


GEOLOGI FOR SAMFUNNET

GEOLOGY FOR SOCIETY



Rapport nr.: 2012.067		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Geologiske bakgrunnsdata for kartlegging av radonfare i Norge			
Forfatter: Guri V. Ganerød, Vikas Baranwal, Harald Elvebakk, Bjørn Frengstad, Torleif Lauritsen, Ingvar Lindahl, Jan S. Rønning og Torbjørn Sørdal		Oppdragsgiver: Statens strålevern / NGU	
Fylke:		Kommune:	
Kartblad (M=1:250.000)		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)	
Forekomstens navn og koordinater:		Sidetall: 75	Pris: 225,-
Feltarbeid utført:		Rapportdato: 25.05 2013	Prosjektnr.: 341900
		Ansvarlig: 	
<p>Sammendrag:</p> <p>I denne rapporten gis det en oversikt over data som NGU har tilgjengelig enten som kart eller som data i databaser, og som kan ha betydning for å vurdere risikoen for radon i Norge. Deriverte produkter som alunskiferkart og aktsomhetskart for sentrale Østlandet er laget basert på geologiske bakgrunnsdata og inneluftmålinger i samarbeid med Statens strålevern. Kilden til radon er grunnstoffet uran som forekommer naturlig i norske bergarter og løsmasser. Ved å kartlegge og undersøke innholdet av uran i grunnen vil det gi en indikasjon på den potensielle radonfaren for et område. Kunnskap om uraninnhold i grunnen kan oppnås med analyse av prøver, målinger med gammaspespektrometer fra fly, helikopter, bil og på bakken, og analyse av vannprøver.</p> <p>Ved regional kartlegging av landet utføres systematisk geofysiske målinger fra fly- og helikopter, hvor målinger med gammaspespektrometer er inkludert. Slike målinger gir en god oversikt over konsentrasjon av uran (og thorium) i grunnen, uavhengig om grunnen består av fast fjell eller løsmasser. Brorparten av Østlandet er dekket og kyststripen fra Mandal i sør til Smøla i nord. I Troms og Finnmark pågår kartleggingsprosjekt av naturressurser i tidsrommet 2010-2014. Som et av målene i regjeringens mineralstrategi skal 75 % av Norges landareal kartlegges innen 2018.</p> <p>Kartlegging av uranforekomster i Norge var del av et større prosjekt i tidsrommet 1970-1990, hvor målet var å kartlegge berggrunn som har over gjennomsnittet konsentrasjon av uran og thorium. Dette ble utført med hensikt på økonomisk drivverdige forekomster, og viser bl.a. områder med spesielt høye uranverdier. NGU har et pågående kartleggingsprosjekt for kjemisk sammensetning av berggrunnen (LITO-prosjektet). Data fra disse prøvene gir en god oversikt over naturlig forekomst av uran i fjellgrunnen, og en oversikt over uraninnhold i de forskjellige bergartene i Norge.</p> <p>Svartskifer er en bergart som er kjent for å ha forhøyet innhold av uran, hvor alunskiferen på Østlandet er mest kjent. Alunskiferen er prøvetatt med totalt 57 prøver og de er analysert for innhold av uran. I tillegg har prøver fra svartskiferer som forekommer utenfor Østlandet blitt analysert med hensyn til uraninnhold. Nyere analyser viser at svartskifer utenom Østlandet også kan inneholde høye urankonsentrasjoner.</p> <p>Radon forekommer også i grunnvann. I denne rapporten gis det en oversikt over hvilke undersøkelser NGU har vært involvert i og hvor grunnvannet kan inneholde radon.</p>			
Emneord: Bakgrunnsdata	Uran	Radon	
Svartskifer	LITO	Uranaldatabasen	
Grunnvann	Gammaspespektrometer	Fagrapport	

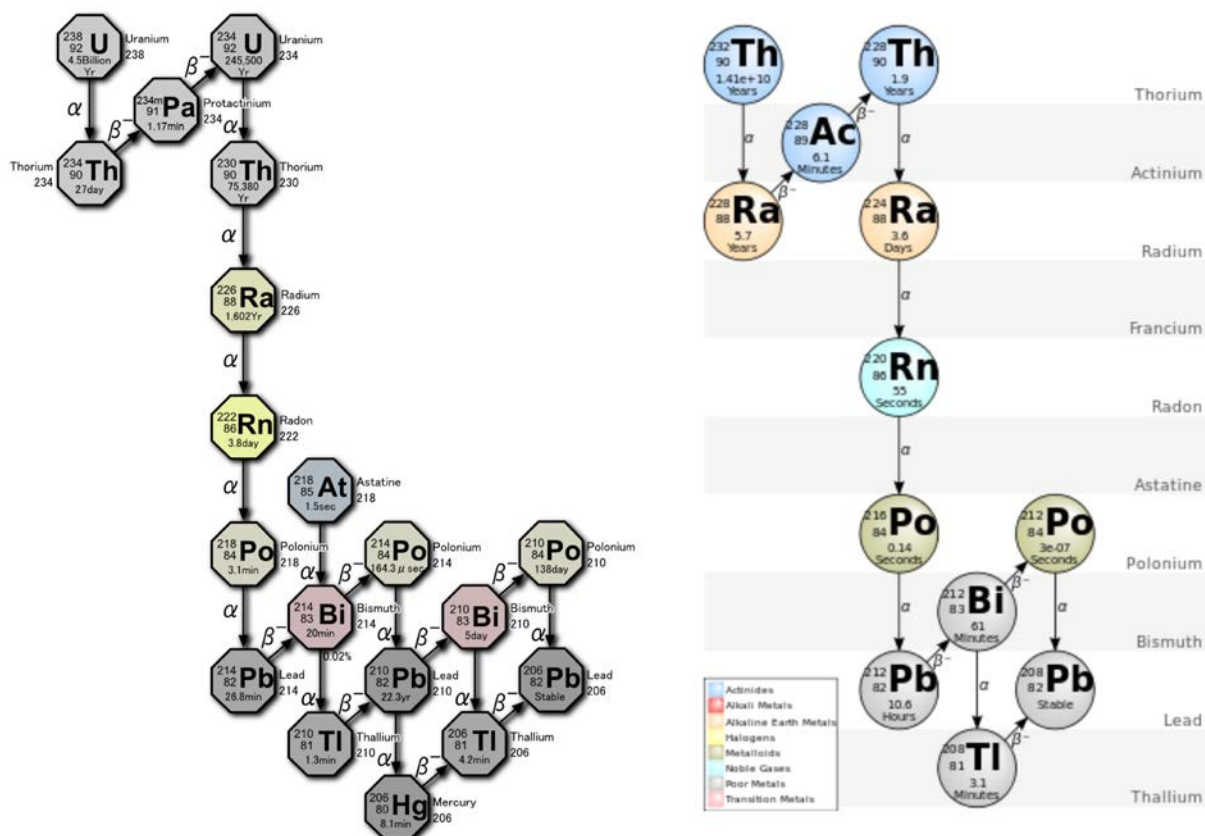
Innhold

1. GEOLOGISKE DATA FOR KARTLEGGING AV RADONFARE I NORGE	6
2. REGIONALE GEOFYSISKE MÅLINGER AV RADIOAKTIVITET FRA FLY OG HELIKOPTER.....	7
2.1 Oversikt over tilgjengelige data og eksempler.....	7
2.2 Oppfølgende undersøkelser.....	12
3. AKTSOMHETSKART FOR RADON.....	13
4. ALUNSKIFERKART.....	15
5. NATURLIG TOTAL GAMMASTRÅLING I NORSKE BERGARTER	16
6. URANPROSPEKTERINGEN OG RADIOAKTIVITET FRA BERGGRUNNEN	21
6.1 NGUs aktiviteter	21
6.2 Geologi: Bergartsmiljø og naturlige variasjoner - erfaringer.....	23
6.3 Kvartærgeologi: Et forvittringsprodukt fra berggrunnen - erfaringer	24
6.4 Geofysikk: Fly og helikopter fram til 90-tallet - erfaringer	25
6.5 Bakkemåling: bil, tog og til fots - erfaringer.....	25
6.6 Geokjemi – bergart, bekkevann, radon i jordluft - erfaringer	26
6.7 Oppsummering av Uranprospektering ved NGU i tidsrommet 1970 – ca. 2000.....	27
7. GEOKJEMISK SAMMENSETNING AV BERGGRUNNEN (LITO DATABASE).....	29
7.1 Innsamling av data	29
8. GEOKJEMISKE DATA FRA ALUNSKIFEREN FRA ØSTLANDET OG SVARTSKIFER ELLERS I NORGE.....	31
9. RADON I GRUNNVANN	33
10. OPPSUMMERING.....	37
11. REFERANSER	38
11.1 Generelt.....	38
11.2 Referanser til fly- og helikoptergeofysikk der det foreligger informasjon om uran ..	40
11.3 Referanseliste til borehullslogging med informasjon om radioaktive elementer.....	41
11.4 Referanseliste for arbeid relatert til Uranprosjektet ved NGU.....	43
11.5 Referanseliste for radon og uran i grunnvann	45
12. VEDLEGG: NGUs arbeid med radioaktive elementer, historie og erfaringer.....	48
12.1 Uranprospekteringen ved NGU og bruken av dataene for å gi en oversikt over radioaktivitet fra berggrunnen.....	48
12.2 NGUs rutiner for datainnsamling i uranprospektering – erfaringer.....	51
12.3 Referanseliste for arbeid relatert til Uranprosjektet ved NGU.....	59
13. VEDLEGG: Metodebeskrivelse radiometriske målinger fra fly- og helikopter.....	71
14. VEDLEGG: Eldre kart over naturlig radioaktivitet (fra NGUs kartkatalog).	75

1. GEOLOGISKE DATA FOR KARTLEGGING AV RADONFARE I NORGE

Over lang tid og mange prosjekter har NGU opparbeidet bred kunnskap om naturlig radioaktivitet fra berggrunn og løsmasser, samt samlet data som kan fremlegges som kart og/eller punktinformasjon. Noen av prosjektene og dataene dekker hele Norge, mens andre er begrenset til fylker eller kommuner. I denne rapporten er det forsøkt å sammenstille alt av data som angår uran, og datterproduktet radon, for å gi en oversikt. Dataene kommer både fra systematisk datainnsamling for kartlegging og mer tilfeldig prøvetaking for prospekteringsprosjekt. Prospektering betyr leting etter naturressurser, som mineraler eller olje, og i denne sammenheng er det forekomst av uran og/eller thorium i det omfang at det er økonomisk drivverdig.

Radon (^{222}Rn) kommer fra nedbrytning av uran (^{238}U) og har en halveringstid på 3,8 døgn (Figur 1). Thoron (^{220}Rn) som kommer fra nedbrytning av thorium (^{232}Th) har en halveringstid på 55 sekunder og blir i denne sammenheng ikke vurdert som en bidragsyter i sammenheng med lungekreft fra radon på grunn av sin korte halveringstid. Det finnes et par andre varianter av radon også, men disse har enda kortere halveringstid. Nedbrytningen av radon skjer ved at nukleidkjernen sender ut α -partikler (heliumkjerne) eller β -partikler (elektroner eller positroner) og i enkelte tilfeller sendes overskuddsenergi ut som gammastråling.



Kilde: Wikipedia.org

Figur 1. Nedbrytningskjede for uran (^{238}U , venstre) og thorium (^{232}Th , høyre) som er kilden for radon (^{222}Rn) og thoron (^{220}Rn).

2. REGIONALE GEOFYSSISKE MÅLINGER AV RADIOAKTIVITET FRA FLY OG HELIKOPTER

2.1 Oversikt over tilgjengelige data og eksempler

NGU har utført geofysiske målinger fra luften siden 1959. Etter å ha dekt fastlands-Norge og deler av kontinentalsokkelen med lavoppløselige magnetiske flymålinger, ble et program for høyoppløselige målinger fra helikopter startet tidlig på syttitallet. En oversikt over områder som er dekket med høyoppløselige radiometriske målinger i Norge frem til 2012 er vist i Figur 2.

NGUs utstyr og prosessering har til enhver tid vært moderne. NGU utfører i dag magnetiske, elektromagnetiske og radiometriske målinger fra helikopter. Vanligvis festes den radiometriske sensoren under helikopteret, mens den magnetiske sensoren og EM systemet slepes i en «bombe» ca 30 meter under helikopteret. Standard flyhøyde er 60 meter, og målehastigheten er vanligvis 100 km/t (ca 30 m/s). Den radiometriske sensoren samples en gang i sekundet noe som gir en målepunktavstand på ca 30 meter. Denne type måling utføres også fra fly. Det er da vanlig at den radiometriske sensoren plasseres inne i flyet og at andre sensorer er festet til flykroppen. Målehastigheten kan da være 200 km/t og dobbel målehastighet kompenseres med større sensor og kortere samplingstid. I noen tilfeller kan magnetisk sensor slepes under flyet. Radiometriske målinger fra fly og helikopter gjør det mulig å kartlegge den overflatenære konsentrasjonen av isotopene ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U og ^{40}K (kalium), som er ansvarlig for det aller meste av den naturlige radioaktiviteten. ^{40}K har bare et datterprodukt (^{40}Ar , argon), men ^{238}U og ^{232}Th bryter ned i en serie av henholdsvis 18 og 11 datterisotoper (se Figur 1) til de stabile isotopene ^{206}Pb (bly) og ^{208}Pb er nådd. Hvert enkelt nedbrytningstrinn har sin egen spesifikke alfa- eller betastråling og i noen tilfeller gammastråling. To av de mest tydelige energitoppene i gammaspekteret stammer fra datterisotopene ^{214}Bi (vismut) og ^{208}Tl (thallium, henholdsvis uran- og thoriumserien se Figur 1). Så lenge prosesser ikke tilfører eller tar bort noen produkter i nedbrytningsseriene, vil tellinger fra ^{214}Bi og ^{208}Tl representerer uran og thorium konsentrasjoner (spaltingsrekke er i likevekt). En mer detaljert beskrivelse av metoden er gitt i vedlegg 12.2.

I en periode på 60-tallet utførte NGU radiometriske målinger fra fly. I alt 22 kartblad i målestokk 1: 50.000 ble målt. Måleutstyret var ikke det aller beste (totalstråling), og målingene ble foretatt fra relativt stor høyde. Kvaliteten på disse data er derfor ikke den aller beste. En oversikt over målte kartblad er vist i vedlegg 12.3. Følgende kartblad ble målt:

Sørlandet: 1311 I+IV, 1411 I+IV, 1511 I+IV, 1611 IV, 1312 II+III og 1512 II.

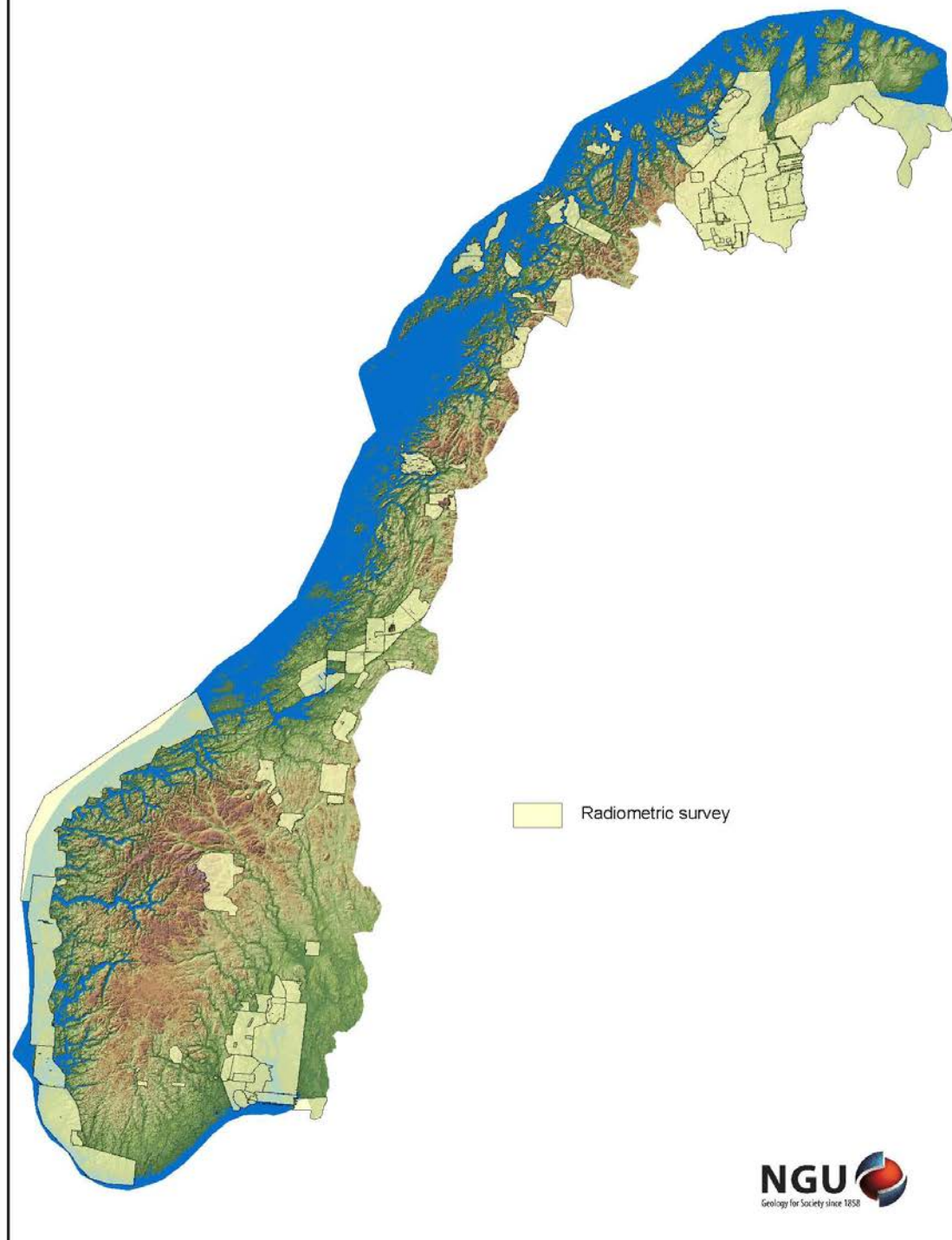
Oslofeltet: 1713 IV og 1814 III

Hedemark: 1816 I, 1916 I-IV, 2016 I+IV, 2017 III og 2117 III

Trøndelag: 1623 II og 1723 IV.

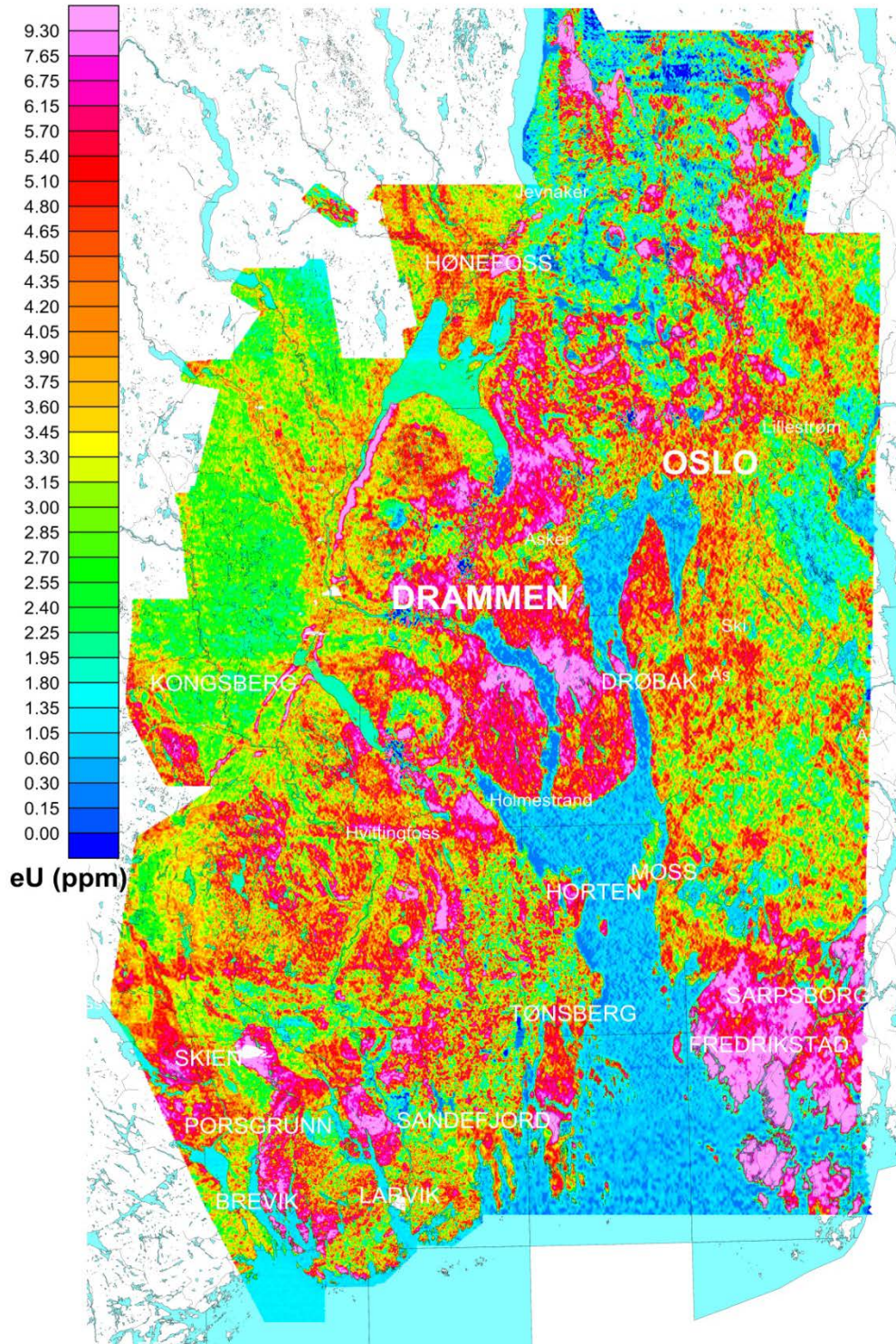
Airborne radiometric surveys in Norway

Radiometriske målinger fra fly og helikopter i Norge

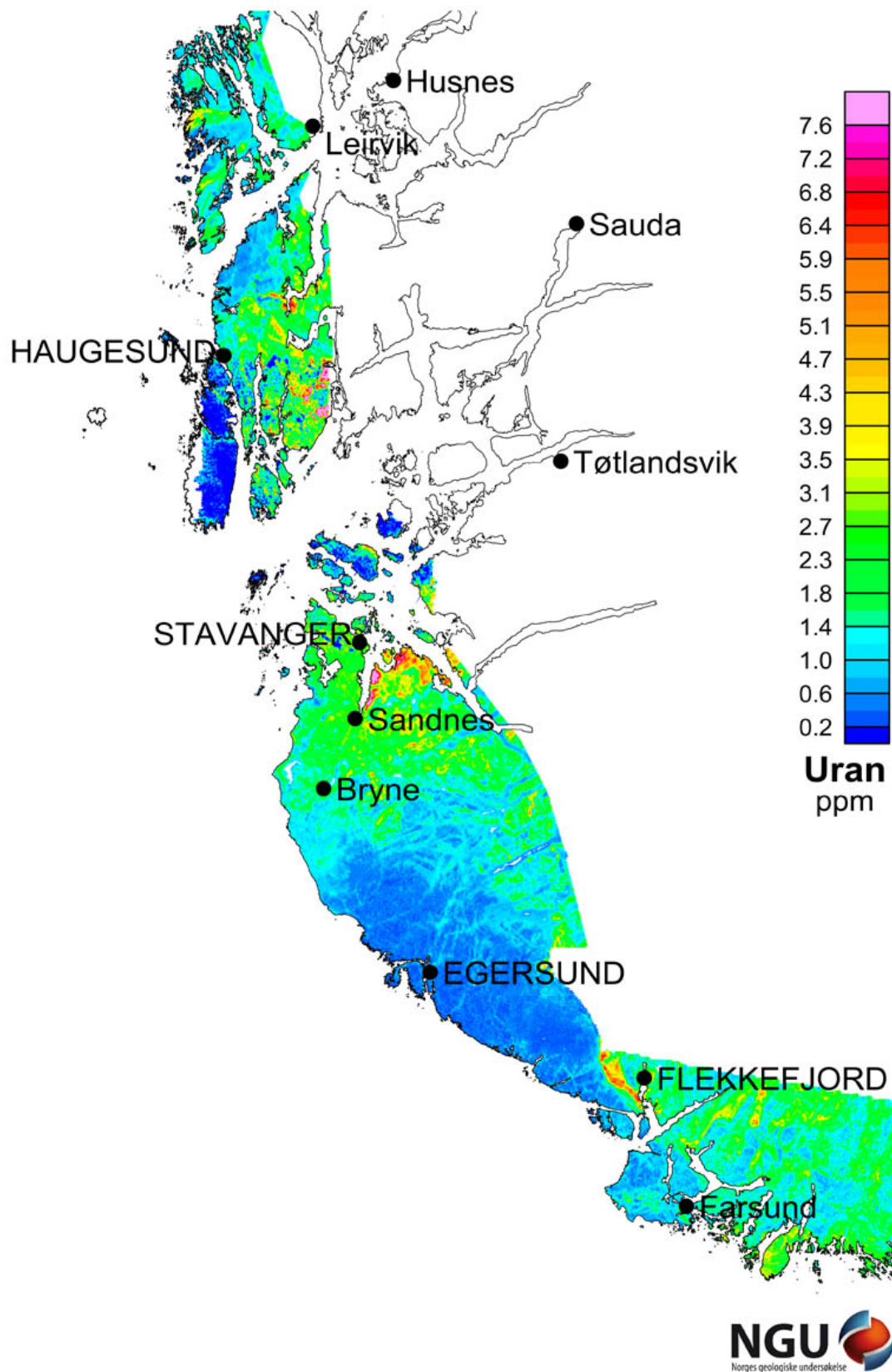


Figur 2. Oversiktskart av radiometriske målinger i Norge, inkludert data til og med 2012.

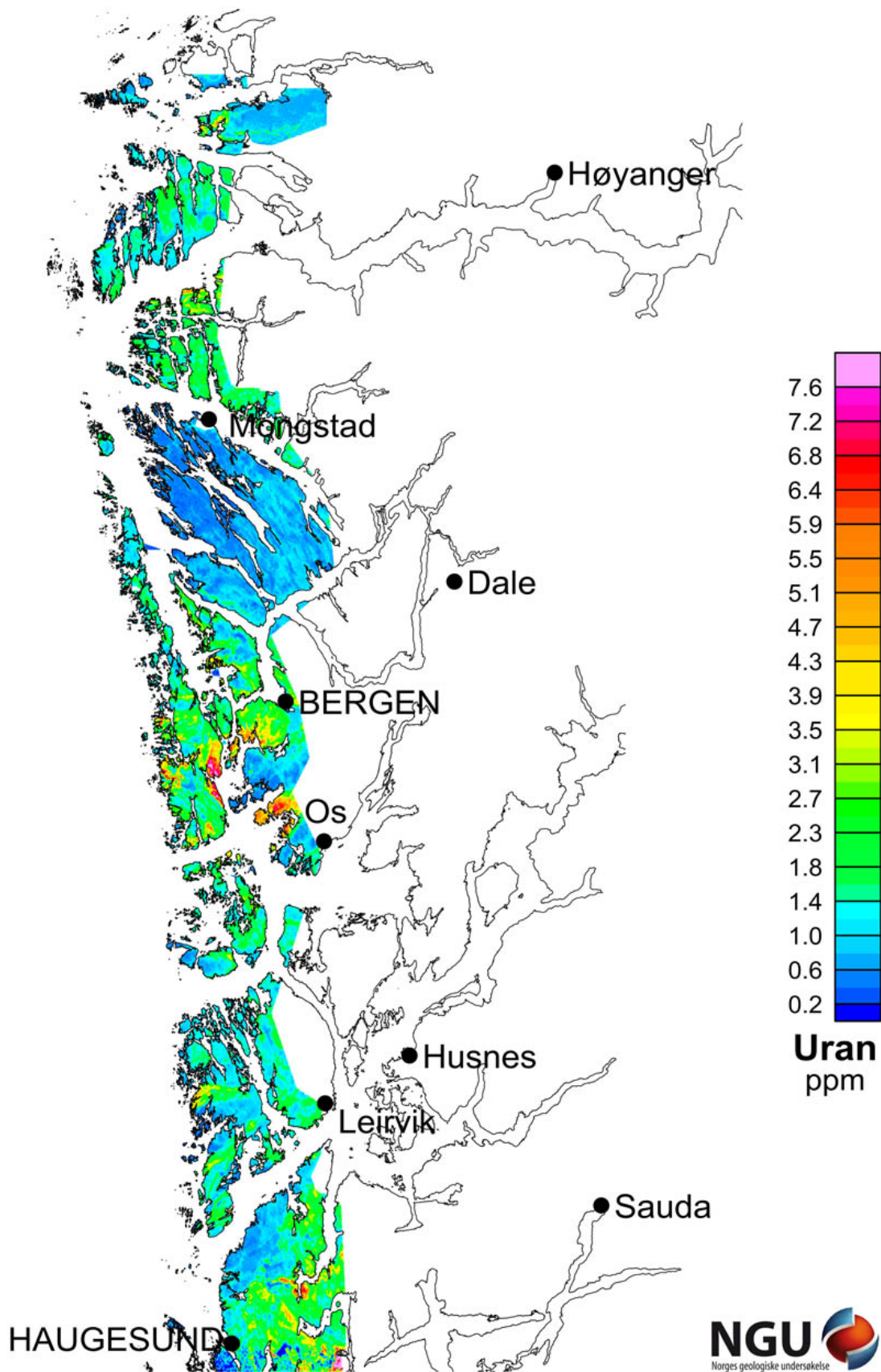
I dag er områdene Østlandet, fra Østfold i øst til deler av Telemark/Buskerud i vest og Oppland/Hedmark i nord, samt lavlandet langs kysten fra Mandal i sør til Smøla i nord dekket av fly- og helikoptergeofysikk med innsamling av data med gammasppektrometer, Figur 3, Figur 4 og Figur 5.



Figur 3. Urankonsentrasjon i grunnen (ppm) for Østlandet. Datafangsten er utført med gammasppektrometer fra fly og helikopter og data fremstilles med en cellestørrelse på 50x50 meter. Kvaliteten på dataene tilsvarer en oppløsning som tilsvarer ca. målestokk 1:50.000 (for detaljer, se Baranwal et al 2013).



