Geologian tutkimuskeskus
Ympäristögeologian ja sovelletun
geofysiikan yksiköt
Espoo / Kuopio

22.08.2019

65/2019
GTK/800/03.01/2016

Uraani, torium, kalium ja maankäyttö Lapissa sekä geofysiikka ympäristötutkimuksissa

Toni Eerola ja Maarit Nousiainen

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS KUVAILULEHTI

22.08.2019 / Dnro

Tekijät
Toni Eerola, Maarit Nousiainen

Raportin laji
Työraportti 65/2019

Toimeksiantaja
Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne – ja ympäristökeskus, GTK ja SYKE

Raportin nimi
Uraani, torium ja kalium Lapissa sekä geofysiikka ympäristötutkimuksissa

Tiivistelmä
Euroopan aluekehitysrahaston rahoittama Lapin kaivoskeskittymän kumulatiivisten ympäristövaikutusten arviointi ja hallinta (Lapin Kaiku) -hanke käsitteli alkuaineiden alueellista esiintymistä Lapin maakunnan alueella moreenissa sekä pinta- ja pohjavesissä. Tämä on Lapin Kaiku -hankkeen erillisraportti, joka käsittelee uraanin, toriumin ja kaliumin esiintymistä, siihen liittyvää maankäyttöä Lapissa ja geofysiikan käyttöä ympäristötutkimuksissa.

Uraanin esiintymistä Lapin maaperässä käsiteltiin geokemiallisen moreeniaineiston perusteella (kuningasvesiliuotus, raekoko <2 mm, näyte C-horisontista). Aineisto käsiteltiin ArcGIS-paikkatieto-ohjelmalla moreenin uraanipitoisuuksien kartoittamiseksi. Tuloksia analysoitiin Lapin kallioperän suurrakenteiden mukaisesti. Lapin uraanin esiintymistä, esiintymiä ja etsintää käsiteltiin myös erilaisten maankäyttömuotojen (luonnonsuojelu, matkailu ja poronhoito) valossa erityisesti Länsi-Lapin ja Soklin suhteen. Merkittävässä roolissa uraanin ja maankäytön suhteen on Kolari-Kittilän uraaniprovinssi, joka kuuluu myös Länsi-Lapin rautaoksidi-kupari-kulta-esiintymätyypin vyöhykkeeseen. Vaikka uraania ei luultavasti alueella tulla lähitulevaisuudessa etsimään tai hyödyntämään, alueen muut mahdolliset kaivannaiset houkuttelevat malminetsintään ja mahdolliseen kaivostoimintaan. Kolari-Kittilän alue on kuitenkin suurelta osin luonnonsuojelu-, matkailu- ja poronhoitoaluetta, mikä aiheuttaa haasteita malminetsinnälle ja kaivostoiminnalle ja eri intressien yhteensovittamiselle. Dialogi eri toimijoiden kanssa on tällöin tarpeen.

Raportissa esitetään uraanin, toriumin ja kaliumin pitoisuus Lapissa Geologian tutkimus-keskuksen lentomittausten mukaan. Radiometrisessä mittauksessa mitataan maan luonnollista radioaktiivista säteilyä, jonka avulla saadaan määriteltyä em. alkuaineiden pitoisuus maan pintaosassa n. 0-30 sentin syvyydellä. Radiometristä mittausta käytetään mm. soiden ja lumen vesipitoisuuden määrittämi-sessä, malminetsinnässä ja geologisen kartoituksen apuna. Raportti sisältää Lapin radiometriset kartat eli uraanin, kaliumin ja toriumin pitoisuuskartat, kokonaissäteilyn ja kaksi pitoisuuksien suhteita esittävää karttaa. Esimerkiksi Keski-Lapin granitoidikompleksi ja Sokli erottuvat kartoista.

Geofysiikkaa käytetään ympäristötutkimuksissa esimerkiksi pohjavesialueiden kartoitukseen ja mallinnukseen, kaivosaltaiden ja muiden patojen pitävyyden tutkimiseen, saasteiden leviämisen havaitsemiseen ja räjähtämättömien ammusten etsintään erityisesti vesialueille rakennettaessa. Tyypillisiä geofysiikan avulla selvitettäviä asioita ympäristötutkimuksissa ovat

esimerkiksi maapeitteen paksuus, peruskallion rikkonaisuus ja maan sähkönjohtavuus, joka liittyy mm. veteen ja siihen mahdollisesti liuenneisiin kemikaaleihin. Raportissa käydään läpi geofysiikan tutkimusmenetelmiä ja niiden käyttöä ympäristötutkimuksissa.

Asiasanat (kohde, menetelmät jne.)
Lappi, Lapin maakunta, moreeni, lentomittaus, aerogeofysiikka, uraani, torium, kalium, maankäyttö, radiometriset menetelmät, radiometriset kartat.

