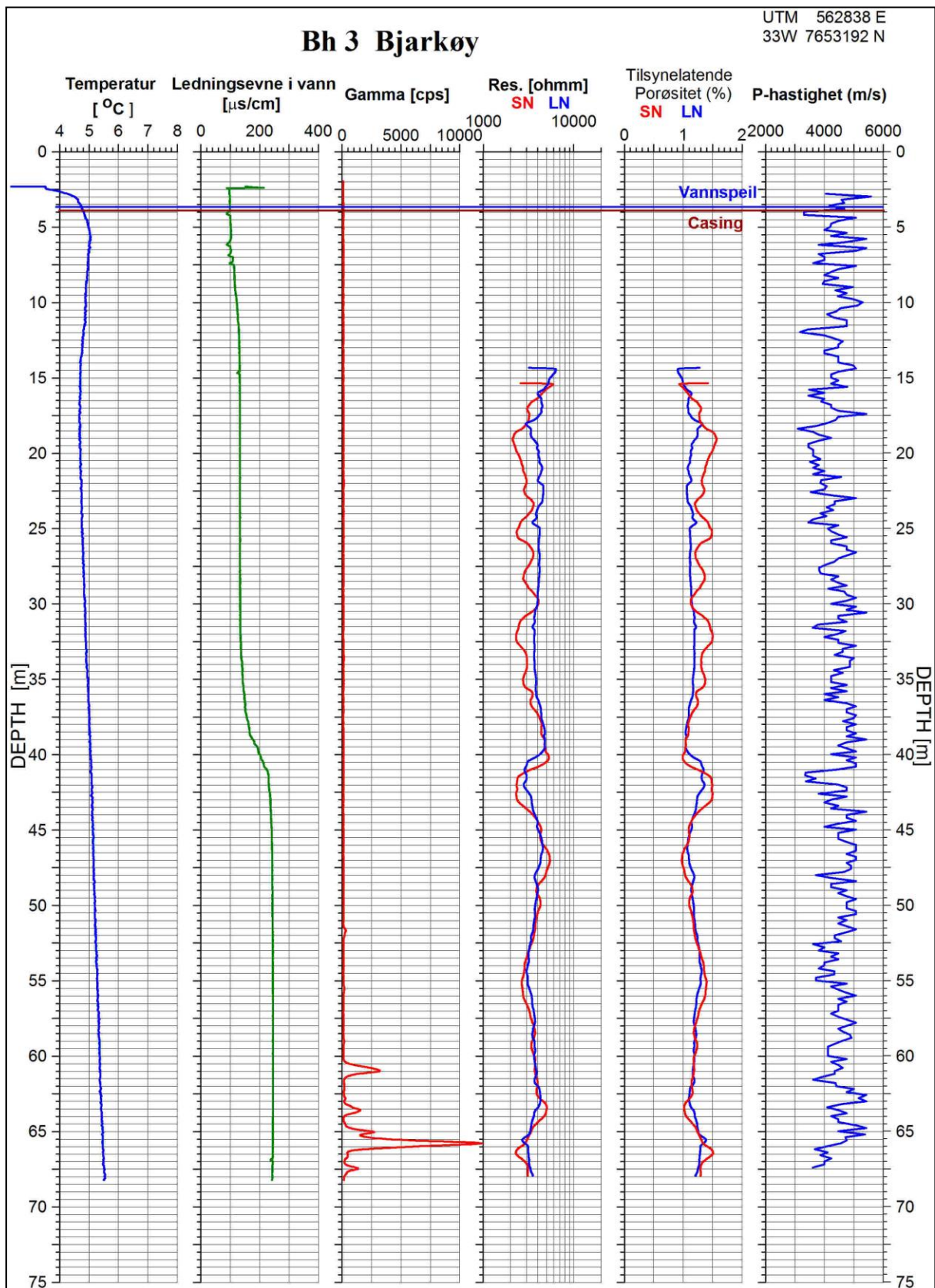
Figurene 3 til 6 viser loggedata fra brønnene Bh 3, Bh 4 og Bh 5 samt fra kjerneborehull KH-1. Høy totalstråling ble påvist ved dyp fra 60 til 68 m i Bh 3, fra 8 til 17,5 m i Bh 4 og fra 7 til 17 m i Bh 5. I KH-1 (Figur 6) er det sporadisk noe øket totalstråling (opp mot 500 cps API-standard), men på ingen måte så intenst som i de tre brønnene. De andre brønnene (Bh 1, Bh 2 og Bh 6) viser ikke spesielt forhøyet radioaktiv stråling (Dalsegg & Elvebakk 2012) og vises derfor ikke her. Det generelle bakgrunnsnivået er noe høyere i KH-1 enn i brønnene, noe som trolig skyldes mindre borehulldiameter og derved mindre vann som demper strålingen.

Største utslag finnes i Bh 3 hvor det er målt verdier opp mot 12.000 cps API-standard. Dette er det høyeste NGU har målt i Norge, og det overgår målingene på alunskifer ved Hamar og Tøyen i Oslo (Elvebakk 2008, Elvebakk 2013). Den økte strålingen i Bh 3 ligger omtrent i nivå med tunnelen og den opptrer riktignok usammenhengende over en mektighet på ca. 10 meter. Det var av interesse å finne ut hva dette skyldes, hvilke elementer bidrar og hvilken geologisk historie har skapt denne oppkonsentreringen. I Bh 4 og Bh 5 ligger nivåer med forhøyet stråling klart over tunnelnivå.

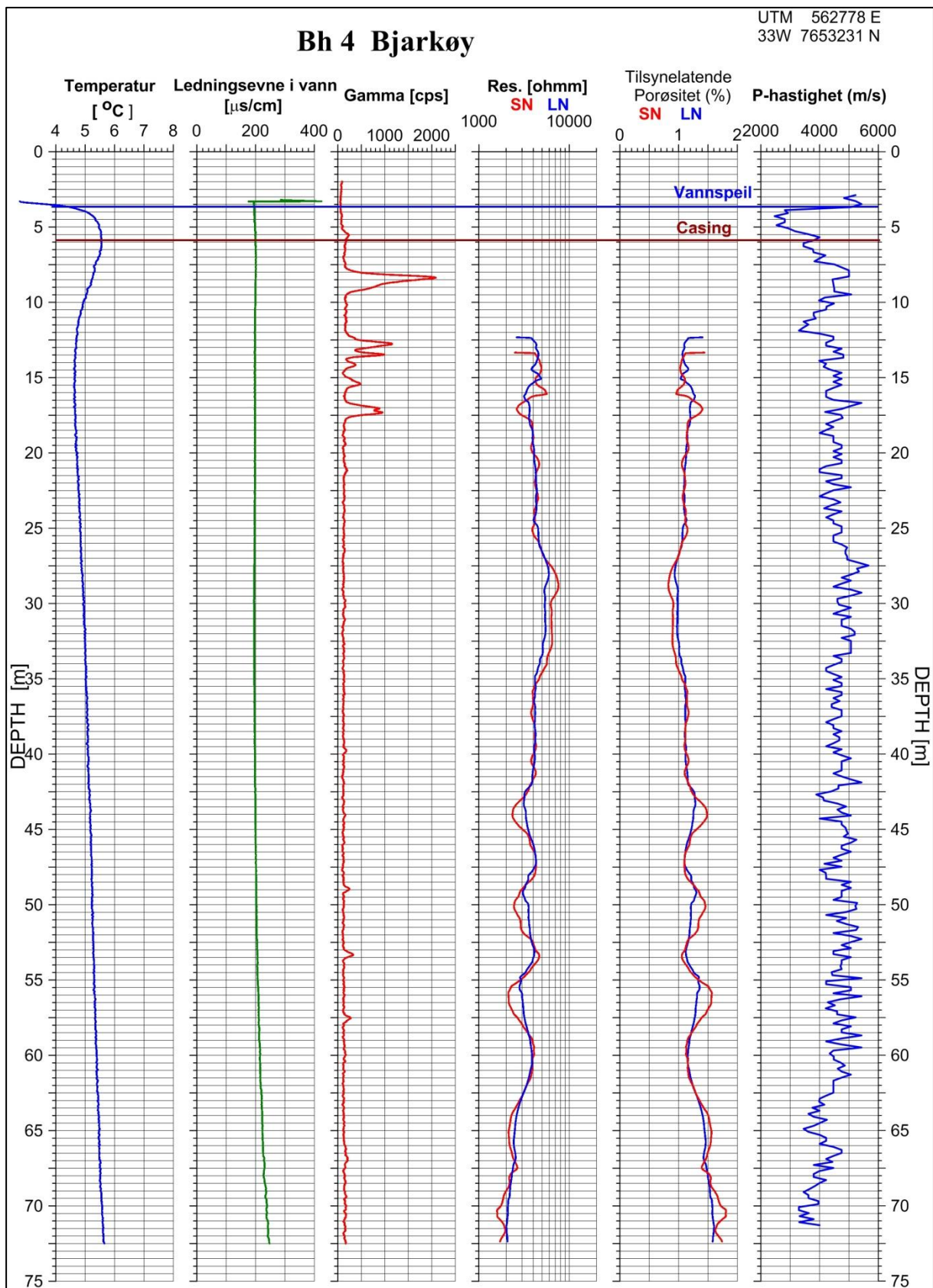
Det er registrert til dels store variasjoner i p-bølgehastigheten og en resistivitet som ligger noe lavere enn det som er forventet i friske granittiske gneiser (Elvebakk 2011). I KH-1, hvor det er målt IP-effekt, er det stedvis påvist svake anomalier som kan skyldes mindre sulfidmineraliseringer. Disse resultatene må sees i sammenheng med den geologiske beskrivelsen av kjernemateriale fra KH-3 (Kap. 6).

Totalstrålingen i granittiske gneiser andre steder i Norge viser jevnt over rundt 100 cps API-standard (Elvebakk 2011). Ved Bjarkøy er denne stedvis betydelig høyere. Den økte strålingen opptrer over soner med mektighet på fra 7 til 10 meter i de tre brønnene, men ikke sammenhengende. Dersom de høye verdiene som ble målt i Bh 3 opptrer i større volum, ville dette vært et miljøproblem i form av høy strålingsdose ved tunneldrivingen. Dersom det hele er styrt av uran kunne dette vært et radonproblem. Økt problem med innånding av radioaktivt støv kan også være et problem ved tunneldrivingen. Det kan også tenkes at tunnelmassene kunne være deponeringspliktige. Det er derfor avgjørende å finne ut hva slags materiale dette er

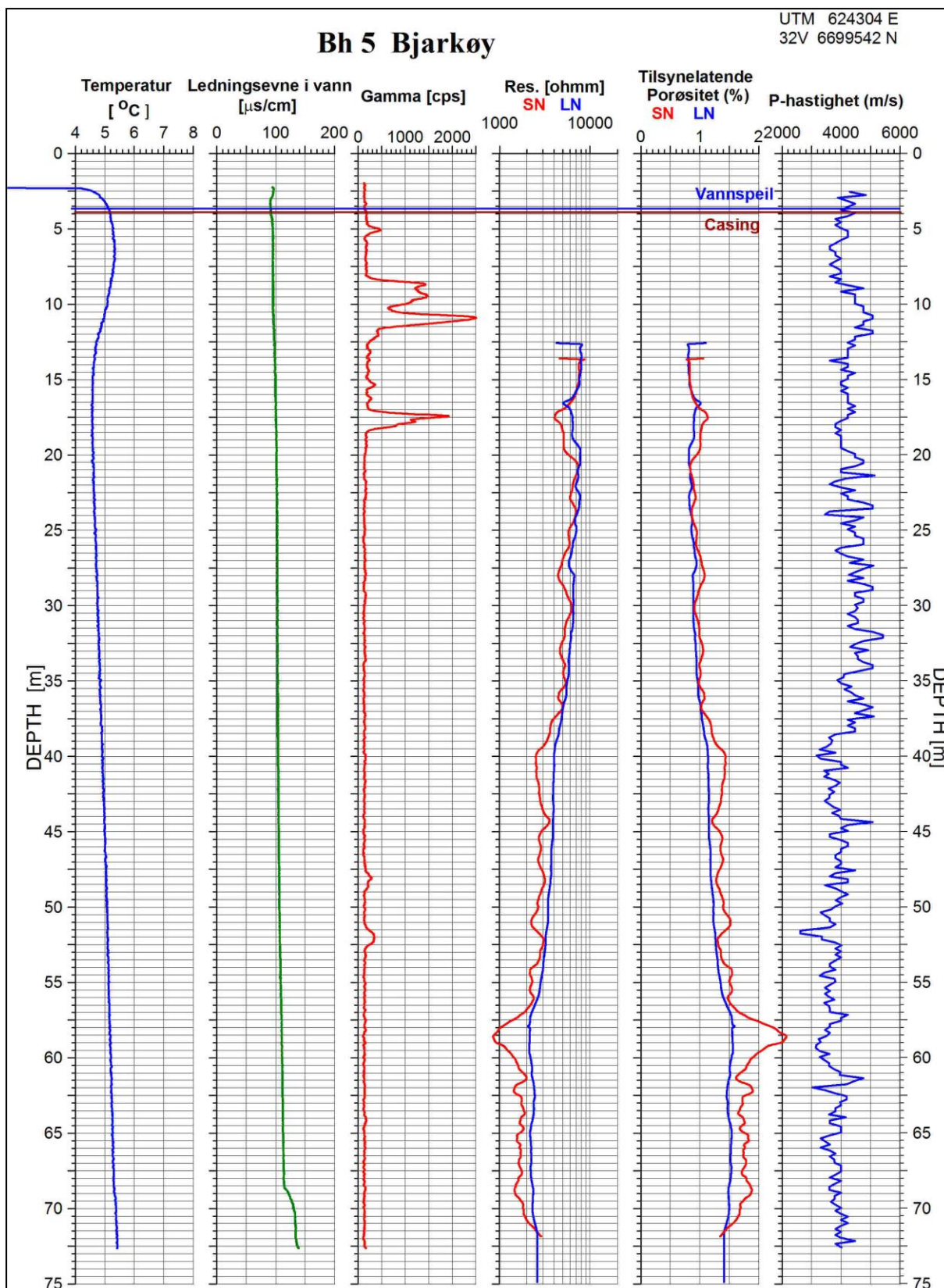
og om en kan forvente å finne tilsvarende oppkonsentreringer av radioaktivt materiale ved tunneldriving andre steder i Norge.



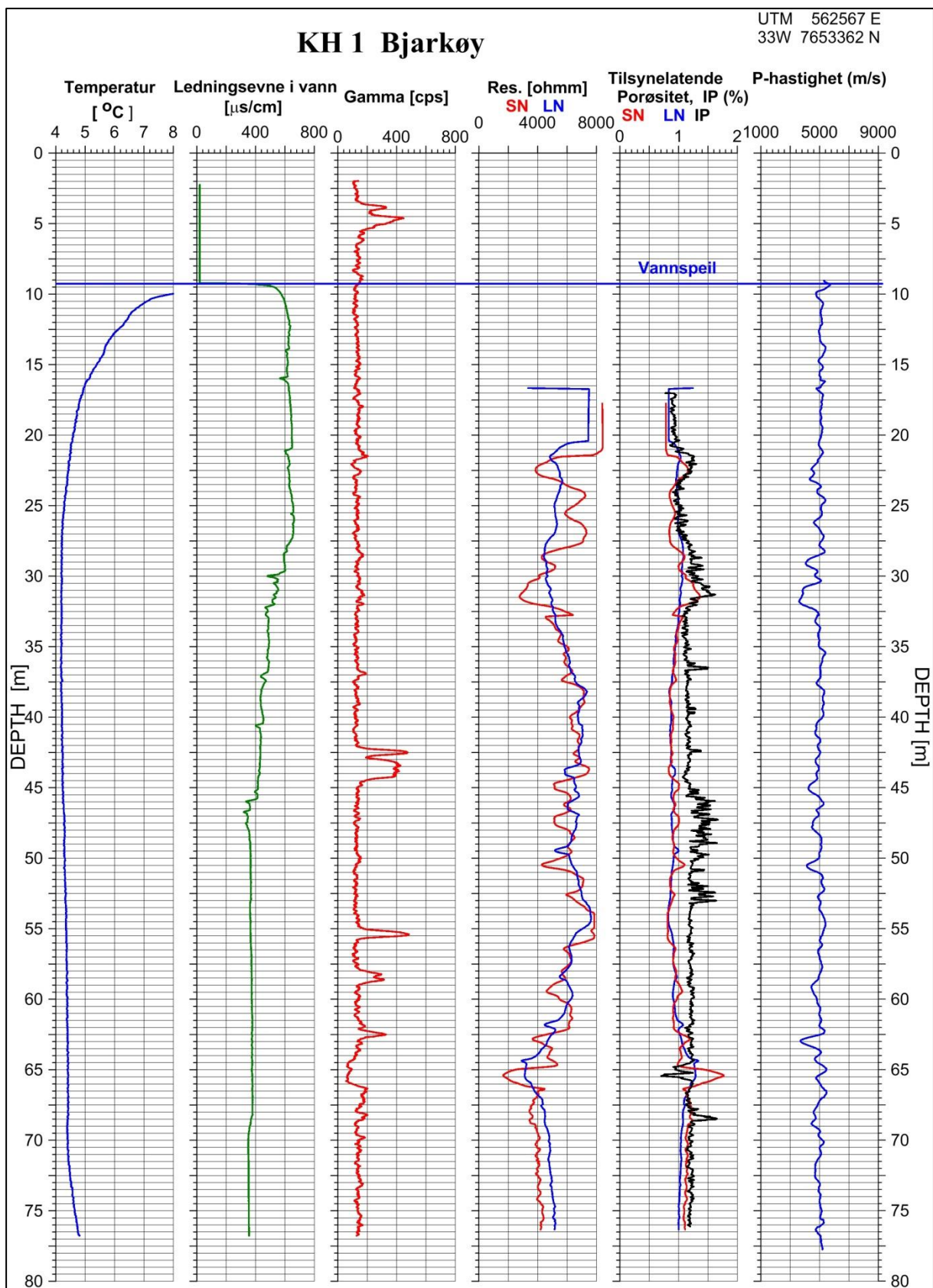
Figur 3: Loggedata fra Bh 3 på Bjarkøya, fra venstre temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total gammastråling, resistivitet, beregnet tilsynelatende porøsitet og seismisk p-bølgehastighet.



Figur 4: Loggedata fra Bh 4 på Bjarkøya, fra venstre temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total gammastråling, resistivitet, beregnet tilsynelatende porøsitet og seismisk p-bølgehastighet.



Figur 5: Loggedata fra Bh 5 på Bjarkøya, fra venstre temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total gammastråling, resistivitet, beregnet tilsynelatende porøsitet og seismisk p-bølge hastighet.



Figur 6: Loggedata fra KH-1 på Bjarkøya, fra venstre temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total gammastråling, resistivitet, IP-effekt, beregnet tilsynelatende porøsitet og seismisk p-bølg hastighet.