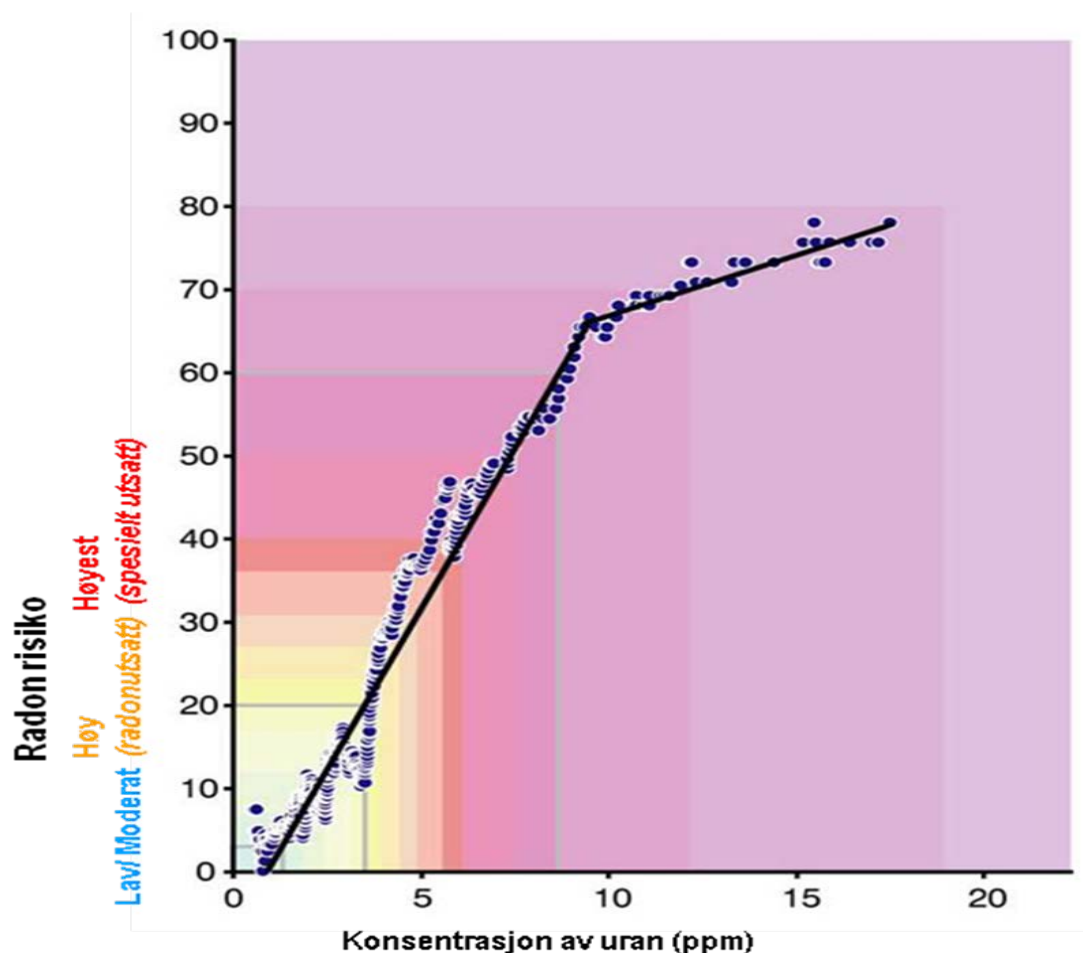
Figur 4. Urankonsentrasjon i grunnen (ppm) for kystområdet i Sør-Norge. Datafangsten er utført med gammaspektrometer i fly og cellestørrelsen er 50x50 meter. Kvaliteten på dataene tilsvarer en oppløsning som tilsvarer ca. målestokk 1:50.000 (fra Olesen et al. 2013).



Figur 5. Urankonsentrasjon i grunnen (ppm) for kystområdet på Vestlandet. Datafangsten er utført med gammaspektrometer i fly og cellestørrelsen er 50x50 meter. Kvaliteten på dataene tilsvarer en oppløsning som tilsvarer ca. målestokk 1:50.000 (Fra Olesen et al. 2013).

2.2 Oppfølgende undersøkelser

Forholdet mellom urankonsentrasjoner i grunnen rundt boliger og forekomsten av høye radonnivåer i bolig er studert av Smethurst et al. (2008). Det er god samsvar der prosentandel av målte boliger med radonnivå over anbefalt tiltaksgrense på 200 Bq/m^3 (anbefalt tiltaksgrense i 2006) er plottet mot beregnet konsentrasjon av uran i grunnen basert på målinger fra luftbåren gammaspektrometer. Dataene er tilpasset en kurve som består av to rette linjer. Denne relasjonen kan benyttes til å anslå prosentandel av boligmasse med radonnivå i inneluft over tiltaksgrense i områder hvor det foreligger data fra luftbåren gammaspektrometer, men ikke radonmålinger i inneluft (Smethurst et al., 2008).



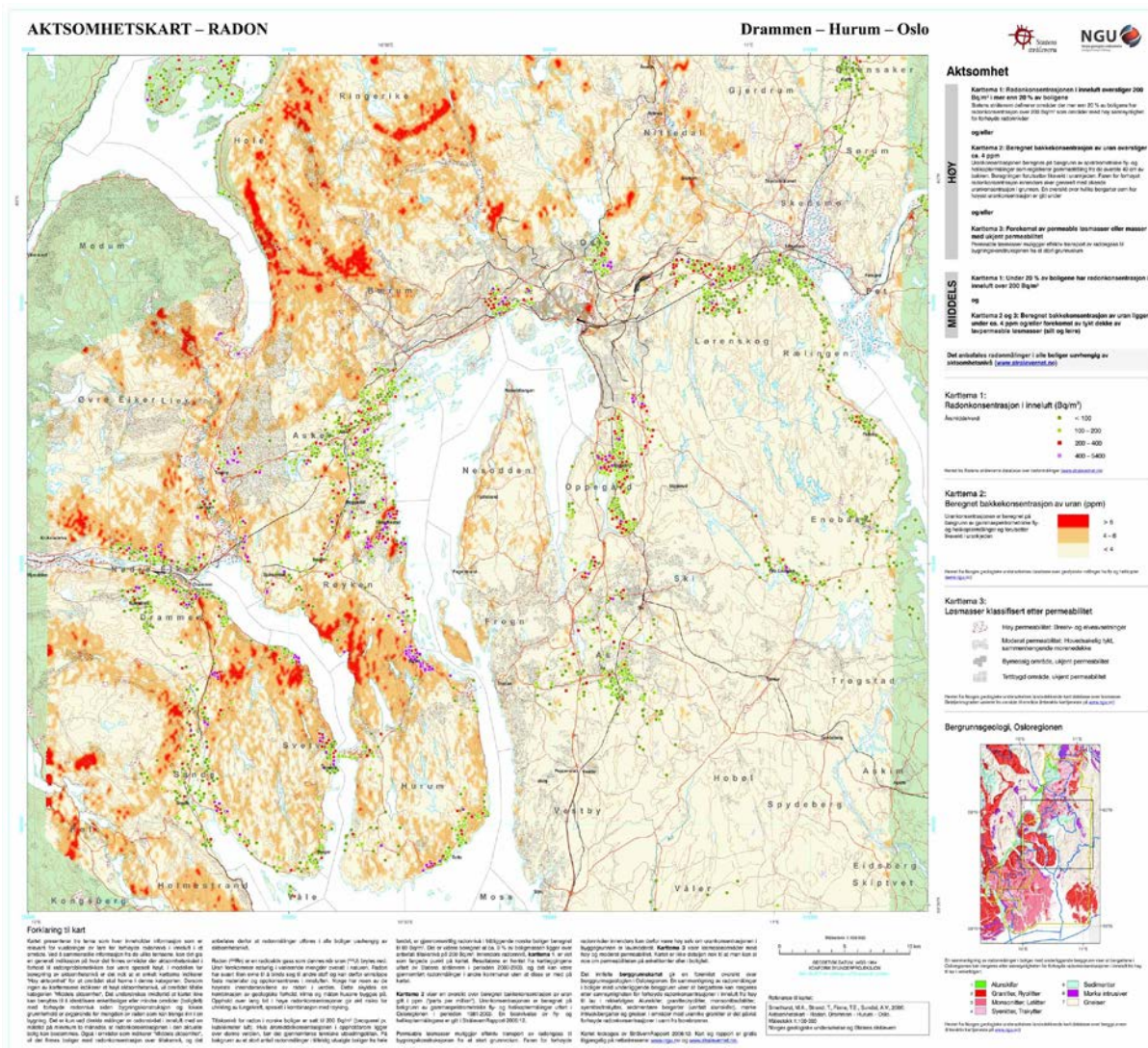
Figur 6. Prosentandel av målte boliger med radonnivå over anbefalt tiltaksgrense på 200 Bq/m^3 (anbefalt tiltaksgrense i 2006) er plottet mot beregnet konsentrasjon av uran basert på radiometriske fly- og helikoptermålinger (Smethurst et al., 2008).

I ett tilfelle har NGU studert sammenhengen mellom uranrespons målt fra helikopter, uran på bakken og radon i jordluft (Walker 1993). I dette arbeidet ble det også sett på radon i grunnvann.

Høsten 2006 utført NGU i samarbeid med Nome kommune en detaljert radiometrisk undersøkelse fra helikopter ved Ulefoss (Heincke et al. 2008). For å få størst mulig oppløsning ble det fløyet spesielt lavt og sakte. Ulefoss er kjent for sitt høye innhold av thorium, men det er også kartlagt høye urankonsentrasjoner.

3. AKTSOMHETSKART FOR RADON

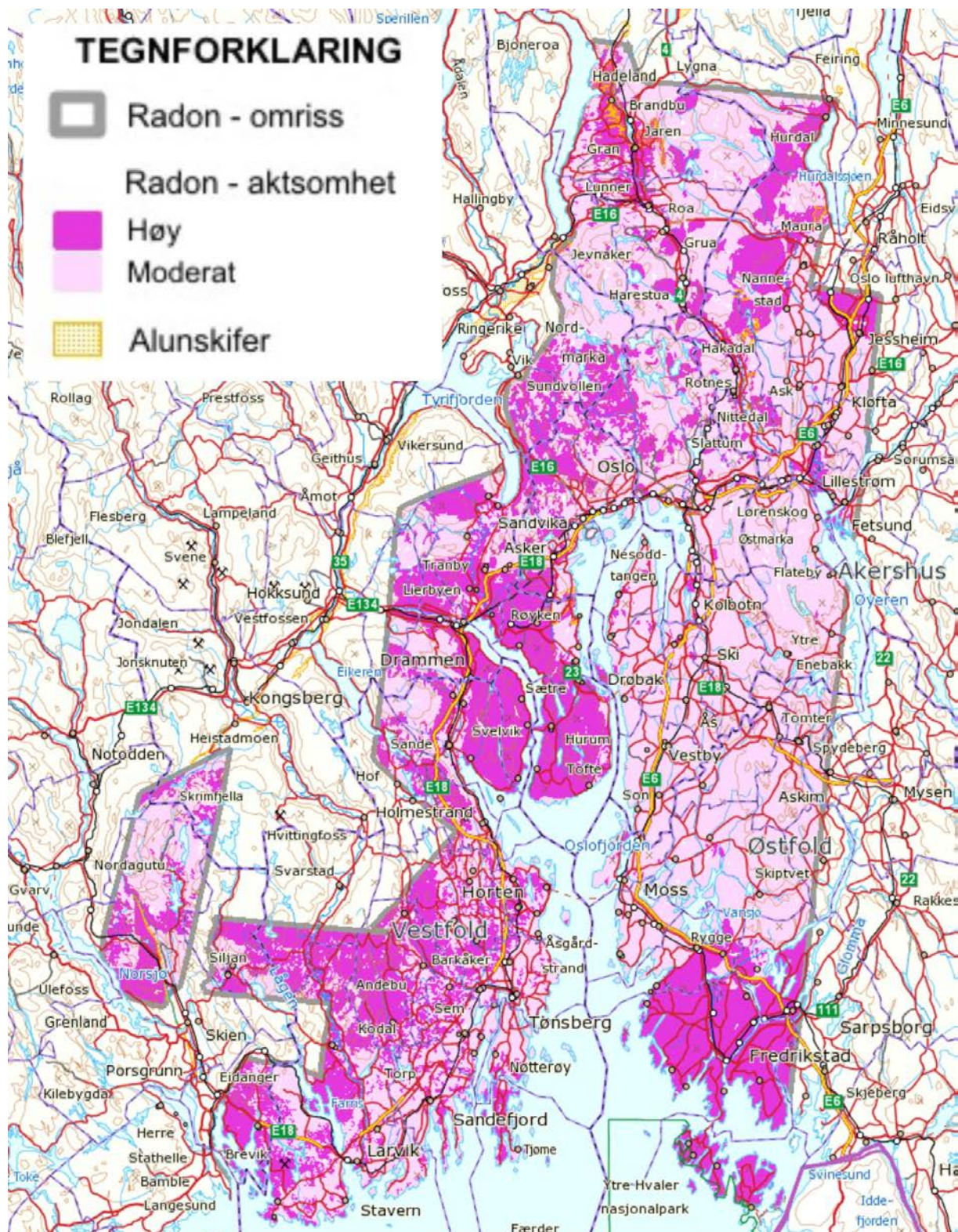
I samarbeid med Statens strålevern har NGU utarbeidet et "aktsomhetskart for radon" (Smethurst med flere, 2006a-d) som dekker sentrale Østlandet. Kartet er basert på innendørsmålinger, innhentet i perioden 2000-2003 av Statens strålevern, berggrunnsgeologi og løsmasse fra kvartær tid, og radiometriske målinger fra fly- og helikoptermålinger fra perioden 1981-2003. Disse kartene kom ut i 2006 da tiltaksgrensen for radonkonsentrasjon var 200 Bq/m³ og maksimumsgrense var 400 Bq/m³, det dobbelte av dagens grenseverdier (100 og 200 Bq/m³). Et eksempel på eksisterende aktsomhetskart for radon er gitt i Figur 7.



Figur 7. Aktsomhetskart for radon som dekker Drammen - Hurum og Oslo i målestokk 1:100.000 (Smethurst et al., 2006).

Andre områder som er dekket av lignende kart som vist i Figur 7 er Sarpsborg-Fredrikstad-Moss, Skien-Sandefjord-Holmestrand og Oslo-Gran- Hurdal. Disse kartene er tilgjengelig på NGUs nettsider: <http://www.ngu.no/no/hm/Geofarer/Radonfare/>.

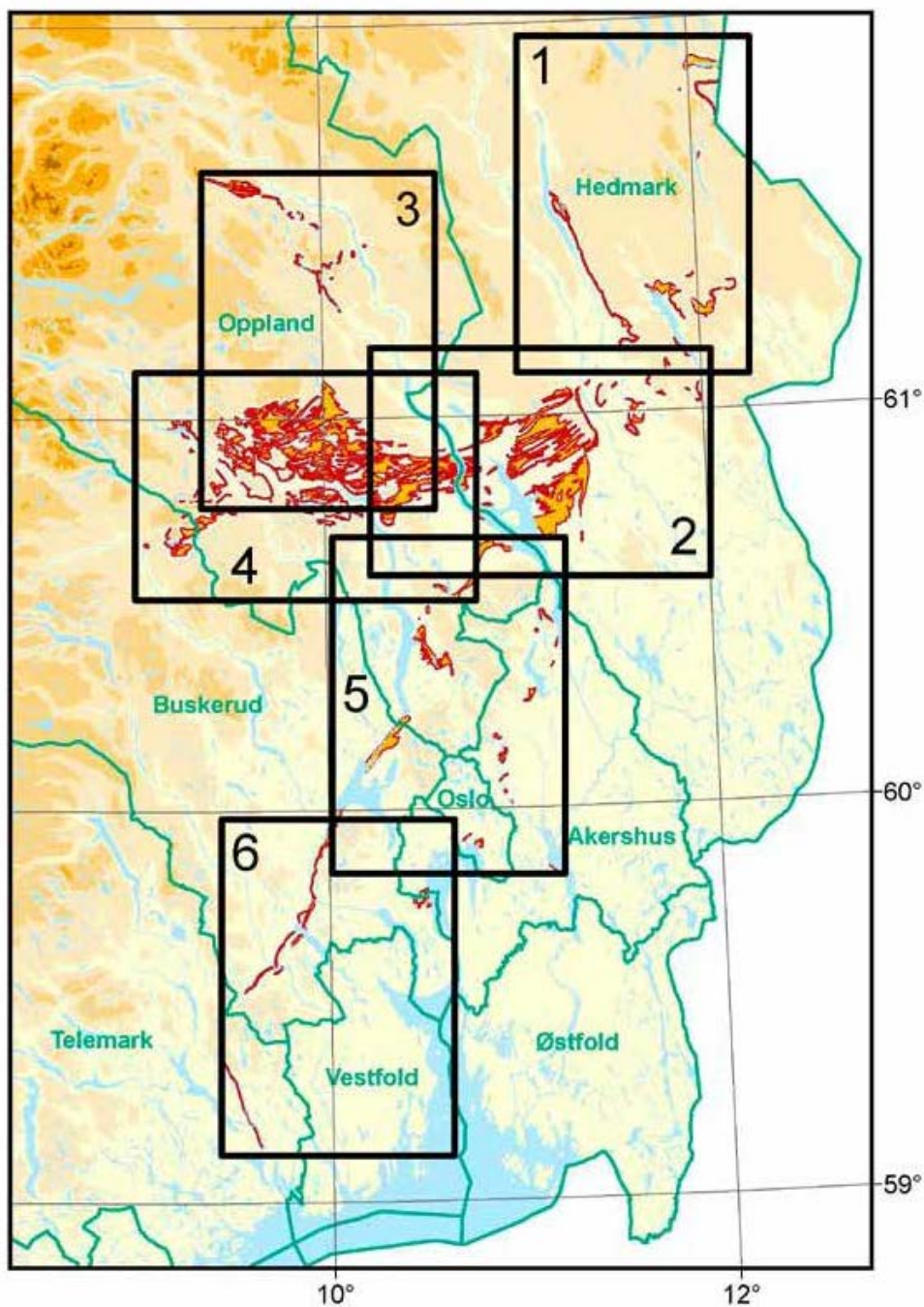
Aktsomhetskart for radon som ble utgitt i 2006 er også tilgjengelig på nett. I nettversjonen er klasseinndelingen forenklet og en har kun to klasser *høy* og *moderat* aktsomhet. Kartet er basert på grenseverdier fra 2006 (200 og 400 Bq/m³), som er høyere enn gjeldende grenseverdier.



Figur 8. Aktsomhetskart for radon tilgjengelig på nett; <http://geo.ngu.no/kart/arealisNGU/>.

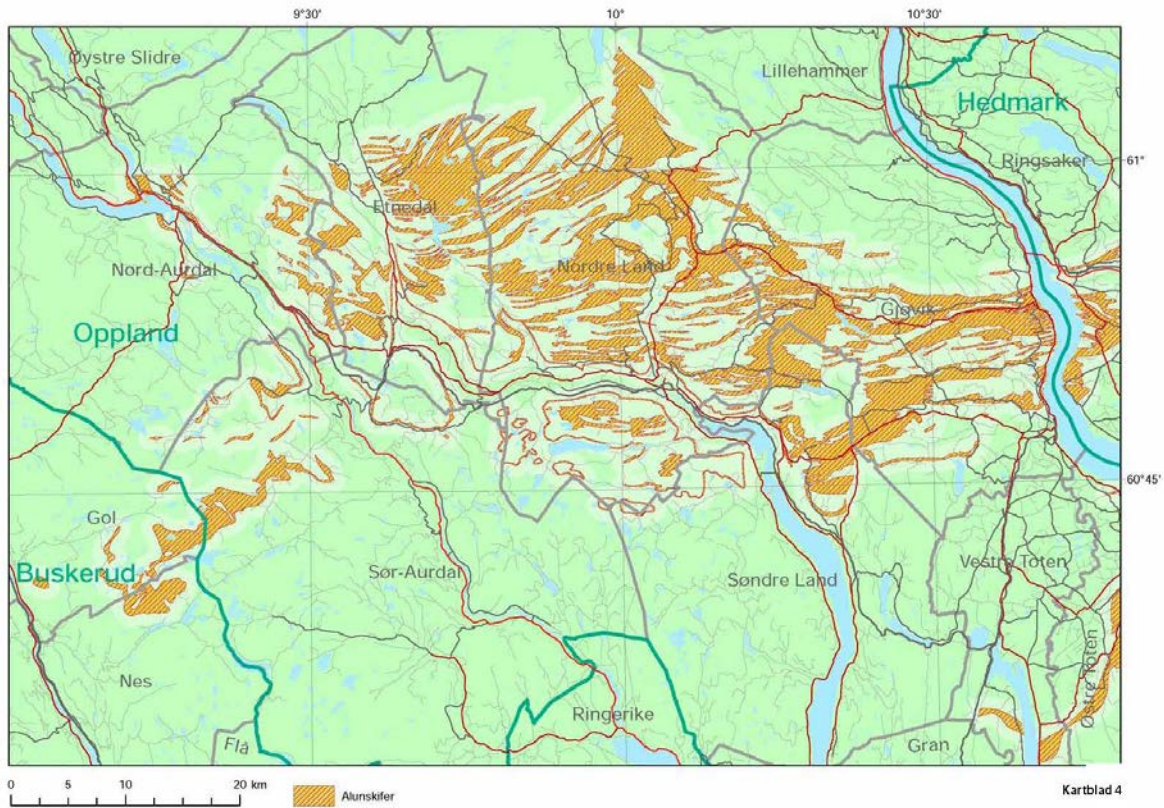
4. ALUNSKIFERKART

I 2011 ble det utgitt et "alunskiferkart" som er basert på berggrunnsgeologi i målestokk 1:250.000, hvor lagpakken der alunskifer kommer til overflaten er angitt. Dette kartet dekker deler av fylkene Oppland, Hedmark, Buskerud, Akershus, Oslo, Vestfold og Telemark som vist i Figur 9. Alunskifer er den bergarten i Norge som er kjent for å inneholde høye konsentrasjoner av uran, kilden til radon, og hvor flest hus er registrert med høye radonkonsentrasjoner innendørs. Derfor er dette kartgrunnlaget viktig informasjon for kommuner innen arealplanlegging og kartdataene er digitalt nedlastbare fra nettsidene til NGU, <http://geo.ngu.no/kart/arealisNGU/>.



Figur 9. Oversiktskart for alunskifer på Østlandet. Alunskiferkartet er også tilgjengelig på NGU sine nettsider: <http://geo.ngu.no/kart/arealisNGU/> og som nedlastbare data fra NGUs nettsider www.ngu.no.

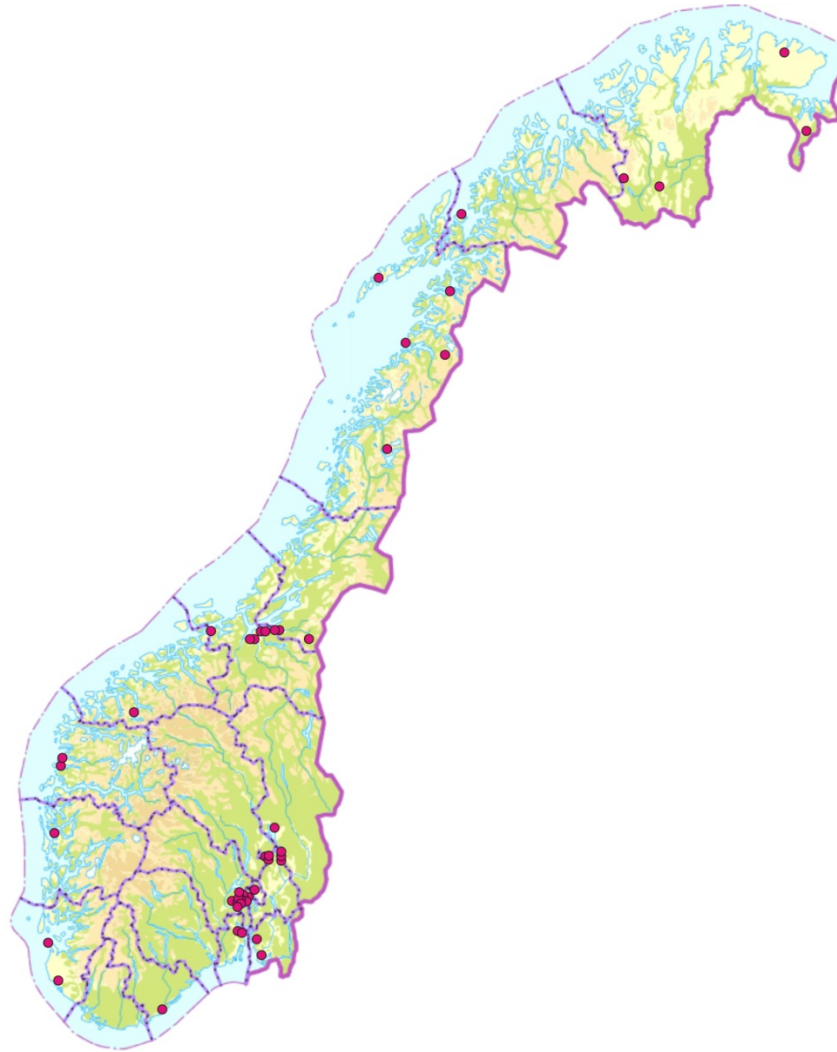
Nordre Land i Oppland er et eksempel på et område hvor det forekommer mye alunskifer og risikoen for høye radonkonsentrasjoner innendørs er stor (Figur 10). Alunskifer er angitt med skravert oransje symbol i kartet. Det skraverte området viser lagpakken som alunskifer forekommer i og ikke nødvendigvis sann tykkelse (utbredelse) av alunskifer som forekommer i dagen.



Figur 10. Utsnitt av alunskiferkartet som dekker deler av Buskerud, Oppland og Hedmark fylke.

5. NATURLIG TOTAL GAMMASTRÅLING I NORSKE BERGARTER

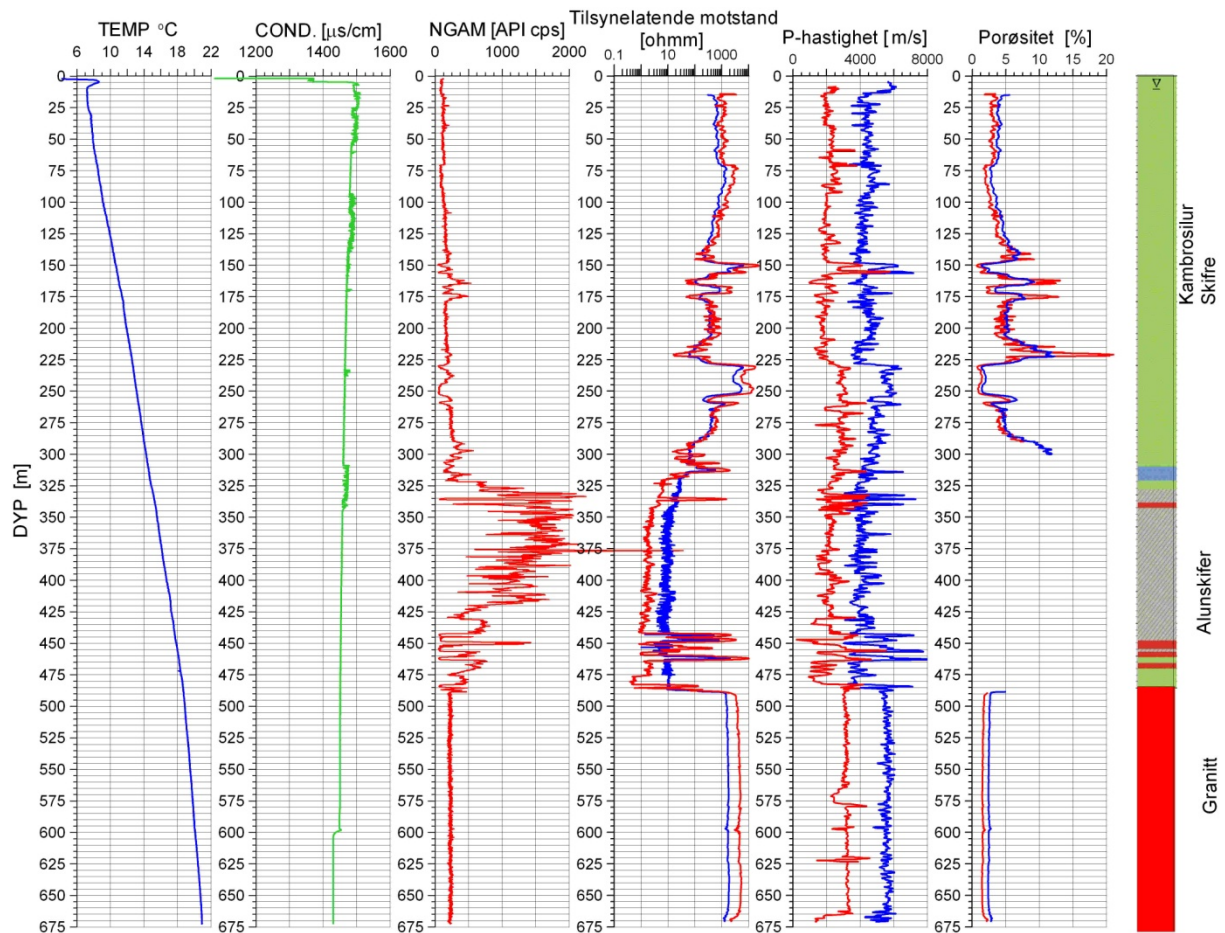
NGU har siden år 2000 logget et sted mellom 80 og 90 borehull over hele landet der ulike fysiske parametre er målt. De fleste målinger er gjort i Oslofeltet, men det er også utført målinger på Sørlandet, Vestlandet, Trøndelag, og Nord-Norge. En av parametrene som er målt er naturlig total gammastråling. Figur 11 viser hvor i landet det er gjort målinger av naturlig gammastråling i borehull.



Figur 11. Kart over Norge som viser hvor det er gjort måling av naturlig total gammastråling i borehull (Elvebakk 2011).

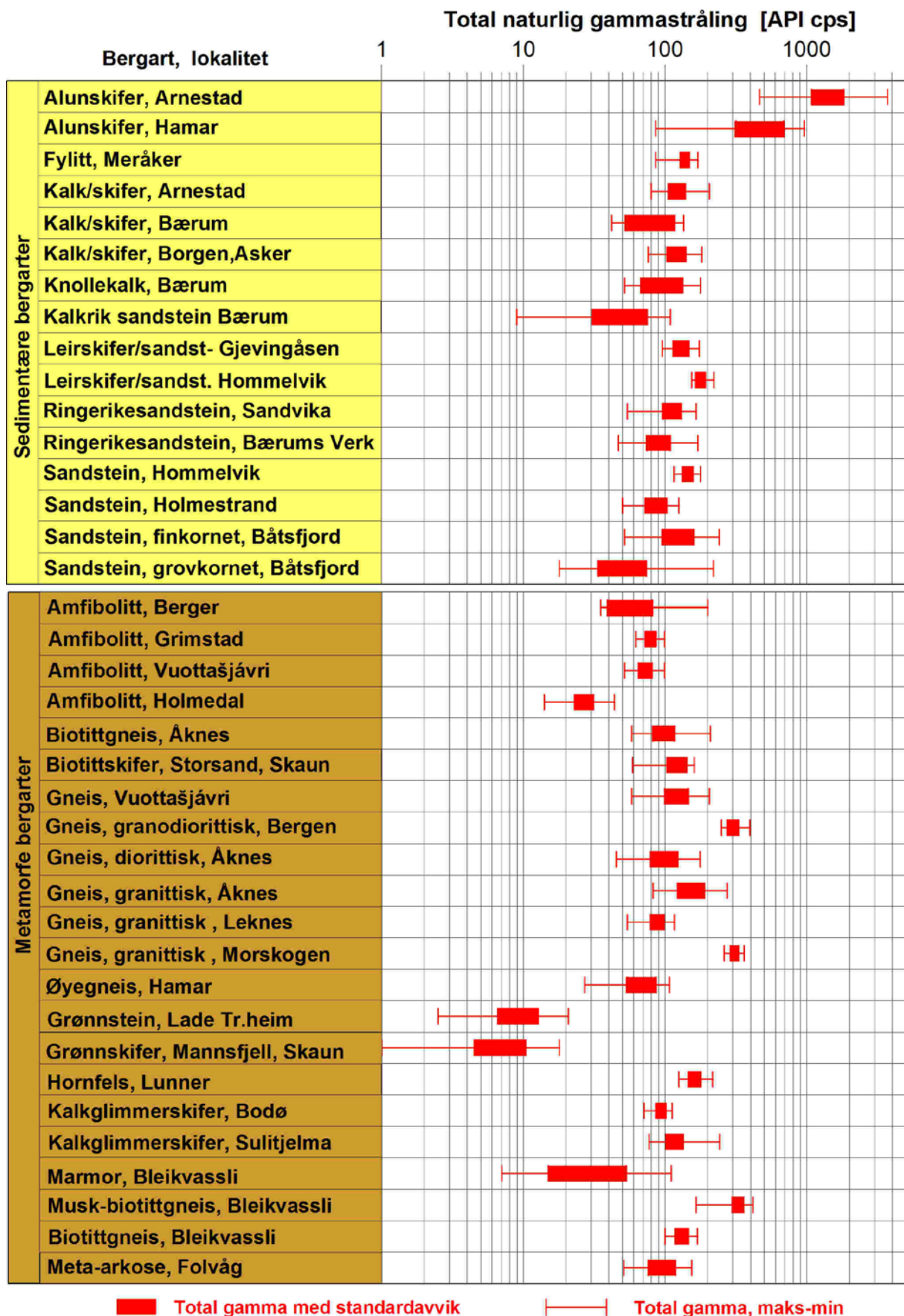
Naturlig gammastråling måles med en NaI-krystall (sylinder) med diameter 50 mm og høyde 25 mm. NGUs utstyr har hittil ikke mulighet til å skille mellom de forskjellige elementene som gir naturlig stråling (U, Th og K). Det er derfor totalstrålingen som måles. Måleenheten er cps (counts per second) API standard (API cps). API er en felles internasjonal standard som sonden er kalibrert etter, slik at målinger med forskjellig utforming kan sammenlignes.