Maantieteellinen alue (maa, lääni, kunta, kylä, esiintymä)
Lappi

Karttalehdet

Muut tiedot
GTK/800/03.01/2016

Arkistosarjan nimi		Arkistotunnus	
GTK:n työraportti		65/2019	
Kokonaissivumäärä	Kieli	Hinta	Julkisuus
45 + 7 liitettä	Suomi		Julkinen
Yksikkö ja vastuualue		Hanketunnus	
Ympäristögeologian yksikkö		50403-300672	
Allekirjoitus/nimen selvennys		Allekirjoitus/nimen selvennys	
Jouni Pihlaja		Toni Eerola / Maarit Nousiainen	

Sisällysluettelo

Kuvailulehti

1 JOHDANTO 1
2 PERUSTIETOA URAANISTA 3
3 Moreeni geokemiallisessa kartoituksessa Suomessa 4
3.1 Moreeninäytteenotto 4
3.2 Moreeninäytteiden geokemiallinen analyysi 5
4 LAPIN MOREENIGEOKEMIALLISEN AINEISTON PAIKKATIETOKÄSITTELY 5
5 URAANI LAPISSA 6
5.1 Inarin arkeeinen alue 7
5.2 Lapin granuliittikaari 7
5.3 Itä-Lapin arkeeinen alue 7
5.4 Käsivarren arkeeinen alue 11
5.5 Keski-Lapin liuskejakso 11
5.6 Kuusamon-Sallan liuskejakso 11
5.7 Keski-Lapin graniittialue 11
5.8 Peräpohjan liuskejakso 13
5.9 Itä-Suomen ja Pudasjärven arkeeinen alue 13
6 LAPIN URAANIPROVINSSI: KOLARI-KITTILÄ 14
7 LÄNSI-LAPIN RAUTAOKSIDI-KUPARI-KULTAESIINTYMÄTYYPPI 14
8 URAANIN ETSINTÄ LAPISSA 16
9 URAANI JA MAANKÄYTTÖ LAPISSA 20
10 MITÄ GEOFYSIIKKA JA RADIOMETRISET MITTAUKSET OVAT? 24
11 GTK:N LENTOMITTAUS: URAANI, TORIUM JA KALIUM LAPISSA 27
11.1 Taustatietoa 27
11.2 Tuloskartat 27
12 KIINNOSTAVIA RADIOMETRISIA KOHTEITA 29
12.1 Sokli 29
12.2 Pomokaira ja Nattaset 31
12.3 Sevettijärven ja Suolisjärven alue 31
12.4 Käsivarren pohjoisosa 31
13 GEOFYSIIKKA YMPÄRISTÖTUTKIMUKSISSA 32

13.1 Geofysiikan käytön edut ja haasteet 32
13.2 Käyttökohteet 34
13.3 Tutkimusmenetelmät 35
13.4 Lennokkimittaukset 38
14 YHTEENVETO 39
15 KIITOKSET 40
16 LIITTEET 40
17 LÄHTEET 40

1 JOHDANTO

Kartat esittävät symbolisia tulkintoja luonnosta, maankäytöstä ja niihin liittyvistä arvostuksista. Karttoihin ja niiden esittämään tietoon sisältyy arvovalintoja ja painotuksia. Esimerkkinä tästä ovat geologiset, geofysikaaliset ja varsinkin malmipotentiaaliset kartat (Lassila 2018). Alueita kartoitetaan niiden kivi- ja maalajien, geofysikaalisten ja geokemiallisten ominaisuuksien sekä tunnettujen ja mahdollisten malmiesiintymien valossa. Luonto ”otetaan haltuun” esittämällä tämä teemakartoissa valikoidusti, muusta ympäröivästä todellisuudesta irrallaan. Karttatietojen perusteella on mahdollista kohdistaa geologista tutkimusta, malminetsintää ja kaivostoimintaa maastossa. Tämän mukaan paikkoja arvotetaan ja tähän liittyy vallankäyttöä. Valtiot käyttävät kansallista valtaansa kartoittaessaan ja hallitessaan luonnonvarojaan. (Adger ja muut 2001, Lassila 2018). Luonnonvarat kartoitetaan kuitenkin useimmiten pelkästään niiden itsensä pohjalta, ottamatta välttämättä huomioon muuta maankäyttöä tai paikallisyhteisöjä (Lassila 2018). Tämä valta on itse kartoittajilla ja heidän edustamillaan tahoilla, kuten kansallisilla geologian tutkimuskeskuksilla sekä etenkin geologisten raaka-ainevarojen etsintää ja hyödyntämistä hallitsevilla viranomaisilla (Kröger 2016, Lassila 2018). Malminetsintä- ja kaivosyhtiöt käyttävät puolestaan näiden tuottamaa tietoa valitessaan kohteita malminetsintä ja kaivosinvestoinneilleen ja hakiessaan lupia toiminnalleen. Viranomaiset myöntävät puolestaan lupia näihin toimintoihin.