4.2 Ny logging med gammasppektrometer

Ved de første loggingene av borehullene på Bjarkøya hadde ikke NGU tilgang på sonde som kan måle spektral gammastråling slik at konsentrasjonen av U, Th og K kunne beregnes. Da denne ble anskaffet, ble det besluttet å foreta spektrometriske målinger i de borehullene som viste størst totalstråling på Bjarkøya.

4.2.1 Målemetode og utførelse

Gammasppektrometeret er en sonde som kan måle konsentrasjonen av K (%), eU (ppm) og eTh (ppm) i tillegg til total naturlig gammastråling (cps, API standard). Siden konsentrasjonene av U og Th er bestemt ved å benytte gammastråling fra datterprodukter benyttes betegnelsen ekvivalent U og Th (eU og eTh). Det kan gjøres en kontinuerlig logg eller det kan tas punktmålinger i 5 – 6 minutter for å kartlegge hele energispekteret for mer nøyaktig konsentrasjonsbestemmelse. Ved kontinuerlig logging senkes sonden med en hastighet på 1 m/min ned i borehullet og det foretas målinger for hver cm. Dette betyr at strålingen akkumuleres ca. 0,6 s for hver konsentrasjonsberegning, noe som kan være relativt kort tid for en liten detektor der målekristallen har diameter 3,8 cm og høyde 15 cm. Tidligere målinger i alunskiferen på Tøyen (Elvebakk 2013) viser at denne kontinuerlige loggingen gir gode resultater sammenlignet med statiske målinger over lengre tid (5 – 6 minutt) og den kontinuerlige loggen kan gi et relativt sikkert bilde av konsentrasjonene av U, Th og K nedover i borehullene.

Opprinnelig var planen å logge alle de tre brønnene Bh 3, Bh 4 og Bh 5. Alle borehullene var gravd over og det var kun mulig å grave frem Bh 3 og Bh 4. Bh 5 er derfor ikke logget med gammasppektrometer. Loggingen ble utført 19. oktober 2016 av Harald Elvebakk.

4.2.2 Resultater fra målinger med gammasppektrometer.

Kontinuerlig logg av konsentrasjonen av eU, eTh og K er vist i vedleggene 1 og 2. Disse loggene viser rå-data og er beheftet med noe støy som kan skyldes kort akkumuleringstid, men også geologiske variasjoner fra punkt til punkt nedover i borehullene. I figurene 7 og 8 viser utsnitt av målingene i de mest interessante områdene, og her er det foretatt en 5-punkts løpende middel som glatting av måleverdiene.

Generelt ligger nivået av både U og spesielt Th relativt lavt, henholdsvis < 10 ppm og < 5 ppm, til å være en granittisk gneis. Kaliuminnholdet varierer fra ca. 1 % opp mot ca. 5 %. Dette må betraktes som normale verdier for en granittisk gneis.

Høyeste kartlagte urankonsentrasjon er på i underkant av 1000 ppm, noe som må sies å være meget høyt. Denne høye verdien opptrer imidlertid bare over en tynn sone, anslagsvis noen få dm. I Bh 3 er den målte konsentrasjon av uran høyere enn 100 ppm over en mektighet på 1,2 m mens tilsvarende i Bh 4 er 0,4 m. I neste kapittel rapporteres modelleringer som sannsynliggjør sonenes mektighet.

4.2.3 Vurdering av måledata

For å sjekke påliteligheten av den kontinuerlige loggingen ble det foretatt statistiske målinger over 4 og 6 minutter på 9 utvalgte punkter i brønnene Bh 3 og Bh 4. Resultater fra disse målingene er vist i tabell 3.

Tabell 3: Statistiske målinger med gammaspektrometer for mer nøyaktige konsentrasjonsberegninger.

Bh	Dyp (m)	Måletid (Min)	Total (cps API)	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)
3	62,16	4	241	11,45	1,97	0,93
3	62,52	4	193	9,55	1,98	0,55
3	63,03	4	230	10,8	1,07	1,45
3	67,32	4	835	49,15	-0,8	1,8
3	67,48	4	365	19,56	-0,70	2,12
3	67,52	4	1657	105,03	-3,7	0,51
3	67,76	4	896	55,98	-3,2	0,99
4	8,15	6	1344	77,42	11,06	1,1
4	8,41	6	2588	161,61	12,55	-0,5

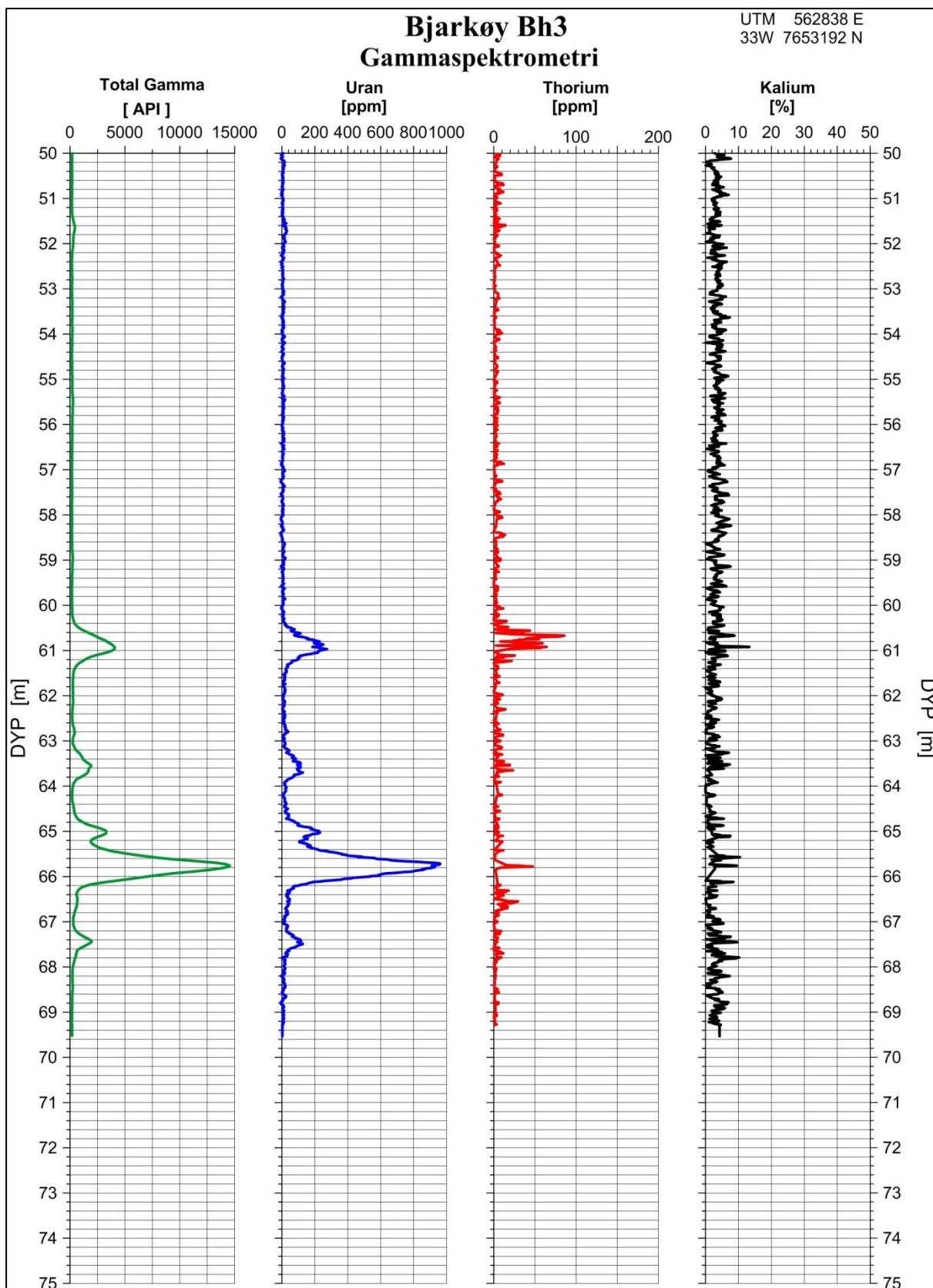
Ut fra de statistiske målingene med måletid fire eller seks minutter rapportert i tabell 3, kan en finne en statistisk sikrere konsentrasjon av de tre elementene U, Th og K. Loggene i borehullene viste med få unntak at totalstrålingen i hovedsak er styrt av U-konsentrasjonen. Alle disse målepunktene ligger i områder med lave konsentrasjoner av K og Th. Figur 9 viser en lineær regresjonsanalyse som sier at

$$\text{Urankonsentrasjonen (ppm)} = 0,064 \times \text{Totalstråling (cps API)} - 3,59$$

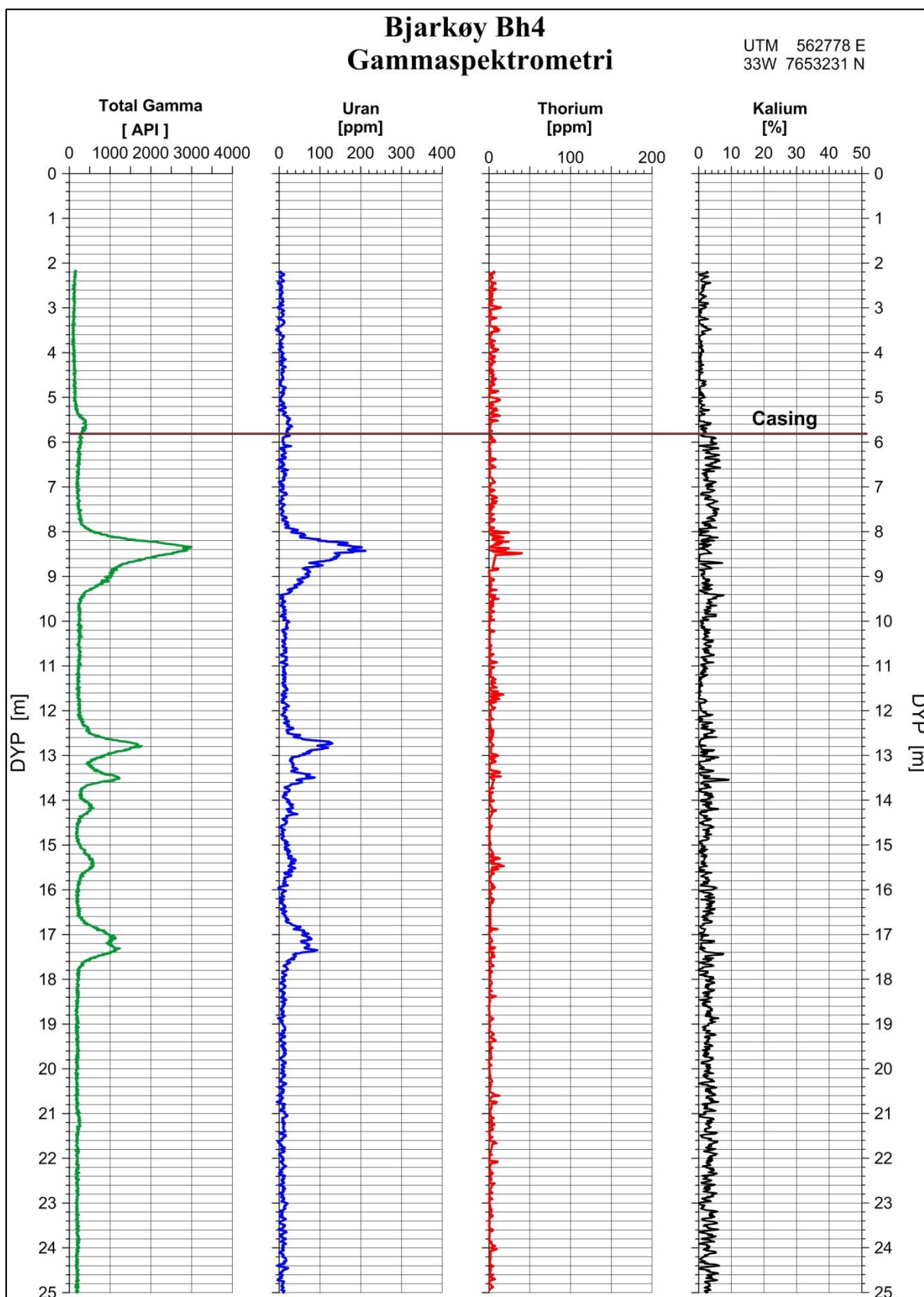
og at korrelasjonskoeffisienten (R^2) er på 0,998. Dette bekrefter at U-konsentrasjonen i disse punktene nesten utelukkende styrer totalstrålingen. Dersom denne formelen benyttes på den høyest målte totalstrålingen i Bh 3 (dyp 65,6 m) blir U-konsentrasjonen på 908 ppm mens den kontinuerlige loggen viser ca. 980 ppm. Dersom det er anrikninger også i Th og K, vil dette redusere U-konsentrasjonen ytterligere. Dette viser at den faktiske konsentrasjonen av uran kan være ca. 10 % lavere enn vist ved den kontinuerlige loggen.

Th-konsentrasjonene viser svært lave verdier og faktisk negative verdier. Det samme kan også sies om K-konsentrasjonene. Trolig er dette en effekt av prosesseringen men også av at konsentrasjonene virkelig er lave.

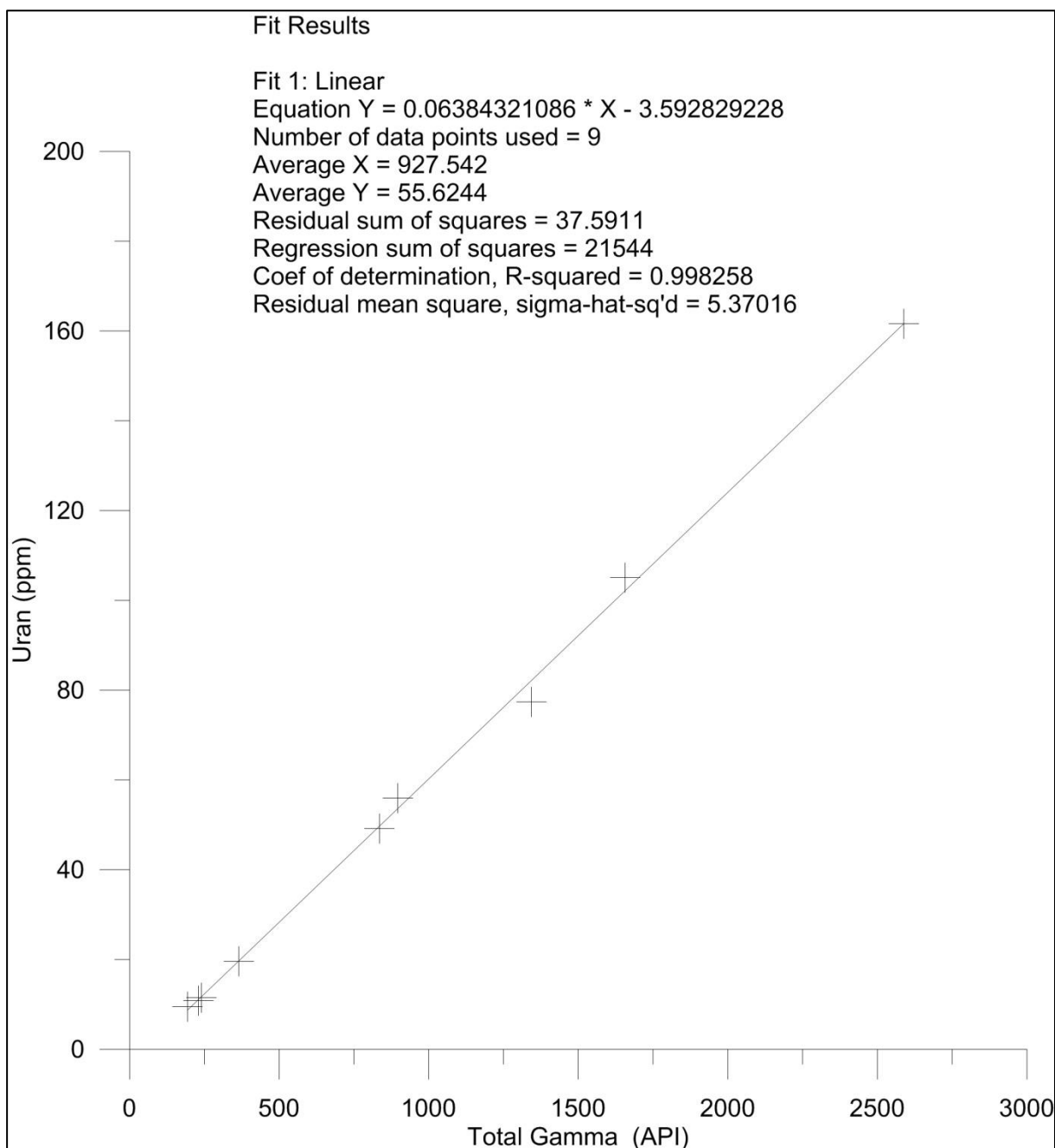
Enkelte av utslagene både på totalstråling og på U-konsentrasjonen viser nær symmetrisk kurveforløp til begge sider ut fra toppverdi. Dette kan tolkes som en effekt av demping av stråling gjennom borehullets vann og i berget omkring. I så fall kan disse sonene med forhøyet uraninnhold være tynne sprekkefyllinger med tykkelse bare på noen få cm til dm. Strålingen dempes i praksis helt av ca. 0,5 m vann eller berg. For å få en avklaring på sonenes bredde og strålingens demping er det foretatt modelleringer (se neste kapittel).



Figur 7: Logget totalstråling og konsentrasjoner av uran, thorium og kalium i Bh 3 på Bjarkøya. Måleverdier er glattet med et 5-punkt middelverdifilter.



Figur 8: Logget totalstråling og konsentrasjoner av uran, thorium og kalium i Bh 4 på Bjarkøya. Måleverdier er glattet med et 5-punkt middelverdifilter.



Figur 9: Korrelasjon mellom uran og totalstråling på 9 utvalgte punkter i Bh 3 og Bh 4.

Som figurene 7, 8 og 9 viser, skyldes den forhøyde totalstrålingen i hovedsak anrikninger av uran. Dette kan være en indikasjon på at dannelsen av anrikede uransoner har skjedd ved hydrotermal aktivitet. Uran er lett løselig i vann og kan løses ut fra moderbergart og avsettes i soner der kjemien tilsier utfelling. Thorium, som er tungt løselig, vil ikke gjennomgå en tilsvarende prosess og vil bli værende i moderbergart. Mer om dette i kapittel 6.

5. MODELLERING AV DE RADIOAKTIVE SONENES BREDDE

Urananomalierne påvist i borehullene Bh 3 og Bh 4 (Figurene 7 og 8) viser en form som kan skyldes at strålingen fra tynne soner dempes gradvis vekk fra sonen. For å sannsynliggjøre sonenes sanne bredde er det foretatt modelleringer.