Med gammalogg kartlegges den naturlige gammastrålingen (totalstråling) langs borehullet. Forandringer i gammastråling er knyttet til endringer i geologien og den mineralogiske sammensetningen i bergartene. Det er i hovedsak elementene kalium, uran og thorium som gir gammastråling. Mest vanlig er kalium som finnes i feltspat. Feltspat (kalifeltspat) er et mineral som forekommer i de vanligste bergartene. Kvartsitt, f. eks., har liten gammastråling (mye kvarts), mens noen granitter har sterkere stråling da de inneholder feltspat og i enkelte tilfeller uran og thorium. Alunskifer har høy stråling da den inneholder mye uran. Måling av total gammastråling kan derfor ikke si noe direkte om faren for radon. Figur 12 viser logger fra Arnestad i Asker kommune. Her vises alunskiferen tydelig på gammaloggen med verdier opp til 2000 cps (API standard; Elvebakk, 2011).

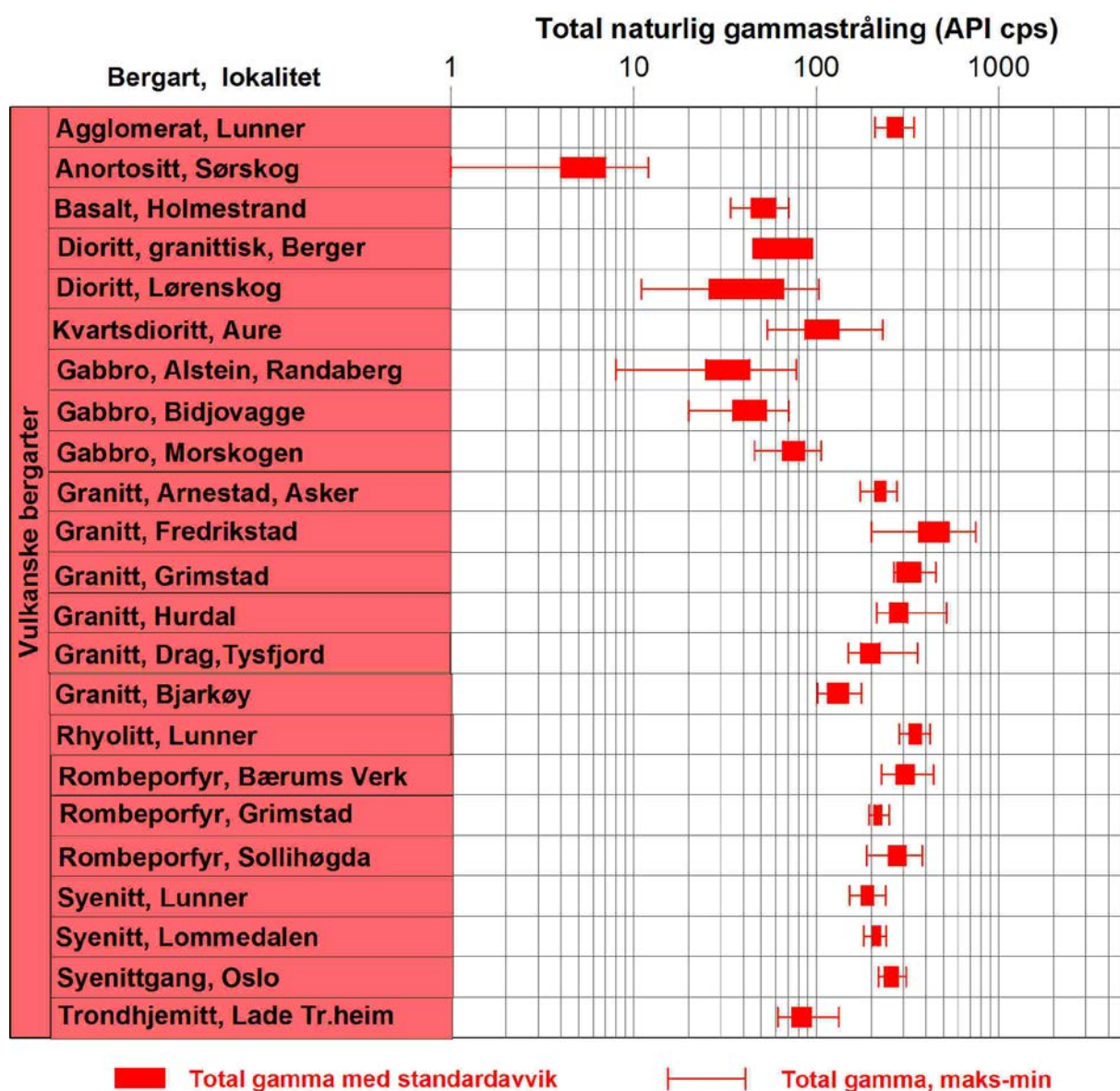


Figur 12. Borehullslogger fra Arnestad skole i Asker. Total gamma (NGAM) viser tydelig alunskiferen med høy stråling (Elvebakk, 2011).

Figur 13 og Figur 14 viser en oversikt over gammaverdier i norske bergarter målt i borehull (Elvebakk, 2011). Naturlig gammastråling, som er viktig for å identifisere bergarter og bergartsgrenser, viser store variasjoner. Alunskiferen skiller seg ut med veldig høy stråling (>1000cps API). Granitt og rombeporfyr har også forholdsvis høy stråling (300 -500 cps). De fleste andre bergarter ligger under 200 cps hvor grønnstein/grønnskifer er definitivt lavest med mindre enn 10 cps. I noen bergarter; gneiser, granitter og pegmatitter, kan en se gammaverdier (peaker) som er mye høyere enn i bergarten generelt. Granitten på Bjarkøy viste gammaverdier opp mot 12000 cps som er mye høyere enn målt gamma i alunskiferen i Asker. Dette skyldes trolig radioaktive mineraler som inneholder uran eller thorium (Dalsegg & Elvebakk 2012).



Figur 13. Oversikt over målte gammaverdier (totalstråling API-standard) i sedimentære og metamorfe bergarter. Målingene er gjort i borehull i Norge (Elvebakk 2011).



Figur 14. Oversikt over målte gammaverdier (totalstråling API-standard) i magmatiske bergarter. Målingene er gjort i borehull i Norge (Elvebakk 2011).

6. URANPROSPEKTERINGEN OG RADIOAKTIVITET FRA BERGGRUNNEN

NGU utførte kartlegging av radioaktive grunnstoff som uran og thorium fra 1950-tallet til ca. midten av 1980-tallet. Disse dataene ble blant annet brukt som bakgrunnsdata ved måling av radioaktivt nedfall etter Tsjernobyl-ulykken i 1986. Data fra målinger av naturlig radioaktivitet fra berggrunnen har vært og er grunnlaget for framstilling av fylkeskart over naturlig radioaktiv stråling (Figur 15 og Figur 16). Vedlegg 12.3 viser bl.a. en oversikt over dekningsgrad for NGUs radiometriske målinger fra bil.

I forbindelse med uranprospektering har NGU over en årrekke analysert bergartsprøver for innhold av radioaktive- og hovedelementer, deriblant uran. Dataene er lagt inn i en database som består av analyser av 4903 bergartsprøver, hvorav 2515 er målt for total gammastråling. Her er ikke instrumentet kalibrert og målingene kan ikke si noe om konsentrasjoner. 3510 prøver er målt med kalibrert gammaspektrometer og viser uran i ppm (1-51600 ppm), og 2001 prøver er målt med XRF og viser uran i ppm (11-53000 ppm). De fleste prøvene ble samlet inn i sammenheng med mineralprospektering, hvor målet er å finne høye konsentrasjoner av mineraler som kan være økonomisk drivverdig. Dette reflekteres også i kartet som viser distribusjonen og urankonsentrasjonene av prøvene (Figur 17) hvor det generelt er svært høye konsentrasjoner av uran.

NGU sin aktivitet mot kartlegging av uran og thorium forekomster i Norge er beskrevet i sin helhet i Vedlegg 12.1, med utfyllende referanseliste. Her vil det i korte trekk bli beskrevet bakgrunnen for kartleggingen samt produkter som er relevant for radonfare i dag.

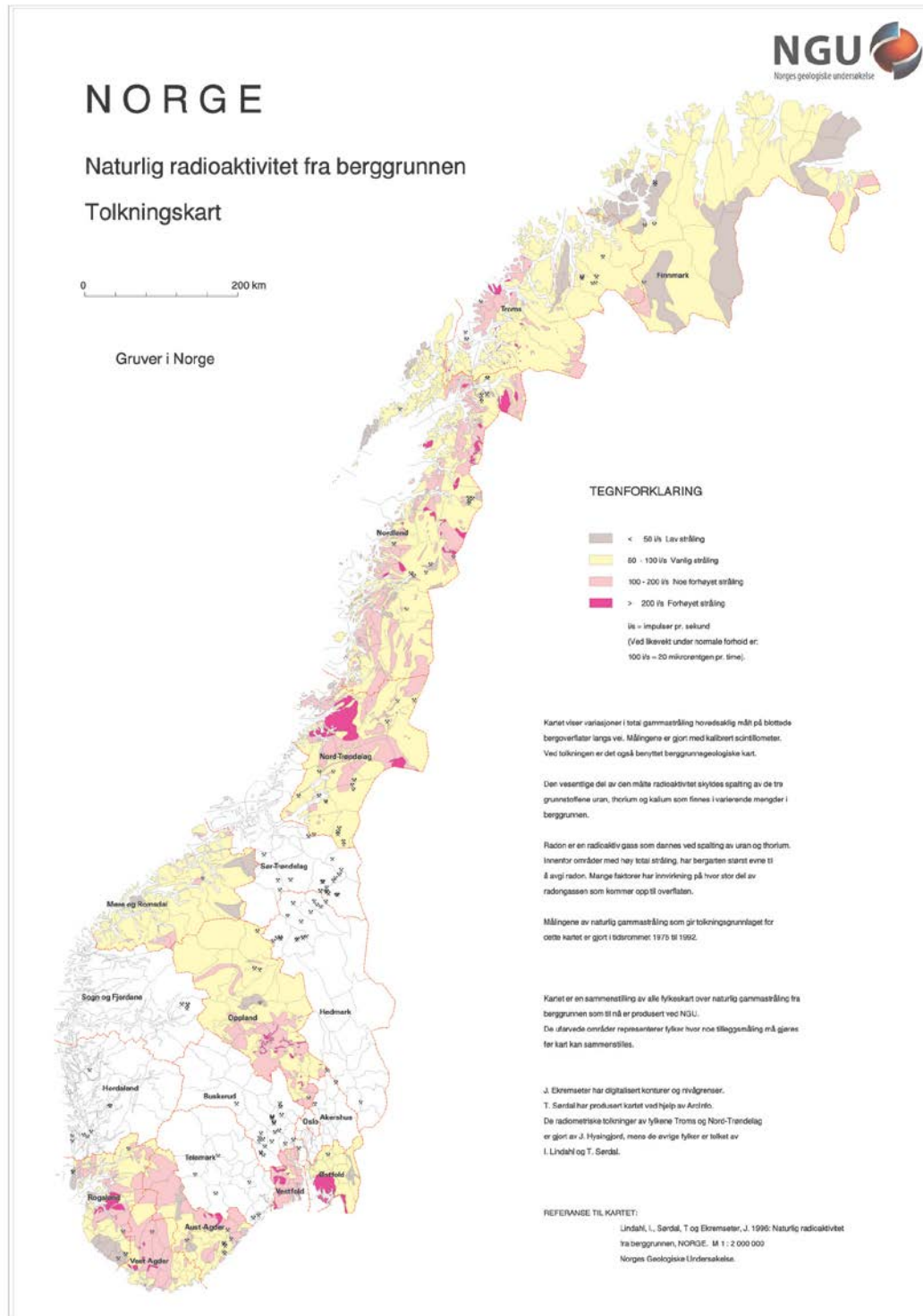
6.1 NGUs aktiviteter

NGU var involvert i kartlegging av uran- og thoriumforekomster fra 1950-tallet og til slutten av 1980-tallet. Det førte til undersøkelser av uraninnholdet i spesielle bergarter slik som alunskiferen i Oslo-feltet, og på noen lokaliteter ble de mest radioaktive delene av skiferen oppboret (Skjeseth 1958). Det ble i denne perioden gjort flymagnetiske og radiometriske målinger over Norge. Forhøyet radioaktivitet fra en del bergarter på Østlandet kom i den sammenheng fram. I denne perioden ble det av NGU også målt radioaktivitet fra bil. Det meste av målingene var av total gammastråling, hvor en ikke kan skille mellom utslag fra uran, thorium eller kalium. Dataene ble presentert i form av kart over naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, framstilt som fylkeskart hvor Figur 15 viser hvor fylkeskart forekommer med et eksempel på kartet vist i Figur 16.

Kartene over naturlig radioaktivitet er bygd på punktmålinger av de typiske bergartene langs veiene i forbindelse med bilmålinger. Måleverdiene er samtolket med geologiske berggrunnskart, og en har antatt at den enkelte bergartssekvens har et homogent innhold av radioaktive elementer. Ved tolkningen er punktkilder med høy radioaktivitet ikke benyttet. Det er imidlertid i tolkningen tatt hensyn til dette der det er mange punktkilder i samme geologiske formasjon. Ved samtolkingen er også helikoptermålinger utnyttet. Disse målingene gir langt bedre dekning, men de er samtolket slik at måleverdiene er koordinert med punktmålingene på bakken. Det er også ved bruken av helikopterdata tatt hensyn til hvor det er målt over kvartære løsmasser, med å sammenstille kart over kvartærgeologi og radiometri, siden bilmålingene kun har lagt vekt på berggrunn og ikke løsmasse.

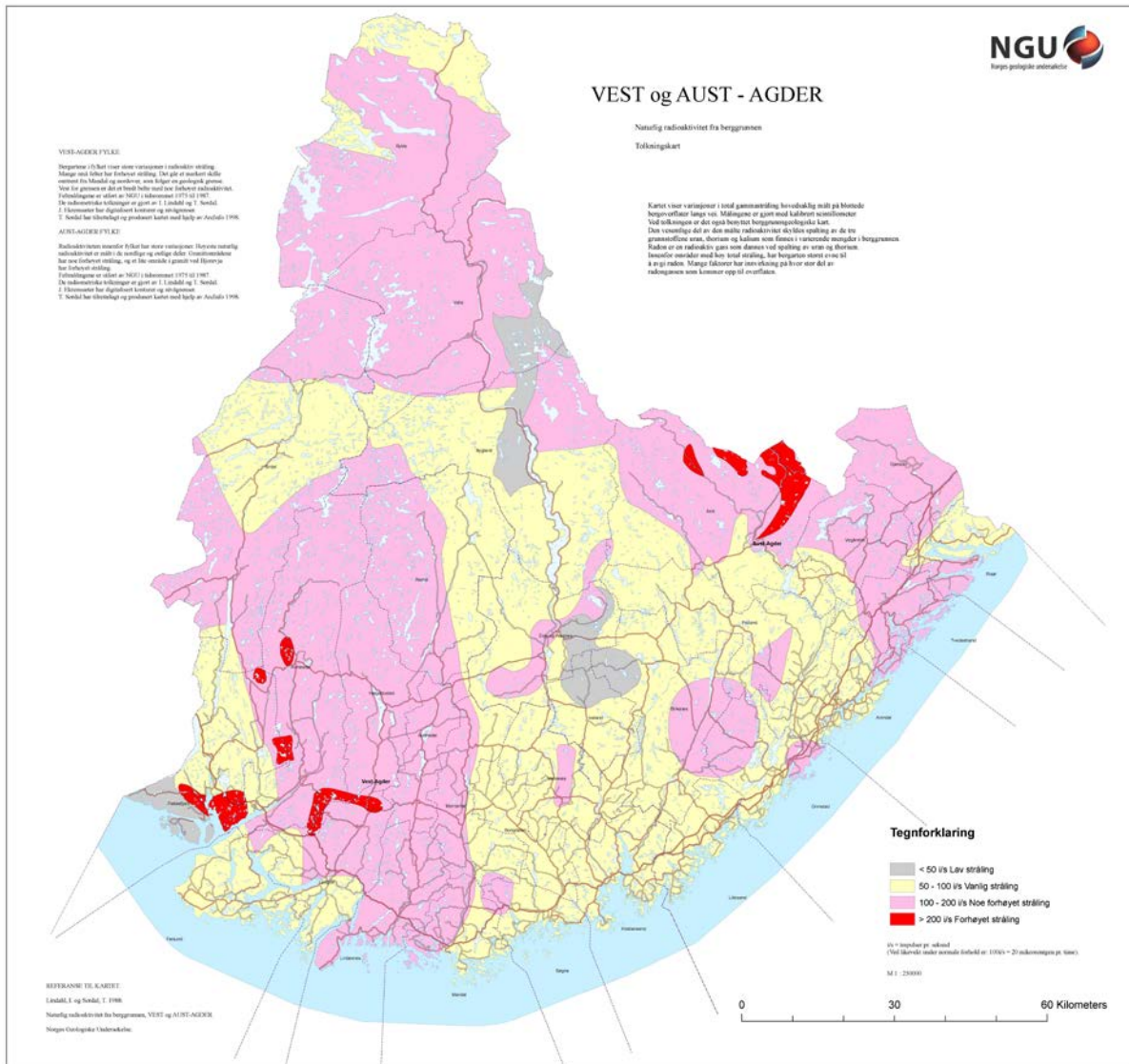
I dag foreligger det kart over naturlig radioaktivitet i berggrunnen i fylkene Finnmark, Troms, Nordland, Nord-Trøndelag, Møre og Romsdal, Oppland, Østfold, Vestfold, Øst-Agder,

Vest-Agder og Rogaland som vist i Figur 15. I tillegg er det laget kommunekart for Asker, Røyken og Hurum (Lindhahl & Hatling, 1988; Lindahl & Sørđal, 1988a, b, c, d; Lindahl, Sørđal & Ekremseter, 1996; Lindahl & Sørđal, 1998; Lindahl & Sørđal, 2003a og b). Et eksempel på fylkeskart er vist i Figur 16. Alle kommunene i Oppland har for eksempel fått mer detaljerte kart med rapporter over naturlig radioaktivitet fra berggrunnen (Lindhahl & Iversen, 1988a, b, c, d, e, f, g, h, i; Lindahl & Sørđal, 1988d).



Figur 15. Naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, kart som viser dekning av fylkeskart med tolkning (Lindhahl, Sørđal & Ekremseter, 1996).

Fylkeskartene for naturlig stråling fra berggrunnen er senere digitalisert og kartene foreligger nå som et NGU-produkt i farger.



Figur 16. Fylkeskart for Vest- og Aust-Agder fylke av naturlig radioaktivitet fra berggrunnen (Digital versjon etter Lindahl & Sørvald, 1988).

6.2 Geologi: Bergartsmiljø og naturlige variasjoner - erfaringer

Forskjellige bergartene har vanligvis forskjellige variasjonsbredder for innhold av radioaktive elementer. Av de magmatiske bergarter er det generelt de mest SiO₂-rike som har høyest innhold av radioaktive elementer. Årsaken er den naturlige anrikingsprosessen som skjer ved magmatisk differensiasjon, og forholdet gjelder både dypbergarter og dagbergarter. Det betyr at en granitt nesten alltid har mer uran enn en gabbro, og en rhyolitt har mer uran enn en basalt eller grønnstein. Men så finnes det som alltid ellers i naturen mange unntak som skyldes spesielle geologiske forhold og spesielle differensiasjonsprosesser for magmatiske bergarter. Gjentatt oppsmelting av bergarter ved utviklingen av jordskorpa gjør da at yngre granitter har større mengder av spesielle elementer enn eldre granitter, inkludert uran og

thorium, fordi de har fått en ytterligere oppkonsentrering ved gjentatt differensiasjon (oppdeling i ulike grupper, segregering).

Sedimenter får et innhold av U og Th som delvis er avhengig av kildebergartene, men innholdet er også avhengig av betingelsene ved avsetningen av sedimentene. Kvartsitter, arkoser og mer finkornede sedimenter som er avsatt klastisk (sediment som består av fragmenter og korn fra andre bergarter) under oksiderende forhold, har vanligvis lavt innhold av radioaktive elementer. Det samme er tilfelle med kalkstein/marmor. Under avsetningsprosessen kan en imidlertid få anrikning av tungmineraler i bånd eller enheter med større mektighet. De aksessoriske tungmineralene fra bergartene som forvitrer er de som gjerne har forhøyede verdier av uran og thorium. Sedimenter som avsettes under reduserende forhold akkumulerer gjerne noe organisk materiale som ved metamorfose blir til grafitt. Uran som er et av de mest lettløselige metallene under oksiderende forhold oppkonsentreres gjerne i organisk materiale eller under reduserende forhold slik som i alunskifer. I tillegg til dette kan senere hydrotermale prosesser som har funnet sted etter bergartsdannelsen komplisere det generelle bildet for innhold av radioaktive grunnstoffer. Ofte er det i tilknytning til granittene dannet pegmatitter, fra restsmelte eller metamorfose, som ofte gir en ytterligere anrikning av uran og thorium.

I Uranprosjektet ble det gjort omfattende prøvetaking av noen av de mest radioaktive granittene. Det gjelder flere granittmassiver i Telemark og i Nord-Norge. Flere analysesett fra systematisk prøvetaking av granittene finnes i NGUs første litogeokjemiske database URANAL. Fra den prospekteringen som er gjort vet vi hvilke granittmassiver som har høye/lave innhold av radioaktive elementer. Vi kjenner også til en del andre bergarter og bergartsformasjoner og regioner som har forhøyet radioaktivitet. Å ta hensyn til bergartene og bergartsmiljøet kan være til stor hjelp for vurdering av radonrisiko. I tillegg til at avgivelse av radon fra berggrunnen er avhengig av dens uran- og thoriuminnhold, er porøsitet og oppsprekning meget viktige faktorer. Radon migrerer gjennom bergarten, og over en skikkelig knusningssone vil avgivelse av radon kunne være betydelig selv om innholdet i bergarten er normalt. Mange andre faktorer som kan spille inn er variasjonen i lufttrykket, vannfylt eller tørt jordsmonn, og tele i grunnen som gjør overflaten mindre gjennomtrengelig for radon. Radoninnholdet kan for eksempel bygges opp under telen i løsmassene.

6.3 Kvartærgeologi: Et forvittringsprodukt fra berggrunnen - erfaringer

Løsmassene eller de kvartære avsetningene som ligger oppå berggrunnen er derivert fra denne, men ikke nødvendigvis fra berggrunnen som ligger under. Avsetningene gjenspeiler til en viss grad berggrunnen, men er kortere eller lengre transporterte masser. Kornstørrelsen i løsmassene viktig med hensyn til gjennomstrømningen av radon. Uranmineralisering i berggrunnen kan kartlegges med å måle jordluft i løsmassene som ligger over. Det ble oppnådd reproducerbare resultater over middels tykk morene. Ved tykke avsetninger med fluviale og glasifluviale avsetninger, kanskje med klastisk sortering av sedimentet etter egenvekt, er det ikke mulig med slik kartlegging. Det ble funnet flere forekomster av sand og grus derivert fra granitter som har forhøyet innhold av uran og thorium.

6.4 Geofysikk: Fly og helikopter fram til 90-tallet - erfaringer

Siden 1970-tallet ble det av NGU og i oppdrag for NGU målt radioaktivitet med gammaspektrometer over mange kanaler (256) med fly eller helikopter i sammenheng med annen kartlegging. Kvaliteten på dataene ble meget god. At radiometri inkluderes ved helikoptermålingene er nyttig både for prospektering generelt og for den geologiske kartleggingen. Anomaliene som kom fram ble fulgt opp med undersøkelser på bakken. Radiometriske data må tolkes og vurderes mot de kvartærgeologiske kartene dersom en er ute etter å finne radioaktiviteten fra berggrunnen.

6.5 Bakkemåling: bil, tog og til fots - erfaringer

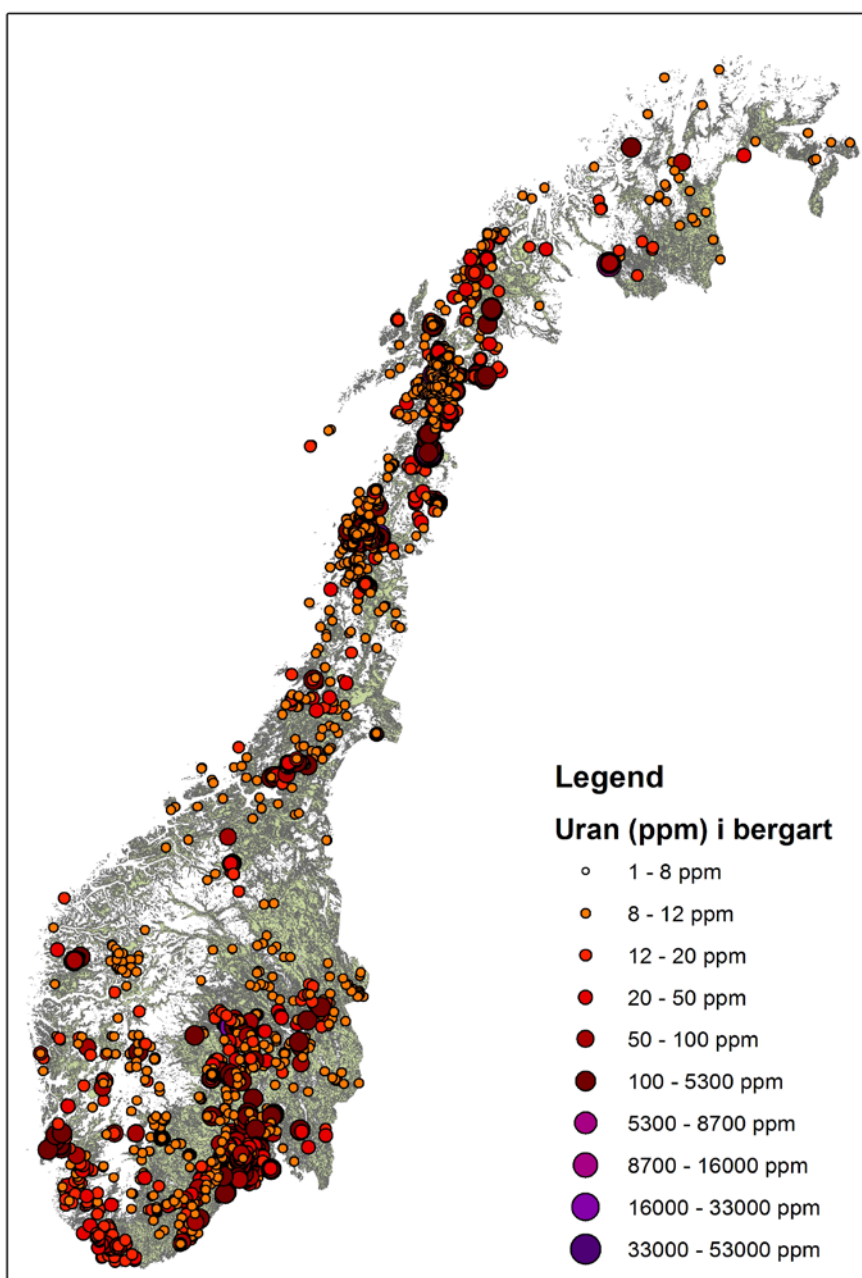
Uranprosjektet utarbeidet en systematikk for gjennomføringen av bilmålingene. Ved målingene ble det for det aller meste brukt den NaI-krystallen som tidligere var anvendt til målinger fra fly og helikopter (7 liter) og en registrerte bare totalstråling. Nivåforskjellene på radioaktiviteten i homogene bergarter kommer fram uansett hastighet. Etter testing kom vi fram til at det skulle brukes en hastighet på 45-50 km/timen ved målingene. Alle veistrekingene skulle måles tur-retur slik at krystallen kunne registrere stråling på begge sidene av veien. Det må nevnes at togstrekingene også ble målt tur-retur på samme prinsipp som bilmålingene. Også her kom det fram vekslende naturlig radioaktivitet i områder uten at man av den grunn kunne bestemme hastighet eller trekke i nødbremsa når radioaktiviteten var høy. Noen av resultatene fra målingene fra tog ble fulgt opp.

Ved bilmålingene ser en tydelig hvor viktig geometrien er ved måling av radioaktivitet. Det blir helt forskjellige verdier langs en vei ved måling tur-retur. Når en ensidig veiskjæring passerer blir måleresultatet helt forskjellig etter kjøretretningen. Veitunnel gir også helt forskjellige utslag. I veitunneler i granitt får instrumentet fullt utslag, som skyldes at strålingen kommer fra alle kanter. I grønnstein/gabbro/marmor går måleverdien ned i tunnelene og blir lavere enn bakgrunnsstrålingen utenfor. Dette skyldes at bidraget fra den kosmiske strålingen blir skjermet og den utgjør et større bidrag enn strålingen fra bergartene med lavt uran- og thoriuminnhold. Radioaktivitet over myr og leire er lav, men når veien er bygd opp av granittisk fyllmasse i veilegemet ser en det klart på målingene. Ved at topografien, blotning i skjæring, overdekke av løsmasser og materiale i veilegemet betyr så mye måtte målelaget være meget observante ved målingene og gjøre vurderinger under veis. Ved bilmålingene ble det stoppet og målt naturlig stråling fra bergartsoverflatene på forskjellige bergarter, forskjellige bergartsformasjoner og punktvis høye anomalier med håndholdt scintillometer som målte totalstråling.

Et av tre scintillometer var av typen Saphymo SRAT, med 1 1/2" krystall, og ble ansett som det mest stabile av vårt måleutstyr den gangen. En kalibreringsmetode ble utarbeidet og alle instrumentene ble testet foran hver feltsesong. Måleverdiene hadde benevnningen impulser pr. sekund (i/s), referert til Saphymo SRAT no. 1, anno 1976.

6.6 Geokjemi – bergart, bekkevann, radon i jordluft - erfaringer

Det ble samlet inn nesten 3000 bergartsprøver i Uranprosjektet samt ca. 2000 prøver i andre prosjekter, noen av dem fra granittmassiver og andre bergarter interessante i uransammenheng og med hensyn til REE (sjeldne jordarter, Figur 17). Alle prøvene er analyserte på uran og thorium, og i tillegg er mange analysert på hoved- og sporelementer. I 1983/1984 ble det satt opp en litogeokjemisk database for prøvene, som i dag er NGUs URANAL og Mineralressurs database. Prøvematerialet er fortløpende nummerert og prøvematerialet ligger oppbevart på NGUs lager på Løkken. Prøvene er koordinatfestet og bergartstype angitt. Dette gjør at materialet kan analyseres på nytt ved behov.