Fraser-instituutin vuosittaisten kansainvälisen kaivosteollisuuden kyselyjen tulosten mukaan Suomessa geologinen tieto ja sen saatavuus ovat olleet jo pitkään maailmanlaajuisesti huippuluokkaa. Muun muassa tämän vuoksi Suomi on ollut toistuvasti Fraser-instituutin mukaan kaivosinvestointien suosituin kohde maailmassa. Kansallisten luonnonvarojen tuntemus ja niihin liittyvän tiedon pitkäjänteinen keruu, hallinta ja saatavuus ovat vastuullisen ja kestävän kaivostoiminnan ja -politiikan perusedellytyksiä. Tätä tehtävää hoitavat yleensä valtion tutkimuslaitokset, kuten GTK. Toimintaa on kuitenkin kritisoitu. Kritiikin mukaan veronmaksajien varoin kerätyn tiedon saavat ilmaiseksi myös ulkomaiset yksityiset yhtiöt, jotka tulevat Suomeen etsimään ja hyödyntämään uusiutumattomia kansallisomaisuudeksi katsottuja mineraalisia luonnonvaroja (Kröger 2016, Lassila 2018). Aineistot ja niiden saatavuus ovat tärkeitä kuitenkin myös ympäristötutkimuksissa sekä kaavoituksessa ja ne ovat avoimia myös kansalaisille EU:n INSPIRE-direktiivin (Euroopan Unioni 2007) mukaisesti.

Viime vuosikymmenien aikana Suomessakin on nähty että kaivostoiminnan ja muiden maankäyttömuotojen väliset ristiriidat ovat johtaneet kiistoihin ja että muu maankäyttö, paikallisyhteisöt ja heidän intressinsä tulisi myös ottaa huomioon jo malminetsinnän ja kaivostoiminnan varhaisessa vaiheessa (Eerola 2008, 2015, 2017, Mononen ja Sairinen 2011, Kröger 2016, Peltonen ja Lyytimäki 2016). Maankäytön ja paikallisten toimijoiden huomioiminen on mahdollista jo etukäteen malminetsinnän ja kaivostoiminnan suunnittelussa, karttoja tarkasteltaessa ja kohdealueen geologista tietoa kerättäessä. Tätä kutsutaan esivalmisteluksi, jota Kestävän kaivostoiminnan verkosto suosittelee malminetsinnän ja kaivostoiminnan sidosryhmätoiminnan

malleissaan (Kestävän kaivostoiminnan verkosto 2015, Eerola 2017). Muun maankäytön ja paikallisväestön huomioon ottamisella jo toiminnan suunnitteluvaiheessa voidaan välttää mahdollisia kiistoja (Goodland 2012, Conde & Le Billion 2017). Tämä on tärkeää toiminnan hyväksyttävyyden kannalta. Kaivostoiminnan hyväksyttävyydellä on puolestaan suuri merkitys geologisten luonnonvarojen tutkimisen ja hyödyntämisen näkökulmasta. Tämä on tärkeää yhteiskunnan raaka-ainehuoltovarmuuden kannalta. Suomi ja EU ovat riippuvaisia tuontimineraaleista. Siksi geologisten luonnonvarojen tutkimusta ja kartoitusta tarvitaan EU:n jäsenvaltioissa kuten Suomessa, jolla on suuri malmipotentiaali. Sen merkitystä on korostettu EU:n- ja Suomen mineraalistrategioissa (Euroopan Unioni 2010, Työ ja elinkeinoministeriö 2010).