5.1 Beskrivelse av modellen

En enkel numerisk modell av strålingen fra borehulls-veggen ble benyttet for å undersøke utbredelsen av en anriket uransone som kunne være kilde til de observerte anrikningene vist i Figurene 7 og 8. Her ble det undersøkt hva for modell som kunne gi en toppverdi på ca. 1000 ppm U med en halvverdbredde på ca. 40 cm, lik toppanomalien i Bh 3 (Figur 7).

En modell ble etablert ved å benytte programmeringsspråket Python. Modellen av borehulls-veggen besto av en serie ringer med høyde 1 cm og en indre radius på 11,7 cm, ikke langt fra borehullets radius (7 cm). Hver ring besto av i alt 50 elementer sirkelen rundt. Antall tellinger pr. sekund (cps) forårsaket av hvert element og detektert med målesonden plassert sentralt i borehullsvannet, ble beregnet med formelen:

$$N = k \cdot C / 4\pi R^2 \cdot \exp(-u \cdot R)$$

C er konsentrasjonen av U-238 (ppm eU) i elementet, u er dempningskoeffisienten i vann for 1,76 MeV gammastråling (strålingstopp for U i energispekteret) og R er avstanden mellom elementet og detektoren. k representerer konstante faktorer som vi ikke eksplisitt tar med her (f.eks. følsomheten for detektoren og konverteringsfaktor fra konsentrasjon til aktivitet). For å forenkle er k satt lik 1. Hvert element er gitt en konsentrasjon C og det totale bidraget fra borehulls-veggen til detektoren er beregnet ved å summere bidragene fra hvert enkelt element. Et profil nedover borehullet oppnås ved å justere detektorens posisjon i borehullet og gjenta beregningen ved hver enkelt detektorposisjon.

Flere scenarier av anrikede soner, geometrier og dempede medium ble undersøkt. For hvert scenario, ble en borehullslengde på 300 cm modellert. Detektoren ble plassert 2,85 cm fra borehullsveggen lokalisert sentralt i en sonde med diameter 6 cm og denne ble flyttet nedover i borehullet med steg på 1 cm.

Anrikede soner med forskjellig høyde ble plassert i borehulls-veggen og disse ble gitt en konsentrasjon C = 1000 ppm eU. I resten av borehullet var konsentrasjonen C = 5 ppm U, tilnærmet det som ble målt i borehullene på Bjarkøya.

Som en startmodell ble det foretatt modellering av et vannfylt borehull uten uran-anrikninger (C = 5 ppm eU i hele borehullet). Forholdet mellom C og observerte tellinger pr. sekund (cps) ved detektoren, ble benyttet som kalibreringsfaktor for å konvertere tellinger pr. sekund til urankonsentrasjon (ppm eU). Kalibreringsfaktoren (33,6 ppm/cps) ble benyttet ved alle modell-scenariene.

Det ble ikke gjort noen forsøk på å modellere dempning eller spredning i bergarten i seg selv, bidrag fra langt inne i berget eller effekt av detektorens geometri. Dette for å forenkle modelleringen og fokusere på de parametrene som påvirker målingene mest.

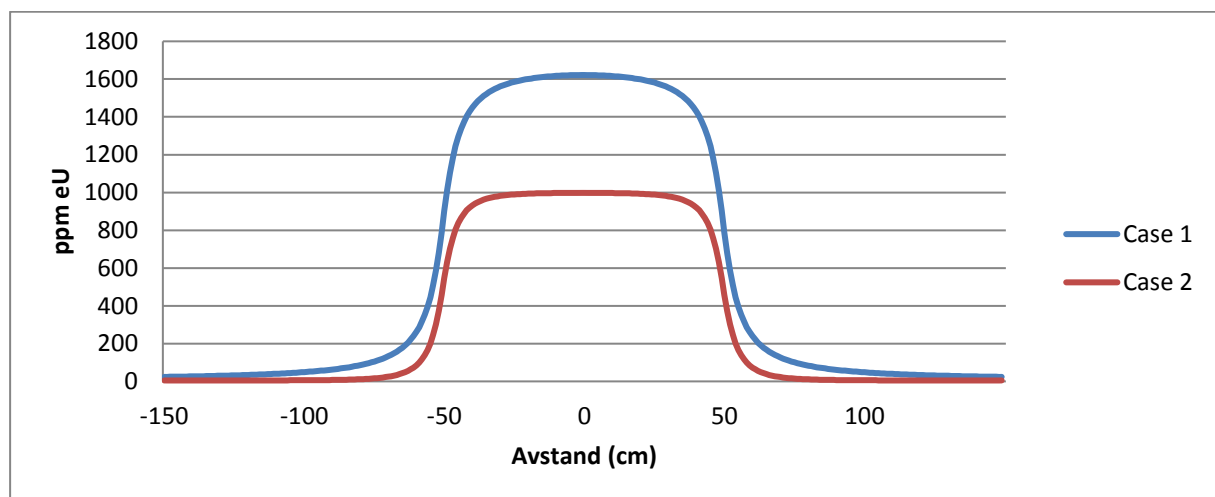
5.2 Resultater fra modelleringen

Ved denne modelleringen ble det tatt utgangspunkt i urananomalien ved dyp 65,6 m i Bh 3 (se Figur 7). Anomalien viser en toppverdi på 1000 ppm U og en halvverdi-bredde på ca. 40 cm. Vinkelrett på borehullet ble det lagt inn en plate med uran-konsentrasjon 1000 ppm. Sonens bredde, form og type dempning ved de forskjellige modellene var som vist i tabell 4.

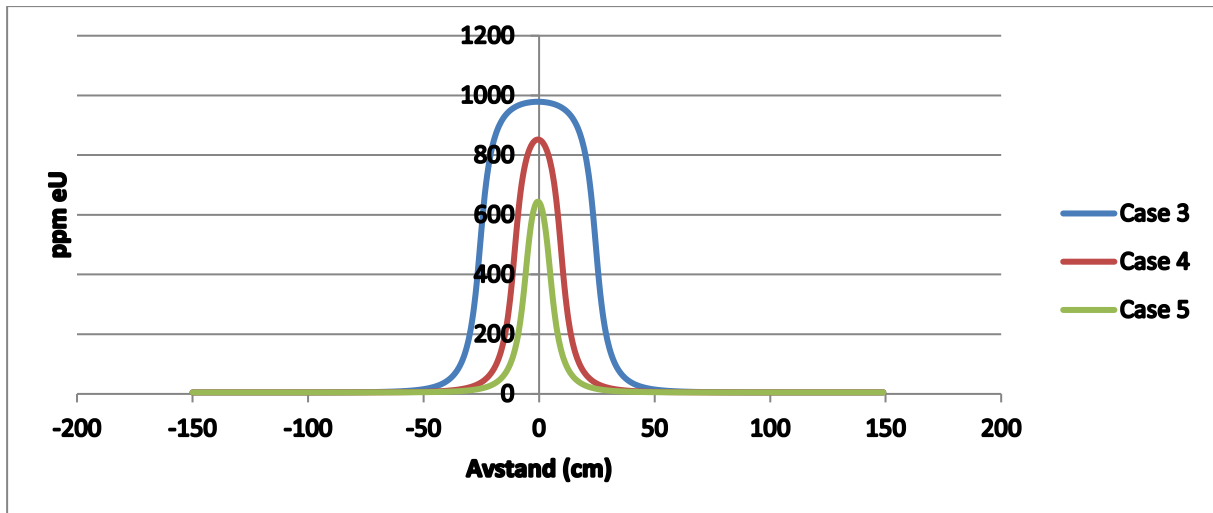
Tabell 4: Forskjellige modeller som er testet ut for å forklare målte urananomali i Bh 3.

Modell nr.	Bredde (cm)	Form	Type dempning
1	100	Firkant	Ingen
2	100	Firkant	Bare vann
3	50	Firkant	Bare vann
4	20	Firkant	Bare vann
5	10	Firkant	Bare vann
6	200	Gaussisk, sigma 50 cm	Bare vann
7	200	Gaussisk, sigma 21,2 cm	Bare vann

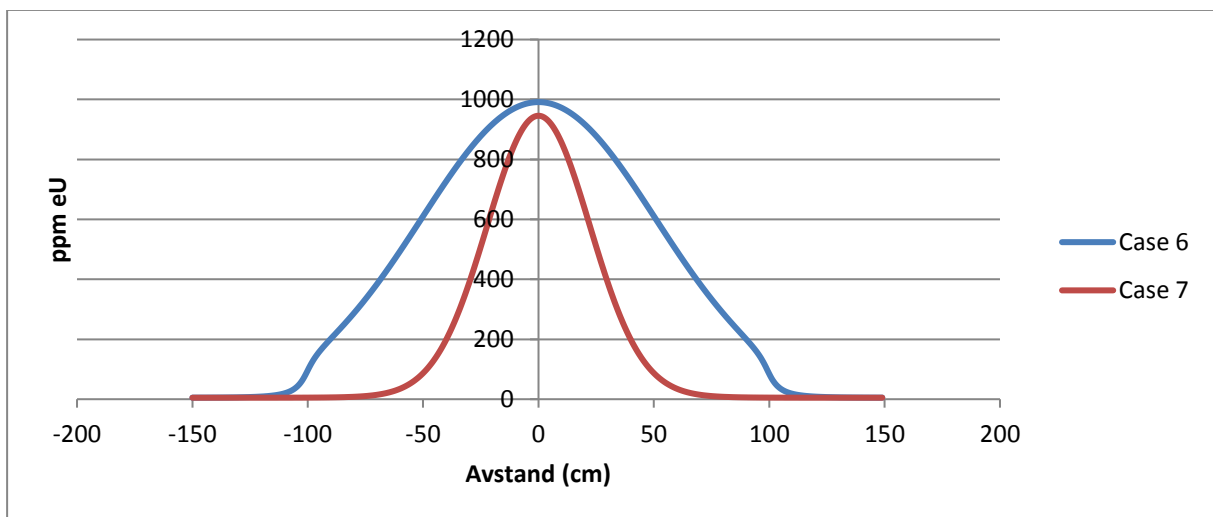
Firkant-form innebærer at urankonsentrasjonen går fra en basisverdi på 5 ppm opp til 1000 ppm og ned til basisverdi brått mens Gaussisk form innebærer en gradvis økning til 1000 ppm og tilsvarende reduksjon når sonen er passert. Gaussisk form og sigma lik 50 cm gir en halvverdibredde på 118 cm mens sigma lik 21,2 cm gir halvverdibredde på 50 cm. Dempning av gammastrålene gjennom berg er betydelig større enn i vann, og for å forenkle modelleringen er det bare vurdert dempning i vannet i borehullet. Resultatene fra modelleringen er vist i figurene 10, 11 og 12.



Figur 10: Modellens respons for en 100 cm bred uran-anriket sone (1000 ppm eU), uten (Modell 1) og med (Modell 2) effekten av dempning i borehullets vann.



Figur 11: Modellens respons for 50 (Case 3), 20 (Case 4) og 10 (Case 5) cm tykk uran-anrikt sone (1000 ppm eU) med effekt av demping i borehullets vann.



Figur 12: Modellens respons for gaussisk-modellert uran-anrikt sone med toppverdi 1000 ppm eU og halvverdbredde 112 cm (Case 6) og 50 cm (Case 7).

5.3 Diskusjon og konklusjon

Skarp overgang fra normal til forhøyet urankonsentrasjon (Case 1 og Case 2, Figur 10) viser en skarpere detektorrespons enn hva de virkelige målingene viser (Figur 7), og modellbredden på 100 cm er alt for høy.

Smalere anrikede soner (Case 3, 4 og 5, Figur 11) viser resultater mer i samsvar med målte data. Modellen med 50 cm bred sone (Case 3) viser en toppverdi på 1000 ppm og en halvverdbredde på ca. 50 cm og stemmer derved bra med målte anomalier (se Figur 7). De to andre modellene med sonebredde 20 cm (Case 4) og 10 cm (Case 5) viser for liten halvverdbredde og for lav toppverdi og forklarer derved ikke den målte anomaliformen (Figur 7).

En modell med gradvis økende og avtagende konsentrasjon, Gaussisk fordeling med sigma 50 cm (Case 6, Figur 12) gir en større halvverdbredde (> 100 cm) enn hva målingene viser, men toppverdien stemmer (1000 ppm). Modellen med Gaussisk

fordeling med sigma 21,2 cm (Case 7) gir en halvverdibredde på ca. 40 cm men med noe lavere toppverdi enn hva målingene viser (945 ppm).

Ut fra denne modelleringen kan en konkludere med at modellene kalt Case 3 og Case 7 stemmer best med formen og toppverdien på den høyeste målte urananomalien. Den høyeste målte urananomalien kan trolig forklares med en modell der sonens bredde er ca. 50 cm, toppkonsentrasjonen på ca. 1000 ppm eU men at konsentrasjonen avtar gradvis ut fra høyeste verdi.

6. RESULTATER FRA ET NYTT KJERNE-BOREHULL

For å finne ut hva for type materiale som viste så store radioaktive anomalier besluttet NGU på forsommeren 2018 å kjerne-bore ett kort hull på 20 m rett ved siden av brønn Bh 4 der uranrikt materiale var påvist mellom 8 og 18 meters dyp (Figur 8).

6.1 Borelokaltet og utførelse

Boringen av kjerneborehull 3 (KH-3) ble utført med NGUs lastebilmonterte LITO-rigg (se figur 13). Borehullet er plassert 5.6 m sørøst fra borebrønn Bh4 ved koordinat 562782N – 7653227Ø (UTM sone 33W). Hullet er boret vertikalt ned til 20 m i løpet av en dag. Kjernediameter er 36 mm. Det ble først boret 7 m i løsmasser og deretter ble det tatt opp 13 m med kjerner. Bilder av kjernematerialet er vist i vedlegg 5.



Figur 13: NGUs LITO-rigg ved grafittundersøkelser i Vesterålen sommeren 2018.

6.2 Geokjemiske analyser

Kjerneprøvene ble analysert med bærbar XRF (NITON XL3T GOLDD+ fra Thermo Scientific). På grunn av mye oppknusing (se vedlegg 5) og lite sammenhengende kjerner ble måletettheten noe tilfeldig. Totalt ble det foretatt 172 analyser som gir en gjennomsnittlig målepunktavstand på 7,5 cm. Målepunktavstanden var minst i soner anriket på uran. Måletiden var 4 x 10 s, totalt ca. 40 s for hver måling (se vedlegg 6). Instrumentet kan analysere på i alt 41 elementer fra Mg og opp i atomvekt til U. Analyser på et utvalg av disse (U, Th og K) er vist i vedlegg 6. En komplett analyseliste kan skaffes ved henvendelse til NGU.

Deteksjonsgrensen for U, Th og K med XRF er ikke fast, men avhengig av sammensetningen av elementer i prøven. For å få et bilde av deteksjonsgrensen er det foretatt en enkel analyse. I tabell 5 er maksimums- og minimumsverdier for konsentrasjoner av U, Th og K listet. I tillegg angis antall analyseverdier som tilfredsstillende to forskjellige kvalitetskrav. Et moderat krav sier at standardavviket ikke bør være større enn 33 % av måleverdi mens et strengere krav er at standardavviket ikke overstiger 25 % av måleverdi. Minste analyseverdier for de tre elementene der disse to kravene er innfridd er også listet i tabell 5, og disse benyttes senere som en nedre kvalitets-kontrollert deteksjonsgrense.

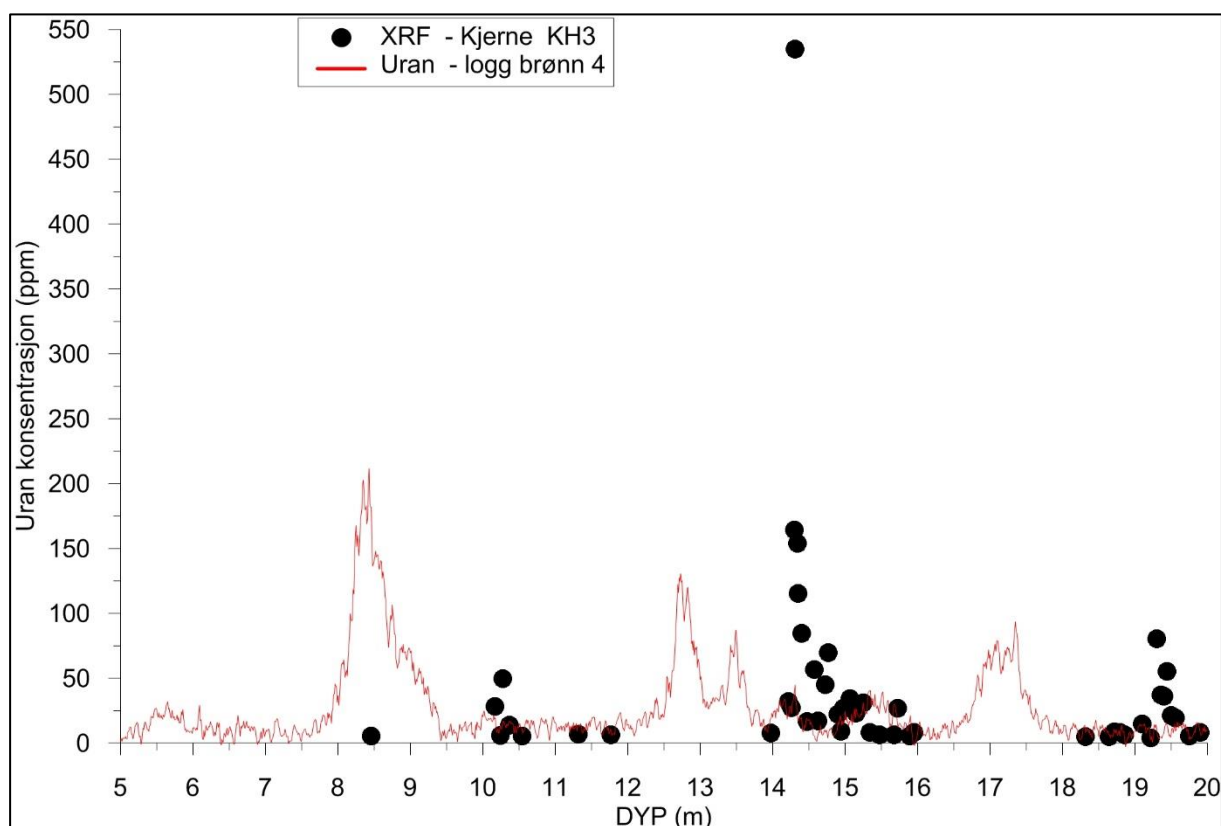
Som det fremgår av tabell 5, er det ikke alle analyser som viser verdier over instrumentets deteksjonsgrense (Limit of detection, LOD), 61 (35 %) for U, 15 (9 %) for Th og 115 (67 %) for K. Mer interessant er hvor mange som tilfredsstillende kvalitetskravene beskrevet ovenfor, og hvor lave verdier er det mulig å detektere ved de to kvalitetskravene. For U er det 39 analyser som tilfredsstillende kravet til 33 % relativt standardavvik, og minimum måleverdi er på 4,1 ppm. Bare 30 prøver tilfredsstillende strengeste kvalitetskrav med relativt standardavvik på 25 %, og minimum måleverdi er 8,4 ppm. Ut fra dette konkluderes det med at ved moderate kvalitetskrav kan en detektere pålitelige U-konsentrasjoner ned til ca. 5 ppm, mens ved strengeste kvalitetskrav er grensen for pålitelige konsentrasjoner i underkant av 10 ppm. Tilsvarende tall for Th er ca. 10 ppm og ca. 20 ppm. For K er laveste målte konsentrasjon 1,6 % (16357 ppm) mens laveste pålitelige måleverdi er 2,6 %, og denne tilfredsstillende også strengeste kvalitetskrav. Dette betyr at en kvalitets-kontrollert deteksjonsgrense for K kan settes til 2,5 %.