Figur 17. Kart som viser konsentrasjon av uran (ppm) i bergartsprøver hentet fra Uranaldata-basen. Prøvetakingen er gjennomført for prospektering for uran og thorium og verdiene er derfor svært høye. Verdiene representerer kun punkter.

Deteksjonsgrensen på analysemetoden som er brukt er ca 10 ppm for uran, så det forekommer ingen lave uranverdier fra prøvene i URANAL og Mineralressurs databasen. Formålet var å påvise forekomster med høye urankonsentrasjoner, noe som gjenspeiles i kartene (Figur 17).

Måling av radon i vann ble gjort som et testeprogram for å se om verdiene i bekkene nedstrøms en av de største uranmineraliseringene kunne ha innvirkning på vannkvaliteten i bekkevannet som er brukt til vannforsyningen i bygda nedenfor. Måling i bekkene ned mot bygda viste hurtig avtakende radonverdier i vannet. Om dette skyldtes lufting av vannet i bratte bekker eller om innholdet av radioaktive spalteprodukter avtok/ble fortynnet er usikkert. Et annet eksempel på måling av radon i vann er målinger i hyttefelt i Oppdal-området (Lindahl, I. 1991; Lindahl, Sjørdal, & Furuhaug, 1991). Målingene viste forhøyde verdier i småbekkene brukt til vannforsyning.

Måling av radon i jordluft kan være en metode for å kartlegge forhøyet radioaktivitet i bergartssoner under overdekke. Det er en metode som også kan brukes til å måle radonavgivelse fra sandige til mer grovkornede løsmasser, men ikke i leire som er relativt "tett" materiale. Man må hele tiden kjenne til de lokale geologiske betingelse en måler under. Mange andre faktorer ved slike målinger er viktig å ha kontroll over. Det gjelder for eksempel lufttrykket. Ved lavtrykk strømmer mer radon fra løsmassene. Også vannmetning av løsmassene etter regn eller tele i de øverste lagene kan skape et underliggende radonreservoar. Radon kan migrere fra berggrunnens underliggende knusningssoner og opp i løsmassene.

6.7 Oppsummering av Uranprospektering ved NGU i tidsrommet 1970 – ca. 2000

God kjennskap til geologi, geofysikk, geokjemi og kvartærgeologi og god forståelse gir mulighet for den beste håndteringen av uran og deretter radon. Det er ikke geologi, geofysikk eller geokjemi alene, men viktig med en kombinasjon av disiplinene i dette arbeidet.

Geologi:

- Ved prospekteringen ble prøvetaking gjort for å finne mineraliseringer og bakgrunnsverdier for uran og thorium i bergartene. De litogeokjemiske dataene fra i databasen må brukes med omtanke ved statistisk utnyttelse av dataene. Det er mange prøver i databasen som er tatt av spesielle bergarter og fra høye punktanomalier.
- Det er framstilt fylkeskart over radioaktivitet fra berggrunnen. Representative måleverdier er samtolket med berggrunnsgeologi.
- Kjennskap til berggrunnens innhold av uran og thorium er generelt viktig og kan brukes til å bestemme hvor innsatsen mht. radon i miljø skal prioriteres.
- Bergart under overdekke og oppsprekning av denne kan tolkes av geolog ved hjelp av geofysikk og strukturgeologi.
- Kvartærgeologi er viktig for tolkningen av løsmassenes opprinnelse og type, samt permeabilitet. Disse avsetningene er ofte like viktige som berggrunnen med hensyn til radon i bomiljø.

Geofysikk:

- Luftbårne radiometriske målinger detekterer forholdene i overflaten, ca. øverste 40 cm. Radiometri gir et bilde av uran eller thorium innhold i berggrunnen eller løsmasse.
- Faresonekart kan utledes ved en sammenstilling av radiometriske fly- og helikoptermålinger, berggrunns- og kvartærgeologi, samt innendørsmålinger av radon der det forekommer.
- Luftbåren geofysikk i alpin topografi må korrigeres for å gi riktig radioaktivitet fra overflaten.

Geokjemi:

- Litogeokjemi er viktig for å bygge kunnskap om bergartene og deres innhold av radioaktive elementer. Disse kan sannsynligvis utnyttes bedre enn hittil i vurdering av forekomst av radon, og anvendes til å prioritere områder hvor undersøkelser bør iverksettes.
- Tradisjonell geokjemiske prospekteringsmetoder for uran og thorium fungerer dårlig, som skyldes uranets geokjemi.
- Uran bindes til organisk materiale i sakte flytende bekker og gir urananomalier på grunn av høyt innhold av organisk materiale.

7. GEOKJEMISK SAMMENSETNING AV BERGGRUNNEN (LITO DATABASE)

LITO-prosjektet startet i 1999 og går ut på å kartlegger den geokjemiske sammensetningen og de petrofysiske egenskapene til alle kartlagte bergartsenheter i Norge.

7.1 Innsamling av data

Kartlegging

Kartleggingen er basert på de landsdekkende geologiske kartene i målestokk 1:250,000. For å sikre god geografisk dekning har vi delt Norge inn i et rutenett bestående av ca. 3800 ruter à 9*9 km. Det tas én prøve innenfor hver rute, og i den grad det er mulig blir alle bergartsenhetene på 1:250.000 kartene prøvetatt i et forhold som gjenspeiler enhetenes utbredelse. Prøvelokalitetene blir bestemt av en geolog som har rekognosert i felt før boringen tar til. Per i dag er 2987 av i alt ca. 3800 lokaliteter prøvetatt, og er vist i Figur 18.

Prøvetaking

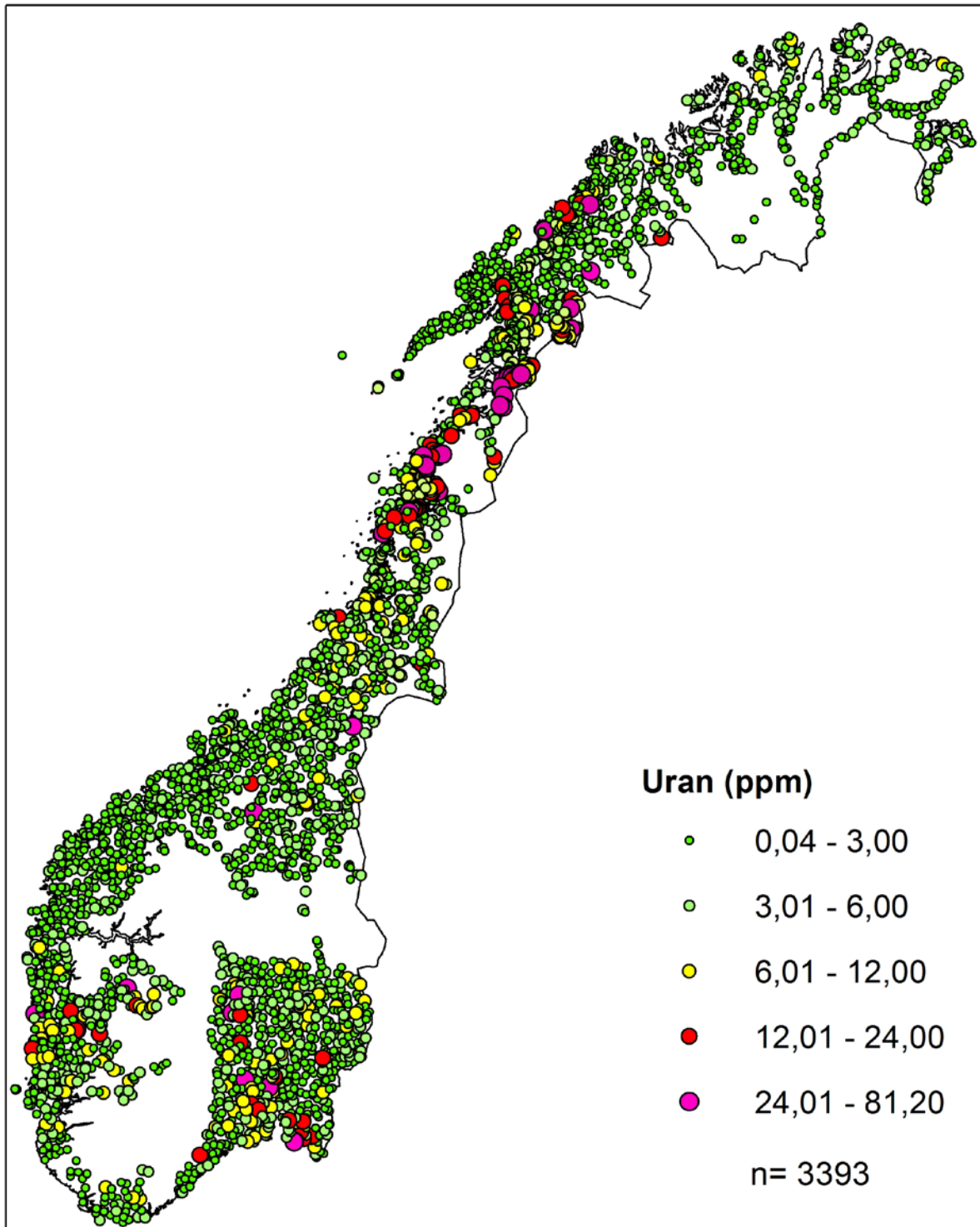
Prøvene tas ut som 3 meter lange borekjerner med diameter 36 mm for på den måten å sikre friske, uforvitrede prøver. På en vanlig dag blir det boret 4 borehull. NGU har en egen liten lastebil med en boremaskin montert på en kran for denne prøvetakingen,

Logging

Etter at kjernene er boret, blir de transportert til NGU hvor de logges og fotograferes. Den visuelle beskrivelsen ("loggingen") brukes som grunnlag når det blir bestemt hvilke deler av kjernen som skal gå videre til analyse. I tillegg til prøver for kjemiske analyser blir det også tatt ut prøver som analyseres med hensyn på petrofysiske egenskaper som tetthet, magnetisk susceptibilitet og varmeledningsevne.

Analyser

De kjemiske analysene utføres ved NGUs laboratorium for å kartlegge hoved- og sporelement i bergarten, og omfatter Røntgenfluorescens ("X-ray fluorescence"; XRF), Induktivt koblet plasma massespektrometri ("Inductively coupled plasma mass spectrometry"; LA-ICP-MS), Induktivt koplet plasma atomemisjonsspektrometri ("Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy"; ICP-AES) og atomabsorpsjon. Hver femtende prøve analyseres i duplikat, og hver tiende prøve som analyseres er en standard med kjent sammensetning. Dette gjøres for å kunne kvalitetssikre måleresultatene og fange opp eventuell drift i instrumentet. Resultatet blir et svært omfattende geokjemisk og petrofysisk datasett som ved prosjektslutt vil dekke hele Norge. (<http://www.ngu.no/no/tm/Om-NGU/Prosjekter/Lito-prosjektet/Provetakiganalyser/>)

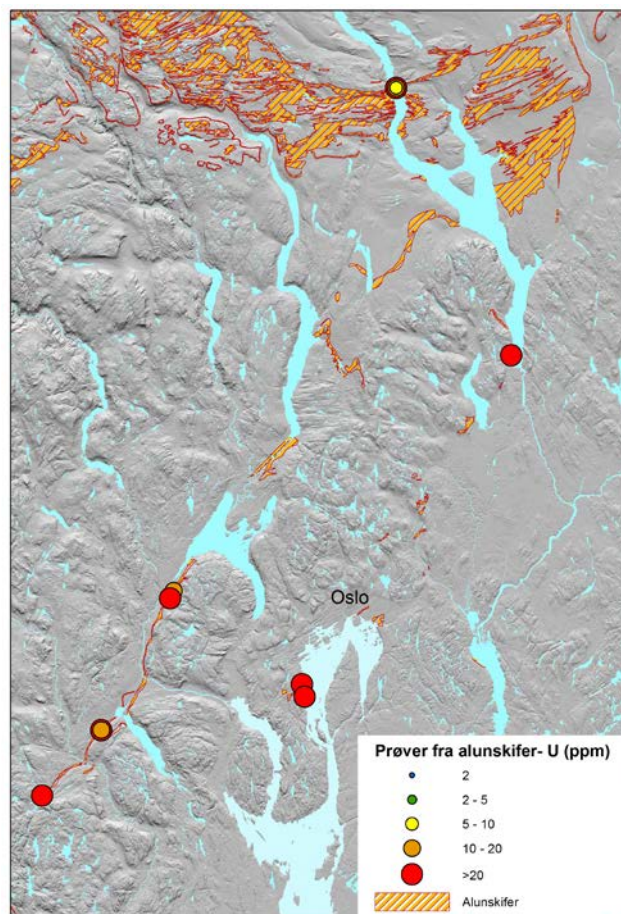


Figur 18. Urankonsentrasjon (ppm) fra prøver i fjell fra LITO databasen, og andre bergartsprøver.

Dette prøvematerialet kan brukes for å få en forståelse for "naturlig bakgrunn" av uran, thorium og andre elementer i norsk berggrunn. Dette er spesielt viktig for vurdering av grenseverdier for forurenset grunn, som for eksempel alunskifer, som krever spesiell håndtering og deponering når den har forhøyet innhold av blant annet uran og svovel. Slik bakgrunnskunnskap er viktig for arealplanleggere ved utvikling av nye byggeprosjekt eller håndtering av masser ved graving.

8. GEOKJEMISKE DATA FRA ALUNSKIFEREN FRA ØSTLANDET OG SVARTSKIFER ELLERS I NORGE

I de siste 50 årene er det utført mye arbeid med alunskiferen på Østlandet og i 2009 sammenstilte Gautneb & Sæther (2009) de eksisterende data av kjemisk analyse som er kjent for alunskiferen. Av arbeidet fremgår det stor variasjon i kjemisk innhold innenfor samme geologiske enhet både nedover i lagpakken og med geografisk utstrekning (Figur 19). I dette arbeidet har Gautneb & Sæther (2009) gjennomgått prøver fra sedimentære bergart fra tidsrommet kambrium og underordovicium, basert på arbeid som ble utført 25-50 år siden og som hovedsakelig er basert på Nyland & Teigland (1984). I rapporten (Gautneb & Sæther, 2009) er den stratigrafiske lagpakken som alunskifer forekommer i detaljert beskrevet, både i forhold til avsetningsmiljø og alder. Prøver fra lavere kambrium, øvre kambrium og lavere ordovicium alder, hvor alunskifer forekommer, er analysert for flere elementer der i blant uran (U), molybden (Mo), vanadium (V), i tillegg er radioaktivitet og organisk innhold (TOC) analysert. Sedimenter fra kambrium og lavere ordovicium i Skandinavia er studert i detalj og geokjemisk analysert. Detaljkunnskap fra kjemisk analyse som viser variasjon av uraninnhold gir oss bedre forståelse av hvor en må være ekstra påpasselig med hensyn til alunskifer. Håndtering av alunskifer er også omtalt i StrålevernInfo (2012).



Figur 19. Kart som viser urankonsentrasjon i bergartsprøver fra alunskifer på Østlandet. Totalt er 57 prøver analysert for innhold av uran og thorium, men flere av prøvene er tatt samme sted, men ved forskjellig dyp i lagpakken (data oppgitt i Gautneb og Sæther 2009).

I de senere årene er det blitt tatt prøver av svartskifer som forekommer utenfor Østlandsområdet for analyse av innhold av uran og thorium. Det er ventet at disse svartskifrene også har et forhøyet innhold av uran sammenlignet med andre bergartstyper i Norge. En oversikt over prøvene som foreligger i dag er gitt i Tabell 1. Prøvene fra Sauholmen ved Kvitsøy er fra kjerneboringer ved ROGFAST-prosjektet (Saintot & Solli 2011).

Tabell 1. Innhold av uran og thorium i prøver fra svartskifer utenfor Østlandsområdet.

Sted	Beskrivelse av prøve	Th (ppm)	U (ppm)	UTM	ØST	NORD	NGU PRØVEID
Sauholmen (1). Ved Kvitsøy, Rogaland	Borekjerne 540,20 m Svartskifer	9,66	5,95	32	294580	6554000	47292
Sauholmen (2). Ved Kvitsøy, Rogaland	Borekjerne 661,50 m Svartskifer	8,19	2,6	32	294580	6554000	47293
Sauholmen (3). Ved Kvitsøy, Rogaland	Borekjerne 749,20-749,30 m Svartskifer	5,88	12,5	32	294580	6554000	47294
Storfossen, Malvik, Sør-Trøndelag	Prøve fra berggrunn av svartskifer	26,0	3,89	32	589165	7028573	47295
Fossberga/Lånke, Stjørdal, Nord-Trøndelag	Prøve fra berggrunn av svartskifer	9,89	3,07	32	597334	7031257	47296
Sorte skiferbrudd, Stjørdal, Nord-Trøndelag	Prøve fra berggrunn av svartskifer	9,68	2,66	32	599215	7036311	47297
Svartskifer i Finnøy kommune, Rogaland	Prøve fra berggrunn av svartskifer	4,06	6,37	32	330301	6573364	47298

Alunskifer er en svartskifer som er kjent for å ha forhøyet innhold av uran og andre elementer som svovel, og andre svartskifere forekommer utenfor Østlandet. Med kartlegging av kjemisk sammensetning av svartskifere vil vi få kunnskap om de må behandles på lik linje med alunskiferen eller om de har forskjellige egenskaper. Så langt viser prøver av svartskifer i Rogaland at uran kan opptre i forhøyet konsentrasjon (12,5 ppm; Tabell 1).

9. RADON I GRUNNVANN

Radon er en edelgass som i liten grad reagerer kjemisk med andre stoffer, men er svært løselig i vann under normale grunnvannstemperaturer. Når vann varmes opp (for eksempel i oppvaskmaskiner og dusjer) blir radongassen mindre løselig og vil fordampe. Borebrønner i fjell er som oftest lukkede systemer som kan føre radongassen inn i huset. Statens strålevern har vist at radongass i vann fra private borebrønner i fjell kan bidra vesentlig til høye radonkonsentrasjoner i inneluft (Strand og Lind 1992). Helserisikoen fra å drikke radonholdig vann er antatt å være lav i forhold til risikoen ved å puste inn radonholdig luft. Vitenskapsakademiet i USA har likevel konkludert med at radon i drikkevann utgjør en større risiko enn de fleste andre kjemiske stoffer som forekommer naturlig i vann (US National Research Council 1999).

I løpet av 1990-årene var NGU involvert i flere undersøkelser av radon i grunnvann.

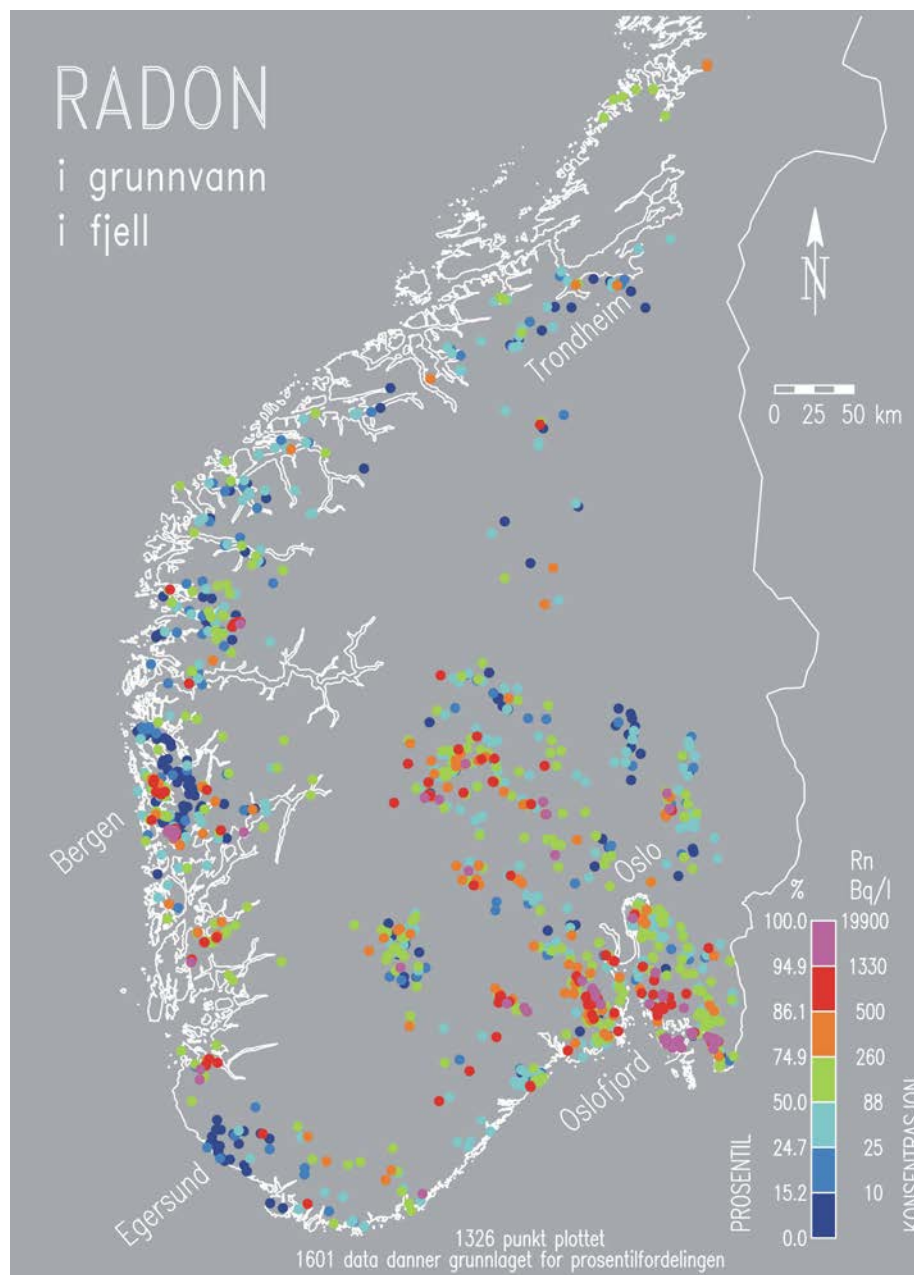
- 1992: 30 borebrønner rundt Oslofjorden og i Trøndelag (Banks m.fl. 1995).
- 1994: 300 borebrønner i fylkene Vestfold og Hordaland (Reimann m.fl. 1996, Morland m.fl. 1997).
- 1996: Alle grunnvannsverk som forsynte mer enn 1000 personekvivalenter (Morland m.fl. 1996).
- 1996-97: 2000 grunnvannsprøver fra hele landet i samarbeid med Statens strålevern og lokale næringsmiddeltilsyn. Disse ble analysert for radon og et bredt spekter av andre kjemiske elementer (Banks m.fl. 2008a,b). Et utvalg på 476 prøver ble også undersøkt for bl.a. uran (Frengstad m. fl. 2000).
- 1996-98: Statens strålevern fortsatte å analysere grunnvannsprøver og endte til slutt med ca 3500 vannprøver.
- 1998/99: Fem borebrønner ble studert for tidsavhengige variasjoner i radoninnholdet i samarbeid med Universitetet i Bergen (Frengstad m.fl. 2001, Nilssen 2001).

De første undersøkelsene av radon i grunnvann viste tydelig at radon i borebrønner i fjell var et stort problem i visse områder av Norge – ikke minst rundt Oslofjorden. Verdier langt over anbefalt tiltaksgrense på 500 Bq/l ble funnet (Banks m.fl. 1995). Av de 30 større grunnvannsverkene som forsyner mer enn 1000 personekvivalenter var det imidlertid ingen som hadde radonkonsentrasjoner over 100 Bq/l. Disse vannverkene er for det meste basert på grunnvann i løsmasser (Morland m.fl. 1996).

Den landsomfattende undersøkelsen av radon i borebrønner utført i samarbeid mellom Statens strålevern, NGU og lokale næringsmiddeltilsyn (Banks m.fl. 2000), viser at 13,9 % av borebrønner i fjell i Norge har høyere konsentrasjon av radon i vannet enn 500 Bq/l, se Figur 20. Undersøkelsen ble presentert i fylkesvise rapporter hvor resultatene er statistisk behandlet på grunnlag av både kommune og bergart, se referansekapittelet, "NGU-referanser for radon og uran i grunnvann".

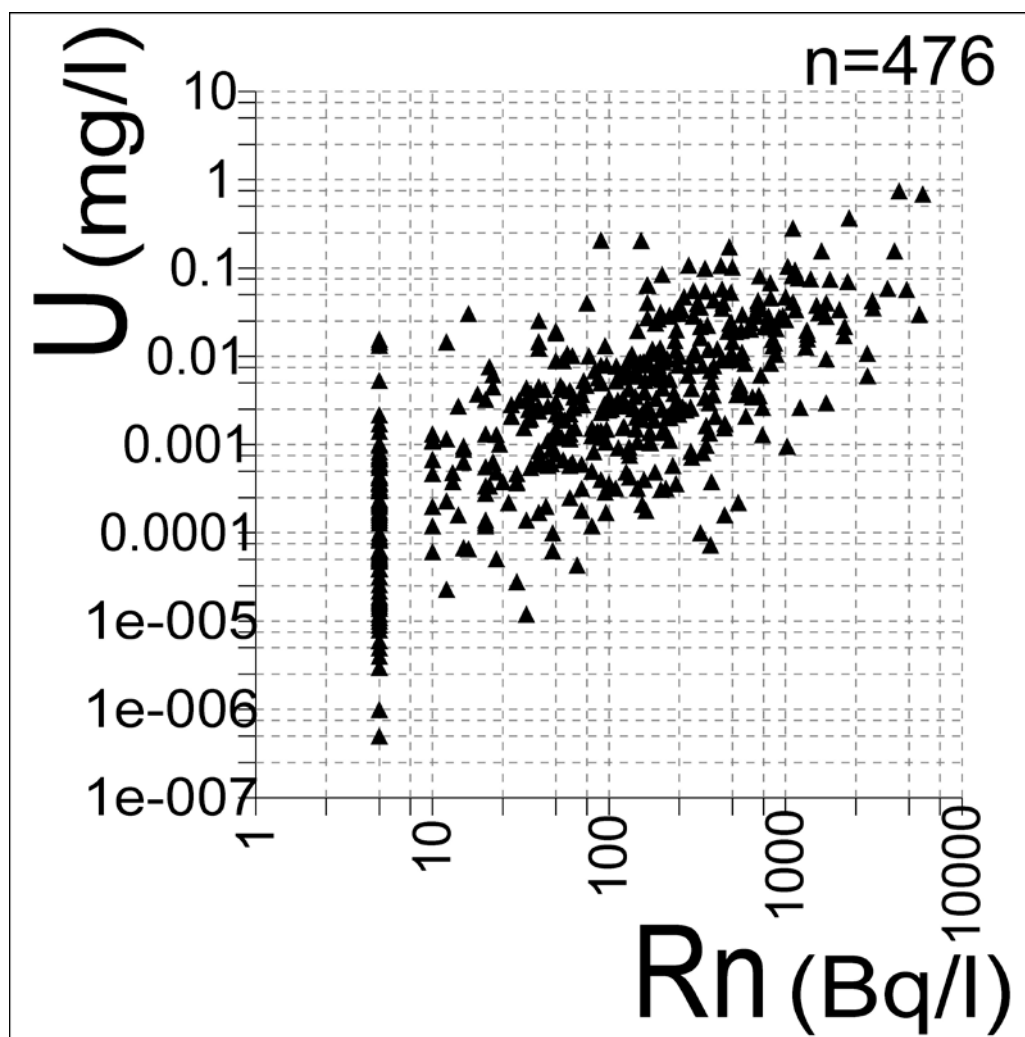
Radonkonsentrasjonene i grunnvann har en viss sammenheng med uraninnholdet i bergartene hvor grunnvannet befinner seg. De bergartene som vanligvis kan være problematiske er granitter, lyse gneiser og pegmatitter (grovkornede ganger som kan gjennomsette ulike bergarter). Alunskifer medfører også ofte et radonproblem, men gir generelt dårlig vannkvalitet slik at brønner i alunskifer er lite brukt.

Svært få bergarter kan "friskmeldes" fullstendig, men det er også store variasjoner mellom brønner innen samme bergart. Dette kan skyldes faktorer som sprekkeminaliseringer, grunnvannets strømningshastighet, forvitningsgrad og sprekkåpninger med mulighet for utlufting av radongassen. I grunnvann fra løsmassebrønner er radon svært sjelden noe problem, trolig fordi gassen luftes ut gjennom porene og fordi uran ofte er fjernet fra permeable løsmasser gjennom forvitring. Området rundt Oslofjorden (Østfold, Vestfold og Buskerud) har generelt de høyeste radonkonsentrasjonene i grunnvann fra fjellbrønner, noe som skyldes de granittiske bergartene og de mange pegmatittgangene i området. Det ser også ut til å være av betydning om bergoverflaten er dekket av marin leire eller andre tette løsmasselag ved at radongassen dermed ikke kan unnsnippe til overflaten gjennom bergsprekker. De høyeste radonmålingene i grunnvann i Norge er gjort i Iddefjordsgranitt under Raet i Østfold med verdier på 32000 Bq/l.



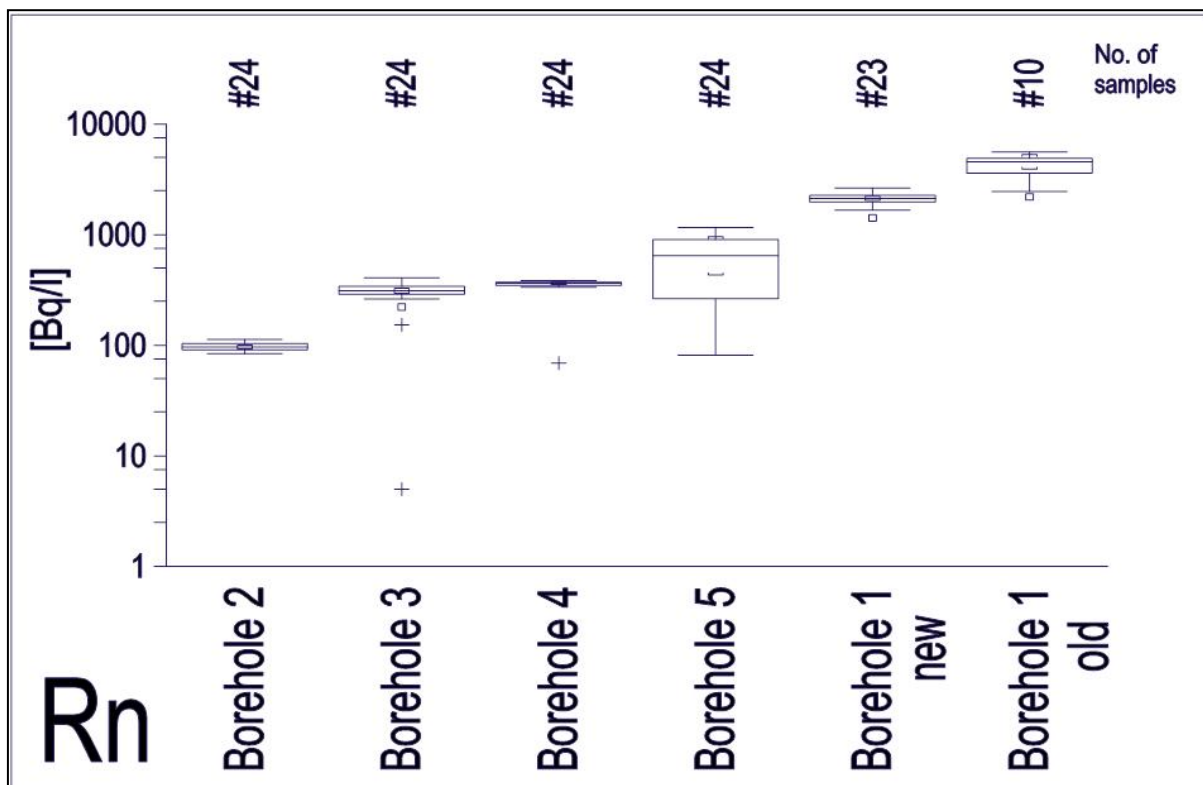
Figur 20. Kart som viser fordelingen av radonkonsentrasjoner i grunnvann i borebrønner i fjell i Sør-Norge. Tegnforklaringen er basert på en persentilfordeling (fra Banks m.fl. 2000).