Lappi ja Pohjois-Suomi ovat malmien ja monien mineraalisten raaka-aineiden suhteen Euroopan rikkaimpia (Sarala 2012). Eri alkuaineiden levinneisyyttä, malmipotentiaalia ja maankäyttöä on pohdittu Lapissa mm. EU-rahoitteisessa Minland- ja Suomen Akatemian rahoittamassa Govada-hankkeissa. Euroopan aluekehitysrahaston rahoittamassa Lapin kaivoskeskittymän kumulatiivisten ympäristövaikutusten arviointi ja hallinta (Lapin Kaiku)- hankkeessa tavoitteena on ollut selkeän ja hyödynnettävässä muodossa olevan ympäristötiedon tuottaminen, jotta pystytään ennakoimaan ja minimoimaan kaivoksien ja mahdollisesti tulevien kaivosten aiheuttamat vaikutukset Lapin alueella. Tavoitteena on ollut geologisesti potentiaalisten kaivosalueiden erottaminen sekä luonnollisten vertailuolosuhteiden laatiminen niille jo olemassa olevien sekä hankkeessa tehtyjen geologisten, vesikemiallisten ja biologisten selvitysten perusteella velvoitetarkkailun ja ympäristövaikutusten arvioinnin tueksi. Pitkällä tähtäimellä hankkeen tavoitteena on, että sen tuloksia pystytään hyödyntämään julkisella sektorilla esimerkiksi maakuntakaavoituksessa maankäytönsuunnittelussa ja päätöksenteon tukena sekä yksityisten toiminnanharjoittajien toiminnan suunnittelussa sekä toteutuksessa. Hankkeessa on käsitelty Lapin maaperän ja pohjavesien alkuainepitoisuuksia. Yksi näistä alkuaineista on uraani. Jo sanana uraani saattaa aiheuttaa monille negatiivisia mielleyhtymiä, ja sen etsintä on aiheuttanut kiistoja myös Suomessa (Koivunen ja muut 1980, Eerola 2008, 2015, Litmanen 2008, Jartti ja muut 2014). Tämä johtunee uraanin radioaktiivisuudesta, joka yhdistetään mm. radoniin, uraanikaivosten ympäristöriskeihin, ydinaseisiin ja ydinvoimalaonnettomuuksiin (Litmanen 2008). Etsittävän tai hyödynnettävän alkuaineen lisäksi malminetsinnän ja kaivostoiminnan kriittisenä tekijänä ovat myös toiminnan sijainti ja sen mahdolliset ristiriidat muiden ympäristön, elinkeinojen, arvojen ja maankäytön suhteen (Goodland 2012, Conde ja Le Billion 2017, Conde 2018). Suomessa erityisesti poronhoito-, matkailu-, luonnonsuojelu- ja vesistöalueet ovat herkkiä ympäristön muutoksille ja näin myös kiistoille (Eerola 2017). Siksi mm. uraanin esiintymisen yhteydessä on tärkeää pohtia myös siihen liittyvää maankäyttöä Lapissa.

Tämä Lapin Kaiku -hankkeessa tuotettu raportti käsittelee geokemiallisiin ja lentogeofysiikan radiometrisiin mittauksiin pohjautuen uraanin, toriumin ja kaliumin esiintymistä, etsintää ja näiden suhdetta maankäyttöön ja ympäristöön Lapissa. Lisäksi käsitellään geofysiikan käyttöä ympäristötutkimuksissa.

2 PERUSTIETOA URAANISTA

Seuraavat tiedot perustuvat GTK:n verkkosivun julkisesti saataviin tietoihin. Uraani on raskain luonnossa esiintyvä alkuaine, ja sen kaikki isotoopit ovat radioaktiivisia. Se on syntynyt aikoinaan tähtien supernovaräjähdyksissä ja neutronitähtien törmäyksissä neutronisieppauksen kautta. Uraania oli mukana pieninä pitoisuuksina kaasu- ja pölypilvessä, josta aurinkokunta muodostui noin 4,6 miljardia vuotta sitten.

Uraanin määrä maapallolla on aikojen saatossa vähentynyt merkittävästi, koska se hajoaa radioaktiivisesti muiksi alkuaineiksi. Uraanin, toriumin ja kaliumin radioaktiivisen hajoamisen tuottama lämpöenergia on maapallon sisäisen lämpöenergian tärkein lähde. Tämän lämmön purkautuminen kohti maapallon pintaa on merkittävässä roolissa geologisissa prosesseissa ja laattatektoniikassa.

Uraani on lähinnä suuren varauksensa vuoksi ns. sopeutumaton alkuaine eli maankuoren kivien osittain sulaessa se rikastuu voimakkaasti muodostuvaan sulaan. Maan vaipan yläosa ja kuori ovat aikojen saatossa toistuvasti sulaneet osittain ja tuottaneet mantereista kuorta, joten uraani on erottunut tehokkaasti ja rikastunut mantereiseen yläkuoreen. Mantereinen kuori sisältääkin nykyään arviolta puolet maapallon kaikesta uraanista. Uraanin keskimääräinen pitoisuus mantereisessa kuoressa on 1,4 mg/kg (0,00014 %) ja mantereisessa yläkuoressa 2,8 mg/kg(0,00028 %). Uraniniitti on yleisin maankuoren uraanimineraali, lisäksi alkuaine esiintyy pieninä pitoisuuksina mm. monatsiitissa ja zirkonissa.

Suomen kallioperän U-pitoisuus (2 ppm) vastaa maapallon mantereisen yläkuoren keskimääräistä U-pitoisuutta (2,8 ppm). Suomessa on kuitenkin kivilajeja (mm. graniitti), jotka sisältävät keskimääräistä enemmän uraania. Suomen kallioperä on monivaiheisten geologisten prosessien lopputulos ja muokkautunut useassa eri vaiheessa, joten myös uraani on paikoitellen rikastunut useassa vaiheessa, jolloin lopputuloksena on paikoin uraania enemmän sisältäviä kivilajeja ja alueita. Kallioperän uraanipitoisuuden vaihtelu korreloi kivilajivaihtelun kanssa, mikä heijastuu myös päällä olevaan maaperään ja alueen pohjaveteen. Suomessa kallioperän uraanipitoisuus on korkein Etelä-Suomen graniittialueilla (keskimäärin 3 mg/kg).