Tabell 5: Statistikk for XRF-analysene på kjernematerialet. Se tekst for detaljer.

Tema	Uran	Thorium	Kalium
# måleverdier totalt	172	172	172
# måleverdier > LOD (Limit of detection)	61	15	115
Målt maksimumskonsentrasjon (ppm)	535	46	73976
Målt minimumskonsentrasjon (ppm)	2,9	9,5	16357
# måleverdier med relativ SDEV < 33 %	39	6	67
Minimumsverdi (ppm) ved relativ SDEV < 33 %	4,1	13,1	26505
# måleverdier med relativ SDEV < 25 %	30	4	48
Minimumsverdi (ppm) ved relativ SDEV < 25 %	8,4	20,7	26505

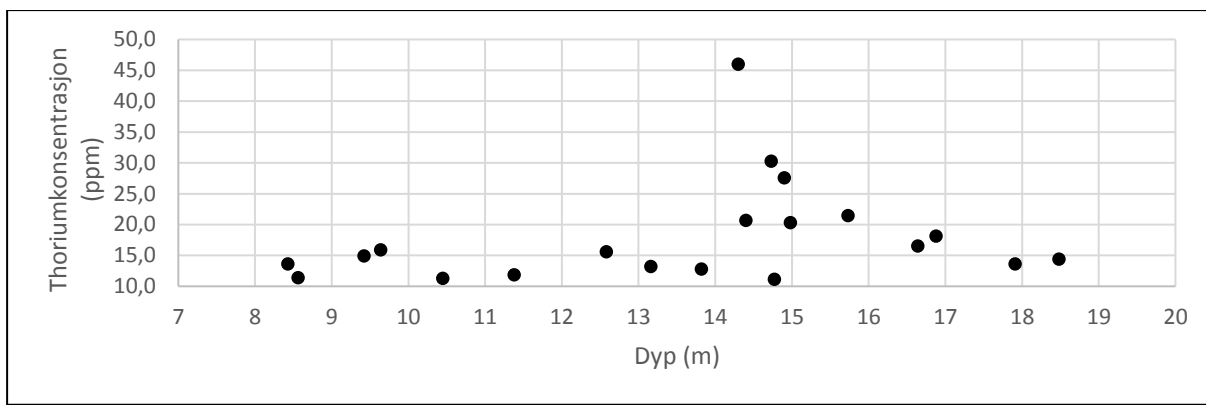
Analyseverdier for U, Th og K målt med bærbar XRF på kjerneprøver fra KH-3 er vist grafisk i figurene 14, 15 og 16. I disse figurene er alle prøver som ikke tilfredsstillende et moderat kvalitetskrav (relativt standardavvik < 33%) utelatt.

Figur 14 viser anriket innhold av uran i tre soner, mellom 10 og 12 m, mellom 14 og 16 m og mellom 18 og 20 m i KH-3. Antall soner stemmer godt med hva som ble påvist i borebrønn Bh 4 men sonene kommer i forskjellig dyp og med variasjoner i uran-konsentrasjonen. Dette viser at urananrikningen er inhomogen både med hensyn på konsentrasjon og posisjon. KH-3 ligger 5,6 m sørøst for Bh 3 og det ser ut til at U-anrikningene her faller slakt ($15^\circ - 20^\circ$) i denne retningen. Dersom en stiller strengeste kvalitetskrav (relativt standardavvik $< 25\%$) blir sonenes tykkelse vesentlig redusert. Høyeste måleverdi er på 535 ppm, mens det i Bh 4 ble målt i underkant av 200 ppm uran. Urankonsentrasjonens bakgrunnsnivå ligger på mindre enn 5 ppm noe som stemmer relativt godt med loggingen i Bh 4 (Figur 8). Analysene på kjernematerialet bekrefter at de høye urananrikningene opptrer i relativt tynne soner, men at det kan være anrikninger med mektighet opp mot to meter.



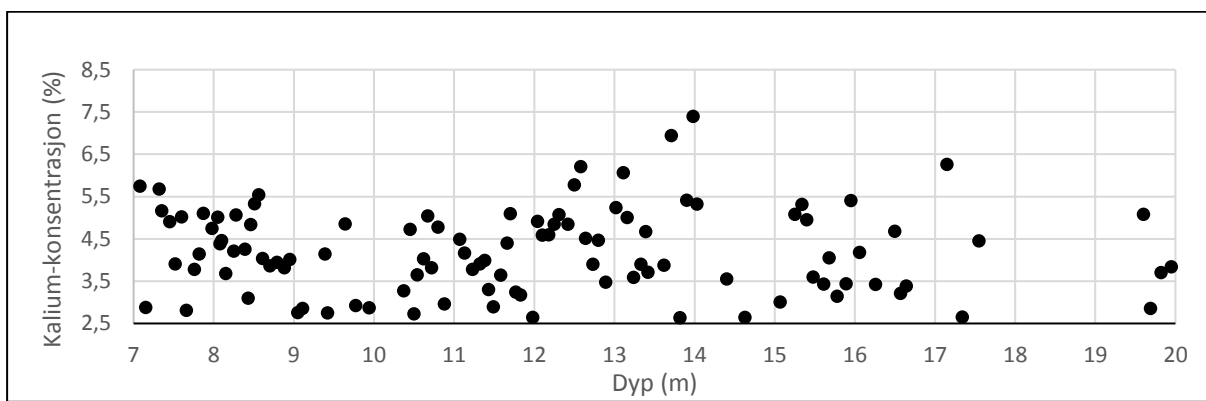
Figur 14: Pålitelige U-konsentrasjoner målt med bærbar XRF på kjerneprøver fra KH-3 (svarte punkter) og analysert U-konsentrasjon i Bh 4 (rød linje).

Figur 15 viser målt thoriumkonsentrasjon i KH-3 med moderat kvalitetskrav (relativt standardavvik $< 33\%$). Få måleverdier (20 stk.) tilfredsstillende et moderat kvalitetskrav og enda færre strengeste kvalitetskrav (6 stk.). Dersom en benytter strengeste kvalitetskrav, som gav en pålitelig deteksjonsgrense på 20 ppm Th, er det bare sonen fra 14 til 16 meters dyp som viser pålitelige måleverdier. Dette er også i overensstemmelse med borehulls-loggingen som bare stedvis viser anrikning av thorium i uran-anrikede soner (Figurene 7 og 8).



Figur 15: Pålitelige Th-konsentrasjoner målt med bærbar XRF på kjerneprøver fra KH-3.

Figur 16 viser K-analyser som tilfredsstillende både det moderate og det strengeste kvalitetskravet. Konsentrasjonen varierer fra mindre enn 2,5 % til en maksimumsverdi på ca. 7,5 %. De høyeste urankonsentrasjonene (> 30 ppm, ved dyp 10,28 m, 14,22 – 15,25 m og 19,3 – 19,56 m) ser ut til å falle sammen med områder med lave kaliumkonsentrasjoner (< 3,5 %). Dette indikerer at anrikningen av uran også kan være koblet til en forvitring av kalium og ikke en ren hydrotermal prosess.



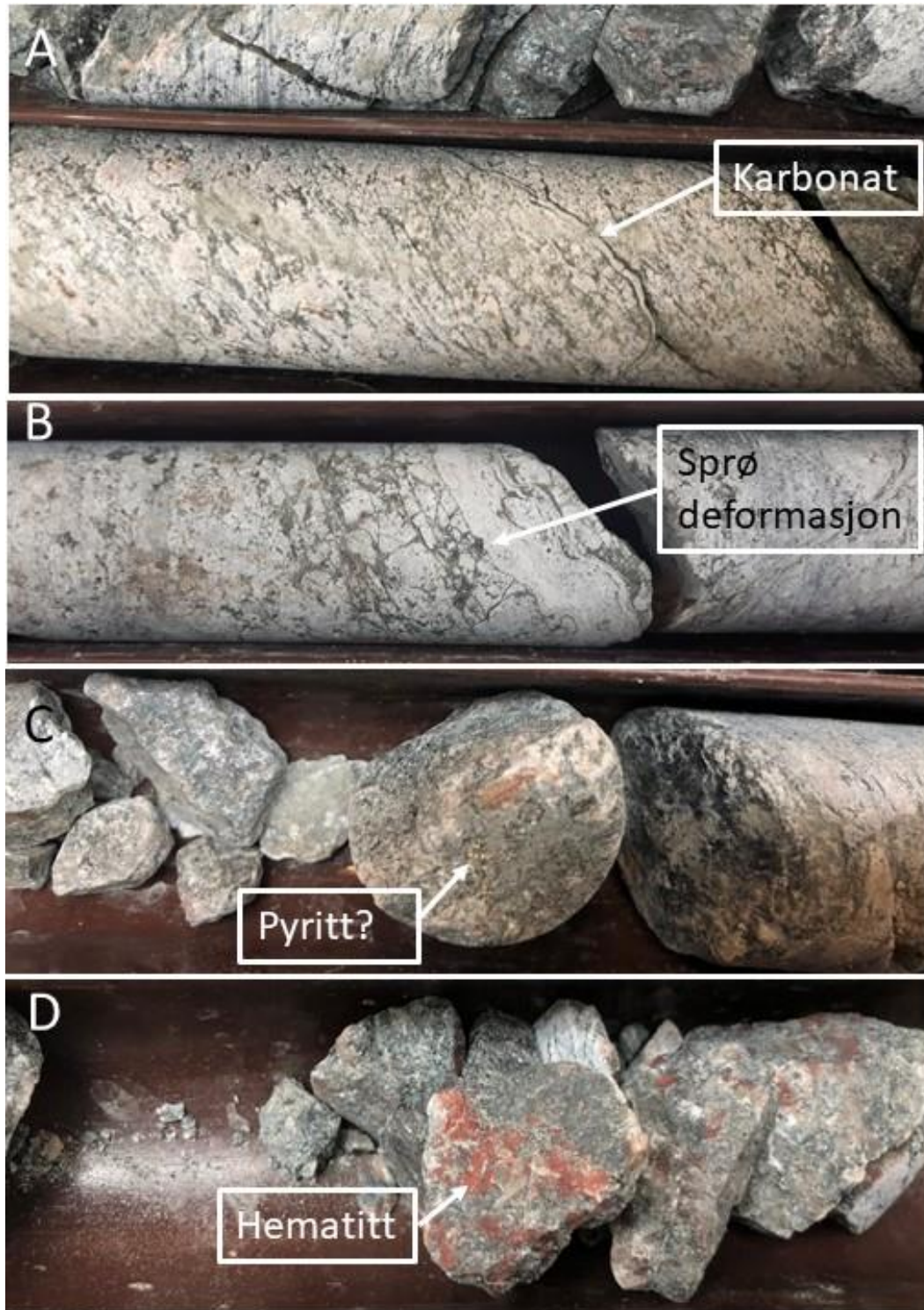
Figur 16: Pålitelige K-konsentrasjoner målt med bærbar XRF på kjerneprøver fra KH-3.

6.3 Geologisk beskrivelse av borekjernene

Bergarten ved tunnelpåhugget på Bjarkøya ble opprinnelig beskrevet som svakt deformert granittisk gneis (Iversen 2012). Senere har noe mer detaljert kartlegging påvist noe skifrig porfyramfibolitt og at den granittiske gneisen er både skifrig og stedvis opptre som breksje (Karlsen og Iversen 2013). Granitter har vanligvis et noe forhøyet innhold av uran, vanligvis mellom 2 og 10 gram pr. tonn, eller ppm. I tilfellet ved Bjarkøya er det ved borehulls-logging påvist verdier opp mot 1000 ppm uran (Figur 7) og ved XRF-analyser på borekjerner over 500 ppm (Figur 14). Borekjernene, 13 m, ble inspisert og beskrives her av Arne Bjørlykke.

Granitten har i markerte soner blitt utsatt for skjærdeformasjon. Et godt eksempel er figur 17A, hvor granitten har utviklet en markant skifrighet og dannelse av små skjærlinser. Det kan også observeres en mindre sone med sprø deformasjon i kjerne-materialet (Figur 17B). Kalifeltspaten får et mer rødlig preg i sonen trolig på grunn av hydrotermal omvandling.

I sonen er granitten omvandlet til et finkornet grønnlig mineral som sannsynligvis er kloritt. Denne opptrer sammen med sulfider sannsynligvis er det vesentlig pyritt, Figur 17C. I en sen fase i skjærsonen opptrer karbonat som kutter strukturene i sonen. Hematitt opptrer også som en senere fase (Figur 17D). Denne fasen kan muligens knyttes til sen forvitring av granitten, muligens relatert til gjennomstrømmende grunnvann. Urananrikningen kan kobles til en svak rødfarging av kjernematerialet (Vedlegg 5) og til soner med lavere kaliuminnhold (Figuren 14 og 16).



Figur 17: Bilder av kjernematerialet fra KH-3. A) Skifrig granitt (granittisk gneis) med skjærlinjer og senere karbonatfylling ved dyp 13,4 m, B) Sprø deformasjon ved dyp 18,4 m, C) Mineralisering av pyritt (?) ved dyp 17,15 m og D) Senere mineralisering av hematitt ved dyp 19,9 m.

6.4 Potensielle problematiske uranførende bergarter andre steder

På grunnlag av inspeksjon av borekjernene er det sannsynlig at hovedårsaken til de høye uranverdiene på Bjarkøya er knyttet til hydrotermale avsetninger i en eller flere kryssende skjærsoner og avsatt sammen med sulfider. Anrikning av uran på grunn av dypforvitring kan ikke utelukkes, men det kreves omfattende analysearbeid for å avklare dette. Orienteringen av skjærsonene er sammenfallende med både kaledonsk orogenese og senere mesozoisk riftstrukturer (F.S. Karlsen, personlig meddelelse 2018). Loggingen av KH-1 viste stedvis noe forhøyet IP-effekt (Figur 6) noe som kan skyldes svake sulfidmineraliseringer slik en også kunne se i KH-3. Urankonsentrasjonene uten sulfider kan være relatert til sprekker som har fått tilført oksygenrikt overflatevann. Vannet kan løse opp uranoksyd i skjærsonen og avsett uranet på overflaten av jernhydroksider på sent avsatte ganger i granitten. Mer detaljerte kjemiske og mineralogiske analyser må til for å gi en mer detaljert beskrivelse av de kjemiske og mineralogiske prosessene.

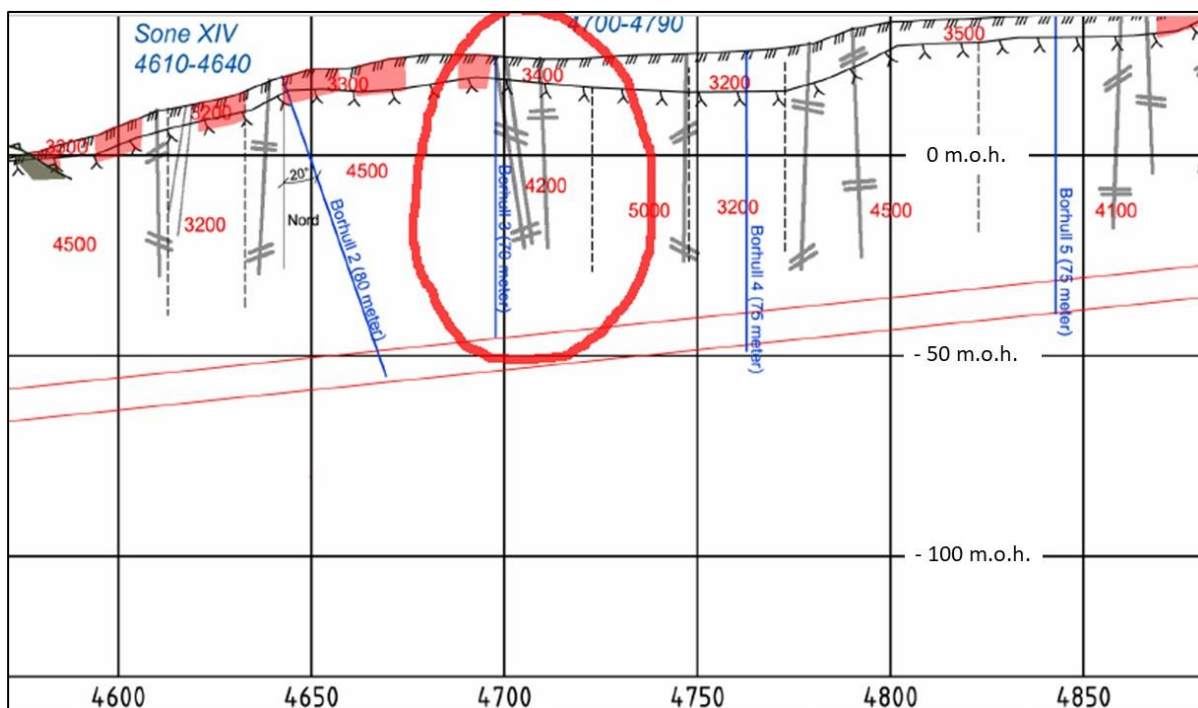
Urananrikninger koblet til skjærsoner som det en finner i KH-3 på Bjarkøya, og trolig også i tunnelen, finnes flere steder i Norge, bl.a. på Bidjovagge i Finnmark hvor det også finnes gull (Olesen og Sandstad 1993, Henderson et al. 2015). Ved tunnelbygging i granittiske bergarter koblet til skjærsoner bør en være oppmerksom på mulige problemer knyttet til anrikninger av radioaktive elementer og spesielt uran.

7. REGISTRERINGER FORETATT UNDER TUNNELDRIVING

Når den høye radioaktiviteten i den granittiske gneisen på Bjarkøya ble kjent for geologer ved tunnelanlegget, ble mulige konsekvenser for tunnelarbeidere og faglige årsaker diskutert med NGU. Dersom den høye radioaktiviteten påvist lokalt i Bh 3 opptrådte i større volum på stoff, kunne dette utgjort et arbeidsmiljøproblem. Ved større volum med forhøyet radioaktivitet, kunne en også hatt et deponeringsproblem. Det ble derfor besluttet å låne et gammaspektrometer med mulighet til å måle konsentrasjonene av K, U og Th og benytte disse måleverdiene til å beregne en strålingsdose. I tillegg ble det foretatt måling av radonkonsentrasjon i luften inne i tunnelen. Alle observasjoner ble lagret og sendt videre til NGU.