Radon (^{222}Rn) dannes direkte som følge av nedbrytning av radium (^{226}Ra) som i sin tur stammer fra uran (^{238}U , se Figur 1). Radium kan finnes i mineraler i berget, utfelt med andre grunnstoffer på sprekker eller løst i grunnvannet. Løseligheten av radium i grunnvann er redoks-sensitivt. Elementet feller gjerne ut med sulfat under oksiderende forhold og kan være løselig og mobilt under reduserende forhold. Radiumkonsentrasjoner i grunnvann er hittil ikke kartlagt i Norge. Løseligheten av uran i grunnvann er også meget redoks-avhengig. Under reduserende forhold er uran vesentlig i sin fireverdige form som er svært lite løselig i vann. Under oksiderende forhold derimot er uran meget løselig i vann som seksverdige uran og i kompleksbinding med bl.a. karbonater. Figur 21 viser sammenhengen mellom uran- og radonkonsentrasjoner i 476 borebrønner i fjell (Fregstad m.fl. 2000). Korrelasjonen skyldes ikke at løst uran brytes ned og frigjør radongass, med mer at begge stoffene kommer fra de samme uranholdige mineralene i berget og grunnvannet i uranrike bergarter vil ofte ha høye nivåer av både løst uran og løst radon. Naturlig forekommende uran (vesentlig ^{238}U) er ikke spesielt radioaktivt, og den negative helseeffekten i drikkevann skyldes heller uranets kjemiske egenskaper som tungmetall. 12 % av private drikkevannsbrønner og 7.5 % av vannverk basert på grunnvann i fjell har urankonsentrasjoner over $30 \mu\text{g/l}$ som er WHO's anbefalte grenseverdi (Fregstad m.fl. in prep.).



Figur 21. xy-plot som viser radon mot uran i grunnvannsbrønner i fjell i Norge (fra Fregstad m.fl. 2000). Merk logskala på begge akser. Radonverdier lavere enn nedre bestemmelsesgrense på 10 Bq/l er plottet som halve bestemmelsesgrensen

Siden radon er en flyktig gass, var det behov for å vite om en enkelt prøvetaking på et vilkårlig tidspunkt kunne være representativt for radonkonsentrasjonene i brønnvannet gjennom året. Årstidsvariasjoner i grunnvannets radonkonsentrasjoner ble derfor undersøkt i en hovedfagsoppgave ved Universitetet i Bergen i samarbeid med NGU (Nilssen 2001, Frengstad m.fl. 2001). Prøvetaking av fem borebrønner annenhver uke gjennom et helt år viste overraskende stabile radonkonsentrasjonene i grunnvannet, se Figur 22. Eneste unntaket var brønn 5 hvor overflatevann uten radon rant direkte ned i brønnen ved nedbør og snøsmelting og fortynnet det radonholdige grunnvannet i brønnen.



Figur 22. Boksplott som viser årstidsvariasjonen av radonkonsentrasjoner i fem borebrønner i Bergensområdet. Prøvetaking ble gjort annenhver uke gjennom ett år. I lokalitet 1 ble borebrønnen erstattet av en ny brønn i løpet av prøvetakingsperioden (fra Frengstad m.fl. 2002)

Alle som bruker vann fra borebrønner i fjell bør få vannet sitt analysert for å sjekke om det er behov for behandling. Radon kan effektivt fjernes ved at vannet luftes og avgassen føres ut av huset. Lagring av vannet i en større tank gir også en halvering av radonkonsentrasjonen i løpet av 3,8 døgn pga den radioaktive nedbrytningen. I løpet av to ukers lagring er konsentrasjonen redusert til under 10 %, men lagring kan gjøre vannet mer utsatt for uønskede bakterier. Filtrering av vannet med aktivt kull er også mulig, men anbefales ikke fordi filteret selv etter hvert kan bli et radioaktivt problem.

Siden alle undersøkelser viser at innholdet av radon og uran i borebrønner i fjell i Norge er problematisk, er det god grunn til å anta at radium også kan være et problem. Dette er hittil ikke undersøkt.

10. OPPSUMMERING

Kilden til radon er grunnstoffet uran som forekommer naturlig i norske bergarter og løsmasser. Ved å kartlegge og undersøke naturlig forekomst av de radioaktive elementene uran og thorium i grunnen, vil det gi en indikasjon på den potensielle radon- og thoronfaren for et område. I denne rapporten gis det en oversikt over data som NGU har tilgjengelig enten som kart og/eller som koordinatfestet punktdata på kart og/eller som data i databaser. NGU arbeider systematisk med kartlegging hvor innhold av radioaktive element er inkludert i analyser og datafangst. Data som urankonsentrasjon i berggrunnen fra analyse av prøver, målinger utført med gammaspektrometer i forbindelse med fly- og helikoptergeofysikk, naturlig stråling fra grunnen fra bilmålinger med gammaspektrometer, og forekomst av radon i grunnvann danner grunnlaget for å vurdere risikoen for radon i Norge. God kjennskap til geologi, geofysikk, geokjemi og kvartærgeologi og god forståelse gir mulighet for den beste håndteringen av uran og deretter radon. Det er ikke geologi, geofysikk eller geokjemi alene, men viktig med en kombinasjon av disiplinene for å oppnå det beste resultatet.

Ved regional kartlegging av landet utføres systematisk fly- og helikoptergeofysikk, hvor målinger med gammaspektrometer er inkludert. Slike målinger gir en god oversikt over uran (og thorium) konsentrasjonen i grunnen, uavhengig om grunnen består av fast fjell eller løsmasser. Brorparten av Østlandet er dekket med radiometriske målinger, og kysstripen fra Mandal i sør til Smøla i nord (disse data er ikke tilgjengelig før tidligst i 2014). I Troms og Finnmark pågår kartleggingsprosjekt av naturressurser i tidsrommet 2010-2014, hvor urankonsentrasjon i grunnen er et av kartresultatene. Som et av målene i regjeringens mineralstrategi skal 75 % av Norges landareal kartlegges med blant annet radiometriske målinger innen 2018.

Kartlegging av uranforekomster i Norge var del av et større prosjekt i tidsrommet 1970-1990, hvor målet var å kartlegge berggrunn som har over gjennomsnittet konsentrasjon av uran og thorium. Denne kartleggingen ble utført med hensikt på økonomisk drivverdige forekomster, og viser områder med ekstremverdier av uran.

NGU har et pågående kartleggingsprosjekt for kjemisk sammensetning av berggrunnen (LITO-prosjektet). En prøve som består av en 3 m dyp borekjerne med 35 mm diameter er hentet inn etter et 9x9 km rutenett over hele landet. Data fra disse prøvene gir en god oversikt over naturlig forekomst av uran i fjellgrunnen, og en oversikt over uraninnhold i de forskjellige bergartene.

Svartskifer er en bergart som er kjent for å ha forhøyet innhold av uran, hvor alunskiferen på Østlandet er mest kjent. Alunskiferen er prøvetatt med totalt 57 prøver og de er analysert for innhold av uran. I tillegg har prøver fra svartskifere som forekommer utenfor Østlandet blitt analysert med hensyn til uraninnhold. Nyere analyser viser at svartskifer utenom Østlandet også kan inneholde høye urankonsentrasjoner.

Radon forekommer også i grunnvann. I denne rapporten gis det en oversikt over hvilke undersøkelser NGU har vært involvert i og hvor grunnvannet kan inneholde radon. Undersøkelser viser at 13,9% av fjellbrønner inneholder radonverdier over anbefalt grense på 500 Bq/l. I tillegg har uran vist seg å være et problem i sammenheng med grunnvann. 12 % av private drikkevannsbrønner og 7.5 % av vannverk basert på grunnvann i fjell har urankonsentrasjoner over 30µg/l som er WHO's anbefalte grenseverdi.

11. REFERANSER

11.1 Generelt.

Alunskiferkart; for vurdering av hensynssoner i henhold til plan- og bygningsloven. 2010.
http://www.ngu.no/upload/Aktuelt/Nyheter%202011/alunskifer_jan_11_web.pdf

Andersson A, Dahlman B., Gee D.G. & Snäll S. 1985: The Scandinavian Alum shales. Svergies Geologiska Undersøking. Ser Ca 56.

Andersson A., Dahlman B. & Gee. D.G. 1983: Kerogen and uranium resources in the Cambrian alum shales of the Billingen Falbygden and Näkre areas, Sweden Geologiska Föreningens Förhandlingar, 104, 197-209.

Banks, D., Røyset, O., Strand, T. & Skarphagen, H. 1995: Radioelement (U, Th, Rn) concentrations in Norwegian bedrock groundwaters. *Environmental Geology* 25, 165-180.

Banks, D., Frengstad, B., Midtgård, A.K., Krog, J.R. & Strand, T. 1998a: The chemistry of Norwegian groundwaters. I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. *The Science of the Total Environment* 222, 71-91.

Banks, D., Midtgård, A.K., Frengstad, B., Krog, J.R. & Strand, T. 1998b: The chemistry of Norwegian groundwaters. II. The chemistry of 72 groundwaters from Quaternary sedimentary aquifers. *The Science of the Total Environment* 222, 93-105.

Banks, D., Frengstad, B., Skrede, A.K., Krog, J.R., Strand, T., Lind, B. & Siewers, U. 2000: Grunnvann – ikke bare vann. Gråsteinen 6. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim. 58 s.

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

Elvebakk, H., 2011: Sammenstilling av resistivitet, seismiske hastigheter og naturlig gammastråling i norske bergarter. NGU rapport 2011.042.
http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2011/2011_042.pdf

Frengstad, B., Midtgård, A.K., Banks, D., Krog, J.R. & Siewers, U. 2000: The Chemistry of Norwegian Groundwaters III. The Distribution of Trace Elements in 476 Crystalline Bedrock Groundwaters, as Analysed by ICP-MS Techniques. *Science of the Total Environment* 246/1, 21-40.

Frengstad, B., Haraldseth, A.L. & Nilssen, R.S.A. 2001: Årstidsvariasjoner i grunnvannskjemien i fem bergborede brønner sør for Bergen. *NGU Rapport 2001.041*, 34 s.

Frengstad, B.S. & Banks, D. in prep.: Uranium distribution in groundwater from fractured crystalline aquifers in Norway. Submitted to IAH Special Publication.

Gautneb, H. & Sæther, O..M., 2009: A compilation of previously published geochemical data on the lower Cambro-Silurian sedimentary sequence, including alum shales in the Oslo region. NGU Report 2009.053.

http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2009/2009_053.pdf

Gee, D.G. 1972: The regional geological context of the Tåsjø Uranium Project, Caledonian Front, Central Sweden. Sveriges Geologiska Undersøking Ser C Nr. 671

Heincke, B.H., Smethurst, M.A., Bjørlykke, A., Dahlgren, S., Rønning, J.S. & Nogaard, J.O. 2008: Airborne gamma-ray spectrometer mapping for relating indoor radon concentrations to geological parameters in the Fen region, southeast Norway. NGU Special Publication 11, p. 131 – 143.

Morland, G., Strand, T., Furuhaug, L. & Skarphagen H. 1996: Måling av radon i råvann ved større grunnvannsverk i Norge. NGU Rapport 96.080.

Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Skarphagen, H., Banks, D., Bjorvatn, K., Hall, G.E.M. & Siewers, U. 1997: The hydrogeochemistry of Norwegian bedrock groundwater - selected parameters (pH, F, Rn, U, Th, B, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway. Norges geologiske undersøkelse Bulletin 432, 103-117.

NHD 2013: Strategi for mineralnæringen, lagt frem av Nærings- og handelsminister Giske, mars 2013.

Nilssen, R.S.A. 2001: Radon i grunnvann fra borebrønner i fjell. Jevnlige målinger fra fem lokaliteter i Bergen og Os. Cand. Scient. Oppgave i geologi. Geologisk institutt, Universitetet i Bergen, 92 s + vedlegg.

Olesen, O., Brønner, M., Ebbing, J., Elvebakk, E., Gellein, J., Koziel, J., Lauritsen, T., Lutro, O., Maystrenko, Y., Müller, Chr., Nauti, A., Osmundsen, P.T., Slagstad, T. & Storrø, G. 2013: Coop Phase I – Crustal Onshore-Offshore Project. NGU Report 2013.002, 359 pp.

Reimann, C., Hall, G.E.M., Siewers, U., Bjorvatn, K., Morland, G., Skarphagen, H. & Strand, T. 1996: Radon, fluoride and 62 elements as determined by ICP-MS in 145 Norwegian hard rock groundwater samples. The Science of the Total Environment 192, 1-19.

Nyland, B. & Teigland, J. 1984: Sedimentologisk og geokjemisk undersøkelse av de kambriske og underordoviciske marine sedimenter i Oslofeltet. Thesis for cand. real. Geologisk institutt, Universitetet i Oslo, 196 p

Saintot, A. & Solli, A. 2011: Geological investigations by drill cor logging for the ROGFAST project. NGU Report 2011.034 (64pp.).

http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2011/2011_034.pdf

Smethurst, M.A., Strand, T., Finne, T.E. & Sundal, A.V. 2006a: Aktsomhetskart - Radon. Drammen - Hurum - Oslo. M: 1:100 000. Norges geologiske undersøkelse og Statens strålevern.

<http://www.ngu.no/upload/Geofarer/Radioaktiv%20stråling/Radonfare/FinalDrammenWeb2.pdf>

Smethurst, M.A., Strand, T., Finne, T.E. & Sundal, A.V. 2006b: Aktsomhetskart - Radon. Oslo - Gran - Hurdal. M: 1:100 000. Norges geologiske undersøkelse og Statens strålevern. <http://www.ngu.no/upload/Geofarer/Radioaktiv%20stråling/Radonfare/FinalGranWeb2.pdf>

Smethurst, M.A., Strand, T., Finne, T.E. & Sundal, A.V. 2006c: Aktsomhetskart - Radon.Sarpsborg - Fredrikstad - Moss. M: 1:100 000. Norges geologiske undersøkelse og Statens strålevern. <http://www.ngu.no/upload/Geofarer/Radioaktiv%20stråling/Radonfare/FinalSarpsborgWeb2.pdf>

Smethurst, M.A., Strand, T., Finne, T.E., & Sundal, A.V. 2006d: Aktsomhetskart - Radon. Skien - Sandefjord - Holmestrand. M: 1:100 000. Norges geologiske undersøkelse og Statens strålevern. <http://www.ngu.no/upload/Geofarer/Radioaktiv%20stråling/Radonfare/FinalSkienWeb2.pdf>

Smethurst, M.A., Strand, T., Finne, T.E., Sundal, A.V. & Rudjord, A.L. 2008: Large- scale radon hazard evaluation in the Oslofjord region of Norway utilizing indoor radon concentrations, airborne gamma ray spectrometry and geological mapping. Science of the total environment, Vol 407, pg. 379-393. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.09.024

StrålevernInfo 7.12: Alunskifer - kilde til radioaktivt avfall og radioaktiv forurensing. 2012. Statens strålevern. <http://www.nrpa.no/dav/73e8ffc937.pdf>

Walker, P. 1993: Airborne radon hazard mapping – Løten, Hedmark County, Norway. NGU Report 93.056 (50pp.). http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1993/93_046.pdf

Watson, R.J., Erichsen, E., Finne, T.E., Ganerød, G.V., Neeb, P-R., Reimann, C. & Rønning, J.S. 2011: Radontrygge byggeråstoff - Fase 1. Etablere målemetoder i felt og laboratorium for å klassifisere tilslagsmateriale i forhold til radonfare. NGU rapport 2010.042 http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2010/2010_042.pdf

Watson, R.J Erichsen, E., Finne, T.E., Ganerød, G.V., Neeb, P-R., Rønning, J.S. & Tangstad, R. 2013: Radontrygge byggeråstoffer. Vurdering av kartleggingsmetoder og fastsettelse av grenseverdier for pukkbergarter. NGU rapport 2011.065.

11.2 Referanser til fly- og helikoptergeofysikk der det foreligger informasjon om uran

Her følger en liste over de siste års helikoptermålinger utført av NGU. Ytterligere informasjon kan fås ved å kontakte ansvarlig for NGUs regionalgeofysiske database, Torleif Laritsen eller ved å gå inn på databasen: <http://srv-v-ofm.ngu.no/kart/geofysikk/>

Baranwal, V., Rodionov, A. & Ofstad, F. 2012: Helicopter-borne magnetic and radiometric geophysical survey in Kviteseid area, Telemark, Norway. NGU Report 2012.043, 25 p.

Baranwal, V.C., Rodionov, A., Koziel, J., Ofstad, F. & Lynum, R. 2013: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical surveys in the Kongsberg region. NGU Report 2013.029.

Baranwal, V.C. 2013: Compilation of various airborne geophysical surveys in the Oslofjord region. NGU report 2013.030

Ofstad, F.; Koziel, J., Lynum, R. & Rodionov, A. 2013: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in the Repparfjord area, Alta and Kvalsund, Finnmark. NGU Report 2013.027, 25 p.

Rodionov, A., Koziel, J. & Lynum, R. 2012a: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in Mauken area, Målselv, Troms. NGU Report 2012.010, 25p.

Rodionov, A. & Ofstad, F. 2012b: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey at Vanna, Karlsøy, Troms. NGU Report 2012.021, 23p.

Rodionov, A., Ofstad, F. & Koziel, J. 2012c: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in Rombaken area, Narvik, Nordland. NGU Report 2012.022, 25p.

Rodionov, A., Ofstad, F. & Tassis, G. 2012d: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in the Storforshei area, Rana, Nordland. NGU Report 2012.044, 31p.

Rodionov, A., Ofstad, F. & Tassis, G. 2012e: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in Finnsnes area, Lenvik, Troms. NGU Report 2012.047, 28p.

Rodionov, A., Ofstad, F. & Tassis, G. 2012f: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in the Kvæfjord area, Kvæfjord and Harstad, Troms. NGU Report 2012.055, 28p.

Rodionov, A., Ofstad, F., Lynum, R. & Tassis, G. 2012g: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in the Alta – Kvænangen area, Troms and Finnmark. NGU Report 2012.065, 28 p.

Rønning, J.S., Rodionov, A. Ofstad, F. & Lynum, R. 2012: Elektromagnetiske, magnetiske, og radiometriske målinger fra helikopter i området Skaland - Trælen på Senja. NGU Rapport 2012.061, 30s.

11.3 Referanseliste til borehullslogging med informasjon om radioaktive elementer.

Elvebakk, H., Braathen, A., Rønning, J.S. & Nordgulen, Ø. 2001: Tunnelprosjektet. Borehullslogging og strukturgeologiske studier Gualia, Lunner kommune. *NGU Rapport 2001.117.*

Elvebakk, H. 2001a: Borehullsinspeksjon med optisk televiwer, SiA, Lørenskog, Akershus. *NGU Rapport 2001.021.*

Elvebakk, H. 2001b: Inspeksjon av borebrønn ved Borgen skole, Asker kommune, Akershus. *NGU Rapport 2001.036.*

Elvebakk, H. 2002: Borehullsinspeksjon med optisk televiewer, Ringveg Vest under Nordåstrømmen, Bergen. *NGU Rapport 2002.060*.

Elvebakk, H., Midttømme, K. & Skarphagen, H. 2002: Geologisk utredning av grunnvarmeanlegg på Hovdejordet, Bodø boligbyggerlag, Bodø. *NGU Rapport 2002.061*.

Elvebakk, H., Rønning, J.S. & Storrø, G. 2002: Borehullslogging i fjellbrønn, Folvåg, Sunnfjord. En verifisering av lineamentsmodell med hensyn til oppsprekking og vanngiverevne. *NGU Rapport 2002.078*.

Elvebakk, H. 2006: Borehullslogging i forbindelse med ny jernbanetunnel Sandvika - Lysaker, Bærum kommune. *NGU Rapport 2006.007*.

Elvebakk, H. 2007a: Borehullslogging i forbindelse med ny jernbanetunnel Sandvika - Lysaker, Bærum kommune. *NGU Rapport 2007.046*.

Elvebakk, H. 2007b: Borehullslogging, ny jernbanetunnel Sandvika - Lysaker, Bærum kommune. *NGU Rapport 2007.073*.

Elvebakk, H. 2008a: Borehullslogging, ny jernbanetunnel Sandvika - Lysaker, Bærum kommune, del 2. *NGU Rapport 2008.065*.

Elvebakk, H. 2008b: Borehullslogging, Åknes, Stranda kommune. *NGU Rapport 2008.030*.

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

Elvebakk, H. 2010a: Geofysisk logging av 2 borehull ved Gjevingåsen jernbanetunnel, Hommelvik – Stjørdal. *NGU Rapport 2010.019*.

Elvebakk, H. 2010b: Geofysisk logging av 4 borehull langs planlagt jernbanetunnel Holm-Holmestrand-Nykirke. *NGU Rapport 2010.032*.

Elvebakk, H. 2011a: Geofysisk logging av borehull ved Lutvann, Oslo. *NGU Rapport 2011.008*.

Elvebakk, H. 2011b: Geofysisk logging av borehull ved Gualia, Lunner. *NGU Rapport 2011.009*.

Elvebakk, H. 2011c: Geofysisk logging av borehull ved Vuottašjávri og Bidjovagge, Kautokeino, Finnmark. *NGU Rapport 2011.010*.

Elvebakk, H. 2011d: Geofysisk logging av borehull ved Arnestad skole, Asker. *NGU Rapport 2011.011*.

Elvebakk, H. 2011e: Geofysisk logging av borehull ved Ciens Forskningspark, Gaustad, Oslo. *NGU Rapport 2011.012*.

Elvebakk, H. 2011f: Geofysisk logging av borehull ved Rødsmyra skole, Fredrikstad.

NGU Rapport 2011.013.

Elvebakk, H. 2011g: Geofysisk logging av borehull på Drag, Tysfjord og Leknes, Lofoten.

NGU Rapport 2011.014.

Elvebakk, H. 2011h: Geofysisk logging av borehull Berger, Skedsmo kommune. *NGU Rapport 2011.015.*

Elvebakk, H. 2011i: Geofysisk logging av borehull ved Arnestad skole, Asker. *NGU Rapport 2011.016.*

Elvebakk, H. 2011j: Logging av grunnvannsbrønner ved Morskogen, Eidsvoll kommune. *NGU Rapport 2011.017.*

Elvebakk, H. 2011k: Geofysisk logging av borehull på Alstein, Randaberg kommune, Rogaland. *NGU Rapport 2011.032.*

Midttømme, K. & Elvebakk, H. 2003: Borehullsbasert energilager ved Akershus Universitetssykehus – geologiske forundersøkelser 2002 – 2003. *NGU Rapport 2003.036.*

Midttømme, K., Ramstad, R.K., Solli, A., Sjørdal, T. & Elvebakk, H. 2004: Grunnvarmekartlegging i Asker og Bærum. *NGU Rapport 2004.013.*

Pascal, C., Barrère, C., Davidsen, B., Ebbing, J., Elvebakk, H., Gernigon, L., Olesen, O., Roberts, D., Siedlecka, A., Skilbrei, J.R., Slagstad, T. & Wissing, B. 2008: HeatBear Report 2008, Basement Heat Generation and Heat Flow in the western Barents Sea- Importance for hydrocarbon systems. *NGU Report 2008.072.*

11.4 Referanseliste for arbeid relatert til Uranprosjektet ved NGU

Lindahl, I. 1984: Uran, uranprospektering og uranmineralisering i Norge. *Nor. geol. Unders. Skr. 51, 29 sider.*

Lindahl, I. & Hatling, H. 1988: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Finnmark. Kart M 1:500.000. Norges geologiske undersøkelse

Lindahl, I. & Sjørdal, T. 1988a: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Aust-Agder. Kart M 1:250 000. Nor. geol. unders.

Lindahl, I. & Sjørdal, T. 1988b: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Vestfold. Kart M 1:250 000. Nor. geol. unders.

Lindahl, I. & Sjørdal, T. 1988c: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Møre og Romsdal. Kart M 1:500 000. Nor. geol. unders.

Lindahl, I.; Sjørdal, T. 1988d: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Oppland; Oppland; M 1:500 000; trykket i farger; på kartet. Norges geologiske undersøkelse.

Lindahl, I. 1988: Naturlig radioaktivitet og avgivelse av radon fra undergrunnen - et naturgitt miljøproblem. *Naturen nr. 5 - 1988, s. 190 – 196.*

- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988a: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Jevnaker kommune, Oppland. **NGU rapport 88.028**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988b: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Lunner kommune, Oppland. **NGU rapport 88.029**, 18 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988c: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Søndre Land kommune, Oppland. **NGU rapport 88.030**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988d: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Vestre Toten kommune, Oppland. **NGU rapport 88.031**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988e: Måling og naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Østre Toten kommune, Oppland. **NGU rapport 88.032**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988f: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Gran kommune, Oppland. **NGU rapport 88.033**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988g: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Nordre Land kommune, Oppland. **NGU rapport 88.034**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988h: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Gjøvik kommune, Oppland. **NGU rapport 88.035**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988i: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Lillehammer kommune, Oppland. **NGU rapport 88.036**, 18 sider.
- Lindahl, I. & SørDAL, T. 1991: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Tysfjord kommune, Nordland. **NGU rapport 91.055**, 17 sider.
- Lindahl, I., SørDAL, T. & Furuhaug, L. 1991: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen og radon i overflatevann, Oppdal kommune, Sør-Trøndelag. **NGU rapport 91.056**, 20 sider + vedlegg.
- Lindahl, I.; SørDAL, T.; Ekremseter J. 1996. Naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, Norge; M: 1:2 000 000. Norges geologiske undersøkelse.
- Lindahl, I. & SørDAL, T. 1998: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Østfold. Kart M 1: 250 000, Nor. geol. unders.
- Lindahl, I. & SørDAL, T. 2003a: Naturlig radioaktivitet (gammastråling) fra berggrunnen. Tolkningskart for ASKER kommune. Nor. geol. unders.
- Lindahl, I. & SørDAL, T. 2003b: Oversikt over naturlig gammastråling fra berggrunnen for kommunene ASKER, RØYKEN og HURUM. Nor. geol. unders.
- Lindahl, I. & Furuhaug, L. 2006: Oppfølging av geokjemiske anomalier på Zr på Hinnøy, Langøy, Hadseløy, Austvågøy og Hamarøy. NGU Notat for Nordland Mineral, 12 sider.
- Lindahl, Ingvar. 2007. Radioaktivitet fra gamle gruver. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 2007.027**, 48 sider.

Siggerud, T. 1956: Uran og uranleting. Nor. geol. unders. *Småskrifter nr. 6*, 61 sider.

Skjeseth, S. 1958: Uran i kambrisk alunskifer i Oslofeltet og tilgrensende områder. Nor. geol. unders. 203, 100 – 111.

Sverdrup, T.L., Thorkildsen, C.D. & Bjørlykke, H. 1967: Uran og thorium i Norge. Nor. geol. unders. 250A, 31 sider.

11.5 Referanseliste for radon og uran i grunnvann

Banks, D., Røyset, O., Strand, T. & Skarphagen, H. 1993: Radioelement (U, Th, Rn) concentrations in Norwegian bedrock groundwaters. NGU Report 93.121.

Banks, D. 1993: Radioelement & trace element concentrations in some Norwegian bedrock groundwaters - Appendix. NGU Report 93.124.

Banks, D., Røyset, O., Strand, T. & Skarphagen, H. 1995: Radioelement (U, Th, Rn) concentrations in Norwegian bedrock groundwaters. *Environmental Geology* 25, 165-180.

Banks, D., Frengstad, B., Midtgård, Aa.K., Krog, J.R. & Strand, T. 1998a: The chemistry of Norwegian groundwaters. I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. *The Science of the Total Environment* 222, 71-91.

Banks, D., Midtgård, Aa.K., Frengstad, B., Krog, J.R. & Strand, T. 1998b: The chemistry of Norwegian groundwaters. II. The chemistry of 72 groundwaters from Quaternary sedimentary aquifers. *The Science of the Total Environment* 222, 93-105.

Banks, D., Midtgård, Aa.K., Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Bjorvatn, K. & Siewers, U. 1998: Is pure groundwater safe to drink?: natural 'contamination' of groundwater in Norway. *Geology Today*, May-June, 104-113.

Banks, D., Frengstad, B., Krogh, J. R., Midtgård, Aa. K., Strand, T. & Lind, 1998: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Norge. NGU rapport 98.058.

Banks, D., Midtgård, Aa. K., Frengstad, B., Krogh, J.R., Strand, T. & Lind, B. 1998: Utjevningsbassens innvirkning på radoninnholdet i grunnvann fra fast fjell. NGU rapport 98.097.

Banks, D., Frengstad, B., Krogh, J. R., Midtgård, Aa. K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Trøndelagsfylkene. NGU rapport 97.168.

Banks, D., Frengstad, B., Krogh, J. R., Midtgård, Aa. K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Østfold fylke. NGU rapport 97.157.

Banks, D., Frengstad, B., Krogh, J. R., Midtgård, Aa. K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Rogaland fylke. NGU rapport 97.163.

- Banks, D., Frengstad, B., Krogh, J. R., Midtgård, Aa. K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Agderfylkene. NGU Rapport 97.162.
- Banks, D., Frengstad, B., Skrede, A.K., Krog, J.R., Strand, T., Lind, B. & Siewers, U. 2000: Grunnvann – ikke bare vann. Gråsteinen 6. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim. 58 s.
- Frengstad, B., Banks, D. Krog, J.R., Midtgård, Aa.K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Oslo og Akershus fylke. NGU Rapport 97.158.
- Frengstad, B., Banks, D. Krog, J.R., Midtgård, Aa.K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Buskerud fylke. NGU Rapport 97.160.
- Frengstad, B., Banks, D. Krog, J.R., Midtgård, Aa.K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Nord-Norge. NGU Rapport 97.169.
- Frengstad, B., Banks, D., Midtgård, A.K. & Siewers, U. 1999: Distribution of Selected Trace Elements (As, Be, Bi, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Th, Tl, U, W) in 476 Norwegian Crystalline Bedrock Groundwaters. In: Fendekova, M. & Fendek, M. (Eds): Hydrogeology and Land Use Management. Proceedings of XXIX IAH Congress, Bratislava, pp 43-48.
- Frengstad, B., Midtgård, A.K., Banks, D., Krog, J.R. & Siewers, U. 2000: The Chemistry of Norwegian Groundwaters III. The Distribution of Trace Elements in 476 Crystalline Bedrock Groundwaters, as Analysed by ICP-MS Techniques. *Science of the Total Environment* 246/1, 21-40.
- Frengstad, B. Banks, D. & Siewers, U. 2001: The Chemistry of Norwegian Groundwaters: IV. The pH-Dependence of Element Concentrations in Crystalline Bedrock Groundwaters. *The Science of the Total Environment* 277, 101-117.
- Frengstad, B., Haraldseth, A.L. & Nilssen, R.S.A. 2001: Årstidsvariasjoner i grunnvannskjemien i fem bergborede brønner sør for Bergen. NGU Rapport 2001.041, 34 s.
- Frengstad, B. 2002: Groundwater quality of crystalline bedrock aquifers in Norway. Doktor Ingeniør Thesis 2002:53. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, NTNU, 389 pp + Appendices.
- Frengstad, B., Skrede, A.K., Krog, J.R., Strand, T., Lind, B. & Banks, D. 2002: Radon in Potable Groundwater: Examples from Norway. In: Bølviken, B (Ed) *Natural Ionizing Radiation and Health*. Proceedings from a symposium held at the Norwegian Academy of Science and Letters, Oslo 6-7 June 2001. Det Norske Videnskaps-Akademi, 27-38.
- Frengstad, B., Banks, D., Skrede, Aa.M., Krog, J.R., Siewers, U. & Strand, T. 2002: The hydrochemistry of crystalline bedrock groundwater in Norway. In: Rohr-Torp, E. & Roberts, D. (Eds) *Hardrock hydrogeology - proceedings of a Nordic workshop*, Oslo 14-16 August 2002. NGU Bulletin 439, 87-98.
- Frengstad, B.S. & Banks, D. in prep.: Uranium distribution in groundwater from fractured crystalline aquifers in Norway. Submitted to IAH Special Publication.
- Krog, J.R., Banks, D., Frengstad, B., Midtgård, Aa.K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Vestfold fylke. NGU Rapport 97.159.