Luonnon radionuklideista yli puolet kuuluu uraanin ja toriumin hajoamissarjoihin. Luonnossa esiintyvä uraani koostuu kolmesta isotoopista: U-238 (99,27 %), U-235 (0,72 %) ja U-234 (0,0057 %). Uraani on epästabiili, koska sillä on liian raskas atomiydin, ja alfahajoamisen kautta se pyrkii kohti stabiilimpaa tilaa. Uraanin radioaktiivinen hajoaminen koostuu kahdesta erillisestä hajoamissarjasta, joiden kantanuklideina ovat U-238 ja U-235.

Terveydelle haitalliset säteilyvaikutukset liittyvät ensisijaisesti uraanin hajoamissarjaan kuuluviin radioaktiivisiin tytärnuklideihin: radon (Rn-222), radium (Ra-226), lyijy (Pb-210) ja polonium (Po-210). Suomalaisen saama keskimääräinen säteilyannos on noin 3,2 millisievertiä vuodessa. Noin puolet tästä annoksesta aiheutuu sisäilman radonista.

Lisäksi luonnon taustasäteilystä aiheutuu vuosittain keskimäärin 30 % ja säteilyn käytöstä terveydenhuollossa noin 15 %. Uraani on kemiallisesti myrkyllinen raskasmetalli ja suurina annoksina haitallinen etenkin munuaisille. Uraanin kemiallisen myrkyllisyyden terveydelliset riskit ovat sen säteilyriskejä suuremmat.

3 MOREENI GEOKEMIALLISESSA KARTOITUKSESSA SUOMESSA

Kun halutaan tarkastella jonkin alueen alkuaineiden, kuten uraanin luontaista esiintymistä maaperässä, turvaudutaan systemaattiseen maaperänäytteenottoon. Lapin Kaiku-hankkeessa uraanin esiintymistä Lapin maa- ja kallioperässä tarkasteltiin geokemiallisissa kartoituksissa ja projekteissa kerätyn, tallennetun ja GTK:n hallinnoiman tietokannan geokemiallista moreeniaineiston avulla.

Useiden toistuvien jääkausien jäätiköiden jälkeensä jättämä maa-aines, moreeni, Suomen yleisin maalaji, peittää laajoja alueita Suomessa. Moreenin ja muiden jääkauden jälkeisten kerrostumien vuoksi kallioperä on Suomessa paljastuneen vain noin 6 % verran. Moreenin koostumus heijastaa sen alla olevan kallioperän koostumusta, koska kallioperästä irtautui jääkausien aikana kiviainesta ja mineraaleja jäätikön kuljetettavaksi. Moreenin sisältämät alkuaineet heijastavat myös lähtöainesta, uraani mukaan luettuna. Siksi moreenia on ollut Suomessa merkittävä tutkimuskohde, kun on haluttu selvittää alla olevan kallioperän geokemiallista koostumusta, sen alkuaineiden levinneisyyttä sekä mahdollisia malmiesiintymiä ja niiden paikantamista. Moreenin geokemiallinen koostumus antaa epäsuoria vihjeitä malmiesiintymistä, joita voidaan paikantaa lohkareiden, moreeninäytteenoton ja moreeniaineksen geokemiallisten alkuaineanalyysien avulla. Tämän vuoksi Suomessa on tehty laajamittaisia valtakunnallisia geokemiallisia kartoituksia, jotka ovat perustuneet moreeninäytteenottoon. Tutkimusten avulla on saatu aikaan alkuainekarttoja, jotka on koottu Suomen geokemialliseksi atlakseksi (Koljonen 1992). Kartat antavat osviittaa eri alueiden maa- ja kallioperän geokemiallisesta koostumuksesta ja niiden malmipotentiaalista sekä niistä ympäristön kannalta merkittävistä piirteistä, jotka tulisi ottaa huomioon mm. maankäytön suunnittelussa. Korkeat alkuaineiden pitoisuudet muodostavat nk. anomalioita, jotka voidaan paikantaa kartoissa esitettyjen korkeiden pitoisuuksien keskittymien avulla.