7.1 Målte konsentrasjoner av U, Th og K på stoff

Målte konsentrasjoner av eU, eTh og K på tunnelstoff er vist i vedlegg 3. Ut fra disse data ble også doserate beregnet, og en størrelse som angir om det radioaktive materialet kan være deponeringspliktig. Målingene ble foretatt med instrumentet Gamma surveyor II produsert av GF Instruments. Dette instrumentet måler med en ca. 20 cm³ BGO-krystall (Barium-Germanium-Oksyd) hvor usikkerheten i målingene oppgis til +/- 0,14 % for K, +/- 0,8 ppm for U og +/- 1,5 ppm for Th. Målingene ble foretatt i perioden oktober 2016 til januar 2017 og strekker seg fra ca. PEL 4665 til PEL 5102. Dette dekker området hvor brønnene Bh 2 til Bh 6 befinner seg (se Figur 18). Bh3, hvor den høyeste målte urankonsentrasjonen ble målt på dyp 65,6 meter, er plassert ved PEL4700 like til side for tunnelen og den høye urananomalien i Bh 3 ligger ca. 5 m over tunnelhengen.



Figur 18: Plassering av borehull og indikerte lavhastighetssoner i forhold til PEL-nummer i tunnelen. Bh 3 ligger innenfor den røde sirkelen modifisert fra vegvesenets tegning V001e, (Karlsen og Iversen 2013).

Høyeste målte U-konsentrasjon på tunnelstuf er 111,5 ppm og denne ble målt ved PEL 4704 (se vedlegg 3), dvs. rett ved Bh 3. Forhøyde urankonsentrasjoner ble også målt ved PEL 4681 (22,6 ppm), 4693 (19,4 ppm) og 4725 (6,2 ppm). Selv om anomalien i Bh 3 lå ca. 5 m over tunnelheng, er det påvist forhøyede verdier i tunnelnivå, og disse kan følges i en lengde på ca. 50 meter. En ny urananrikning opptrer ved PEL 4740 (36 ppm) og PEL 4746 (59,3 og 88,8 ppm). Også denne ser ut til å fortsette til begge sider, men PEL-nummer er ikke angitt. Av de 86 målingene som ble foretatt, kan 13 (15 %) karakteriseres som forhøyde verdier over 10 ppm eU. Siden det er så stor avstand mellom målepunktene er det umulig å si om urananrikningene er sammenhengende.

Målte Th-konsentrasjoner viser mer moderate verdier. Høyest målte verdi er 39,9 ppm målt ved PEL 4918. Rundt Bh 3 opptrer normale Th-konsentrasjoner (5 – 12 ppm) slik en kan forvente i en granittisk gneis. Sporadiske moderate anrikninger av Th er i samsvar med det borehulls-loggingen viser (Figurene 7 og 8).

Målt K-konsentrasjon på stuf varierer fra mindre enn 1 % og opp til en maksimalverdi på 12,4 %. Sistnevnte synes meget høyt og kan være en effekt av feilkalibrering, eventuelt feil korreksjon av Compton-effekt. K-analysene vurderes derfor som usikre.

Figur 19 viser et bilde fra stufen ved PEL 4717. Omvandlingssone med den røde fargen påvist i KH-3 ble også observert i tunnelen ved PEL 4717 og PEL 4720. Dessverre var ikke gammaspesktrometeret tilgjengelig for målinger her. Rødfargingen opptrer på sprekker i til dels dårlig fjell, og den laterale utstrekningen er relativt liten. At det er påvist U-anrikninger flere steder i tunnelen uten at en finner den karakteristiske rødfargen viser at U kan opptre uten en synlig signatur.



Figur 19: Bilde fra stoffen ved PEL 4717. Rødfarge (Hematitt) opptrer på begrensede flater som sprekkebelegg i til dels dårlig fjell.

Vurdering:

Målinger med gammaspektrometer på tunnelstoff viser samme mønster som ved loggingen av borehullene. Uran er anriket i soner, men påvist maksimalkonsentrasjonen er moderat (111,5 ppm). Målepunktavstanden er relativt stor (opp mot 15 m) og vi vet at U-anrikningen opptrer uregelmessig. Det ble ikke foretatt måling på soner med karakteristisk rødfarge. Dette betyr at det er rom for større konsentrasjoner mellom målepunktene. Målingene på tunnelstoffet er ikke tilstrekkelig til å få gode representative målinger av det radioaktive materialet.

Det ble ikke foretatt målinger av eU, eTh og K i andre deler av tunnelen. Det er derfor uklart om anrikninger av U finnes flere steder utenfor det målte området fra PEL 4665 til PEL 5102.

7.2 Måling av doserate

På grunnlag av målte konsentrasjoner av U, Th og K er også doserate (DR) beregnet, både uttrykt i nGy/h (nanoGray pr. time) og nSv/t (nanoSievert pr. time), se vedlegg 3. Som en anbefaling fra firmaet Gammadata ble det satt en grenseverdi på 440 nSv/t for akseptabel doserate. Grenseverdien ble valgt ut fra den gjennomsnittlige doseraten i tunnelen (110 nSv/t) og ganget med fire. Denne ble overskredet ved to anledninger i det tilgjengelige datamaterialet, og maksimal stråledose ble målt til 484 nSv/t (vedlegg 3). Doserate beregnet fra målte konsentrasjoner av U, Th og K på flater, kan være for lav i tunneler og bergrom der stråling kan komme fra alle kanter (se Kapittel 8). Denne doseraten gjelder ekstern stråling og tar ikke hensyn til stråling som kommer fra innsiden av kroppen (lungevev).

Vurdering:

I følge Strålevernforskriften (Helse- og Omsorgsdepartementet 2017) skal virksomheter sørge for at all stråleeksponering holdes så lav som praktisk mulig, og for yrkespersonell skal ikke effektiv dose overskride 20 mSv pr. år. Dersom en medarbeider hadde arbeidet et helt år (1800 timer) under den maksimale strålingsdosen målt i tunnelen (484 nSv/t), ville vedkommende blitt utsatt for en effektiv dose på 0,87 mSv i arbeidstiden. Det er imidlertid uklart om det mellom målepunktene rapportert i vedlegg 3 og i tunnelen for øvrig kunne være høyere verdier. Loggingen av Bh 3 viste en maksimumsverdi som var 9 ganger høyere U-konsentrasjon (980 ppm) enn det som målingene i tunnelen viste (111,5 ppm), men viste samtidig at de U-rike sonene hadde liten mektighet. Observasjoner på tunnelstufen indikerer at uran kun er anriket på sprekker (Kapittel 7.1).

Arbeiderene i Bjarkøytunnelen ble sannsynligvis ikke utsatt for uakseptable strålingsdoser.

7.3 Måling av radon i luft

Radon i tunnelluft ble målt med instrumentet «Airthings Corentium Plus» fra firmaet Gammadata (2018) på utvalgte steder og til utvalgte tider fra november 2016 til juli 2017 (vedlegg 4). Det var gjennomslag på tunnelen 30. januar 2017 og radonmålinger før dette er utført med full ventilasjon unntatt målingen rett etter juleferien (3. januar 2017). Målinger etter 30. januar ble foretatt med uregelmessig ventilasjon der viftene sto i perioder, men gikk det meste av tiden.

Målinger i tunnelen rundt Bh 3 (PEL 4700, se Figur 18) viser moderate konsentrasjoner av radon i tunnelluften (31 og 42 Bq/m³, vedlegg 4). Alle disse målingene er foretatt med full ventilasjon og viser som forventet lave verdier. Målinger i pumpeump i bunnbrekket av tunnelen (ved PEL 3835) viser imidlertid til dels meget høye verdier med et maksimum på 919 Bq/m³ den 18. juli 2017. Disse målingene ble foretatt etter gjennombrudd med begrenset ventilasjon og 30 til 40 m vinkelrett fra senterlinjen i tunnelen. Ventilasjonen her var trolig ikke så god som i hovedløpet av tunnelen. Høyeste verdi, 2648 Bq/m³, ble imidlertid målt som gjennomsnitt over 7 dager i juleferien. Dette er sannsynligvis en effekt av at ventilasjonen var slått av gjennom en ukes juleferie.

Anrikningen av radon i bunnbrekket kan skyldes to forhold; radon er tyngre enn luft og vil under stabile forhold anrikes i dypet og radon er løselig i vann og kan delvis være transportert til pumpeump med grunnvannet. Pumpeumpen ligger vinkelrett på tunnellopet og den uregelmessige ventilasjonen etter tunnelgjennomslag hadde trolig begrenset virkning ved målestasjonene.

Vurdering:

Ideelt sett bør det være et mål om at de generelle anbefalingene for boligrom følges også i tunneler og bergrom (Arbeidstilsynet, 2018). Dette betyr at radonnivået holdes så lavt som mulig, tiltak bør gjennomføres dersom nivået overstiger 100 Bq/m³ og etter tiltak bør nivået være så lavt som praktisk mulig og under grenseverdien på 200 Bq/m³. De få målingene som ble foretatt med full ventilasjon under selve tunneldrivingen i det mest radioaktive området (PEL 4700) viser som forventet lave verdier. Rn-konsentrasjonen ved pumpeump i tunnelens lavbrekk etter gjennomslag var klart over anbefalt verdi.

7.4 Radioaktivt støv

Radioaktive bergarter gir radioaktivt støv ved sprengning. Støvpartikler kan sette seg på arbeidernes lungevev og α -, β - og γ -stråling fra hele spaltingsrekken fra U^{235} , U^{238} og Th^{232} ned til stabilt Pb^{206} , Pb^{207} og Pb^{208} vil skade lungevev. Det er altså ikke bare datterprodukter av radon (Rn^{219} , Rn^{220} og Rn^{222}) som er aktive men også mødrene til radon. Representant fra firmaet Gammadata, som lånte ut gammaspektrometeret, påpekte at det største helsemessige problemet ved Bjarkøytunnelen kunne være støv, da dette kan inhaleres fra lufta. Gammadata anbefalte på forhånd bruk av støvmaske og et større fokus på bruk av vann for å redusere støvdannelsen. Støvmaske ble bare sporadisk benyttet av enkeltpersoner ved tunneldrivingen.

Vurdering.

Radioaktivt støv må tas på alvor. Forfatterne kjenner ikke til at dette problemet har vært studert i tunnelsammenheng. Det burde iverksettes et forskningsprosjekt som setter fokus på dette problemet. Uansett, bruk av støvmaske og vanning for å dempe støvplagen bør være obligatoriske tiltak for å redusere radoneksponeringen ved tunnelarbeider i radioaktive bergarter.

7.5 Deponeringspliktig radioaktivt avfall

I vedlegg 3 er også beregnet en faktor som avgjør om det radioaktive materialet kan være deponeringspliktig på grunnlag av spesifikk aktivitet (se avsnitt 2.4). Bare ved tre av i alt 86 målinger er summen av U-, Th- og K-konsentrasjonen så høye at kravet for deponeringspliktig radioaktivt avfall basert på aktivitet overskrides. I to av disse tilfellene er materialet deponeringspliktig utelukkende på grunn av uran-konsentrasjonen. For at materialet skal være deponeringspliktig må også et krav til total aktivitet overskrides, dvs. det må være et visst volum radioaktivt materiale.

Vurdering:

Målepunktettheten er for liten til å få full forståelse for hvor store volum radioaktivt avfall som et tatt ut av tunnelen. Ut fra resultatene målt i borehull (Bh 3, Bh 4 og Bh 5) og på kjernematerialet (KH-3) indikeres relativt tynne soner. Det kan tyde på at sonene anriket på uran kan ha en viss horisontal utstrekning, men hvis tykkelsen er på dm-skala, vil dette ikke utgjøre noe volum av betydning og tunnelmassen er ikke deponeringspliktig. I følge Forurensingsloven er det imidlertid krav om at flytting av masser med mer enn 8 ppm U eller 25 ppm Th skal klareres av Statens Strålevern (Lovdata 2010, §4 og Kapittel 2.4 i denne rapporten).

7.6 Oppsummering og konklusjon

Måledata NGU har fått fra drivingen av tunnelen til Bjarkøya bekrefter målingene foretatt i borehull (Kapittel 4) og på kjernemateriale (Kapittel 6). Soner anriket på uran er påvist. Det er ikke indikasjoner på tilsvarende anrikninger på thorium. Uran-konsentrasjonen viser store variasjoner over korte avstander i borehull. Sonene ser ut til å være mer utholdende langsetter tunneltracéen.

Det er påvist doserater over en anbefalt verdi, men den effektive dosen for tunnelarbeidere overstiger ikke det absolutte grensen på 20 mSv i løpet av ett år.

Det er målt til dels høye Rn-konsentrasjoner i tunnelluften i et arbeidsrom i tunnelens dypeste punkt hvor ventilasjonen trolig hadde begrenset effekt. De høyeste verdiene kan knyttes til stans i ventilasjonen. Under ordinær ventilasjon er det i et område med forhøyet U-innhold (opp til 111,5 ppm) målt akseptable radonverdier i tunnelluften noe som viser at ventilasjonen virker.

Det største helsemessige problemet knyttet til radioaktive bergarter er trolig støv som kan sette seg i tunnelarbeidernes lunger. Ved tunnelen til Bjarkøy, Kvernsundtunnelen, ble det anbefalt bruk av støvmaske og satt fokus på vanning for å redusere støvplagen. Dette problemet bør tas på alvor og studeres nærmere.

Ved tre tilfeller er konsentrasjonen av U, Th og K så høy at bergarten overskrider grensen for deponeringspliktig radioaktivt avfall basert på spesifikk aktivitet (konsentrasjon). I to av disse tilfellene er materialet deponeringspliktig utelukkende på grunn av U-konsentrasjonen. For at et materiale skal være deponeringspliktig må også et krav til totalaktivitet overskrides. Siden urananrikningene opptrer i tynne soner, var volumet av urananriket materiale lite og etter all sannsynlighet var tunnelmassene fra Kvernsundtunnelen ikke deponeringspliktig. Det er i denne sammenheng ikke vurdert om krav til søknadsplikt for flytting av massene er overskredet (Lovdata 2010).

Ut fra det en vet om radioaktiviteten i Bjarkøytunnelen overskrides noen anbefalte grenseverdier, men ingen absolutte krav. Ut fra det en i dag vet, opptrer forhøyde urankonsentrasjoner i tynne men kanskje lateralt utholdende soner. Uran-konsentrasjoner skifter raskt og det burde vært foretatt hyppigere målinger og ikke minst målinger i hele tunnelens lengde. Ved tunnelarbeider i granitter og granittiske bergarter, spesielt i tilknytning til skjærsoner, bør det fokuseres på mulige problemer knyttet til radioaktivitet.

8. LITTERATURSTUDIE AV RADIOAKTIVITET I BERGROM

Doserater fra eksternt stråling fra naturlig radioaktivitet i tunneler er undersøkt og rapporteres i dette kapittelet.

8.1 Bakgrunn

Ansatte som jobber i tunneler med forhøyet naturlig radioaktivitet kan være utsatt for forhøyde stråledoser fra eksternt gammastråling, innpusting av radioaktivt støv, og innpusting av radon og radonprodukter (intern stråling). Her undersøker vi muligheter for forhøyde eksterndoser fra gammastråling i tunneler hvor det kan finnes U-konsentrasjoner rundt 100 ppm i mange områder, og opp til 1000 ppm i mindre områder.

Anbefalte grenseverdier:

Dosegrensen for allmenheten er 1 mSv/år (effektiv helkroppsdose). Yrkes-eksponerte arbeidere har en høyere dosegrense: 20 mSv/år, men doser bør holdes på så lavt nivå som praktisk mulig (Helse- og omsorgsdepartement 2017). Med bruk av 2000 arbeidstimer per år får vi en tommelregel for "akseptable" doser per time:

For allmenheten: 1 mSv/år tilsvarer 0,5 uSv/t
Yrkeseksponerte: 20 mSv/år tilsvarer 10 uSv/t

8.2 Doserate fra naturlige isotoper.

Doserater 1m over en uendelig overflate som inneholder K^{40} , U^{238} og Th^{232} er gitt som:

$$D \text{ (nGy/t)} = 13.078 * K + 5.675 * eU + 2.494 * eTh \quad (1)$$

hvor K, eU og eTh er konsentrasjoner av naturlig (all) K (%), U^{238} (ppm) og Th^{232} (ppm) (IAEA 2003). U^{238} utgjør 99,3 % av all naturlig U. Med bruk av konsentrasjoner uttrykt i aktivitet for de tre elementene (Bq/kg) blir dette:

$$D \text{ (nGy/t)} = 0.04178 * K + 0.4595 * eU + 0.6040 * eTh \quad (2)$$

hvor K nå representerer aktivitet av K^{40} . Quindos et al. (2004) diskuterer variasjoner av dette forhold fra ulike studier, men variasjon i parametere ligger innenfor ca. 15 % av verdiene gitt over.

Disse doserate er beregnet ut fra en uendelig overflate. Total doserate vil være avhengig av geometri, slik at er det rimelig å forvente høyere doserate når flere overflater (f.eks. tak og vegger) bidrar til strålingen.

NGU opererte RSX-5 spektrometer i bil fra Göteborg til Oslo høsten 2016. En kort analyse av data fra et par tunneler (Eidetunnelen og Follotunnelen) viser at totaltelling og doserate (ukalibrerte) kan øke med en faktor mellom 1.5 og 2 i tunneler, sammenlignet med verdiene målt utenfor tunnelene.

Doserater fra eU

Med bruk av formler vist ovenfor kan vi beregne doserater (DR) 1m over en uendelig overflate hvor innhold er hovedsakelig eU, sammen med 10 ppm Th og 2 % K:

- a) 100 ppm U: DR = 617 nGy/t
- b) 1000 ppm U: DR = 5726 nGy/t

Dette tilsvarer 494 og 4580 nSv/t, hvis man benytter en omregningsfaktor på 0,8 Sv/Gy (Isaksson 2011). Dersom en person oppholder seg i 1800 timer i et slikt miljø, ville vedkommende blitt utsatt for en årlig strålingsdose på 1,1 mSv (100 ppm U) eller 8 mSv (1000 ppm U), noe som er høyere enn det som anbefales for allmennheten men lavere enn grensen for yrkesaktive.

8.3 Studier av doserater i tunneler og bergrom

Bochiolo et al. (2012) beregnet doserater i uranrike gruveganger i Italia på to måter:

1. Ved å bruke in-situ målinger av Th-, U- og K-konsentrasjoner og formel (1).
2. Ved å måle fult gammaspekter og integrere måleverdiene.

Det ble påvist et rimelig godt samsvar mellom disse to metodene.

Doserater på ca. 300 – 500 nGy/t ble oppnådd i områder med uranaktivitet på 500 – 900 Bq/kg (inkludert bidrag fra Th og K). Siden en konsentrasjon på 1 ppm U tilsvarer en aktivitet på 12,35 Bq/kg gir dette urankonsentrasjon på 40 – 75 ppm.