- Krog, J.R., Banks, D., Frengstad, B., Midtgård, Aa.K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i fylkene Hedmark og Oppland. NGU Rapport 97.165.
- Krog, J.R., Banks, D., Frengstad, B., Midtgård, Aa.K., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Telemark fylke. NGU Rapport 97.161.
- Midtgård, Aa.K., Banks, D., Frengstad, B., Krog, J.R., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Sogn og Fjordane fylke. NGU Rapport 97.166.
- Midtgård, Aa.K., Banks, D., Frengstad, B., Krogh, J.R., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Hordaland fylke. NGU rapport 97.164.
- Midtgård, Aa.K., Banks, D., Frengstad, B., Krog, J.R., Strand, T. & Lind, B. 1997: Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Møre og Romsdal fylke. NGU rapport 97.167
- Midtgård, Aa.K., Frengstad, B., Banks, D., Krog, J.R., Strand, T., Siewers, U. & Lind, B. 1998: Drinking water from crystalline bedrock aquifers – not just H₂O. Mineralogical Society Bulletin, December 1998, 9-16.
- Midtgård, Aa.K., Frengstad, B., Banks, D., Krog, J.R., Siewers, U., Strand, T. & Lind, B. 1999: Fordeling av sporelementer i grunnvann fra 476 borebrønner i fast fjell, analysert med ICP-MS. NGU Rapport 99.099, 169 s.
- Morland, G., Strand, T., Furuhaug, L. & Skarphagen H. 1996: Måling av radon i råvann ved større grunnvannsverk i Norge. NGU Rapport 96.080.
- Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Skarphagen, H., Banks, D., Bjorvatn, K., Hall, G.E.M., & Siewers, U. 1997: The hydrogeochemistry of Norwegian bedrock groundwater - selected parameters (pH, F, Rn, U, Th, B, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway. Norges geologiske undersøkelse Bulletin 432, 103-117.
- Morland, G., Strand, T., Furuhaug, L., Skarphagen, H. & Banks, D. 1998: Radon in Quaternary aquifers related to underlying bedrock geology. Ground Water, 36/1, 143-146.
- Nilssen, R.S.A. 2001: Radon i grunnvann fra borebrønner i fjell. Jevnlige målinger fra fem lokaliteter i Bergen og Os. Cand. Scient. Oppgave i geologi. Geologisk institutt, Universitetet i Bergen, 92 s + vedlegg.
- Reimann, C., Hall, G.E.M., Siewers, U., Bjorvatn, K., Morland, G., Skarphagen, H. & Strand, T. 1996: Radon, fluoride and 62 elements as determined by ICP-MS in 145 Norwegian hard rock groundwater samples. The Science of the Total Environment 192, 1-19.

12. VEDLEGG: NGUs arbeid med radioaktive elementer, historie og erfaringer.

Pensjonert forsker Ingvar Lindahl har ledet mye av arbeidet med kartlegging av radioaktive elementer ved NGU, og gir i dette vedlegget et historisk tilbakeblikk og en oppsummering av erfaringer.

12.1 Uranprospekteringen ved NGU og bruken av dataene for å gi en oversikt over radioaktivitet fra berggrunnen

NGU utførte kartlegging av radioaktive grunnstoff som uran (U) og thorium (Th) fra 1950-tallet til ca. midten av 1980-tallet. Disse dataene ble blant annet brukt som bakgrunnsdata ved måling av radioaktivt nedfall etter Tsjernobyl-ulykken i 1986. Data fra målinger av naturlig radioaktivitet fra berggrunnen har vært og er grunnlaget for framstilling av fylkeskart over naturlig radioaktiv stråling. Se referanseliste for utfyllende referanser for kart over naturlig radioaktivitet fra berggrunnen.

I forbindelse med uranprospektering har NGU over en årrekke analysert bergartsprøver for innhold av radioaktivitet og hovedelementer, deriblant uran. Dataene er lagt inn i en inaktiv database som består av analyser av 4903 bergartsprøver, hvorav 2515 er målt for total gamma (rekkevidde 7-15000 cps), 3510 er målt med gammaspektrometer og viser uran) i ppm (rekkevidde 1-51600 ppm), og 2001 prøver er målt med XRF og viser uran i ppm (rekkevidde 11-53000 ppm). De fleste prøvene ble samlet inn i sammenheng med mineralprospektering, hvor målet er å finne høye konsentrasjoner av mineraler som kan være økonomisk drivverdig. Dette reflekteres også i kartet som viser distribusjonen og urankonsentrasjonene av prøvene hvor det generelt er svært høye konsentrasjoner av uran. Se referanseliste for utfyllende referanser for databasen.

NGU før 1970

De første geologene på NGU startet sin kartlegging av landet på slutten av 1800-tallet. Det ble funnet og identifisert en hel del nye mineraler i pegmatitter, særlig i Sør-Norge. En del av disse mineralene var uran- og/eller thoriumførende. Radioaktive mineraler ble tatt ut med bondedrift og brukt til forskning av for eksempel M. Curie. Dette var fra bondedrift med utvinning av de radioaktive mineralene med handsortering, hovedsakelig i Agder fylkene og i Hordaland.

Etter siste verdenskrig var det stor interesse for uran, kanskje mest i militær sammenheng. Det ble av NGU gjort undersøkelser som dels var fortrolig. NGU var involvert i dette arbeidet på 1950-tallet og tidlig på 1960-tallet. Det førte til undersøkelser av uraninnholdet i spesielle bergarter slik som alunskiferen i Oslo-feltet, og på noen lokaliteter ble de mest radioaktive delene av skiferen oppboret (Skjeseth 1958). Det ble prospektert etter potensielle forekomster ut fra geologiske kriterier, og lokalt kjøpte mange private personer Geiger Müeller instrumenter av for å lete etter uran og radioaktive mineraler. NGU informerte om hvordan en skulle lete etter uran og thorium (Siggerud 1956). En hel del mineraliseringer av uran og thorium ble funnet i denne perioden av geologer og entusiaster. Det ble i denne perioden gjort

flymagnetiske målinger over Norge, og i en del områder hvor topografien var gunstig, slik at bakkeklaringen kunne holdes noenlunde konstant, ble det samtidig også målt radioaktivitet. Forhøyet radioaktivitet fra en del bergarter på Østlandet kom i den sammenheng fram. Også i denne perioden ble det av NGU målt radioaktivitet fra bil. Det ble publisert artikler om uran- og thoriumforekomster i Norge (Sverdrup et al. 1967). Flere publikasjoner og rapporter finnes hvorav noen er referert av Lindahl (1984).

NGUs Uranprosjekt 1975 – 1985

NGU besluttet i 1975 å etablere et større Uranprosjekt. Begrunnelsen for å starte prosjektet var at NGU så det som sitt ansvar å ha oversikt over mineralressursene i Norge. Det måtte også omfatte uran og thorium. En annen begrunnelse var at flere store industriselskaper i Norge var interessert i at dette ble gjort. Selskapene var såpass interessert at de bidrog med finansiering av oppstarten av NGUs uranprosjekt. Prognosene på det tidspunktet forutså en mangel på energi i global sammenheng. Det var viktig for selskapenes å sikre tilgang på energi i framtida. NGU var helt åpen ovenfor media med hensyn til denne beslutningen, og den førte heller ikke til nevneverdig kritikk og kun begrenset pressedekning.

En omfattende global uranleting var allerede startet tidlig på 1970-tallet. FNs organ IAEA i Wien og europeiske OECD NEA i Paris koordinerte de globale undersøkelsene i medlemslandene hvor Norge er med, og arrangerte en rekke symposier og møter med erfaringsutveksling innen uranforekomstenes geologi og prospekteringsmetoder for uran. Kompetansen innenfor uranets geologi og prospekteringsmetoder ble bygd opp i alle land. Som resultat ble det i løpet av relativt få år funnet mange nye rike forekomster. Samtidig utover 1980-tallet fant man ut at prognosene for uran til energiproduksjon var alt for høye. Uranprisene falt og prospekteringsaktiviteten avtok kraftig. Ytterligere prisfall på uran kom etter "Glasnost", og anriket uran til militært bruk kunne gå til kraftproduksjon.

NGUs tiårige Uranprosjekt fra 1975-85 gjorde omfattende undersøkelser og innhentet kunnskap om forekomstenes geologi og prospekteringsmetodikk fra den internasjonale prospekteringsboomen. Hovedmålet ved prosjektet var å vurdere om det finnes potensielt utnyttbare forekomster i Norge og ikke kun mineraliseringer. Prosjektet hadde nært samarbeid med de geologiske undersøkelsene i de skandinaviske landene og globalt. Mange letemetoder ble vurdert og flere testet og anvendt i Norge innenfor geologi, geofysikk og geokjemi. Med hensyn til radon ble utstyr for det skaffet for måling av radon i jordluft og vann. Slike målinger ble gjennomført i forbindelse med undersøkelse av flere objekter.

I starten av Uranprosjektet ble prospekteringsmetodene tilpasset norske forhold og flere notater fra disse innledende forsøkene med tilpasninger ble skrevet. Resultatene fra prosjektet ble rapportert etter hver feltsesong. Et stort antall rapportert er framstilt og oversikt over disse finnes i NGUs Skrifter no. 51 (Lindahl 1984). Lindahls presentasjoner relatert til uran, radioaktivitet og radon er oppgitt i referanselisten.

Utnyttelsen av prospekteringsdata i kart for naturlig radioaktivitet fra berggrunnen – fylkeskartene.

NGUs innsats innenfor Uranprosjektet og kartlegging av nedfall fra Tsjernobyl langs veger fra Kirkenes til Lindesnes gav en god oversikt over hvor naturlige radioaktive elementer fantes. Det ble besluttet å framstille disse data som fylkeskart over radioaktiv stråling fra

berggrunnen. De første kartene som ble ferdigstilt var der hvor vi hadde full måledekning. Det vil si der vi hadde gjort radiometriske bilmålinger langs alle tilgjengelige veier. NGU gjorde noen tilleggsmålinger der kun lite manglet for å dekke alle veiene. Det ble laget en oversikt over den innsatsen som var nødvendig for å få full dekning av målinger i fylkene der slike manglet, og sendt forespørsel til disse fylkene om prosjektstøtte. Noen av fylkene bidro i den sammenheng. For disse ble målingene fullført og kart framstilt. I dag foreligger det kart over naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen i alle fylkene utenom Sør-Trøndelag, Hedmark, Akershus, Buskerud, Telemark, Hordaland samt Sogn og Fjordane. En del fylkeskommuner / kommuner var særlig interesserte og ønsket å få framstilt mer detaljerte kart. Det ble derfor også laget kart og rapporter over en hel del kommuner. Alle kommunene i Oppland har for eksempel fått mer detaljerte kart med rapporter over naturlig radioaktivitet fra berggrunnen og fått dem presentert på møter i kommunen (se referanseliste). Også noen kommuner i Akershus har fått slike mer detaljerte kart.

Kartene over naturlig radioaktivitet er bygd på punktmålinger av de typiske bergartene langs veiene i forbindelse med bilmålingene. Det er som sådan litt uriktig å kalle produktet "kart fra bilmålinger". Måleverdiene er samtolket med de geologiske berggrunnskartene. Ved tolkningen som er gjort manuelt av geolog er punktkilder med høy radioaktivitet ikke benyttet. Det er imidlertid i tolkningen tatt hensyn til dette der det er mange punktkilder i og samme geologiske formasjon. Ved samtolkingen er også dataene fra den flekkvise informasjonen fra områder dekket med helikoptermålinger utnyttet. Disse målingene gir langt bedre dekning, men de er samtolket slik at måleverdiene er koordinert med punktmålingene på bakken. Det er også ved bruken av helikopterdata tatt hensyn til hvor det er målt over kvartære løsmasser.

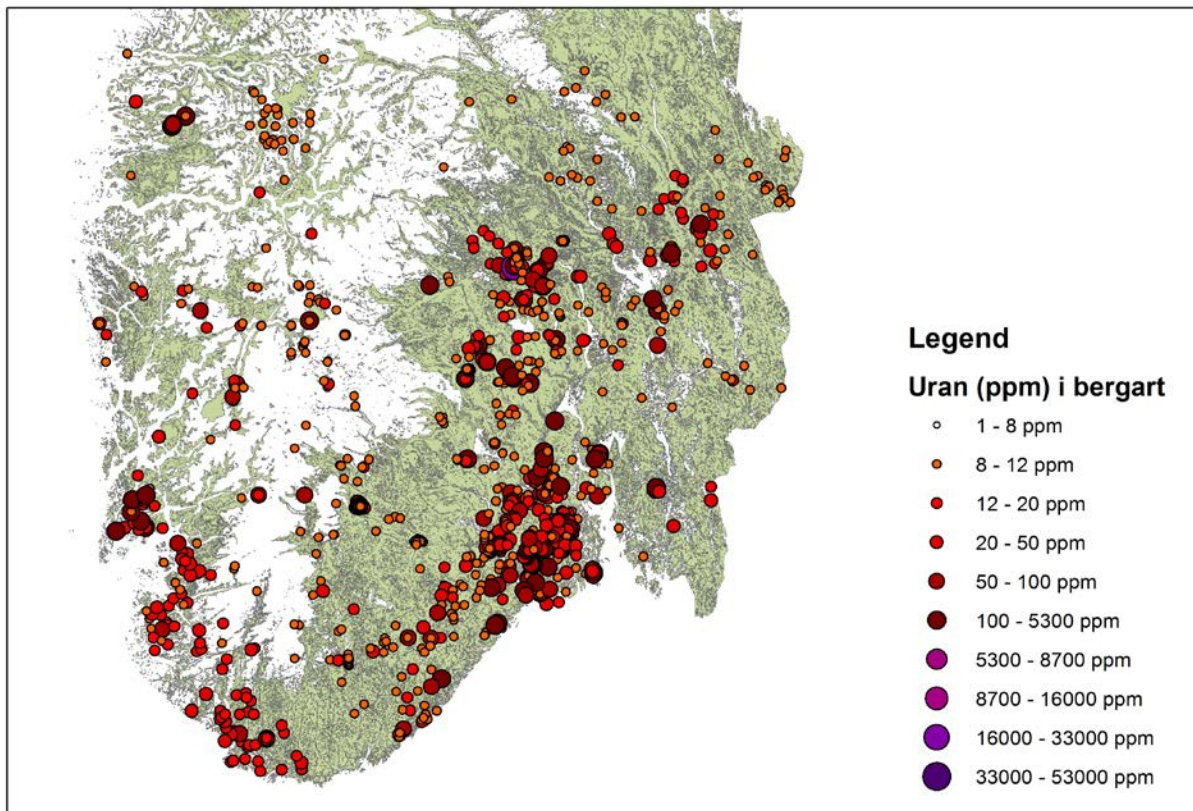
Fylkeskartene for naturlig stråling fra berggrunnen ble i første utgave framstilt tegnet i svart-hvitt. Senere er kartene digitalisert og kartene foreligger nå som et NGU-produkt i farger. I 1997 ble det utarbeidet et forslag internt på NGU om å fullføre bilmålingene i de fylkene som ikke hadde full dekning, slik at kartserien over naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen over fylkene ble fullført. Det ble imidlertid av NGUs ledelse bestemt at dette ikke skulle gjøres.

Radonmåling som prospekteringsmetode

Måling av radon (Rn) i jordluft er en metode som er brukt i uranprospektering, hovedsakelig for å kartlegge en mineralisering under overdekke. Utstyr for måling av Rn ble anskaffet i Uranprosjektets regi og metoden ble brukt for å kartlegge uranmineralisering dekket av morene. Metoden ga brukbare resultater med å måle innholdet av Rn i jordluft. Det ble etablert en rutine som ga reproducerbare resultater. Feilkildene er imidlertid mange og er kommentert i senere avsnitt om metodikk mht. miljø. Videre ble metoden brukt til å måle innholdet av Rn i vann i forbindelse med uranmineraliseringer. Metoden er også brukt noen steder av NGU for å måle Rn i grunnvann.

Det ble etablert et samarbeid med IFE i forbindelse for målinger av Rn i jordluft basert på det utstyret vi hadde på NGU. Det ble også etablert et samarbeid med IFE når det gjelder vurdering av mulige Rn-problemer i forbindelse med boligfelt (dette omfattet også målinger av radioaktiv stråling fra berggrunn og løsmasser). De tidligere deltakerne i Uranprosjektet har gjort et lite antall slike undersøkelser som er rapportert. NGU tok etter Tsjernobyl, da Rn ble meget omtalt, en beslutning at vi ikke vil gjøre målinger i boliger, men holde oss til

geologiske forhold. Måling i hus mente vi var et område for Strålevernet og kommersielle selskaper.



Kart som viser konsentrasjon av uran (ppm) fra bergartsprøver fra Sør-Norge hentet fra Uranaldatabasen. Prøvetakingen er gjennomført for prospektering for uran og thorium, og verdiene er derfor svært høye. Verdiene representerer kun punkter.

NGUs aktivitet etter 1990

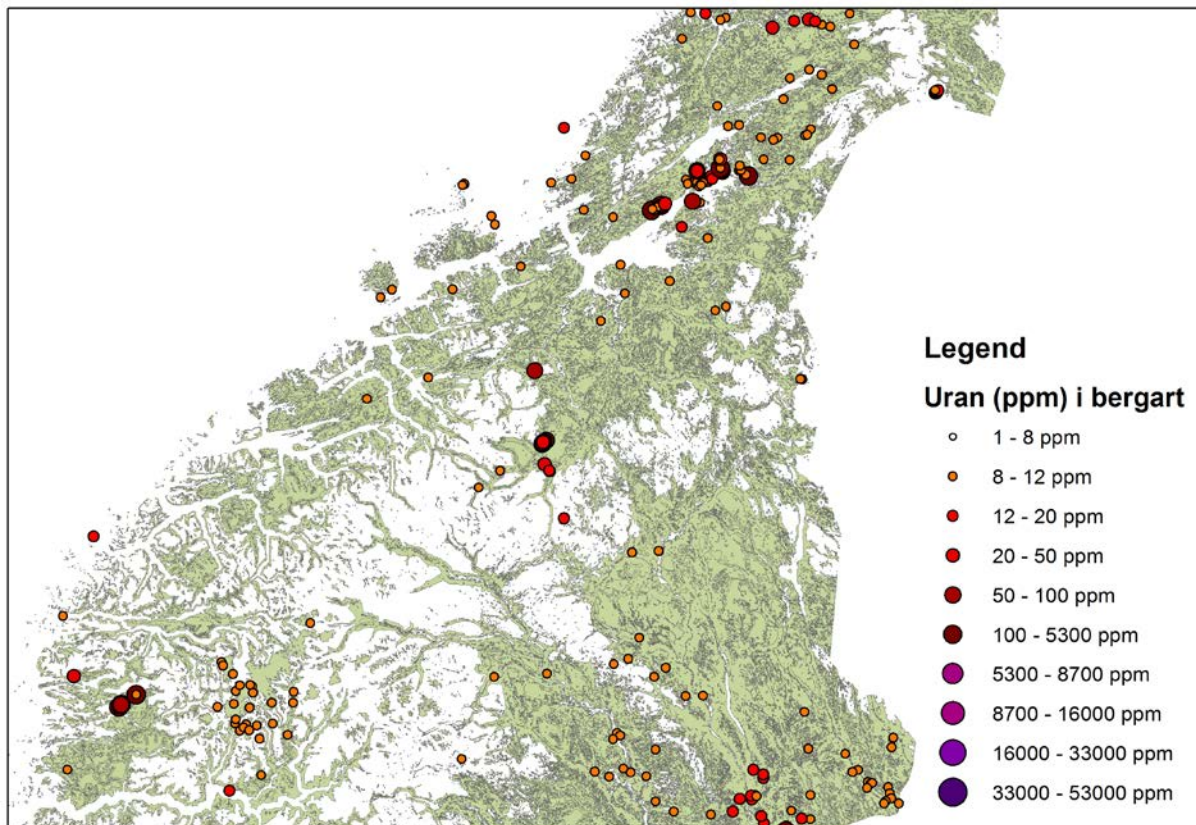
Etter avslutning av Uranprosjektet har i liten grad geologene vært brukt i forbindelse med Rn-problematikken. Innsatsen er gjort hovedsakelig innenfor geofysikk, med måling fra fly og helikopter. Noe innsats er imidlertid gjort med digitalisering av fylkekartene, og det er sammenstilt en rapport om radioaktivitet i forbindelse med gamle gruver (Lindahl 2007).

12.2 NGUs rutiner for datainnsamling i uranprospektering – erfaringer

Geologi: Bergartsmiljø og naturlige variasjoner

Selv om det finnes mange unntak har de forskjellige bergartene vanligvis forskjellige variasjonsbredder for innhold av radioaktive elementer. Når det gjelder magmatiske bergarter er generelt de mest SiO₂-rike bergartene de som har høyest innhold av radioaktive elementer. Årsaken er den naturlige anrikingsprosessen som skjer ved magmatisk differensiasjon, og

forholdet gjelder både dypbergarter og dagbergarter. Det betyr at en granitt nesten alltid har mer uran enn en gabbro, og en rhyolitt har mer uran enn en basalt eller grønnstein. Men så finnes det som alltid ellers i naturen mange unntak som skyldes spesielle geologiske forhold og spesielle differensiasjonsprosesser for magmatiske bergarter. Gjentatt oppsmelting av bergarter ved utviklingen av jordskorpa gjør da at yngre granitter har større mengder av spesielle elementer enn eldre granitter, inkludert uran og thorium, fordi de har fått en ytterligere oppkonsentrering ved gjentatt differensiasjon.

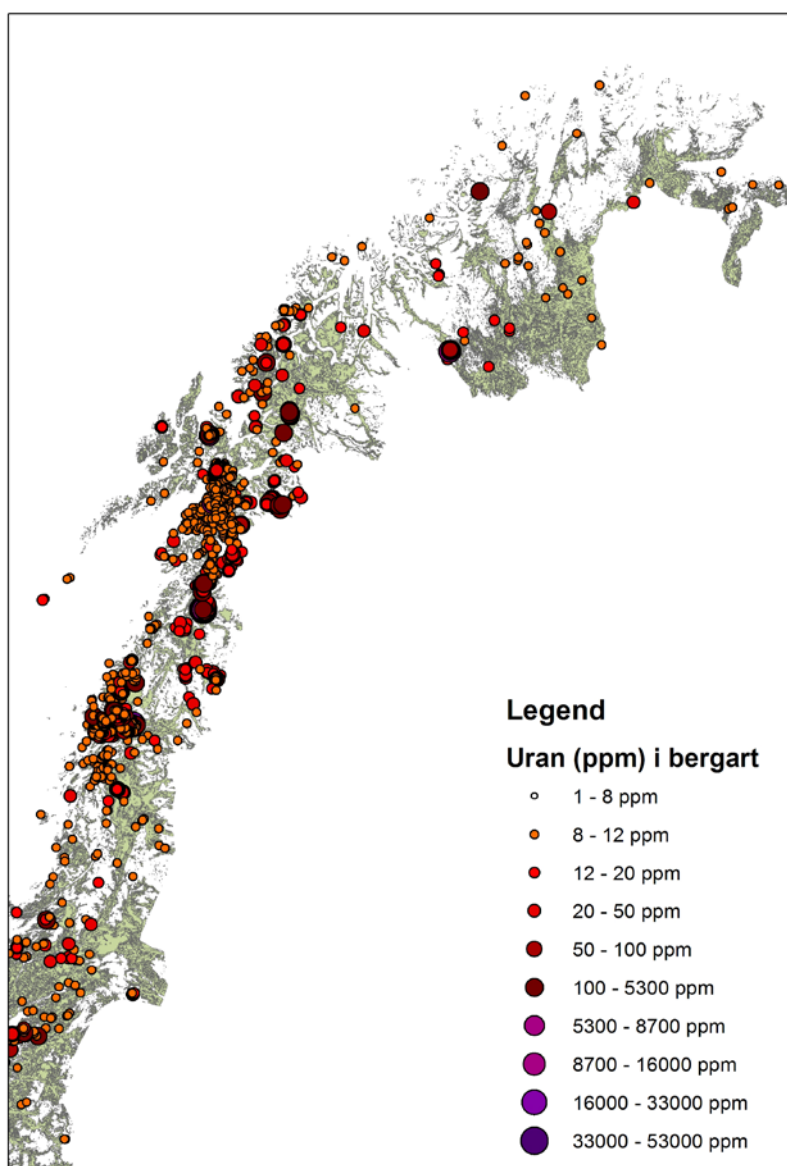


Kart som viser konsentrasjon av uran (ppm) fra bergartsprøver fra Midt-Norge hentet fra Uranaldatabasen. De høye verdiene ved Trondheimsfjorden skyldes spesielt Th, med også urananrikede ganger, som er undersøkt nøye og resultatene rapportert.

Sedimenter får et innhold av U og Th som delvis er avhengig av kildebergartene, men innholdet er også avhengig av betingelsene ved avsetningen av sedimentene. Kvartsitter, arkoser og mer finkornede sedimenter som er avsatt klastisk under oksiderende forhold har vanligvis lav radioaktivitet. Det samme er tilfelle med kalkstein/marmor. Under avsetningsprosessen kan en imidlertid få anrikning av tungmineraler i bånd eller enheter med større mektighet. De aksessoriske tungmineralene fra bergartene som forvitrer er de som gjerne har forhøyede verdier av uran og thorium. Sedimenter som avsettes under reduserende forhold akkumulerer gjerne noe organisk materiale som ved metamorfose blir til grafitt. Uran som er et av de mest lettløselige metallene under oksiderende forhold oppkonsentreres gjerne i organisk materiale eller under reduserende forhold (alunskifer). I tillegg til dette kan senere hydrotermale prosesser som har funnet sted etter bergartsdannelsen komplisere det generelle bildet for innhold av radioaktive grunnstoffer. Ofte er det i tilknytning til granittene dannet

pegmatitter, fra restsmelte eller metamorfose, som ofte gir en ytterligere anrikning av U og Th.

Det meste av målingene av radioaktivitet gjort i regi av Uranprosjektet i perioden 1975 – 85 var gamma totalstrålingsmålinger. Erfaringene er at spalteredden til uran og thorium i våre gamle bergarter, med de yngste på noen titalls millioner år, er i likevekt. Det vil si at uran og thorium ekvivalentene som ble målt gir riktig verdi for bergartens innhold av uran og thorium. Det samme gjelder for spektromettermålinger som også ble gjort. Eneste forhold hvor spalteredden ikke er i likevekt gjelder er i de kvartære avsetningene. I elver (stilleflytende med organisk materiale) og ved kaldvannskilder hvor kaldvassmose vokser utfelles uran. Over de få tusen år etter istiden er ikke spalteredden i likevekt.



Kart som viser konsentrasjon av uran (ppm) fra bergartsprøver fra Nord-Norge hentet fra Uranalldatabasen. Alle de høyeste verdiene for uran er fra prøver fra lokaliserte uranmineraliseringer og representerer kun punkter.

Fokus for Uranprosjektet ble naturlig nok de bergartene som i utgangspunktet fører mest uran og thorium. Det ble gjort omfattende prøvetaking av noen av de mest radioaktive granittene

som var kjent fra før og de nye som ble lokalisert i prosjektperioden. Det gjelder flere granittmassiver i Telemark og i Nord Norge. Flere analysesett fra systematisk prøvetaking av granittene finnes i NGUs første litogeokjemiske database URANAL, som ble etablert av Uranprosjektet. Arbeidet med granittene førte til funn av berylliumforekomsten på Høgtuva i Rana i granittiske bergarter med høy radioaktivitet. Det ble utarbeidet statistiske korrelasjoner for geokjemien til de forskjellige granittmassivene med datidens dataverktøy (1983/84), klargjort for sluttbearbeiding for publisering, men alt materialet ble kastet under intern flytting internt på NGU.

I tillegg til at avgivelse av Rn fra berggrunnen er avhengig av dens uran- og thoriuminnhold, er porøsitet og oppsprekning meget viktige faktorer. Rn migrerer gjennom bergarten, og over en skikkelig knusningssone vil avgivelse av Rn kunne være betydelig selv om innholdet i bergarten er normalt. Mange andre faktorer som kan spille inn er variasjonen i lufttrykket, vannfylt eller tørt jordsmonn, tele i grunnen som gjør overflaten mindre gjennomtrengelig for Rn. Rn-innholdet kan for eksempel bygges opp under telen i løsmassene. Det finnes mange bygningstekniske måter å forhindre og bli utsatt for høye Rn-avgivelser fra grunnen i litteraturen som ikke kommenteres ytterligere her (Lindahl 1988).

Fra den prospekteringen som er gjort vet vi hvilke granittmassiver som har høye/lave innhold av radioaktive elementer. Vi kjenner også til en del andre bergarter og bergartsformasjoner og regioner som har forhøyet radioaktivitet. Derfor er erfaringen fra prospekteringsarbeidene etter uran og de geologiske kartene et viktig bakgrunnsmateriale. Det å ta hensyn til bergartene og bergartsmiljøet kan være til stor hjelp for vurdering av Rn-rikisiko. For prioritering av områder hvor det er viktig å gjøre undersøkelser av radon i bomiljø er grunnforholdene viktig. Det er ikke minst også viktig for å kunne berolige folk i noen områder hvor Rn fra berggrunnen og løsmassene høyst sannsynlig ikke skaper noe problem.

Kvartærgeologi: Et forvittringsprodukt fra berggrunnen

Løsmassene eller de kvartære avsetningene som ligger oppå berggrunnen er derivert fra denne. Avsetningene gjenspeiler til en viss grad berggrunnen, men er kortere eller lengre transporterte masser. Kvartærgeologisk kunnskap er derfor viktig for Rn-problematikken. Særlig er kornstørrelsen i løsmassene viktig med hensyn til gjennomstrømningen av Rn. Det ble ikke i Uranprosjektet brukt tid på å kartlegge løsmassene, men som ellers i prospektering er de et problem for kartlegging av berggrunnen. Uranmineralisering i berggrunnen kan kartlegges med å måle jordluft i løsmassene som ligger over. Det ble oppnådd reproduerbare resultater over middels tykke morene. Ved tykke avsetninger med fluviale og glasifluviale avsetninger, kanskje med klastisk sortering av sedimentet etter egenvekt, er det ikke mulig med slik kartlegging.