3.1 Moreeninäytteenotto

Jotta moreenin koostumusta voidaan tutkia, tarvitaan maaperänäytteenottoa. Satu Hietala (2017) kuvailee moreeninäytteenottoa ja geokemiallista analyysiä seuraavasti:

Uraanin ja muiden alkuaineiden tutkimuksia varten maalajinäytteitä voidaan ottaa käsin tai koneellisesti. Koneellisesti voidaan käyttää maaperäkairaukseen tarkoitettua kevyttä kairauskalustoa ja näytteitä voidaan ottaa myös lapiolla pintamaasta tai pintamoreenista. systemaattisessa valtakunnallisessa moreeninäytteenotossa näytteitä otettiin 1 näyte/4 km² (Koljonen 1992). Kun radiometrinen lento- tai maastomittaus- tai geokemiallinen aineisto antavat aihetta korkean radioaktiivisuuden tai uraanipitoisuuden vuoksi, tarkempi kohteellinen malminetsintää palveleva tutkimus ja näytteenotto tapahtuvat yleensä kaivinkoneella tehtävistä tutkimuskuopista. Näillä

pyritään paikantamaan anomalian lähde kallioperässä. Tutkimuskuopat pyritään kaivamaan kallion pintaan asti tai niin syvälle, kuin se käytössä olevalla kalustolla on mahdollista huomioiden alueen luonnonpiirteet, kuten kivikkoisuus, kalliot, jyrkät rinteet, suo sekä pääsy alueelle tietä tai metsäkoneuria pitkin. Alustavalla tutkimuskuoppien kaivuulla saadaan yleensä kattava kuva alueiden tai kohteiden maapeitteen kerroksista, laadusta ja paksuudesta sekä erikerrostumien geokemiallisesta ja hivenmetalli-ja raskasmetallikoostumuksesta. Parhaimmillaan saadaan välttävä kuva kallioperästä ja sen rakenteista.

3.2 Moreeninäytteiden geokemiallinen analyysi

Suomen geokemian atlaksessa (Koljonen 1992) (suuralueellinen moreeni) uraanipitoisuus määritettiin neutroniaktivointianalyysillä, jossa määritysraja oli riittävän pieni. Tarkemmassa alueellisessa moreenigeokemiallisessa kartoituksessa käytettiin kuningasvesiliotusta ja ICP-AES mittausta. Siinä erityisesti uraanin määritysraja oli liian korkea ja uraanipitoisuudet jäivät pääosain määritysrajan alapuolelle. Lapin Kaiku-hankkeessa mukaan otettiin kuitenkin ainoastaan tällä menetelmällä saadut analyysitulokset.

Kuningasvesi on väkevän vetykloridin ja typpihapon 3:1 seos. Näyte liuotetaan liuokseen. Tehokkainta liukeneminen on kuningasveden kiehumispisteessä (109 ◦C). Näin aikaansaatu liuos analysoidaan aerosolina ICP-AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy eli - induktiivisesti kytketty plasma atomiemissiospektrometria) –menetelmällä (Boss ja Fredeen 2004). Siinä liuoksen alkuaineet altistetaan olosuhteille joissa atomi virittyy, jolloin elektroni siirtyy sen perustilaltaan ylemmälle orbitaalille. Atomi muuttuu epästabiilimmaksi siirtäen ylimääräistä energiaa synnyttämällä fotonin perustilaan palatakseen. Jos atomiin kohdistuva energia on tarpeeksi suuri, elektroni voi kokonaan erottua atomista, jolloin syntyy ioni. Tähän tarvittavaa energiaa kutsutaan ionisaatioenergiaksi. Viritystilan purkautuessa atomit ja ionit synnyttävät alkuaineelle ominaista säteilyä. Näiden spektriviivojen avulla näytteessä olevat alkuaineet tunnistetaan ominaisten aallonpituuksiensa intensiteettien perusteella ja havaita erityisellä mittauslaitteella. Aallonpituuden intensiteetti ja optiikan laatu määrittävät alkuaineen herkkyyden. Emission intensiteetti on verrannollinen alkuaineen konsentraation eli mitä isompi konsentraatio, sitä suurempi intensiteetti.

Uusimmissa maaperän taustapitoisuuskartoituksissa sekä uraani että torium on nykyään määritetty kuningasvesiliuotuksen jälkeen ICP-MS-tekniikalla. ICP-MS:llä päästään paljon pienempiin määritysrajoihin kuin ICP-AES:llä. Geokemiallista moreeninäyttöä ja –analyysiä sekä Lapin moreenigeokemiallisia tutkimuksia ovat kuvailleet tarkemmin Pasi Lehmuspelto ja Pertti Sarala (2012).

4 LAPIN MOREENIGEOKEMIALLISEN AINEISTON PAIKKATIETOKÄSITTELY

Lapin Kaiku-hankkeen käytössä oli koko Lapin moreenigeokemiallinen aineisto jota on kertynyt vuosikymmenten ajalta. Sen ovat keränneet GTK, Outokumpu Oy, Rautaruukki Oy ja Lapin malmi Oy. Kyseessä on kaiken kaikkiaan 7399 näytepisteen aineisto. Se