Bochiolo observerte også to ganger høyere doserater ved in-situ-målinger sammenlignet med laboratoriemålinger. Dette skyldes trolig stråling fra tunnelens tak og vegger ved in-situ-målinger, og bekrefter NGUs observasjoner fra målinger i tunneler (se Kapittel 8.2). Urankonsentrasjoner viste enda høyere forholdstall noe som kan skyldes en effekt av radon.

Hodolli et al. (2015) rapporterte årlige doser på 1,6 – 3,6 mSv, ca. 2,0 – 4,5 mGy om en benytter en omregningsfaktor på 0,8 Sv/Gy (Isaksson 2011), i gruver i Kosovo. Mesteparten av dette kom fra radon og dens datterprodukter, med ca. 20 % fra ekstern gammastråling.

UNSCEAR (1993) estimerte at ekstern strålingsdose for gruvearbeidere fra gammastråling utgjør ca. 14 – 43 % av den totale strålingsdosen og at det resterende stammer fra innånding av radon, radondøtre og radioaktivt støv (intern stråling).

8.4 Oppsummering og konklusjoner

Doserater fra gammastråling i tunneler kan på grunn av stråling fra tak og vegger være rundt en faktor 2 til 3 ganger høyere enn beregnet ut fra U-, Th- og K-konsentrasjoner for en uendelig plan overflate (dvs. fra ligningene (1) eller (2)). I områder med ca. 100 ppm U kan det derfor forventes doserate på ca. 1 uSv/t; og i områder med 1000 ppm U kan det forventes ca. 10 uSv/t. Dette blir trolig lavere dersom anriket uran

bare finnes i tynne soner som indikert ved Kvernsundtunnelen. På årsbasis (1800 timer) kan en tunnelarbeider bli utsatt for strålingsdoser fra ekstern gammastråling tilsvarende ca. 2 mSv ved en U-konsentrasjon på 100 ppm og ca. 18 mSv ved 1000 ppm U.

Beregnete doserater fra gammastråling kan utgjøre bare fra 20 til 40 % av total doserate (UNSCEAR 1993) og resten (60 til 80 %) kommer fra innpusting av radon, radon datterprodukter og radioaktivt støv. Den totale årlige strålingsdosen fra ekstern gammastråling og innpustet materiale kan da bli fra 5 til ca. 10 mSv der en har 100 ppm U i bergarten og fra ca. 40 til 100 mSv i områder med 1000 ppm U, sistnevnte klart over den øvre grense for årlig akseptert strålingsdose for yrkeseksponerte.

Stråling fra radon og støvpartikler som kan sette seg på lungevev kan være en vesentlig helserisiko og større enn strålingsdoser fra ekstern gammastråling. Problemet kan selvsagt reduseres med effektiv ventilasjon, bruk av verneutstyr og støvdemping.

9. KONKLUSJONER

Tunneldrift i bergarter med forhøyet innhold av de naturlige radioaktive elementene U, Th og K kan utgjøre et miljøproblem på flere måter. Det kan utsette tunnelarbeiderne for uakseptable strålingsdoser, uakseptable konsentrasjoner av radon og støv som setter seg på lungevev. I tillegg kan tunnelmassen etter forurensingsloven være deponeringspliktig. Utbygger plikter å holde den radioaktive eksponeringen så lav som mulig.

Ved logging av borehull ved tunnelprosjektet på Bjarkøya (Kvernsundtunnelen) ble det påvist sterkt forhøyet total gammastråling. Oppfølgende undersøkelser med gamma-spektrometer i de samme borehullene viste at denne strålingen i hovedsak var forårsaket av uran, og at maksimal konsentrasjon var på i underkant av 1000 ppm. Modellering av anomaliformen fra loggingen av borehull, viste at sonen med den høyeste U-konsentrasjonen kunne være ca. 50 cm mektig.

For å kunne avklare den geologiske historien og hvor uranet kom fra, utførte NGU en kort kjerneboring (20 m, 13 m med kjerner) der en fra før visste det var radioaktivt materiale. Analyser med bærbar XRF på kjernematerialet (172 målinger) viste at U var anriket i tre nivåer som alle var ca. 2 m mektige. Høyeste målte urankonsentrasjon var på 535 ppm og denne var omkranset av uranverdier høyere enn 100 ppm i en total mektighet på ca. 10 cm.

Logging av kjernene fra det korte borehullet bekrefter at den opprinnelige granitten i markerte soner har blitt utsatt for sterke skjærdeformasjoner, både duktil og sprø deformasjon. Granitten har utviklet en markant skifrihet og dannelse av små skjærlinser. Bergarten er omvandlet i flere faser hvorav minst en har gitt en hydrotermal anrikning av uran i soner med mektighet opp mot 2 m. Denne type skjærsone i granittiske bergarter finnes flere steder i Norge, og tilsvarende anrikninger av uran kan forekomme.

Oppfølgende undersøkelser under drivingen av Kvernsundtunnelen har stedvis påvist strålingsdoser over et anbefalt nivå. Radonkonsentrasjonen har også tidvis vært betydelig høyere enn det Statens strålevern og Helse- og omsorgsdepartementet anbefaler. Bare ved tre av i alt 86 målinger med gammaspektrometer i tunnelen viste målingene konsentrasjoner av U og Th over grenseverdier for deponeringsplikt basert på spesifikk aktivitet. For at et materiale skal være deponeringspliktig må også et krav til totalaktivitet overskrides. Siden urananrikningene opptrer i tynne soner, var volumet av urananrikt materiale trolig lite og etter all sannsynlighet var tunnelmassene fra Kvernsundtunnelen ikke deponeringspliktig.

Teoretiske vurderinger viser at å arbeide et år i et materiale med 100 ppm U ikke gir en total strålingsdose som overstiger grensen på 20 mSv. Er urankonsentrasjonen 1000 ppm, noe som anses som meget høyt, vil den årlige strålingsdose ligge klart over grenseverdien, og mer enn halvparten skyldes innpusting av radon og radioaktivt støv. Støvplagen må derfor reduseres ved bruk av luftfilter og vanning dersom tunnelmassene er tørre.

Ut fra det en vet om radioaktiviteten i Kvernsundtunnelen til Bjarkøya overskrides noen anbefalte grenseverdier, men ingen absolutte krav. Ut fra det en i dag vet, opptrer forhøyde urankonsentrasjoner i tynne men kanskje lateralt utholdende soner. Uran-konsentrasjoner skifter raskt og det burde vært foretatt hyppigere målinger og ikke minst målinger i hele tunnelens lengde. Ved tunnelarbeider i granitter og granittiske bergarter, spesielt i tilknytning til skjærsoner, bør det fokuseres på mulige problemer knyttet til radioaktivitet.

10. REFERANSER

Arbeidstilsynet 2018: Stråling fra radon under jord. Nedlastet 16. juli 2018 fra <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/straling/radon/radon-under-jord/>

Bochiolo, M., Verdoya, M., Chiozzi, P. & Pasquale, V. 2012: 'Radiometric Surveying for the Assessment of Radiation Dose and Radon Specific Exhalation in Underground Environment'. *Journal of Applied Geophysics* 83 (August): 100–106. doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.05.004.

Fjermestad, H., Gundersen, E., Hagelia, P., Moen, A.B. & Torp, M 2018: Rv.4 på Gran, nyttiggjøring av svartskifer. Sluttrapport og erfaringer. Statens vegvesen rapport 333, (237 s.).

Dalsegg E. & Elvebakk, H. 2012: Geofysiske målinger i forbindelse med undersjøisk tunnel på Bjarkøya, Troms. NGU Rapport 2012.027.

Elvebakk, H. 2008: Geofysisk logging av borehull ved Hamar Flyplass. NGU Rapport 2008.079.

Elvebakk, H. 2011: Sammenstilling av resistivitet, seismiske hastigheter og naturlig gammastråling i norske bergarter. NGU Rapport 2011.042 (60s.).

Elvebakk, H. 2013: Geofysisk logging av borehull ved Geologisk Museum, Tøyen, Oslo. NGU Rapport 2013.040.

Elvebakk, H., Fredin, O., Viola, G. & Dalsegg, E. 2014: Geofysisk logging og kjernelogging av diamantborehull KH1, Bjarkøya Troms. NGU Rapport 2014.020.

Gammadata 2018: Airthings (Corentium) Plus radonmåler, nedlastet fra nettsiden <http://www.gammadata.se/no/produkter/radioaktivetsmaling/radon/radon-instruments/>

Helse- og omsorgsdepartement 2017: Forskrift om strålevern og bruk av stråling (Strålevernforskriften). Nedlastet 16. juli 2018 fra https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-12-16-1659#KAPITTEL_4

Henderson, I.H.C., Viola, G. & Nasuti, A. 2015: A new tectonic model for the Palaeoproterozoic Kautokeino Greenstone Belt, northern Norway, based on high-resolution airborne magnetic data and field structural analyses and implications for mineral potential. *Norwegian Journal of Geology*, Vol. 95 Nr. 3-4 (2015) <http://dx.doi.org/10.17850/njg95-3-05>

Hodolli, Gezim, Sadik Bekteshi, Sehad Kadiri, and Konstandin Dollani. 2015: 'Radon Concentration and Gamma Exposure in Some Kosovo Underground Mines'. *International Journal of Radiation Research* 13 (4).

IAEA. 2003. 'Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363'. IAEA, Vienna.

Isaksson, M. (2011). Environmental Dosimetry – Measurements and Calculations, Radioisotopes - Applications in Physical Sciences, Prof. Nirmal Singh (Ed.), InTech.

Iversen, E. 2012: Geologi Bjarkøyaforbindelsen. Geologisk undersøkelse av tunneltracé. Vegdirektoratet teknologiavdelingen, Rapport nr. 2011035874-1.

Karlsen, F.S. & Iversen, E. 2013: Fv 867 Bjarkøytunnelen. Ingeniørgeologisk rapport for konkurransegrunnlaget. Statens vegvesen, Oppdragsrapport Region Nord, Ressursavdelingen. Nr.: 2013102312-003.

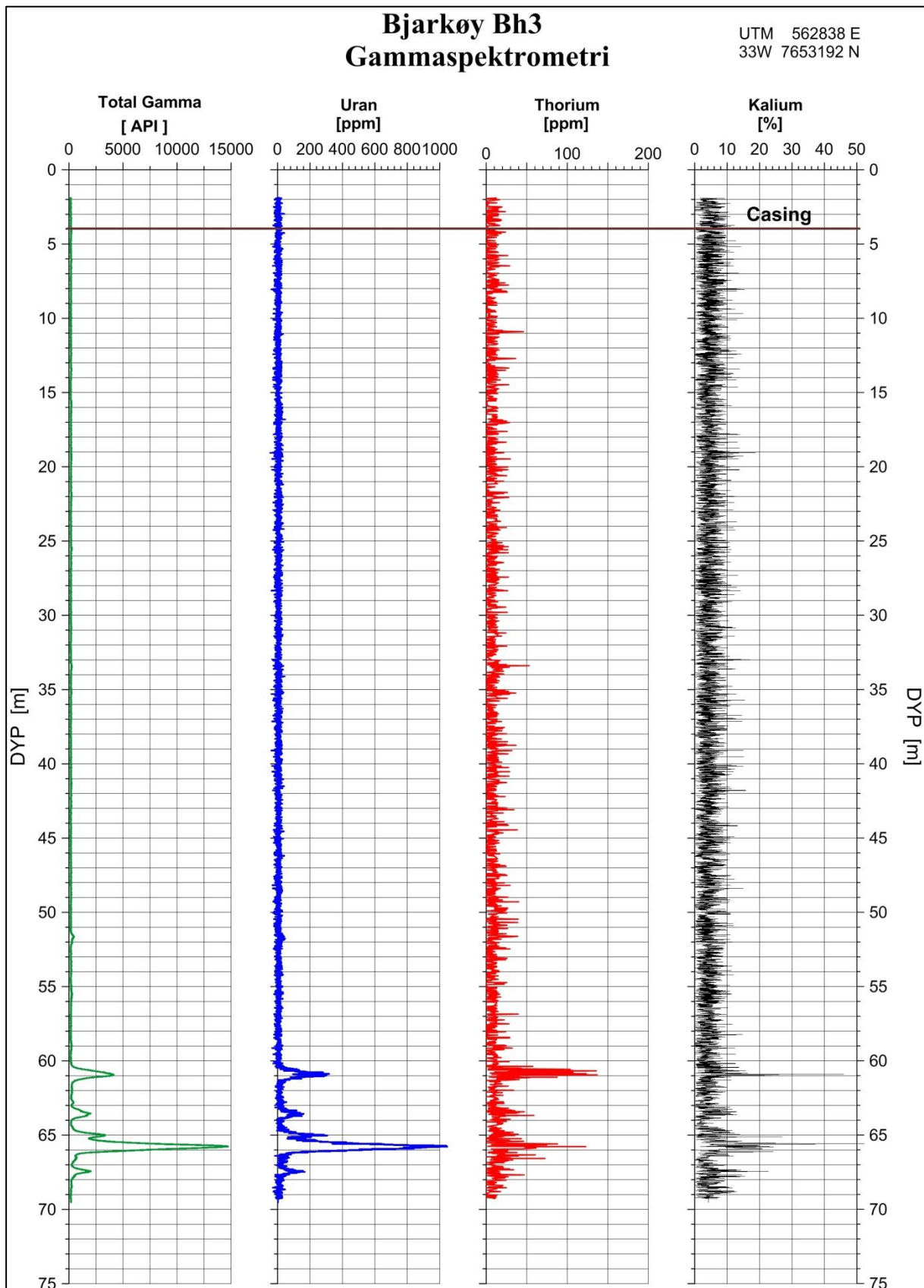
Lovdata 2010: Forskrift om forurensingslovens anvendelse på radioaktiv forurensning og radioaktivt avfall. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-11-01-1934>

Olesen, O. & Sandstad, J.S. 1993: Interpretation of Proterozoic Kautokeino Greenstone Belt, Finnmark, Norway from combined geophysical and geological data. NGU Bull. 425.

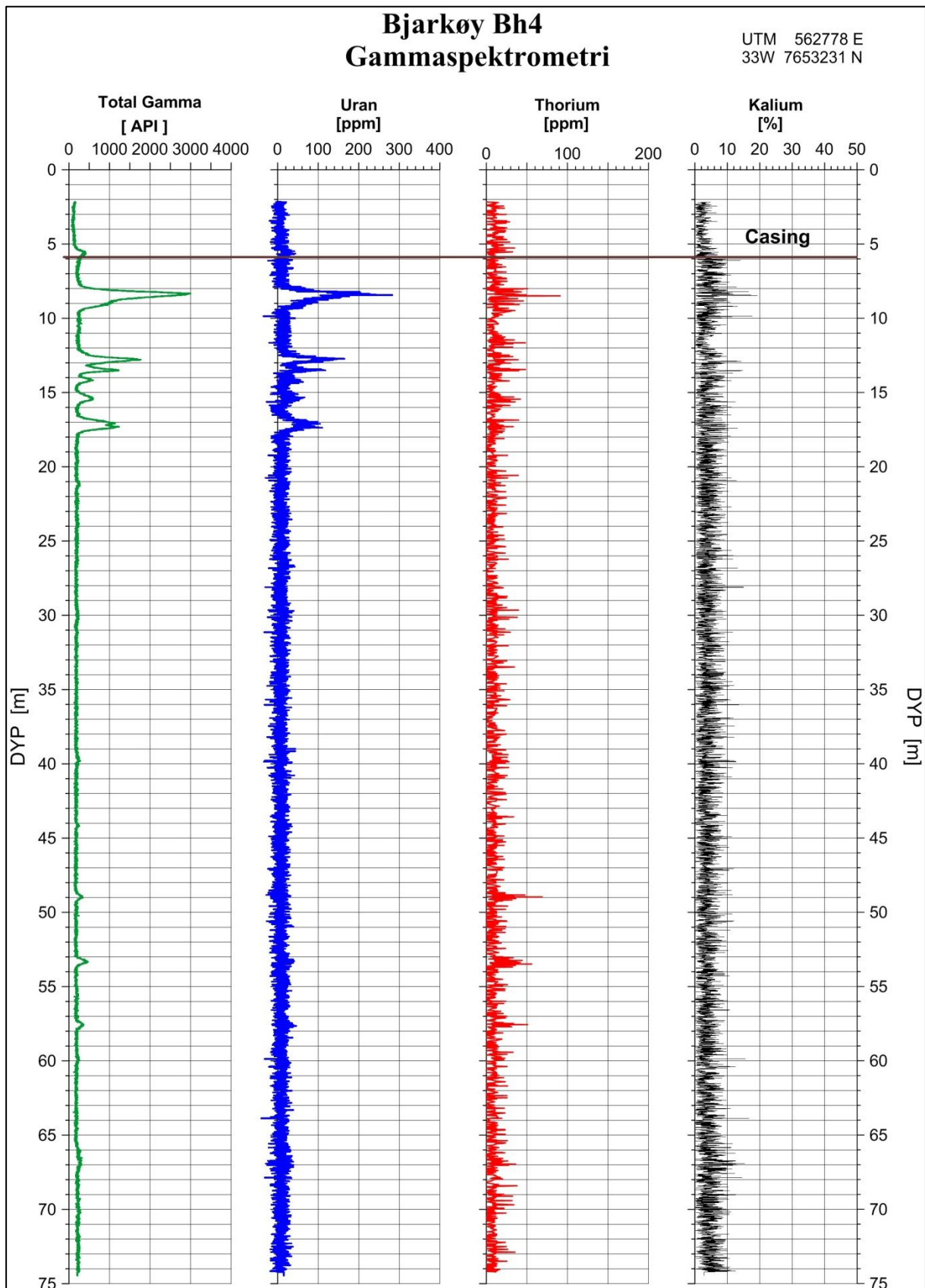
Quindos, L. S, Fernández, P. L, Ródenas, C., Gómez-Arozamena, J. & Arteché, J. 2004: Conversion Factors for External Gamma Dose Derived from Natural Radionuclides in Soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 71 (2): 139–45. doi:10.1016/S0265-931X(03)00164-4.

UNSCEAR 1993: Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. http://unscear.org/docs/publications/1993/UNSCEAR_1993_Annex-D.pdf

Vedlegg 1: Spektral gammalogg i hele borebrønnen Bh 3 ufiltrert.



Vedlegg 2: Spektral gammalogg i hele borebrønnen Bh 4 ufiltrert.



Vedlegg 3: Konsentrasjon av K, U og Th målt på tunnelstuff med gamma-spektrometer, beregnet doserate (DR) og deponeringskrav ved forskjellig pelnummer i Bjarkøytunnelen (data fra Statens vegvesen Region nord).