Løsmassene er et nyttig byggeråstoff og den tekniske kvaliteten varierer etter hva slags bergart de er derivert fra. Det ble i forbindelse med Uranprosjektet funnet flere forekomster av sand og grus derivert fra granitter som har forhøyet innhold av uran og thorium. Det er viktig å kontrollere byggeråstoffet for radioaktivitet som ved bruk kan medføre et problem med Rn i innemiljø. Oppstart av systematiske målinger av radioaktivitet i byggeråstoff ble etablert ved NGU som et resultat fra arbeidene i Uranprosjektet. I den senere tid har NGU arbeidet med å etablere rutiner for kontroll av byggeråstoff i henhold til radon og radioaktivitet, med etablering av pålitelige målemetoder og anbefalte grenseverdier. Det samme gjelder for pukk fra knuste bergarter.

En del sand og grusforekomster er tidligere brukt til byggeformål uten at Rn-problematikken er vurdert. Slikt bruk ble også registrert i forbindelse med de radiometriske bilmålingene. Hus med radioaktiv lettbetong og brent alunskifer (rødstybb) brukt på tennisbaner ga flere anomalier. Også dette vil komme under kontroll med dagens forståelse av Rn-problematikken og krav til byggematerialene. Om en ser det nødvendig å kartlegge gamle "radioaktive" hus kan dette gjøres med bilmålinger. Det er gjort et omfattende arbeid med slik kartlegging i vårt naboland Sverige.

Geofysikk: Fly og helikopter fram til 90-tallet

Ved de fleste fly og helikoptermålingene over land ble det av NGU siden 1970-tallet også målt radioaktivitet med spektrometer over mange kanaler (256) i gammaspekteret. Kvaliteten på dataene ble meget god. På de fleste målingene, både de som ble utført av NGU og dels de som ble gjort av NGU som oppdrag for eksterne brukere, ble det gjerne også målt radiometrisk. At radiometri inkluderes ved helikoptermålingene er nyttig både for prospektering generelt og for den geologiske kartleggingen. Anomaliene som kom fram ble fulgt opp med undersøkelser på bakken.

Alle metodene har sine fordeler, som også må tas hensyn til ved tolkningen av måleresultatene. Helikopterdataene må tolkes og vurderes mot de kvartærgeologiske kartene dersom en er ute etter å finne radioaktiviteten fra berggrunnen. Målingene har også sin begrensning i vårt lokalt alpine landskap. Det er ikke bare på grunn av at det er vanskelig å holde jevn bakkeklaring. En må også være oppmerksom på at det kommer fram "topografiske" anomalier. Det gjelder for eksempel i skarpe daler og iseroderte botner hvor man får inn stråling fra berggrunnen fra alle kanter. I regi av Uranprosjektet og i forbindelse med leting etter spesielle metaller og REE (sjeldne jordarter) knyttet til granitter er det fulgt opp en del slike "topografiske" anomalier særlig i granitt-terreng.

Bakkemåling: bil, tog og til fots

Uranprosjektet utarbeidet en systematikk for gjennomføringen av bilmålingene. Ved målingene ble det for det aller meste brukt den NaI-krystallen som tidligere var anvendt til målinger fra fly og helikopter (7 liter). En VW transporter ble fast brukt ved målingene med to kompetente personer for å gjennomføre målingene etter samme rutine. Krystallen ble plassert oppå motorkassen på høyre side av bilen vendt utover. Instrumentet var koblet til en enkel papirskriver plassert framme hos kartleser. Før oppstart av Uranprosjektets målinger ble det testet hvor stor hastighet som kunne brukes på bilen for å få fram punktanomalier, som var viktig i prospekteringen. Nivåforskjellene på den radioaktiviteten i homogene bergarter kommer fram uansett hastighet. Etter testing kom vi fram til at det skulle brukes en hastighet på 45 – 50 km/timen ved målingene. Alle veistrekningene skulle måles tur-retur slik at krystallen kunne registrere stråling på begge sidene av veien. Det må nevnes at togstrekningene også ble målt tur-retur på samme prinsipp som bilmålingene. Også her kom det fram vekslende naturlig radioaktivitet i områder uten at man av den grunn kunne bestemme hastighet eller trekke i nødbremsa når radioaktiviteten var høy. Noen av resultatene fra målingene fra tog ble fulgt opp.

Ved bilmålingene ser en tydelig hvor viktig geometrien er ved måling av radioaktiv stråling. Det blir helt forskjellige verdier langs en vei ved måling tur-retur. Når en ensidig veiskjæring passerer blir måleresultatet helt forskjellig etter kjøretretningen. Veitunnel gir også helt forskjellige utslag. I veitunneler i granitt får instrumentet fullt utslag, som skyldes at strålingen kommer fra alle kanter. I grønnstein/gabbro/marmor går måleverdien ned i tunnelene og blir lavere enn bakgrunnsstrålingen utenfor. Dette skyldes at bidraget fra den kosmiske strålingen blir skjermet og den utgjør et større bidrag enn strålingen fra bergartene med lavt uran og thoriuminnhold. Radioaktivitet over myr og leire er lav, men når veien er bygd opp av granittisk fyllmasse i veilegemet ser en det klart på målingene. Ved at topografien, blotning i skjæringer, overdekke av løsmasser og materiale i veilegemet betyr så mye måtte målelaget være meget observante ved målingene og gjøre vurderinger under veis. På grunn av dette er det også kun villedende å digitalisere utskriftene fra bilmålingene fra skriveren, som i etterkant av Uranprosjektet ble diskutert som en mulig ytterligere utnyttelse av måledataene.

Ved bilmålingene ble det stoppet og målt naturlig stråling fra bergartsoverflatene på forskjellige bergarter, forskjellige bergartsformasjoner og punktvis høye anomalier. Det er disse måleverdiene som ble presentert i de mange rapportene som er skrevet fra undersøkelsene som var fokusert på uranprospektering. Bakkemåling til fots ble i Uranprosjektet gjort av geologen i felt. Hammer og lett scintillometer var den typiske utrustningen medarbeiderne i prosjektet den gang. Det var totalstråling som ble målt med de håndholdte instrumentene. Det gjaldt både med måling på bergartsoverflater ved bilmålingene og målingene i terrenget.

NGU hadde forskjellige typer av scintillometer for måling av radioaktivitet med forskjellig krystallstørrelse og forskjellige skalaverdier. Ved oppstarten av Uranprosjektet fant vi det nødvendig å snakke om målinger og anomalier i en og samme måleskala. Det ble valgt å bruke skalaen på et av instrumentene av typen Saphymo SRAT, med 1 1/2" krystall. Denne typen instrument ble også brukt andre steder i Norden og globalt. Det ble ansett som det mest stabile av vårt måleutstyr den gangen. Instrumentene av denne typen viser imidlertid innbyrdes også litt forskjell i måleverdiene. Måleverdiene på ett av de tre instrumenter av denne typen som vi hadde ble valgt som referanseskala for uranprosjektets måleverdier. Men instrumentene viser også avtakende måleverdier etter som NaI-krystallene blir "slitte". Måleskalaen er derfor over prosjektperioden også justert til den første sesongen i uranprosjektet, og på det spesielle instrumentet som ble valgt. Naturlig materiale med forskjellig uraninnhold ble støpt inn i prøveslabs og alle instrumentene testet foran hver feltsesong med samme geometri. Kurver for måleverdier for hvert instrument ble laget foran hver feltsesong for de forskjellige innhold av uran og thorium i slabsene. Med dette som utgangspunkt kunne en gjennom prosjektets levetid referere til sammenlignbare måleverdier i felt. Måleverdiene hadde benevnningen impulser pr. sekund (i/s), referert til Saphymo SRAT no. 1, anno 1976.

En meget viktig faktor ved målingene er geometrien på det punktet som måles. Dette må gjøres på bergartsoverflater som er mest mulig jevne. Det bør være noen få kvadrat meters rimelig plan overflate for å få representative verdier. De måleverdiene som er oppgitt for en bestemt bergart eller lokalitet er oftest etter flere målinger på en bergart innenfor et visst område. Måling i en sprekk i fjellet eller i groper gir for høy stråling fordi strålingen kommer fra alle kanter. Målegeometrien er derfor svært viktig også i denne sammenhengen.

Måleopplegget som ble besluttet ble brukt av alle deltakerne i prosjektet. I og med at målet for Uranprosjektet var å kartlegge potensielle ressurser av uran og thorium, var også punktvis

høye måleverdier viktige. Disse er beskrevet nærmere i rapportene. Men disse anomaliene må vurderes på en helt annen måte i helsemessig sammenheng, enn målingene på bergartsflater som representerer de store bergartsvolumene. Dette er det tatt hensyn til i tolkningskartene som er laget for naturlig radioaktivitet fra berggrunnen. De er framstilt basert på representative målinger av de større bergartsvolumene og de geologiske kartene.

Det blir helt feil å digitalisere alle måleverdiene fra uranprospekteringen og lage kart fra det basert på statistikk. Det er også uriktig å bruke analyseresultatene fra prøvematerialet som ligger i databasen URANAL til slik kartframstilling uten å ta hensyn til prøvebeskrivelsen.

Geokjemi – bergart, bekkesediment, bekkevann, radon i jordluft

I Uranprosjektets regi ble det samlet inn nesten 3000 bergartsprøver. I andre prosjekter som USB (Undersøkelse av Statens Bergrettigheter) ble det også samlet inn mange prøver (ca. 2000), og noen av dem fra granittmassiver og andre bergarter interessante i uransammenheng og med hensyn til REE. Alle disse prøvene er analyserte på uran og thorium, og i tillegg er mange analysert på hoved- og sporelementer. Undertegnede satte opp en litogeokjemisk database for disse prøvene i 1983/1984 fra diverse analyseoppdrag innenfor og utenfor NGU. Dette er et stort materiale som i dag er en av NGUs databaser. Prøvematerialet er fortløpende nummerert med U-prøver fra nr. 1 og utover og prøvematerialet ligger på Løkken. Prøvene er koordinatfestet og bergartstype angitt. Det er mulig at dette kan være til nytte for et prosjekt for å vurdere helserisiko fra stråling og Rn.

NGU har gjennom årene brukt løsmassegeokjemi for prospektering etter metaller, som har vært til stor nytte. Prøvetakingsmedia har vært bekkesediment, tungmineraler og jordprøver, og i de siste årene er flere andre forskjellige prøvetakingsmedier testet. Også i Uranprosjektet ble det forsøkt å bruke bekkesedimenter og tungmineralprøver fra bekker for U, Th, Zr og REE i kartleggingen. Uranprosjektet fikk analysert noen tusen bekkesedimentprøver fra det tidligere blyprosjektets prøvetaking langs fjellkjederanden i Sør-Norge og i Finnmark. Det ble brukt en enkel fluorimetrisk analysemetode etablert ved NGU for dette. Verdiene på uran ga store variasjoner og resultatene virket lovende. Det ble gjort oppfølging av anomaliene både i Nord- og Sør-Norge. Men konklusjonen ble den at de bekkesedimentprøvene som ga kraftige anomalier på uran var tatt der elva flyter stille og inneholdt høye til meget høye innhold av organisk materiale. Uran som et av de mest mobile elementene under oksiderende forhold hadde festet seg til det organiske materialet i prøvene. Metoden fungerer ikke uten å ha streng kontroll med innholdet av organisk materiale i prøvene. Fra oppfølging i Nordland på høye Zr-anomalier i tungmineralprøver fra bekker (2006), viste det seg at anomaliene skyldtes revasket glasifluvialt materiale. Anrikning av tunge uranførende mineraler i bekkene vil sannsynligvis heller ikke være et gunstig prøvetakingsmedium for uranprospektering uten kunnskap om kvartærgeologien.

Måling av radon i vann ble gjort i regi av Uranprosjektet som et testeprogram for å se om verdiene i bekkene nedstrøms en av de største uranmineraliseringene kunne ha innvirkning på vannkvaliteten i bekkevannet som er brukt til vannforsyningen i bygda nedenfor. Måling i bekkene ned mot bygda viste hurtig avtakende Rn-verdier i vannet. Om dette skyldtes lufting av vannet i bratte bekker eller om innholdet av radioaktive spalteprodukter avtok/ble fortynnet er usikkert. Et annet eksempel på måling av Rn i vann er målinger i hyttefelt i Oppdal-området. Målingene viste forhøyde verdier i småbekkene brukt til vannforsyning.

Måling av Rn i vann er også gjort i grunnvannsbrønner. I granitt slik som i Drammensgranitten gir slike målinger høye verdier.

Måling av radon i jordluft kan være en metode for å kartlegge forhøyet radioaktivitet i bergartssoner under overdekke. Det er en metode som også kan brukes til å måle radonavgivelse fra sandige til mer grovkornede løsmasser, men ikke i leire som er relativt ”tett” materiale. Man må hele tiden kjenne til de lokale geologiske betingelse en måler under. Mange andre faktorer ved slike målinger er viktig å ha kontroll over. Det gjelder for eksempel lufttrykket. Ved lavtrykk strømmer mer Rn fra løsmassene. Også vannmetning av løsmassene etter regn eller tele i de øverste lagene kan skape et underliggende Rn-reservoar. Rn kan migrere fra berggrunnens underliggende knusningssoner og opp i løsmassene.

Oppsummering av Uranprospektering ved NGU i tidsrommet 1970 – ca. 2000

I uranprospektering ble det med den store globale prospekteringsaktiviteten på 1970 og tidlig 1980-tallet raffinert gamle og utviklet nye prospekteringsmetoder. Dette ble utviklet ut fra økt kunnskap om forekomster og deres geologiske miljø og bedre kunnskap om mobiliteten til uran og thorium i overflatenære forhold. Men prospekteringsmetodene måtte tilpasses de klimamessige forhold det enkelte land hadde. Bakgrunnskunnskapen fra prospektering er viktig å bruke også i miljømessig sammenheng. God kjennskap til geologi, geofysikk, geokjemi og kvartærgeologi og god forståelse gir mulighet for den beste håndteringen av Rn-problematikken. Det er ikke geologi, geofysikk eller geokjemi alene, men viktig med en kombinasjon av disiplinene i dette arbeidet. Et godt samspill mellom disiplinene hvor NGU besitter alle kan gi de beste resultatene.

Geologi:

- I Uranprosjektet 1976 – 1985 var kunnskap om U, Th og prospekteringsmetoder til stede ved NGU.
- Ved prospekteringen ble prøvetaking gjort for å finne mineraliseringer og bakgrunnsverdier for U og Th i bergartene. De litogeokjemiske dataene fra prospekteringen kan ikke brukes uten ytterligere bearbeiding før det gjøres en statistisk utnyttelse av dataene. Det er mange prøver i databasen som er tatt av spesielle bergarter og fra høye punktanomalier.
- Miljømessig er dataene brukt til å framstille fylkeskartene over radioaktivitet fra berggrunnen. Representative måleverdier er samtolket med geologien av geolog. Statistisk behandling av alle måleverdiene samlet vil gi et uriktig kartbilde.
- Kjennskap til berggrunnens innhold av U og Th er generelt viktig og kan brukes til å bestemme hvor innsatsen mht. Rn i miljø skal prioriteres.
- Bergart under overdekke og oppsprekning av denne kan tolkes av geolog ved hjelp av geofysikk og strukturgeologi.
- Kvartærgeologi er viktig for tolkningen av løsmassenes opprinnelse og type. Disse avsetningene er ofte like viktige som berggrunnen med hensyn til Rn i bomiljø.

Geofysikk:

- Luftbårne målinger detekterer forholdene i overflaten. Radioaktiviteten kommer fra berggrunnen og løsmassene.
- Faresonekart kan forbedres ved at geolog/kvartærgeolog brukes i tolkingen.
- Luftbåren geofysikk i alpin topografi gir unøyaktige og feilaktige resultater for radioaktivitet fra overflaten. Flere ”topografiske” anomalier som er fulgt opp viser det.

Geokjemi:

- Litogeokjemi er viktig for å bygge kunnskap om bergartene og deres innhold av radioaktive elementer. Disse kan sannsynligvis utnyttes bedre enn hittil i vurdering av Rn-avgivelse, og anvendes til å prioritere områder hvor undersøkelser bør iverksettes.
- Tradisjonell geokjemiske prospekteringsmetoder for uran og thorium fungerer dårlig, som skyldes uranets geokjemi.
- I sakte flytende bekker gir U anomalier på grunn av høyt innhold av organisk materiale.
- Tungmineraler kan oppkonsentreres i bekkene, særlig ved gjentatt oppkonsentrering i glasifluvialt materiale. Slikt gir anomalier på de metallene som opptrer i tunge mineraler. Anomaliene skyldes de geologiske prosessene og er i mindre grad relatert til berggrunnen. Oppfølging av slike anomalier på U, Th og Zr har vist dette.

12.3 Referanseliste for arbeid relatert til Uranprosjektet ved NGU

Siggerud, T. 1956: Uran og uranleting. Nor. geol. unders. *Småskrifter nr. 6*, 61 sider.

Skjeseth, S. 1958: Uran i kambrisk alunskifer i Oslofeltet og tilgrensende områder. Nor. geol. unders. 203, 100 – 111.

Sverdrup, T.L., Thorkildsen, C.D. & Bjørlykke, H. 1967: Uran og thorium i Norge. Nor. geol. unders. 250A, 31 sider.

1975:

Lindahl, I. 1975: NOTATER I URANPROSJEKTET:

Lindahl, I. 1975: Besøk ved SGU-urangruppen 20. – 22.11.1974. Besøk i Hotagen-feltet ved SGU's snøscootermålinger 10. – 11.02.1975. Uranprosjektet Notat nr. 1, 11 sider

Lindahl, I. 1975: Rapport fra reise til Clausthal, Tyskland på COM/GDMB-møte, besøk hos Gewerkschaft Brunhilde, Üetze ved Hannover og besøk hos Grønlands Geologiske Undersøkelse, København 31.03. – 9.04.1975. Uranprosjektet Notat nr. 2, 6 sider.

Lindahl, I. 1975: Rapport fra besøk ved SGU, Malå 14.04.1975. Uranprosjektet. Notat nr. 3, 2 sider.

Lindahl, I. 1975: Rapport fra reise i England, Skottland og Orknøyene, 24.04. – 3.05.1975. Uranprosjektet. Notat nr. 4, 8 sider + bilag.

Lindahl, I. 1975: Vurdering av forskjellige instrumenter for uranprospektering, våren 1975. Uranprosjektet Notat nr. 5, 6 sider.

Lindahl, I. 1975: Besøk ved Geologiske Forskningsanstalten og Outokumpu Oy i Helsingfors 13. – 15.05.1975. Uranprosjektet Notat nr. 6, 5 sider.

Torkildsen, C. D. & Lindahl, I. 1975: Resultater fra målinger med bærbare scintillometre i laboratoriet (våren 1975) og i feltet (21. – 23.05.1975), samt forsøk med utstyr for bilmålinger (21. – 23.5.1975). Uranprosjektet Notat nr. 8, 11 sider + bilag.

Heier, K. S. & Lindahl, I. 1975: Uran som energiresurs. Notat til ID, 10 sider.

Lindahl, I. & Heier, K. S. 1975: Possible uranium mineralizations in the light of recognized geological and geotectonic structures in Norway in "Recognition and evaluation of uraniferous areas" – Symp. Wien 17. – 21. nov. 1975, p. 123 – 129.

1976:

Lindahl, I. 1976: Uran som Energiressurs. Statens (ved Norges geologiske undersøkelse) ansvar for kartlegging av våre energiressurser. Behov for intensivering av urankartlegging i Norge. Notat til Ind. Dep., 10.02.1976, 10 sider.

Lindahl, I. 1976: Rapport fra et internasjonalt symposium vedr.: "Exploration of Uranium Ore Deposits" i Wien 29.03. – 2.04.1976, 6 sider + bilag.

Lindahl, I. 1976: Radiometriske bilmålinger og uranundersøkelser i Troms og Finnmark, sommeren 1975. **NGU rapport 1389/1**, 14 sider + bilag.

Lindahl, I. 1976: Radiometriske bilmålinger og radiometriske målinger i Ofoten og Skjomen, sommeren 1975. **NGU rapport 1389/2**, 11 sider + bilag.

Hysingjord, J., Lindahl, I., Thorkildsen, C.D. & Furuhaug, L. 1976: Radiometriske bilmålinger på kysten av Sør-Trøndelag – Nordfjord. **NGU rapport 1389/6**, 9 sider.

Furuhaug, Leif; Hysingjord, Jens; Lindahl, Ingvar. 1976. Radiometriske bilmålinger på kysten av Sør-Trøndelag - Nordfjord. sommeren 1975. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1389/6**.

Lindahl, Ingvar; Hysingjord, Jens; Hatling, Harald. 1976. Oversikt over uranprospekteringen i 1976 og resultatet av geokjemiske undersøkelser. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1416/9**.

1977:

Fareth, E., Gjelsvik, T. & Lindahl, I. 1977: Čier'te. Berggrunnskart 1733 II, 1:50 000 med beskrivelse. Nor. geol. unders. 331, 28 sider.

Håbrekke, H.; Lindahl, I.; Often, M. 1977. Radiometriske helikoptermålinger i Skjomenområdet. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1416/16**.

Lindahl, Ingvar. 1977. Radiometriske bilmålinger på Andøy, Nordland fylke og Ringvassøy, Troms fylke. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1416/3**.

Lindahl, Ingvar; Hysingjord, Jens. 1977. Oversikt over uranprospekteringen i 1977 og resultat av geokjemiske undersøkelser. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1416/17**.

Lindahl, I. 1977: Radiometriske bilmålinger og radiometriske målinger i Gildeskål-Meløy-området. **NGU rapport 1389/4**, 14 sider + bilag.

Lindahl, I. 1977: Radiometriske bilmålinger og radiometriske målinger i Nordli-Sørli-området, somrene 1975/76. **NGU rapport 1389/5**, 10 sider + bilag.

Lindahl, I. & Hysingjord, J. 1977: Radiometriske målinger i Uranprosjektets regi 1975, samplerapport. **NGU rapport 1389/10**, 24 sider + bilag.

Lindahl, I. 1977: Radiometriske bilmålinger på Andøya, Nordland og Ringvassøya, Troms. **NGU rapport 1416/3**, 6 sider + bilag.

Lindahl, Ingvar; Furuhaug Leif. 1977. Uranundersøkelser i Skjomen-området. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1416/2**.

Lindahl, I. 1977: Geologiske forutsetninger for lagring av radioaktivt avfall i Norge. Kjernekraftutvalgets utredning, 12 sider. (1. utkast).

Lindahl, I. 1977: En oversikt over metodikk ved uranprospektering. MALM 76 - Røros 15. – 17.11.1976. Malmgeologisk Symposium side 28 – 32.

Lindahl, I. 1977: Reiserapport fra Workshop on risk analysis and geologic modelling in relation to the disposal of radioactive waste into geological formations. OECD/NEA. Ispra Italia 23. – 27.05.1977.

1978:

Lindahl, I. & Hysingjord, J. 1978: Oversikt over uranprospekteringen i 1976 og resultatene av geokjemiske undersøkelser. **NGU rapport 1416/9**, 20 sider + bilag.

Lindahl, I. 1978: Radiometriske målinger i regionen rundt Longyearbyen, Svalbard. **NGU rapport 1707**, 18 sider + bilag.

1979:

Håbrekke, H., Lindahl, I. & Often, M. 1979: Radiometriske helikoptermålinger i Skjomen-området, Narvik, Nordland. **NGU rapport 1416/16**, 10 sider + bilag.

Lindahl, I.; Furuhaug, L. 1979. Jordprøvetaking og radonmåling. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1575/20D**.

Lindahl, I., Bergstrøm, B., Fareth, E. & Often, M. 1979: Heavy-metal exploration in the western part of Finnmarksvidda, northern Norway. Prosp. in areas of glaciated terrain, 1979. Inst. Min. Met., 59 – 66.

Lindahl, I. 1979: Reiserapport fra en studiereise til Filippinene og Australia 2.5. – 17.6.1979, 49 sider.

Lindahl, I. 1979: Radon i bolighus og i byggefelt. 26.9.1979 Internt notat NGU, 3 sider.

1980:

Hysingjord, J.; Lindahl, I. 1980. Oversikt over uranprospekteringen i 1977 og resultat av geokjemiske undersøkelser. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1416/17**.

Lindahl, I. 1980: Uranium resources, production and demand 1979: Norway. p. 133-134. OECD/IAEA-publication, 95 pp.

Lindahl, I. & Hysingjord, J. 1980: Oversikt over uranprospekteringen i 1977 og resultater av geokjemiske undersøkelser. **NGU rapport 1416/17**, 21 sider + bilag.

Sørdal, T.; Lindahl, I. 1980. Jordprøvetaking og radonmåling. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 1750/20H**, 9 sider + bilag.

1981:

Lindahl, I. & Hysingjord, J. 1981: Oversikt over uranprospekteringen i 1978 og resultater av geokjemiske undersøkelser. **NGU rapport 1416/24**, 18 sider + bilag.

1982:

Lindahl, I. 1982: Uranium resources, production and demand 1982: Norway. p. 142-143. OECD/IAEA-publication, 213 pp.

1983:

Lindahl, I. 1983: Classification of uranium mineralization in Norway. Nor. geol. unders. 380, p. 125 – 142.

1984:

Furuhaug, L. & Lindahl, I. 1984: Oppfølging av radiometrisk helikopteranomali i Njallaav'zi, Nordreisa, Troms. **NGU rapport 84.023**, 11 sider + bilag.

Grauch, R.I. & Lindahl, I. 1984: A unique suite of Sn- and Fe-Ti-Mn-Zn oxides from Precambrian biotite gneisses, Nordland county, Norway. Poster GSA annual meeting Reno NV, 5. – 8.11.84.

Lindahl, I. 1984: Uranium resources, production and demand 1984. Norway, OECD/IAEA publication.

Lindahl, I. 1984: Uran, uranprospektering og uranmineralisering i Norge. *Nor. geol. Unders. Skr. 51*, 29 sider.

Lindahl, I., Furuhaug, L. & Often, M. 1984: Radiometriske målinger, prøvetakning og Pack-sack boringer på Harelifjell, Nordland. **NGU rapport 84.005**, 35 sider + bilag.

Lindahl, I. 1984: Rishaugfjellvinduet og Harelifjell uranmineralisering, Sørfold, Nordland. **NGU rapport 84.057**, 31 sider + bilag.

1985:

Krill, Allan G.; Bergh, Steffen; Lindahl, Ingvar. 1985. Rb-Sr, U-Pb and Sm-Nd isotopic dates from Precambrian rocks of Finnmark. Norges geologiske undersøkelse, *Bulletin 403*, s. 37-54.

Lindahl, I., Andresen, A., Rindstad, B.I. & Rundberg, Y. 1985: Age and tectonic setting of the uraniferous Precambrian basement rocks at Orrefjell, Salangen, Troms. *Norsk geol. Tidsskr. 65 (3)*, p. 167 – 178.

Lindahl, I. & Grauch, R.I. 1985: Mineralogi og elementfordeling i en geokjemisk anomal gneis fra Høgtuva-vinduet. V.M. Vokes ed. "Nye malmer i Norge". Malmgeologisk Symp./BVLI, s. 125 (resymé).

Lindahl, I. 1985: Fastfjellsgeokjemiske data fra Uranprosjektet og USB-prosjektet. F.M. Vokes (red.) "Nye malmer i Norge". Malmgeologisk Symposium/BVLI, s. 137 (resymé).

1986:

Lindahl, I. & Grauch, R.I. 1986: A Be, U, Sn and REE mineralization in Precambrian granitic gneisses at Høgtuva, Northern Norway. Abstract. *Terra Cognita 6, no. 3*, p. 554.

Lindahl, I. & Håbrekke, H. 1986: Kartlegging av radioaktivt nedfall etter Tsjernobyl-ulykken. **NGU rapport 86.160**, 19 sider.

1987:

Lindahl, I. 1987: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Vest-Agder. Kart M 1:250 000. *Nor. geol. unders.*

Lindahl, I. 1987: Radon - Tsjernobyl. NGUs Årsmelding 1986 s. 10 – 11.

1988:

Bølviken, Bjørn; Håbrekke, Henrik; Lindahl, Ingvar. 1988. Mapping of natural distribution of radioactive elements in Norway. In J. Låg, Ed: Health problems in connection with radiation from radioactive matter; in fertilizers, soils and rocks. p. 105-126. *Nor. Acad. of Sci. and letters. Nor. Univ. Press.*

- Furuhaug, Leif; Lindahl, Ingvar. 1988. Vurdering av radonrisiko i boligfelt. Kragerø, Telemark. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 88.175**, 11 sider + kart
- Lindahl, I. & Grauch, R.I. 1988: Be-REE-U-Sn mineralization in Precambrian granitic gneisses, Nordland County, Norway. *Proc. 7th IAGOD Symp. Schweizerbart'sche Verlagsbuchh.*, p. 583-594.
- Lindahl, I. & Hatling, H. 1988: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Finnmark. Kart M 1:500.000. Norges geologiske undersøkelse
- Lindahl, I. & Sjørdal, T. 1988: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Aust-Agder. Kart M 1:250 000. Nor. geol. unders.
- Lindahl, I. & Sjørdal, T. 1988: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Vestfold. Kart M 1:250 000. Nor. geol. unders.
- Lindahl, I. & Sjørdal, T. 1988: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Møre og Romsdal. Kart M 1:500 000. Nor. geol. unders.
- Lindahl, I.; Sjørdal, T. 1988. Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Oppland; Oppland; M 1:500 000; trykket i farger; på kartet. Norges geologiske undersøkelse.
- Lindahl, I. 1988: Naturlig radioaktivitet og avgivelse av radon fra undergrunnen - et naturgitt miljøproblem. *Naturen nr. 5 - 1988*, s. 190 – 196.
- Lindahl, I. 1988: Country reports: Norway. In: *Uranium Newsletter*, 2, IAEA, Wien, p. 32 – 33.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Jevnaker kommune, Oppland. **NGU rapport 88.028**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Lunner kommune, Oppland. **NGU rapport 88.029**, 18 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Søndre Land kommune, Oppland. **NGU rapport 88.030**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Vestre Toten kommune, Oppland. **NGU rapport 88.031**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling og naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Østre Toten kommune, Oppland. **NGU rapport 88.032**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Gran kommune, Oppland. **NGU rapport 88.033**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Nordre Land kommune, Oppland. **NGU rapport 88.034**, 19 sider.
- Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Gjøvik kommune, Oppland. **NGU rapport 88.035**, 19 sider.

Lindahl, I. & Iversen, B. 1988: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Lillehammer kommune, Oppland. **NGU rapport 88.036**, 18 sider.

Nilsen, G. & Lindahl, I. 1988: VIDEO om beryllium og undersøkelsene i Høgtuva-området. VHS, ca. 9. min.

1989:

Lindahl, I., Iversen, B., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Eidsvoll kommune, Akershus. **NGU rapport 89.007** / IFE / KR / F-89 / 062, 14 sider.

Lindahl, I., Iversen, B., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Sørums kommun, Akershus. **NGU rapport 89.008** / IFE / KR / F-89 / 063, 13 sider.

Lindahl, I., Iversen, B., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Fet kommune, Akershus. **NGU rapport 89.009** / IFE / KR / F-89 / 064, 14 sider.

Lindahl, I. & Sørđal, T. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen for kommunene: Skjåk, Lesja, Dovre, Sel, Nord-Fron, Sør-Fron og Ringebu, Oppland. **NGU rapport 89.018**, 20 sider.

Lindahl, I. & Sørđal, T. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen for kommunene: Lom og Vågå, Oppland. **NGU rapport 89.019**, 20 sider.

Lindahl, I. & Sørđal, T. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen for kommunene: Vang, Øystre Slidre, Vestre Slidre og Nord-Aurdal, Oppland. **NGU rapport 89.020**, 20 sider.

Lindahl, I. & Sørđal, T. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen for kommunene: Sør-Aurdal og Etnedal, Oppland. **NGU rapport 89.021**, 20 sider.

Lindahl, I. & Sørđal, T. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen for kommunene: Øyer og Gausdal, Oppland. **NGU rapport 89.022**, 20 sider.