koottiin seuraavista aineistosta: Suomen geokemian atlaksen projektiaineisto, Happamat sulfaattimaat (HaSu), Rikin yhdisteet kaivostoiminnassa – ympäristövaikutusten arviointi, mittaus ja minimointi (Sulka), Haavi-hanke ja iskuporanäytteet. GTK hallinnoi tätä valtakunnallista paikkatietopohjaista moreenigeokemiallista aineistoa. Aineiston yhdenmukaisuusvaatimusten vuoksi Lapin Kaiku-hankkessa aineistosta poimittiin kuitenkin ne moreeninäytteet, jotka oli otettu vain maaperän C-horisontista, analysoitu < 2 mm raekoon fraktioista ja joiden analyysitulokset ovat yli määritysrajan (<0,05 mg/kg kuivapainoa). Visuaalisen selkeyden vuoksi näiden kriteerien ulkopuolelle jäävien tulosten näytepisteet jätettiin kokonaan pois kartoilta. Jäljelle jäävät tulokset käsiteltiin ArcMap-paikkatietojärjestelmällä, joka sijoitti näytepisteet Lapin maakunnan kartalle koordinaattiensa mukaisesti (kuva 1). Näytepisteiden uraanipitoisuudet luokiteltiin pallosymboleina ArcMapillä, joka antaa pisteelle sen geokemiallisen pitoisuusvälin mukaisen koon (kuva 2). Kookkaammalla pisteellä on suurempi pitoisuus ja toisinpäin.

Inverse Distance Interpolation (IDW), eli päinvastaisen pituuden interpolointiohjelma, arvioi puolestaan tunnettujen pisteiden välistä puuttuvien pisteiden arvoja tunnettujen pisteiden keskinäisten arvojen avulla. Se ennustaa niiden väliin jäävälle alueelle arvon, joka on riippuvainen näiden pisteiden keskinäisistä arvoista. Näin voidaan tuottaa alueellisia pitoisuusarviokarttoja. Korkeamman pitoisuuden alueet näkyvät kartoissa keltaisina (kuva 2). Tätä geotilastotieteellistä menetelmää käytetään paljon sekä malminetsinnässä että ympäristötutkimuksissa.

Väripintakartan ja symbolikartan yhdistelmillä voidaan kuvata useampia alkuaineita tai muita ominaisuuksia samalla kartalla (Lehmuspelto ja Sarala 2012). Interpoloinnin avulla saatu aineisto yhdistettiin tukemaan näytepisteiden pitoisuuksien vaihtelun visualisointia alueellisesti (kuva 2). Uraanin alueellisen levinneisyyden tarkastelua varten laadittiin suurimittakaavaisia, alueellisia kallioperä-, näytepiste ja -pitoisuuskarttoja, sekä yksityiskohtaisempia paikallisia- että suurmittakaavaisia teemakarttoja.

5 URAANI LAPISSA

Suomesta tunnetaan lukuisia uraaniesiintymiä, jotka eivät kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavia (Äikäs 2007, 2013, Lauri 2010, Lauri ja muut 2010). GTK:n *Mineral Deposits and Exploration*-verkkopalvelun geokemiallisen ja geofysikaalisen aineiston perusteella uraani muodostaa metallogeenisen vyöhykkeen ainoastaan Kolarin alueella Kesänkitunturi-Äkäslompolon ympäristössä, missä on tunnettuja uraaniesiintymiä (Pohjolainen 2012, 2015, kuva 3). Muita tunnettuja uraaniesiintymiä ovat Ranta-Tulkkivaara, Mustamaa, Orajärvi, Asentolamminoja, Kuohunki ja Sokli (Lauri ja muut 2012, kuva 3).

GTK:n malmiviitetietokannassa on useita uraanilohkare- ja kallioviitteitä Lapissa (kuva 3). Lisäksi uraani esiintyy monissa malmiesiintymissä esim. kullan, koboltin, kuparin tai molybdeenin kanssa, kuten esim. Pahtavuoman, Saattoporan ja Rompas-Rajapalon esiintymissä tai fosforiitin yhteydessä, kuten Soklissa (kuva 3).

Lapin kaiku-hankkeen moreenigeokemiallista laajamittakaavaista näytepisteaineistoa tarkasteltaessa huomio kiinnittyy kartan yleiseen harvapisteisyyteen sekä joihinkin melko rajattuihin alueisiin, joissa on tiheitä näytepistekeskittymiä (kuva 1). Näitä tiheämpiä näytekeskittymiä löytyy Inarin ja Ivalon alueilta, Soklista, Sodankylästä, Kolarista ja Rovaniemen eteläpuolelta. Näillä alueilla on tehty tarkempaa kohteellista näytteenottoa.

Lapin Kaiku-hankkeen uraanipitoisuuksia (kuva 2) tarkastellaan Lapin kallioperän geologisten suuryksiköiden mukaisesti (kuva 1), noudattaen valtakunnalliseen kallio-geokemialliseen aineistoon (Rasilainen ja muut 2007, 2008) perustuvaa Suomen kallioperän uraanipotentiaalin arviointia (Lauri ja muut 2012).