Date	Time	K [%]	eU [ppm]	eTh [ppm]	DR [nGy/h]	DR [nSv/h]	Note [Pel nr.]	Deponeringsplikt >1
01/05/2017	02:56:33	8,68	1,76	8,51	144,75		5102	0,33
10/28/2016	08:58:11	3,38	0,75	15,15	86,18	60,33		0,18
10/28/2016	09:01:47	2,59	2,04	14,08	80,57	56,4		0,16
10/28/2016	09:08:08	2,65	2,84	18,18	96,11	67,28		0,19
10/28/2016	09:11:33	2,46	4,29	14,48	92,6	64,82		0,19
10/28/2016	09:18:02	1,92	1,48	12,92	65,73	46,01		0,13
10/28/2016	09:53:59	9,60	4,22	8,72	171,24	119,87	4667	0,39
10/28/2016	09:58:56	7,04	22,63	11,95	250,25	175,18	4681	0,55
10/28/2016	10:09:28	7,38	19,36	8,88	228,5	159,95	4693	0,51
10/28/2016	10:14:16	3,14	111,52	6,88	691,12	483,78	4704	1,50
10/28/2016	10:25:10	8,37	6,19	5,47	158,2	110,74	4725stuff	0,36
10/28/2016	14:05:07	0,91	0,00	5,77	26,3	18,41		0,05
10/29/2016	08:57:10	7,90	3,00	3,29	128,6	90,02	4665h	0,30
10/29/2016	09:02:08	6,78	2,31	2,69	108,43	75,9	4767h	0,25
10/29/2016	09:06:54	8,47	3,12	5,18	141,41	98,99	4771h	0,32
10/31/2016	19:50:29	1,58	1,30	8,64	49,65	34,75		0,10
10/31/2016	23:24:09	2,59	1,87	16,41	85,44	59,81		0,17
10/31/2016	23:40:15	6,03	2,84	15,84	134,53	94,17		0,29
10/31/2016	23:52:56	5,45	19,80	7,80	203,13	142,19		0,45
11/02/2016	23:40:59	8,40	59,33	14,46	482,62	337,83	4746	1,05
11/02/2016	23:46:24	7,73	36,03	9,66	329,67	230,77	4740	0,73
11/02/2016	23:50:02	6,12	11,13	7,91	162,88	114,02		0,36
11/02/2016	23:53:53	8,52	5,06	6,04	155,17	108,62		0,35
11/02/2016	23:58:25	9,51	88,79	15,07	665,83	446,08	4746	1,45
11/03/2016	00:05:01	8,44	16,36	8,03	223,16	156,21		0,50
11/03/2016	00:08:15	7,79	23,52	9,64	259,36	181,55		0,57
11/22/2016	00:57:34	1,31	2,73	7,92	52,35	36,65		0,11
11/22/2016	01:00:59	1,85	2,28	12,32	67,88	47,52		0,14
11/22/2016	01:17:18	8,97	3,14	10,92	162,33	113,63	4860	0,36
11/22/2016	01:20:54	9,29	11,21	27,65	254,09	177,87	4860	0,54
11/22/2016	01:24:36	8,62	4,03	9,61	159,55	111,68	4860	0,36
11/22/2016	01:50:24	2,57	1,18	15,24	78,27	54,79		0,16
11/22/2016	01:54:48	2,19	2,57	10,92	70,42	49,29		0,14
11/22/2016	01:59:14	3,21	1,35	17,93	94,39	66,07		0,19
11/22/2016	02:03:55	3,11	1,76	14,82	87,58	61,31		0,18
11/22/2016	02:08:03	2,28	3,11	10,20	72,9	51,03		0,15
11/22/2016	13:39:48	8,09	3,94	7,03	145,7	101,99	4869	0,33
11/22/2016	18:05:46	0,76	0,00	3,83	19,54	13,68		0,04
11/23/2016	08:57:27	1,51	0,66	11,65	52,6	36,82		0,10
11/23/2016	10:24:54	8,85	3,35	5,25	147,9	103,53	ts	0,34
11/23/2016	20:35:36	8,55	4,21	6,41	151,7	106,19	4883	0,35

11/23/2016	20:40:26	7,57	5,39	3,40	138,04	96,63		0,32
11/24/2016	07:41:53	9,32	6,76	14,39	196,21	137,35	4888	0,43
11/24/2016	07:46:06	9,65	2,55	3,45	149,33	104,53	4888	0,35
11/24/2016	16:31:48	7,61	6,92	3,55	147,7	103,39	4893	0,34
11/25/2016	00:09:04	9,30	2,72	3,15	144,9	101,43	4893	0,34
11/25/2016	00:13:13	9,56	3,36	3,30	152,28	106,59	4893	0,35
11/25/2016	00:19:19	9,32	0,00	3,80	131,33	91,93		0,31
11/25/2016	15:40:28	9,45	1,43	4,09	141,92	99,34	4898	0,33
11/25/2016	15:46:34	8,66	0,92	3,56	127,31	89,12	4898	0,30
11/25/2016	22:43:25	10,38	0,45	3,80	147,7	103,39	4903	0,35
11/25/2016	22:48:19	9,80	0,00	5,32	141,37	98,96	4903	0,33
11/25/2016	22:51:42	9,69	1,18	7,53	152,2	106,54	4903	0,35
11/25/2016	22:58:44	8,24	2,99	13,35	158,05	110,63	4903	0,35
11/26/2016	14:23:10	8,58	4,53	4,97	150,32	105,22		0,34
11/26/2016	14:27:16	9,23	3,37	21,10	192,46	134,72		0,42
11/29/2016	07:47:03	8,02	3,83	6,60	143,07	100,15		0,32
11/29/2016	07:51:35	12,35	12,43	39,89	331,61	232,13	4918	0,70
11/29/2016	07:55:10	10,88	9,10	17,09	236,56	165,59		0,52
11/29/2016	07:58:48	10,28	6,74	30,73	249,35	174,55		0,53
11/29/2016	08:02:17	11,35	10,09	37,14	298,31	208,82		0,63
12/01/2016	14:12:04	10,22	2,22	12,51	177,45	124,21	4932	0,40
12/02/2016	19:16:04	10,35	1,49	9,11	166,54	116,58	4942	0,38
12/06/2016	00:24:48	5,27	3,56	2,64	95,68	66,98		0,22
12/06/2016	18:15:09	8,44	4,53	6,63	152,66	106,86	4967	0,35
12/07/2016	01:43:33	8,07	2,66	7,46	139,32	97,53	4973	0,32
12/07/2016	22:40:29	8,96	0,00	6,10	132,44	92,71	4983	0,30
12/09/2016	00:33:32	9,15	5,22	19,27	197,37	138,16	4998	0,43
12/09/2016	23:30:10	7,81	3,73	9,12	146,09	102,27	5008	0,33
12/10/2016	13:41:20	8,22	3,90	15,96	169,43	118,6		0,37
12/12/2016	13:16:49	8,47	1,98	7,05	139,58	97,71	5018	0,32
12/12/2016	22:40:18	8,68	2,23	6,41	142,24	99,57	5023	0,32
12/12/2016	22:47:46	6,74	4,39	6,52	129,32	90,52	5023	0,29
12/13/2016	10:22:44	8,12	0,43	6,08	123,85	86,7	5028	0,28
12/13/2016	22:06:43	7,35	3,52	7,99	136,07	95,25	5032	0,31
12/13/2016	22:13:52	7,48	0,74	14,56	138,37	96,86	5032	0,30
12/14/2016	08:51:20	5,62	2,78	8,52	110,46	77,32	5038	0,24
12/14/2016	17:57:36	5,99	1,25	6,46	101,55	71,08	5037	0,23
12/14/2016	18:03:19	7,87	3,23	6,99	138,7	97,09	5037	0,31
12/15/2016	09:52:17	7,51	1,14	7,64	123,77	86,64	5047	0,28
12/19/2016	08:29:49	2,12	2,21	9,75	64,56	45,19		0,13
12/19/2016	08:33:06	2,57	0,56	10,68	63,4	44,38		0,13
12/19/2016	08:36:38	2,23	2,28	11,39	70,56	49,39		0,14
12/19/2016	14:58:09	1,01	0,00	7,35	31,56	22,09		0,06
12/21/2016	09:59:32	9,87	0,00	7,59	148,01	103,61	5070	0,34
01/03/2017	01:19:48	7,99	1,71	4,35	124,99	87,5	5087	0,29
01/05/2017	02:56:33	8,68	1,76	8,51	144,75	101,32	5102	0,33

Vedlegg 4: Målt radonkonsentrasjon i tunnelluft på utvalgte tider og steder (data fra Statens vegvesen Region nord).

Dato	Pel	Radon [Bq/m ³]	
11.10.2016	Kabeltrommel bak stuff	7	Snitt siste døgnet
24.10.2016	Stuff på 4717	42	Snitt over 1t
27.10.2016	Stuff på 4725	31	Snitt over 1t
03.01.2017	Kabeltrommel bak stuff 4950	2648	Snitt siste 7 dager Etter juleferie
		13	Snitt siste døgnet
27.01.2017	Kabeltrommel bak stuff 5249	4	Snitt siste 7 dager
		5	Snitt siste døgnet
20.03.2017	4160	9	Snitt siste døgnet
21.03.2017	4750	24	Snitt siste døgnet
22.03.2017	4750	36	Snitt siste døgnet
23.03.2017	4650	23	Snitt siste døgnet
24.03.2017	4650	8	Snitt siste døgnet
27.03.2017	4840	5	Snitt siste døgnet
30.03.2017	4840	0	Snitt siste døgnet
31.03.2017	4840	14	Snitt siste døgnet
03.04.2017	4840	43	Snitt siste døgnet
17.04.2017	4840	72	Snitt siste døgnet
18.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	51	Snitt siste døgnet
19.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	70	Snitt siste døgnet
24.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	62	Snitt siste døgnet
25.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	61	Snitt siste døgnet
26.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	60	Snitt siste døgnet
27.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	28	Snitt siste døgnet
28.04.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	151	Snitt siste døgnet
02.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	23	Snitt siste døgnet
03.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	34	Snitt siste døgnet
04.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	126	Snitt siste døgnet
05.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	26	Snitt siste døgnet
09.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	46	Snitt siste døgnet
10.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	34	Snitt siste døgnet
11.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	61	Snitt siste døgnet
12.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	25	Snitt siste døgnet
15.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	165	Snitt siste døgnet
16.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	205	Snitt siste døgnet
18.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	168	Snitt siste døgnet
19.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	415	Snitt siste døgnet
22.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	297	Snitt siste døgnet
23.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	246	snitt siste døgnet
24.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	54	snitt siste døgnet

29.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	56	Snitt siste døgnet
30.05.2017	3835 i pumpesump 40m fra tunnelsenter	29	snitt siste døgnet
01.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	53	snitt siste døgnet
02.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	65	Snitt siste døgnet
06.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	304	Snitt siste døgnet
09.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	800	Snitt siste døgnet
12.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	776	Snitt siste døgnet
14.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	432	Snitt siste døgnet
15.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	575	Snitt siste døgnet
19.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	340	Snitt siste døgnet
20.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	430	Snitt siste døgnet
21.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	366	Snitt siste døgnet
22.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	279	Snitt siste døgnet
23.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	309	Snitt siste døgnet
26.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	348	Snitt siste døgnet
28.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	63	Snitt siste døgnet
30.06.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	214	Snitt siste døgnet
04.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	197	Snitt siste døgnet
06.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	95	Snitt siste døgnet
07.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	220	Snitt siste døgnet
10.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	148	Snitt siste døgnet
11.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	203	Snitt siste døgnet
12.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	454	Snitt siste døgnet
13.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	456	Snitt siste døgnet
14.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	201	Snitt siste døgnet
17.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	400	Snitt siste døgnet
18.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	919	Snitt siste døgnet
19.07.2017	3835 i pumpesump 30m fra tunnelsenter	265	Snitt siste døgnet

Vedlegg 5: Bilder av kjernematerialet fra KH-3.



Bilde av kjernene fra KH-3, 7 – 10 m (7 m med løsmasser). Tørr (øverst) og våt (nederst).



Bilde av kjernene fra KH-3, 10 – 20 m. Tørr (øverst) og våt (nederst).

Vedlegg 6: Konsentrasjonen av U, Th og K målt med bærbar XRF (NITON XL 3T) på kjernene fra KH-3 på Bjarkøya.

LOD = Limit of detection. SDEV = Standardavvik (1σ). Analyser utført av J.S. Rønning 13.07.2018.

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
1	7.08	Grå kjerne	13.07.2018 10:04	49	ppm	< LOD	2.0	#####	< LOD	6.0	#####	57438	9392	16
2	7.15	Grå kjerne	13.07.2018 10:08	65	ppm	< LOD	1.2	#####	< LOD	6.2	#####	28802	7848	27
3	7.32	Grå kjerne	13.07.2018 10:10	56	ppm	< LOD	1.9	#####	9.5	4.3	46	56776	16202	29
4	7.35	Grå kjerne	13.07.2018 10:12	41	ppm	< LOD	2.1	#####	< LOD	8.8	#####	51659	9622	19
5	7.45	Grå kjerne	13.07.2018 10:13	48	ppm	< LOD	1.8	#####	< LOD	8.7	#####	49092	9072	18
6	7.52	Grå kjerne	13.07.2018 10:15	45	ppm	< LOD	2.2	#####	< LOD	9.2	#####	39106	9367	24
7	7.6	Grå kjerne	13.07.2018 10:17	47	ppm	< LOD	2.7	#####	< LOD	7.2	#####	50182	11586	23
8	7.66	Grå kjerne	13.07.2018 10:18	46	ppm	< LOD	1.5	#####	< LOD	9.2	#####	28113	9069	32
9	7.76	Grå kjerne	13.07.2018 10:21	56	ppm	< LOD	1.7	#####	< LOD	6.5	#####	37770	9521	25
10	7.82	Grå kjerne	13.07.2018 10:22	44	ppm	< LOD	4.9	#####	< LOD	19.2	#####	41409	15355	37
11	7.87	Grå kjerne	13.07.2018 10:24	43	ppm	< LOD	3.0	#####	< LOD	8.8	#####	50998	12552	25
12	7.98	Grå kjerne	13.07.2018 10:26	45	ppm	< LOD	2.8	#####	< LOD	7.7	#####	47440	7549	16
13	8.05	Grå kjerne	13.07.2018 10:28	49	ppm	< LOD	2.0	#####	< LOD	9.4	#####	50127	10892	22
14	8.08	Grå kjerne	13.07.2018 10:30	44	ppm	4.7	2.0	42	< LOD	14.9	#####	43842	11209	26
15	8.1	Grå kjerne	13.07.2018 10:31	42	ppm	< LOD	4.2	#####	< LOD	8.4	#####	44605	8909	20
16	8.15	Grå kjerne	13.07.2018 10:33	46	ppm	< LOD	2.9	#####	< LOD	8.2	#####	36821	8922	24
17	8.25	Grå kjerne	13.07.2018 10:34	45	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	6.7	#####	42132	10683	25
18	8.28	Grå kjerne	13.07.2018 10:36	48	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	5.7	#####	50677	11574	23
19	8.39	Grå kjerne	13.07.2018 10:37	49	ppm	< LOD	2.6	#####	< LOD	8.6	#####	42517	13105	31
20	8.43	Grå kjerne	13.07.2018 10:39	42	ppm	< LOD	2.3	#####	13.6	6.8	50	31008	10758	35
21	8.46	Grå kjerne	13.07.2018 10:40	43	ppm	5.4	2.7	50	< LOD	11.4	#####	48414	13966	29
22	8.51	Grå kjerne	13.07.2018 10:42	45	ppm	< LOD	3.8	#####	< LOD	13.7	#####	53307	11553	22
23	8.56	Grå kjerne	13.07.2018 10:44	48	ppm	< LOD	2.1	#####	11.4	5.2	45	55383	12600	23

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
24	8.61	Grå kjerne	13.07.2018 10:45	48	ppm	< LOD	1.6	#####	< LOD	11.2	#####	40386	10374	26
25	8.7	Grå kjerne	13.07.2018 10:47	61	ppm	< LOD	1.4	#####	< LOD	4.8	#####	38620	8943	23
26	8.79	Grå kjerne	13.07.2018 10:49	43	ppm	< LOD	3.8	#####	< LOD	11.6	#####	39421	11595	29
27	8.88	Grå kjerne	13.07.2018 10:51	45	ppm	< LOD	2.6	#####	< LOD	10.5	#####	38167	12207	32
28	8.95	Grå kjerne	13.07.2018 10:52	46	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	8.2	#####	40117	12090	30
29	9.05	Grå kjerne	13.07.2018 10:58	44	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	9.6	#####	27583	9859	36
30	9.11	Grå kjerne	13.07.2018 11:00	48	ppm	< LOD	4.2	#####	< LOD	15.0	#####	28538	9530	33
31	9.22	Grå kjerne	13.07.2018 11:01	43	ppm	< LOD	2.7	#####	< LOD	10.6	#####	< LOD	22711	####
32	9.28	Grå kjerne	13.07.2018 11:03	44	ppm	< LOD	2.6	#####	< LOD	12.9	#####	< LOD	22534	####
33	9.39	Grå kjerne	13.07.2018 11:04	47	ppm	< LOD	3.3	#####	< LOD	9.2	#####	41427	10699	26
34	9.42	Grå kjerne	13.07.2018 11:06	44	ppm	< LOD	3.6	#####	14.9	7.0	47	27459	12547	46
35	9.52	Grå kjerne	13.07.2018 11:07	46	ppm	< LOD	2.6	#####	< LOD	10.5	#####	< LOD	24884	####
36	9.57	Grå kjerne	13.07.2018 11:09	44	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	14.9	#####	< LOD	30981	####
37	9.64	Grå kjerne	13.07.2018 11:10	46	ppm	< LOD	2.3	#####	15.9	5.8	36	48539	11934	25
38	9.7	Grå kjerne	13.07.2018 11:12	43	ppm	< LOD	3.4	#####	< LOD	10.8	#####	19891	9287	47
39	9.77	Grå kjerne	13.07.2018 11:13	46	ppm	< LOD	3.0	#####	< LOD	6.6	#####	29204	9534	33
40	9.83	Grå kjerne	13.07.2018 11:14	43	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	7.7	#####	17173	7728	45
41	9.94	Grå kjerne	13.07.2018 11:16	46	ppm	< LOD	3.2	#####	< LOD	11.7	#####	28738	10447	36
42	10	Grå kjerne	13.07.2018 11:17	45	ppm	< LOD	3.5	#####	< LOD	9.2	#####	< LOD	26614	####
43	10.08	Grå kjerne	13.07.2018 11:20	44	ppm	< LOD	3.0	#####	< LOD	11.0	#####	< LOD	18950	####
44	10.17	Grå kjerne	13.07.2018 11:21	50	ppm	28.1	2.1	7	< LOD	6.9	#####	< LOD	13636	####
45	10.22	Grå kjerne	13.07.2018 11:23	44	ppm	< LOD	2.6	#####	< LOD	7.5	#####	< LOD	23034	####
46	10.24	Grå kjerne	13.07.2018 11:27	48	ppm	5.6	1.5	26	< LOD	11.4	#####	< LOD	22991	####
47	10.28	Grå kjerne	13.07.2018 11:25	45	ppm	49.8	3.8	8	< LOD	9.2	#####	< LOD	21062	####
48	10.37	Grå kjerne	13.07.2018 11:29	49	ppm	13.7	1.9	14	< LOD	11.2	#####	32680	12740	39
49	10.41	Grå kjerne	13.07.2018 11:31	45	ppm	< LOD	3.3	#####	< LOD	11.4	#####	23925	10692	45
50	10.45	Grå kjerne	13.07.2018 11:32	50	ppm	< LOD	2.3	#####	11.3	5.3	47	47261	13071	28
51	10.5	Grå kjerne	13.07.2018 11:34	49	ppm	< LOD	2.6	#####	< LOD	12.2	#####	27262	8827	32