Lindahl, I., Sørđal, T., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Gjerdrum kommune, Akershus. **NGU rapport 89.111** / IFE / KR / F-89 / 104, 13 sider.

Lindahl, I., Sørđal, T., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Aurskog-Høland kommune, Akershus. **NGU rapport 89.112** og IFE / KR / F-89 / 111, 13 sider.

Lindahl, I., Sørđal, T., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Frogn kommune, Akershus. **NGU rapport 89.113** og IFE / KR / F-89 / 105, 13 sider.

Lindahl, I., Sørđal, T., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Rælingen kommune, Akershus. **NGU rapport 89.114** og IFE / KR / F-89 / 106, 13 sider.

Lindahl, I., Sørdal, T., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Asker kommune, Akershus. **NGU rapport 89.115** og IFE / KR / F-89 / 110, 14 sider.

Lindahl, I., Furuhaug, L., Christensen, G. & Qvale, H. 1989: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Hurdal kommune, Akershus. **NGU rapport 89.128** / IFE / KR / F-89 / 134, 14 sider.

1990:

Sørdal, T. & Lindahl, I. 1990: Granitoider i Efjord-Tysfjord-Hamarøy området, Nordland. Foreløpig rapport. **NGU rapport 90.066**, 7 sider.

1991:

Lindahl, I. & Sørdal, T. 1991: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen, Tysfjord kommune, Nordland. **NGU rapport 91.055**, 17 sider.

Lindahl, I., Sørdal, T. & Furuhaug, L. 1991: Måling av naturlig radioaktiv stråling fra berggrunnen og radon i overflatevann, Oppdal kommune, Sør-Trøndelag. **NGU rapport 91.056**, 20 sider + vedlegg.

Lindahl, I. & Sørdal, T. 1991: Måling av naturlig radioaktivitet i boligfelt Ytre Hafstad, Førde, Sogn og Fjordane. **NGU rapport 91.251**, 17 sider.

1992:

Lindahl, I. & Sørdal, T. 1992: Måling av naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, Rogaland fylke. **NGU rapport 92.288**, 18 sider.

Lindahl, I. & Sørdal, T. 1992: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Rogaland. Kart i M 1:500 000. Nor. geol. unders.

1993:

Lindahl, I. & Sørdal, T. 1993: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Nordland. Kart i M 1:500 000. Nor. geol. unders.

1995:

Lindahl, I., Sørdal, T. & Bargel, T. H. 1995: Registrering av naturlig radioaktivitet fra løsmasser og berggrunn, Bardu kommune, Troms. **NGU rapport 94.087**, 23 sider.

Lindahl, I. 1995: Oppfølging av helikoptermålinger i Hellemobotn-Kobbelv-området. **NGU rapport 95.139**, 14 sider.

Lindahl, I., Furuhaug, L. & Sørdal, T. 1995: Vurdering av radonrisiko i Hornnes tomteområde. Førde, Sogn og Fjordane. **NGU rapport 95.143**, 18 sider.

1996:

Lindahl, I.; SørDAL, T.; Ekremseter J. 1996. Naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, Norge; Norge; 1:2 000 000; trykt i sort/hvitt. Norges geologiske undersøkelse.

1998:

Lindahl, I. & SørDAL, T. 1998: Radioaktiv stråling fra berggrunnen, Østfold. Kart M 1: 250 000, Nor. geol. unders.

Lindahl, I. , SørDAL, T. & Ekremseter, J. 1998: Naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, NORGE. Kart i M 1:2 000 000, Nor. geol. unders.

2003:

Lindahl, I. & SørDAL, T. 2003: Naturlig radioaktivitet (gammastråling) fra berggrunnen. Tolkningskart for ASKER kommune. Nor. geol. unders.

Lindahl, I. & SørDAL, T. 2003: Oversikt over naturlig gammastråling fra berggrunnen for kommunene ASKER, RØYKEN og HURUM. Nor. geol. unders.

2006:

Lindahl, I. & Furuhaug, L. 2006: Oppfølging av geokjemiske anomalier på Zr på Hinnøy, Langøy, Hadseløy, Austvågøy og Hamarøy. NGU Notat for Nordland Mineral, 12 sider.

Lindahl, I. & Vrålstad, T. 2006: Vurdering av muligheten for uran i bergartene over grunnfjellet i Nabar-området i Kvænangen etter Athabasca Basin dannelsesmodell. Notat for Scanur AS, 12.12.06., 5 sider.

2007:

Lindahl, Ingvar. 2007. Radioaktivitet fra gamle gruver. Norges geologiske undersøkelse, **NGU-rapport 2007.027**, 48 sider.

2008:

Lindahl, I. 2008: Thorium Resources in Norway. In: Thorium as an energy source – Opportunities for Norway (160 pp) – prepared by the Thorium Report Committee. Chapter 3, 22 – 29.

Presentasjoner

70 – tallet:

Lindahl, I. & Heier, K.S. 1975: Possible uranium mineralization in the light of recognized geological and geotectonic structures in Norway. IAEA symposium, Wien 17. – 24.11.1975.

Lindahl, I. 1976: Produksjon og reserver av uran. Noen spesielle problemer ved gruvedrift på uranmalmer, med erfaring fra et gruvebesøk i Elliot Lake, Ontario, Canada. NIF Berging. høstmøte i Syd-Sverige 22. – 25.9.1976.

Heier, K.S. & Lindahl, I. 1976: Muligheter for uran og thoriumforekomster i Norge. NGUs inventeringsplan. NIF Berging. høstmøte i Syd-Sverige 22. – 25.9.1976.

Lindahl, I. 1976: En oversikt over metodikk ved uranprospektering. MALM 76 på Røros. Malmgeologisk Symposium. 15. – 17.11.1976.

Lindahl, I. 1978: Uran og uranleting. Trøndelag Amatørgeologiske forening. Trondheim 6.2.1978.

80 – tallet:

Lindahl, I. & Rindstad, B.I. 1981: Orrefjell uranforekomst. Folkemøte i Elvebakken Ungdomshus, Salangen, 20.3.1981.

Lindahl, I. 1981: "Uranprospektering i Norge". Foredrag Geol. forening avd. Trondheim, 7.5.1981. (Innledning ved K.S. Heier: Utvikling av uranprogrammet ved NGU).

Lindahl, I. 1981: The Orrefjell uranium mineralization. "Uranium in granites meeting", OECD/IAEA - Uranium Exploration Techniques. Luleå, 15. – 16.9.1981.

Lindahl, I. 1983: Prospekteringsmetoder for uran brukt ved NGU. NGF's VIII landsmøte, Oslo 4. – 6.1.1983.

Lindahl, I. 1983: Uranmineraliseringer undersøkt av NGU. NGF's VIII landsmøte. Oslo 4. – 6.1.1983.

Lindahl, I. & Grauch, R.I. 1984: Mineralogi og elementfordeling i en geokjemisk anomal gneis fra Høgtuva-vinduet, Nordland. Malmgeologisk Symposium. Trondheim 17. – 19.10.1984.

Grauch, R.I. & Lindahl, I. 1984: A unique suite of Sn- and Fe-Ti-Mn-Zn-oxides from Precambrian biotite gneisses, Nordland Country, Norway. GSA-meeting, Reno, Nevada, 5. – 8.11.1984.

Lindahl, I. & Ihlen, P.M. 1985: Ore Associated with Granitic rocks - ORG Programme. - Report from Norway. EU Committee - meeting, Dublin 21.5.1985.

Lindahl, I. 1986: Høgtuva-prosjektet. Malmer tilknyttet granittiske bergarter. Møte på Røros 19. – 20.3.1986.

Lindahl, I. & Grauch, R.I. 1986: A Be, U, Sn and REE mineralization in Precambrian granitic gneisses at Høgtuva, Northern Norway. VII-IAGOD-meeting, Luleå 18. – 22.8.19.

Lindahl, I. 1986: Radioaktivt nedfall i Norge etter Tsjernobyl-ulykken. Malvik Lions Club, Malvik 2.9.1986.

Lindahl, I., Håbrekke, H. & Høst, J. 1986: Tsjernobyl-ulykken – Radioaktivitet og radioaktivt Nedfall. Norsk Geol. Forening Trondheim, 23.10.1986.

Lindahl, I. 1986: Høgtuva. En ny Be-mineralisering. Malmgeologisk Symposium. Trondheim 6. – 7.1.1986.

- Lindahl, I. 1986: Tsjernobyl-ulykken – Radioaktivitet og radioaktivt nedfall. Løkken Rotary Klubb, Løkken 11.11.1986.
- Lindahl, I. & Håbrekke, H. 1987: Mapping of the radioactive fall-out after the Tsjernobyl accident. XVI NOFTIG-møte, Trondheim 13. – 15.1.1987.
- Lindahl, I. 1987: Radioaktiv forurensning og naturlig stråling i Sogn og Fjordane. Landbruksdagene i Sogn og Fjordane. Førde, 12.3.1987.
- Lindahl, I. 1987: Geologi, naturlig stråling og radon. Tekn. Hygienisk Forum, Oslo 2.-3.4.1987.
- Lindahl, I. 1987: Stråling fra berggrunnen i Norge. Seminar om stråling, NGU 7.4.1987.
- Lindahl, I. 1987: Nedfall fra Tsjernobyl i Norge. Seminar om stråling, NGU, 7.4.1987.
- Lindahl, I. 1987: Kart over naturlig stråling. Bergmestermøte, NGU 29.4.1987.
- Lindahl, I. 1987: Fylkeskart over naturlig stråling, Oppland. Møte med fylke og kommuner, Gjøvik 25.8.1987.
- Lindahl, I. & Wilberg, R. 1987: Høgtuva-prosjektet. Rana Rotary-klubb, Mo i Rana 17.9.1987.
- Lindahl, I. & Wilberg, R. 1987: Høgtuva-prosjektet. Presentasjon for Rana kommune, Mo i Rana 18.9.1987.
- Lindahl, I. 1987: Naturlig radioaktiv stråling – radon. Foredrag NIF-avd. Notodden, Notodden 11.11.1987.
- Lindahl, I. 1988: Bordvedåga Be-forekomst. En presentasjon for Adm. + politikere i Rana kommune, Mo i Rana 17.3.1988.
- Lindahl, I. & Wilberg, R. 1988: The Bordvedåga Be-deposit, Høgtuva window, Rana, Nordland, Norway, USGS, Denver 21.4.1988.
- Lindahl, I. 1988: Beryllium ved Bordvedåga, Høgtuva-vinduet. Mo i Rana Rotary-klubb, Mo i Rana 22.8.1988.
- Lindahl, I. 1988: Naturlig radioaktivitet fra berggrunnen - avgivelse av radon, Stavanger avd. av NGF, Stavanger 22.11.1988.
- Lindahl, I. 1988: Beryllium i Høgtuva, Nordland. Resultater og muligheter. Malmgeol. Symposium/Bergindustriforening. Trondheim 29.11.1988.
- Lindahl, I. 1991: The Rana-Ofoten Be-province in Proterozoic granitic basement, Nordland. 5. Kongsberg seminar, Kongsberg 25. – 27.4.1991.

90 – tallet:

Lindahl, I. 1991: Be-REE-U-Sn mineralization in Proterozoic granitic gneisses at Høgtuva, Nordland. 5. Kongsberg-seminar, Kongsberg 25. – 27.4.91.

Lindahl, I. 1991: Measurement of gamma-radiation from bedrock, radon in water and soil, and radioactive fall-out after the Tsjernobyl accident in Norway. Geol. Survey of Prague, Prague, Tsjekkoslovakia 4.5.1991.

Lindahl, I. 1991: Measurement of gamma-radiation from bedrock and radon in soil and water in Norway. Radon Investigation Company, Liberec, Tsjekkoslovakia 8.5.1991.

Lindahl, I. 1991: Om geologi og naturlig stråling. Naturlig stråling og radon i vann i Oppdal kommune. Folkemøte Oppdal 4.7.1991.

Lindahl, I. 1992: Bordvedåga Be-forekomst. Muligheter for utnyttelse. Styringsgruppen for SNU A/S, Bodø 15.1. og 23.1.1992.

Lindahl, I. 1992: Radioaktiv berggrunn. Seminar om stråling og virkning av stråling. NIF og PF Senior Ekspertgruppe. Oslo 1.10.1992.

Lindahl, I. 1996: Radioaktivitet i bergarter, generelt og spesielt fokusert på berggrunnen i Oppdal-området. Nordisk Stein og Mineralmesse. Oppdal 1. – 4.8.1996.

Lindahl, I. 1998: Radioaktivitet fra berggrunnen - lokaliteter med radioaktive mineraler i Trøndelagsområdet. Trøndelag Amatørgeologiske forening, Trondheim 4.11.1998

Etter 2000:

Lindahl, I. 2007: Thorium-ressurser i Norge. NTVA (Norges Tekniske Videnskapsakademi), Lerchendal gård, Trondheim 30.1.07

Lindahl, I. 2007: Mulige Th-ressurser i Norge. Geologiens dag, Universitetet i Oslo, 15.9.07

Bjørlykke, A., Lindahl, I., Heincke, B., Smerthurst, M. & Ihlen, P.M. 2007: The occurrence of Thorium Minerals in Norway. Det Norske Videnskapsakademi, Oslo 21.9.07

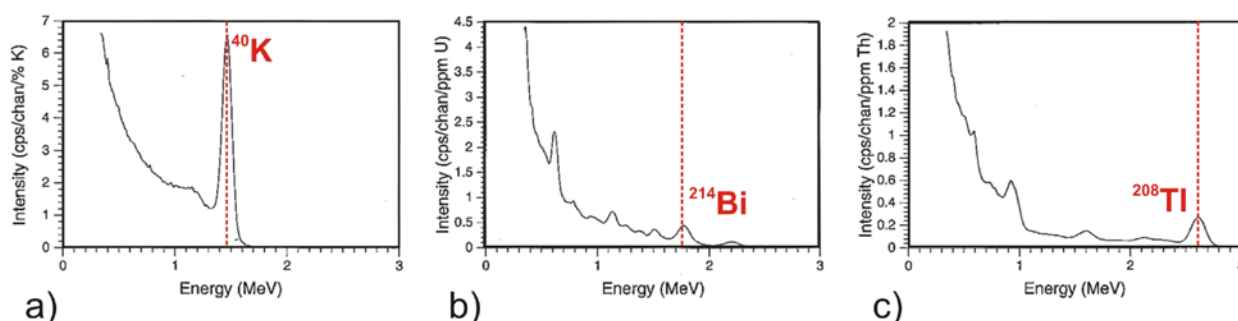
Lindahl, I. 2007: Thoriumressurser i Norge – men har vi en forekomst? Bergforeningens høstmøte, Trondheim, 11. – 12.10.07

Lindahl, I. 2010: Presentation of the Høgtuva Be-REE deposit. GTK, Outokumpu, 24.2.2010.

Lindahl, I. 2010: NGU og geologi for samfunnet – Radon og radioaktiv stråling i bygg og anlegg. Faglig samling i SWECO, Narvik 18. og 19.3.2010.

13. VEDLEGG: Metodebeskrivelse radiometriske målinger fra fly- og helikopter

Radiometriske målinger fra fly og helikopter gjør det mulig å kartlegge den overflatenære konsentrasjonen av isotopene ^{232}Th , ^{238}U og ^{40}K , som er ansvarlig for det aller meste av den naturlige radioaktiviteten. ^{40}K har bare et datterprodukt (^{40}Ar), men ^{238}U og ^{232}Th bryter ned i en serie av henholdsvis 18 og 11 datterisotoper til de stabile isotopene ^{206}Pb og ^{208}Pb er nådd. Hvert enkelt nedbrytningstrinn har sin egen spesifikke alfa, beta og/eller gammastråling, og ved å studere energifordelingen i gamma-spekteret kan en finne frem til hvilke elementer som bidrar til strålingen. Figur 1 viser energispekter for elementene kalium, uran og thorium. To av de mest tydelige maksima i uran og thoriumserien hører til datterisotoper ^{214}Bi og ^{208}Tl . Så lenge prosesser ikke tilfører eller tar bort noen produkter i nedbrytningsseriene, vil tellinger fra ^{214}Bi og ^{208}Tl representerer uran og thorium konsentrasjoner (spaltingsrekke er i likevekt).



Figur 1: Viser simulert a) kalium-, b) uran- og c) thoriumspektrum 100m over terrenget. Røde linjer indikerer ^{40}K , ^{214}Bi og ^{208}Tl maksima. Modifisert etter Minty, (AGSO 1997).

Måling

Flymålinger utføres ved å benytte et gammaspesktrometer koblet til en følsom detektor montert i eller under fly / helikopter. Under målinger blir hele gammaspektrum fra 0,2 til 3 MeV målt og delt inn i 256 eller 1024 energikanaler. Energikanaler rundt maksima for ^{40}K , ^{214}Bi og ^{208}Tl blir sammenfattet i vinduer og tellinger i vinduene blir brukt i prosessering til å bestemme kalium, uran og thorium konsentrasjoner. Områder som skal undersøkes flys langs parallell linjer på en høyde mellom 60 og 100 m. I tillegg blir forskjellige kalibreringsmålinger utført for å bestemme parametre som behøves under prosesseringen. Tilsvarende målinger kan også utføres med bærbart instrument på bakken (se figur 2) eller fra bil.

Prosessering

I prosesseringen blir støyandelen redusert og tellinger fra kosmisk stråling og fra fly/helikopter fjernet. Nedbrytning av luftbåren radon, som er en datterisotop fra uran, kan føre til betraktelige antall tellinger i uranvindu og denne radonandelen må også fjernes i uranvindu. Strålingsandelen fra kalium-, uran- og thoriumkjeden blir etterpå separert og dataene blir korrigert for innflytelsen fra flyhøyde og topografi. Ved å måle på kjente konsentrasjoner (se figur 2), kan måleinstrumentet kalibreres, og tellinger i de forskjellige vinduer kan oversettes til konsentrasjonen av elementene på bakken.

Resultatet etter dataprosessering er tre nøyaktige kart som viser konsentrasjonen av thorium, uran og kalium fra de øverste 30-40 cm av bakken. Kalium konsentrasjonen ble angitt i prosent, men uran og thorium i ppm (parts per million).



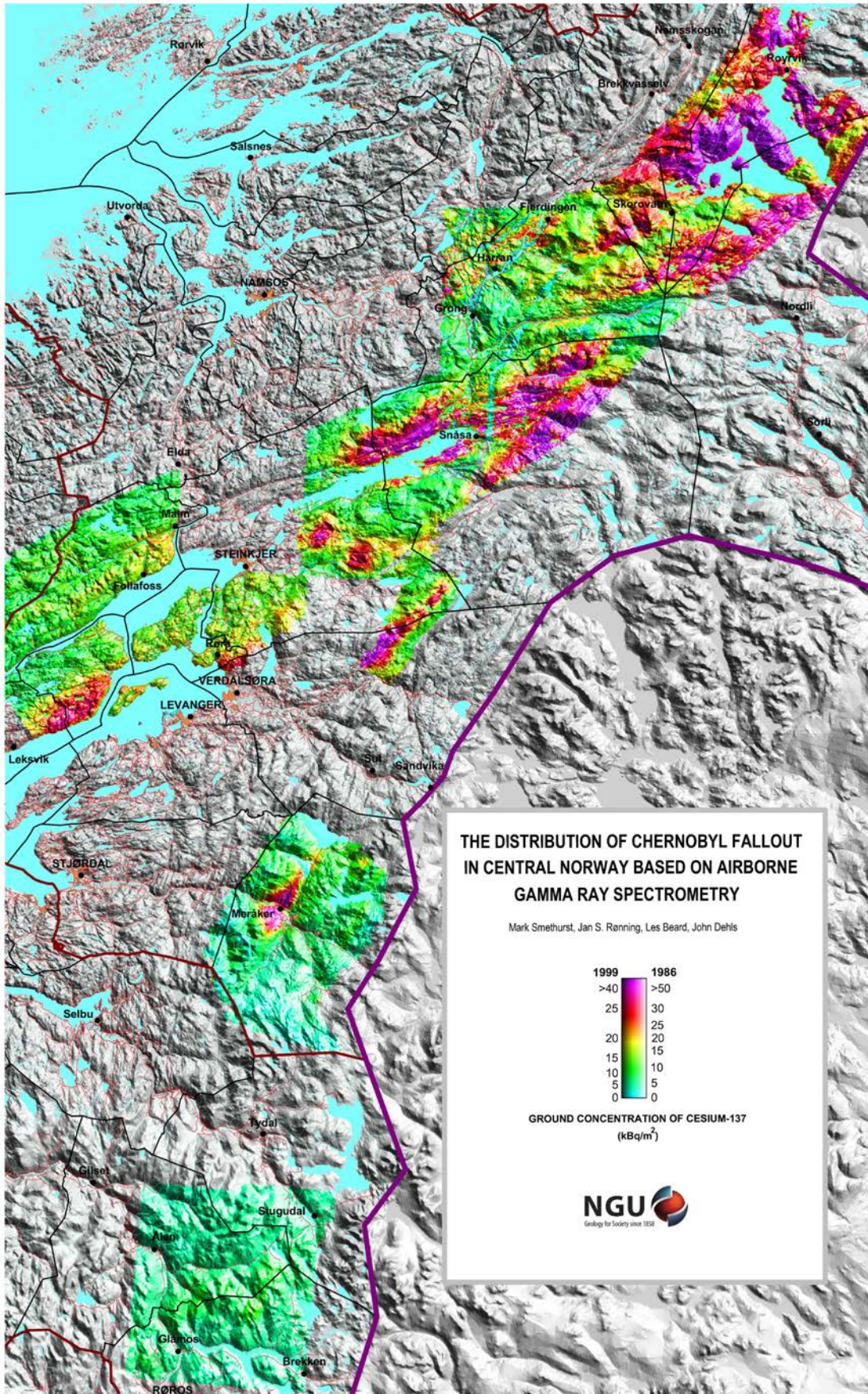
Figur 2: Kalibrering av instrument for måling av gammastråling på bakken. Ved å måle på 4 syntetiske prøver ("pads") med kjent innhold av uran, thorium og kalium, kan instrumentene kalibreres slik at konsentrasjoner av de radioaktive elementene på bakken kan beregnes.

Anvendelsesområder

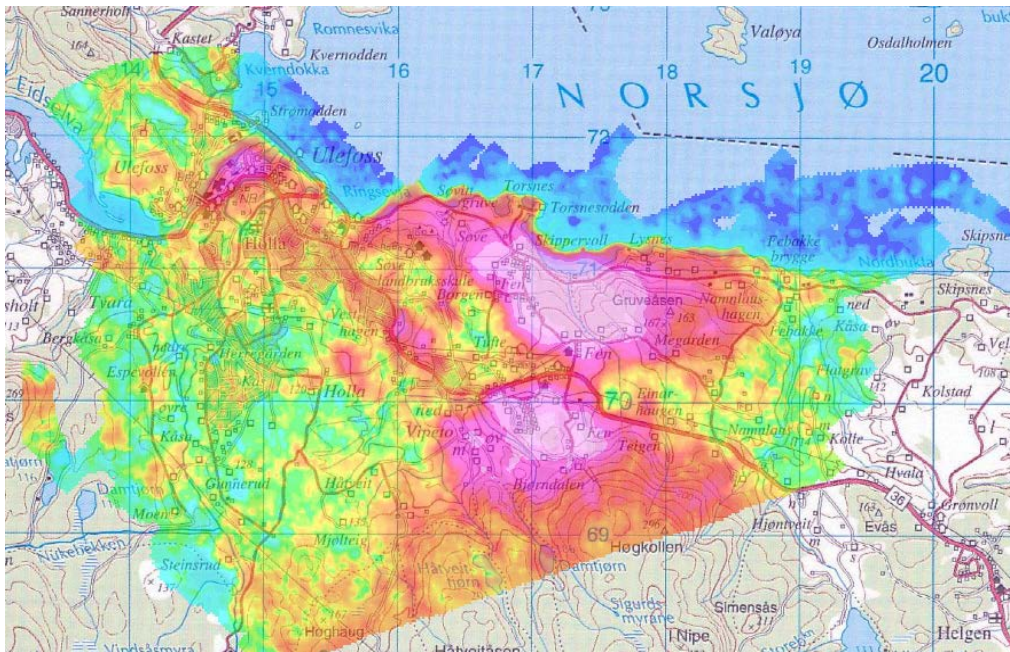
Radiometri blir brukt hovedsakelig i leting etter mineralressurser og geologisk kartlegging, men metoden benyttes også i miljøundersøkelser. Både naturlig radioaktivitet fra uran, som er kilde til radon, og nedfall etter Tsjernobylulykken er kartlagt fra luften.

Datakvalitet

Flyhøyden, flytempoet, opptakstid for en enkeltmåling og størrelsen av krystallen styrer antall tellinger som ble registeret fra bakkestråling og dermed kvaliteten av enkeltmålingene. Romlig oppløsning ble styrt av linjeavstand og avstand av enkeltmålinger langs linjer. Kvaliteten av radiometriske målinger varierer også svært med værforholdet. Fuktigheten i jord eller snø demper strålinger fra undergrunnen og både vind og nedbør påvirker sterkt radonkonsentrasjonen. Derfor utfører man best målinger i en periode med stabile og tørre værforhold.



Figur 3: Eksempel på kartlegging av Cs-nedfall fra Tsjernobylulykken.



Figur 4: Kartlagt konsentrasjon av thorium ved Ulefoss, Nome kommune. NGU utførte målinger med helikopter med en linjeavstand av 50 m og en gjennomsnittshøyde av 45 m (fra Heincke et al. 2008)

Litteratur

AGSO 1997: AGSO Journal, volume 17, number 2, flere artikler.

Heincke, B.H., Smethurst, M.A., Bjørlykke, A., Dahlgren, S., Rønning, J.S. & Nogaard, J.O. 2008: Airborne gamma-ray spectrometer mapping for relating indoor radon concentrations to geological parameters in the Fen region, southeast Norway. NGU Special Publication 11, p. 131 – 143

IAEA, 2003: Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363. Vienna, Austria.

14. VEDLEGG: Eldre kart over naturlig radioaktivitet (fra NGUs kartkatalog).

Kart over naturlig radioaktivitet

Total gamma radiation maps

NGU gir ut kart over naturlig radioaktivitet fra berggrunnen, bygd på måleresultater langs veiene samtolket med de geologiske kart. Kartene utgis fylkesvis etter hvert som målingene fullføres. Kartene utgis i målestokk 1:250 000, 1:500 000 eller 1:1 mill.

Se forøvrig oversikt over dekningsgrad for målinger.

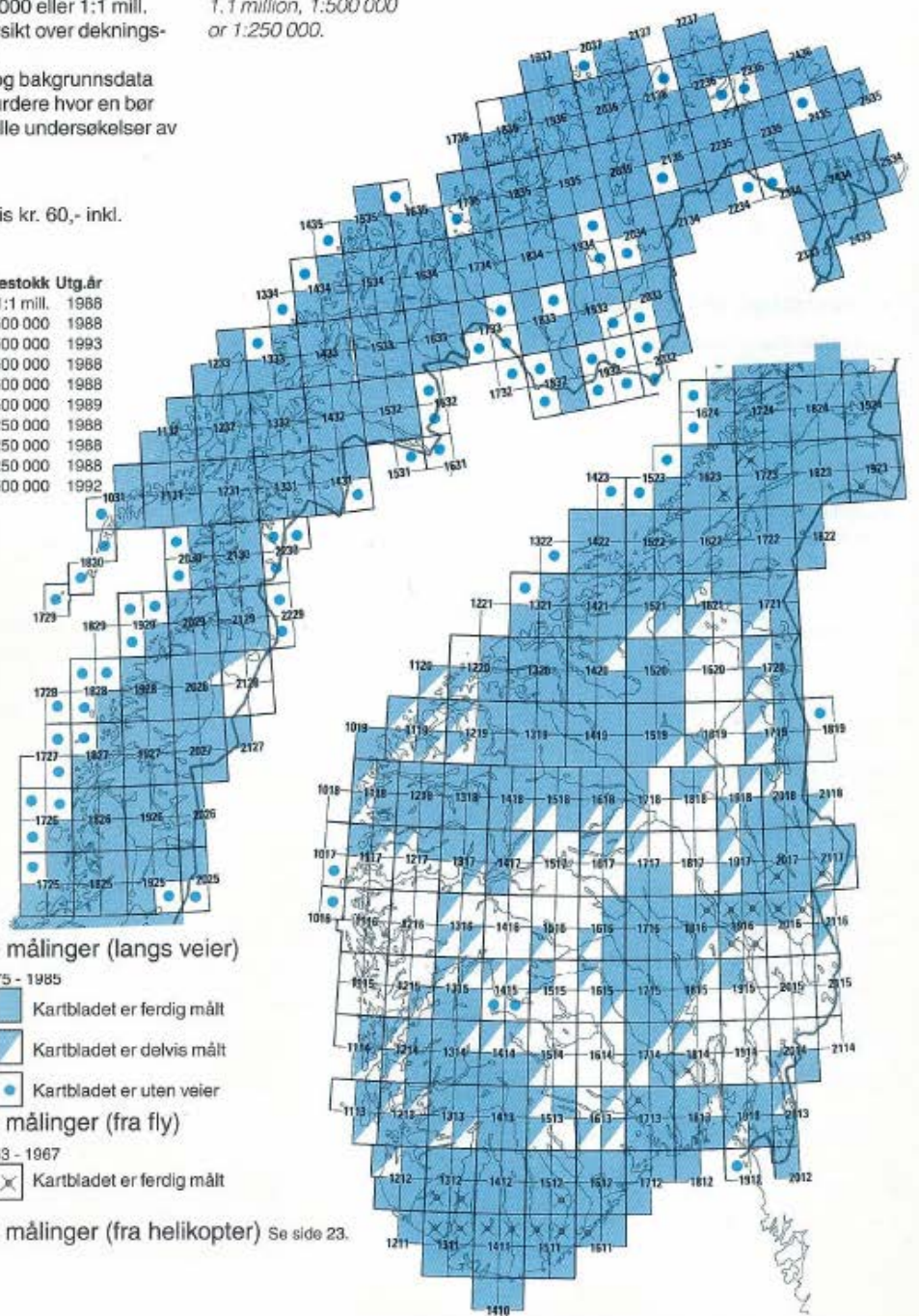
Fylkeskartene og bakgrunnsdata kan brukes til å vurdere hvor en bør prioritere eventuelle undersøkelser av radon i boliger.

Total gamma radiation maps

The maps show natural radiation from the bedrock interpreted from surveys along all roads and the bedrock maps. They are issued for individual counties at scales of 1:1 million, 1:500 000 or 1:250 000.

Fylkeskart. Pris kr. 60,- inkl. m.v.a.

Kartblad navn	Målestokk	Utg.år
Finnmark	1:1 mill.	1988
Troms	1:500 000	1988
Nordland	1:500 000	1993
Nord-Trøndelag	1:500 000	1988
Møre og Romsdal	1:500 000	1988
Oppland	1:500 000	1989
Vest-Agder	1:250 000	1988
Aust-Agder	1:250 000	1988
Vestfold	1:250 000	1988
Rogaland	1:500 000	1992



Radiometriske målinger (langs veier)

M 1:50 000 1975 - 1985

- Kartbladet er ferdig målt
- Kartbladet er delvis målt
- Kartbladet er uten veier

Radiometriske målinger (fra fly)

M 1:50 000 1963 - 1967

- Kartbladet er ferdig målt

Radiometriske målinger (fra helikopter) Se side 23.



Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39, 7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00
Telefax 73 92 16 20
E-post ngu@ngu.no
Nettside www.ngu.no

*Geological Survey of Norway
PO Box 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norway*

*Visitor address
Leiv Eirikssons vei 39, 7040 Trondheim*

*Tel (+ 47) 73 90 40 00
Fax (+ 47) 73 92 16 20
E-mail ngu@ngu.no
Web www.ngu.no/en-gb/*