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
52	10.54	Grå kjerne	13.07.2018 11:35	42	ppm	5.2	2.2	43	< LOD	14.9	#####	36506	9923	27
53	10.62	Grå kjerne	13.07.2018 11:37	47	ppm	< LOD	3.4	#####	< LOD	9.9	#####	40247	12166	30
54	10.67	Grå kjerne	13.07.2018 11:39	50	ppm	< LOD	1.6	#####	< LOD	10.2	#####	50408	11321	22
55	10.72	Grå kjerne	13.07.2018 11:42	46	ppm	< LOD	3.4	#####	< LOD	10.1	#####	38202	9202	24
56	10.8	Grå kjerne	13.07.2018 11:44	46	ppm	< LOD	3.9	#####	< LOD	14.8	#####	47773	10831	23
57	10.88	Grå kjerne	13.07.2018 11:45	47	ppm	< LOD	1.8	#####	< LOD	10.5	#####	29578	8402	28
58	10.97	Grå kjerne	13.07.2018 11:47	48	ppm	< LOD	2.4	#####	< LOD	15.8	#####	24240	9154	38
59	11.07	Grå kjerne	13.07.2018 12:15	48	ppm	4.4	1.9	43	< LOD	14.0	#####	44866	16114	36
60	11.13	Grå kjerne	13.07.2018 12:16	44	ppm	< LOD	3.4	#####	< LOD	17.2	#####	41663	12470	30
61	11.23	Grå kjerne	13.07.2018 12:18	42	ppm	< LOD	3.2	#####	< LOD	9.0	#####	37775	10284	27
62	11.32	Grå kjerne	13.07.2018 12:25	46	ppm	6.9	2.2	31	< LOD	11.7	#####	39105	10644	27
63	11.38	Grå kjerne	13.07.2018 12:27	54	ppm	2.9	1.2	42	11.9	4.1	34	39893	11955	30
64	11.43	Grå kjerne	13.07.2018 12:29	45	ppm	< LOD	3.7	#####	< LOD	8.0	#####	33029	10602	32
65	11.49	Grå kjerne	13.07.2018 12:30	43	ppm	< LOD	4.4	#####	< LOD	9.7	#####	28904	9800	34
66	11.58	Grå kjerne	13.07.2018 12:32	43	ppm	< LOD	3.2	#####	< LOD	7.9	#####	36460	12163	33
67	11.66	Grå kjerne	13.07.2018 12:34	45	ppm	< LOD	1.9	#####	< LOD	10.1	#####	43969	11144	25
68	11.7	Grå kjerne	13.07.2018 12:35	47	ppm	< LOD	3.9	#####	< LOD	12.4	#####	50986	11569	23
69	11.77	Grå kjerne	13.07.2018 12:37	46	ppm	6.1	2.2	36	< LOD	9.2	#####	32443	11481	35
70	11.83	Grå kjerne	13.07.2018 12:38	43	ppm	< LOD	3.6	#####	< LOD	10.1	#####	31754	11170	35
71	11.88	Grå kjerne	13.07.2018 12:40	44	ppm	< LOD	3.1	#####	< LOD	8.0	#####	< LOD	22626	####
72	11.98	Grå kjerne	13.07.2018 12:42	42	ppm	< LOD	2.7	#####	< LOD	11.4	#####	26453	9706	37
73	12.04	Grå kjerne	13.07.2018 12:43	46	ppm	< LOD	3.4	#####	< LOD	7.2	#####	49108	11566	24
74	12.1	Grå kjerne	13.07.2018 12:45	46	ppm	< LOD	3.5	#####	< LOD	11.8	#####	45902	10646	23
75	12.18	Grå kjerne	13.07.2018 12:46	40	ppm	< LOD	3.5	#####	< LOD	14.2	#####	45957	13885	30
76	12.25	Grå kjerne	13.07.2018 12:48	45	ppm	< LOD	3.1	#####	< LOD	11.2	#####	48492	12427	26
77	12.31	Grå kjerne	13.07.2018 12:49	43	ppm	< LOD	1.9	#####	< LOD	8.2	#####	50697	9788	19
78	12.42	Grå kjerne	13.07.2018 12:50	44	ppm	< LOD	3.8	#####	< LOD	9.6	#####	48460	11072	23
79	12.5	Grå kjerne	13.07.2018 12:52	43	ppm	< LOD	2.4	#####	< LOD	16.9	#####	57782	14015	24

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
80	12.58	Grå kjerne	13.07.2018 12:54	43	ppm	< LOD	3.3	#####	15.6	6.1	39	62056	12924	21
81	12.64	Grå kjerne	13.07.2018 12:56	48	ppm	3.6	1.3	36	< LOD	5.2	#####	45121	10981	24
82	12.73	Grå kjerne	13.07.2018 12:57	47	ppm	< LOD	2.2	#####	< LOD	14.1	#####	39026	11720	30
83	12.8	Grå kjerne	13.07.2018 12:58	45	ppm	< LOD	3.6	#####	< LOD	12.4	#####	44650	10080	23
84	12.89	Grå kjerne	13.07.2018 13:00	44	ppm	< LOD	2.3	#####	< LOD	14.1	#####	34752	11373	33
85	13.02	Grå kjerne	13.07.2018 13:02	51	ppm	< LOD	1.7	#####	< LOD	7.3	#####	52411	10228	20
86	13.11	Grå kjerne	13.07.2018 13:03	56	ppm	< LOD	1.7	#####	9.4	3.9	41	60657	12366	20
87	13.16	Grå kjerne	13.07.2018 13:06	51	ppm	< LOD	1.2	#####	13.2	4.1	31	50055	12419	25
88	13.24	Grå kjerne	13.07.2018 13:07	53	ppm	4.1	1.1	27	< LOD	6.8	#####	35908	11242	31
89	13.33	Grå kjerne	13.07.2018 13:08	44	ppm	< LOD	3.0	#####	< LOD	11.5	#####	39023	13869	36
90	13.39	Grå kjerne	13.07.2018 13:10	44	ppm	< LOD	1.7	#####	< LOD	6.6	#####	46705	8818	19
91	13.42	Grå kjerne	13.07.2018 13:12	43	ppm	4.1	1.6	40	< LOD	10.2	#####	37075	10438	28
92	13.62	Grå kjerne	13.07.2018 13:13	52	ppm	< LOD	2.2	#####	< LOD	8.5	#####	38748	10982	28
93	13.71	Grå kjerne	13.07.2018 13:15	45	ppm	< LOD	3.7	#####	< LOD	10.3	#####	69400	15267	22
94	13.82	Grå kjerne	13.07.2018 13:17	46	ppm	< LOD	1.4	#####	12.8	4.6	36	26360	10238	39
95	13.9	Grå kjerne	13.07.2018 13:18	45	ppm	< LOD	2.2	#####	< LOD	9.9	#####	54126	11181	21
96	13.98	Grå kjerne	13.07.2018 13:19	46	ppm	7.6	2.3	30	< LOD	13.6	#####	73976	9251	13
97	14.03	Grå kjerne	13.07.2018 13:50	43	ppm	< LOD	3.7	#####	< LOD	9.6	#####	53236	11404	21
98	14.11	Grå kjerne	13.07.2018 13:51	47	ppm	4.4	1.9	43	< LOD	8.2	#####	< LOD	23628	####
99	14.22	Røddlig	13.07.2018 13:53	45	ppm	31.9	2.8	9	< LOD	13.8	#####	< LOD	39538	####
100	14.26	Røddlig	13.07.2018 13:54	44	ppm	27.2	3.1	11	< LOD	15.8	#####	< LOD	36407	####
101	14.3	Røddlig	13.07.2018 15:51	43	ppm	164.1	6.8	4	46.0	9.0	20	< LOD	24299	####
102	14.31	Røddlig	13.07.2018 13:56	47	ppm	534.9	10.2	2	< LOD	10.5	#####	< LOD	26190	####
103	14.34	Røddlig	13.07.2018 15:49	47	ppm	154.0	6.5	4	< LOD	11.1	#####	< LOD	24508	####
104	14.35	Røddlig	13.07.2018 13:58	64	ppm	115.3	3.1	3	< LOD	5.6	#####	< LOD	21758	####
105	14.4	Røddlig	13.07.2018 13:59	55	ppm	84.5	3.0	3	20.7	4.5	22	35507	15318	43
106	14.48	Røddlig	13.07.2018 14:00	42	ppm	16.5	2.6	16	< LOD	9.7	#####	< LOD	29393	####
107	14.58	Røddlig	13.07.2018 14:02	45	ppm	56.6	3.7	7	< LOD	8.9	#####	< LOD	16893	####

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
108	14.63	Røddlig	13.07.2018 14:04	44	ppm	17.0	2.4	14	< LOD	10.5	#####	26431	11715	44
109	14.73	Røddlig	13.07.2018 14:06	45	ppm	44.8	3.3	7	30.3	6.7	22	< LOD	13987	####
110	14.77	Røddlig	13.07.2018 14:07	45	ppm	69.7	3.3	5	11.1	5.3	48	< LOD	17656	####
111	14.9	Røddlig	13.07.2018 14:09	44	ppm	21.9	2.6	12	27.6	6.5	24	< LOD	22587	####
112	14.94	Røddlig	13.07.2018 14:11	46	ppm	9.2	2.0	22	< LOD	11.6	#####	< LOD	24750	####
113	14.98	Røddlig	13.07.2018 14:12	42	ppm	27.0	3.0	11	20.3	6.8	33	< LOD	22043	####
114	15.07	Røddlig	13.07.2018 14:14	45	ppm	34.4	3.2	9	< LOD	9.4	#####	30081	12054	40
115	15.15	Røddlig	13.07.2018 14:15	44	ppm	22.9	2.3	10	< LOD	9.5	#####	< LOD	17152	####
116	15.25	Røddlig	13.07.2018 14:17	44	ppm	31.0	3.2	10	< LOD	8.7	#####	50780	14179	28
117	15.34	Røddlig	13.07.2018 14:20	45	ppm	8.3	2.1	26	< LOD	12.2	#####	53134	11934	22
118	15.4	Grå kjerne	13.07.2018 14:21	42	ppm	< LOD	4.3	#####	< LOD	9.0	#####	49535	12570	25
119	15.48	Røddlig	13.07.2018 14:23	45	ppm	6.3	2.2	35	< LOD	10.9	#####	35981	13195	37
120	15.61	Grå kjerne	13.07.2018 14:24	45	ppm	< LOD	1.7	#####	< LOD	8.3	#####	34280	6910	20
121	15.68	Grå kjerne	13.07.2018 14:26	47	ppm	6.1	2.0	32	< LOD	8.5	#####	40482	11443	28
122	15.73	Røddlig	13.07.2018 14:28	46	ppm	26.6	2.8	10	21.5	6.4	30	< LOD	17264	####
123	15.78	Grå kjerne	13.07.2018 14:29	44	ppm	< LOD	3.5	#####	< LOD	7.4	#####	31434	9608	31
124	15.89	Røddlig	13.07.2018 14:30	44	ppm	5.5	1.8	34	< LOD	11.8	#####	34416	10337	30
125	15.95	Røddlig	13.07.2018 14:33	44	ppm	8.3	2.5	30	< LOD	10.3	#####	54062	11742	22
126	16.06	Grå kjerne	13.07.2018 14:35	43	ppm	4.9	2.1	43	< LOD	12.4	#####	41791	9885	24
127	16.18	Grå kjerne	13.07.2018 14:36	43	ppm	< LOD	2.9	#####	< LOD	9.4	#####	< LOD	26426	####
128	16.26	Grå kjerne	13.07.2018 14:40	41	ppm	< LOD	4.5	#####	< LOD	12.6	#####	34212	8942	26
129	16.35	Grå kjerne	13.07.2018 14:42	43	ppm	< LOD	3.1	#####	< LOD	18.6	#####	< LOD	25979	####
130	16.41	Grå kjerne	13.07.2018 14:44	48	ppm	< LOD	3.1	#####	< LOD	9.0	#####	24007	10900	45
131	16.5	Grå kjerne	13.07.2018 14:45	44	ppm	< LOD	2.1	#####	< LOD	6.8	#####	46770	11880	25
132	16.57	Grå kjerne	13.07.2018 14:47	44	ppm	< LOD	2.9	#####	< LOD	6.4	#####	32126	8405	26
133	16.64	Grå kjerne	13.07.2018 14:48	43	ppm	< LOD	3.3	#####	16.5	6.1	37	33821	9609	28
134	16.72	Grå kjerne	13.07.2018 14:50	44	ppm	< LOD	2.0	#####	< LOD	9.2	#####	< LOD	18616	####
135	16.8	Grå kjerne	13.07.2018 14:51	44	ppm	4.1	1.7	41	< LOD	7.1	#####	< LOD	28041	####

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
136	16.88	Grå kjerne	13.07.2018 14:53	46	ppm	4.1	1.7	41	18.1	5.6	31	< LOD	24807	####
137	16.95	Grå kjerne	13.07.2018 14:54	44	ppm	< LOD	3.5	#####	< LOD	9.3	#####	< LOD	28740	####
138	17.05	Grå kjerne	13.07.2018 14:55	44	ppm	< LOD	5.0	#####	< LOD	12.8	#####	< LOD	24723	####
139	17.15	Grå kjerne	13.07.2018 14:57	47	ppm	< LOD	3.3	#####	< LOD	6.8	#####	62568	13386	21
140	17.19	Grå kjerne	13.07.2018 14:58	43	ppm	< LOD	3.9	#####	< LOD	8.5	#####	< LOD	26823	####
141	17.34	Røddlig	13.07.2018 15:00	45	ppm	< LOD	3.0	#####	< LOD	9.3	#####	26505	6203	23
142	17.42	Røddlig	13.07.2018 15:01	44	ppm	< LOD	3.0	#####	< LOD	8.7	#####	16358	5661	35
143	17.55	Grå kjerne	13.07.2018 15:04	66	ppm	< LOD	1.2	#####	< LOD	3.8	#####	44495	5903	13
144	17.63	Grå kjerne	13.07.2018 15:05	45	ppm	4.3	1.9	45	< LOD	11.5	#####	< LOD	24729	####
145	17.72	Grå kjerne	13.07.2018 15:07	45	ppm	< LOD	3.6	#####	< LOD	7.0	#####	< LOD	17006	####
146	17.8	Grå kjerne	13.07.2018 15:09	43	ppm	4.5	1.8	39	< LOD	8.4	#####	< LOD	16778	####
147	17.91	Grå kjerne	13.07.2018 15:10	43	ppm	< LOD	3.3	#####	13.6	6.3	46	< LOD	15597	####
148	18.05	Grå kjerne	13.07.2018 15:12	46	ppm	< LOD	2.5	#####	< LOD	8.4	#####	< LOD	11776	####
149	18.2	Grå kjerne	13.07.2018 15:13	43	ppm	< LOD	2.1	#####	< LOD	6.1	#####	< LOD	13544	####
150	18.32	Grå kjerne	13.07.2018 15:15	45	ppm	5.1	1.8	36	< LOD	11.4	#####	< LOD	11627	####
151	18.4	Grå kjerne	13.07.2018 15:16	46	ppm	< LOD	3.6	#####	< LOD	7.0	#####	< LOD	14661	####
152	18.48	Grå kjerne	13.07.2018 15:17	46	ppm	3.5	1.6	46	14.4	5.4	37	< LOD	15346	####
153	18.55	Grå kjerne	13.07.2018 15:19	53	ppm	< LOD	1.9	#####	< LOD	4.9	#####	20572	9213	45
154	18.64	Grå kjerne	13.07.2018 15:20	44	ppm	5.1	2.1	41	< LOD	13.8	#####	< LOD	17775	####
155	18.72	Grå kjerne	13.07.2018 15:21	44	ppm	8.4	2.0	24	< LOD	7.4	#####	< LOD	21938	####
156	18.79	Grå kjerne	13.07.2018 15:23	44	ppm	8.0	1.8	23	< LOD	8.4	#####	< LOD	13763	####
157	18.86	Grå kjerne	13.07.2018 15:24	46	ppm	6.1	2.1	35	< LOD	14.1	#####	< LOD	22768	####
158	19.02	Grå kjerne	13.07.2018 15:26	44	ppm	< LOD	3.6	#####	< LOD	11.0	#####	< LOD	13641	####
159	19.1	Grå kjerne	13.07.2018 15:27	42	ppm	14.9	2.6	18	< LOD	10.9	#####	< LOD	22652	####
160	19.22	Grå kjerne	13.07.2018 15:29	60	ppm	4.1	1.1	26	< LOD	5.4	#####	19101	7800	41
161	19.3	Grå kjerne	13.07.2018 15:30	44	ppm	80.2	4.2	5	< LOD	8.2	#####	< LOD	17555	####
162	19.36	Røddlig	13.07.2018 15:32	43	ppm	37.1	3.9	10	< LOD	14.8	#####	< LOD	34204	####
163	19.4	Røddlig	13.07.2018 15:33	45	ppm	36.3	3.1	9	< LOD	7.6	#####	< LOD	28375	####

Prøve nr.	DYP (m)	Kommentar	Time	Måletid (s)	Enhet	U	U SDEV	U SDEV/U (%)	Th	Th SDEV	Th-SDEV/Th (%)	K	K SDEV	K-SDEV/K (%)
164	19.44	Grå kjerne	13.07.2018 15:34	43	ppm	55.3	3.7	7	< LOD	8.9	#####	< LOD	25503	####
165	19.5	Røddlig	13.07.2018 15:37	43	ppm	21.2	2.6	12	< LOD	8.4	#####	< LOD	19005	####
166	19.56	Røddlig	13.07.2018 15:38	46	ppm	19.4	2.2	11	< LOD	6.8	#####	< LOD	24138	####
167	19.6	Grå kjerne	13.07.2018 15:39	43	ppm	< LOD	2.9	#####	< LOD	9.5	#####	50828	14574	29
168	19.69	Grå kjerne	13.07.2018 15:41	44	ppm	< LOD	3.5	#####	< LOD	6.8	#####	28587	9376	33
169	19.75	Grå kjerne	13.07.2018 15:42	45	ppm	5.4	1.8	33	< LOD	10.6	#####	< LOD	24145	####
170	19.82	Grå kjerne Bruddflate	13.07.2018 15:43	44	ppm	< LOD	2.1	#####	< LOD	7.8	#####	37023	9654	26
171	19.9	m/hematitt	13.07.2018 15:47	44	ppm	8.0	2.1	27	< LOD	7.9	#####	< LOD	32291	####
172	19.95	Grå kjerne	13.07.2018 15:45	45	ppm	< LOD	1.8	#####	< LOD	7.0	#####	38427	8608	22



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
- NGU -

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39
7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00
E-post ngu@ngu.no
Nettside www.ngu.no