5.1 Inarin arkeeinen alue

Suomen päälaella sijaitseva Inarin alue koostuu valtaosin arkeeisista, yli 2,7 miljardia vuotta vanhoista, koostumukseltaan korkeassa paineessa ja lämpötilassa raidallisiksi muovautuneista syväkivistä, muinaisista vulkaanisista kivistä sekä merenpohjan savista syntyneistä kiillegneisseistä (kuva 1). Alueella on myös n. 1,78 miljardin vuoden ikäinen Vainospään graniittinen syväkivi, jonka geokemia ja keskimääräinen uraanipitoisuus poikkeavat alueen muusta kallioperästä. Se erottuu myös lentomittausgamma-säteilykartoilta eli radiometrisilta selvästi uraanin suhteen (ks. edempänä). Inarin alueelta ei kuitenkaan tunneta uraaniesiintymiä eikä uraanimalmiviitteitä.

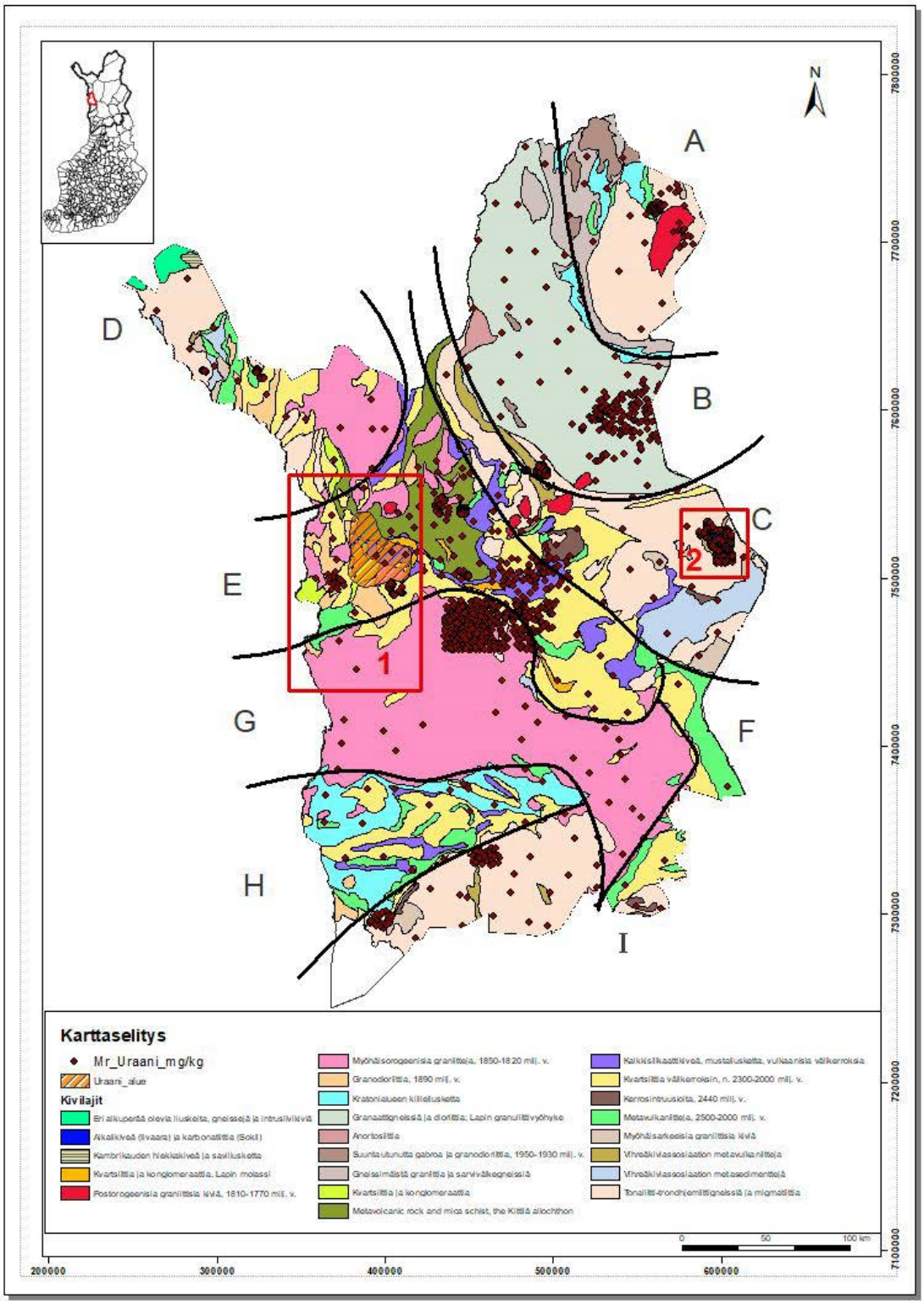
Lapin Kaiku-hankkeen uraaniaineistossa alueelta on otettu tiheästi moreeninäytteitä, joiden uraanipitoisuudet ovat keskimääräistä suurempia (kuva 2).

5.2 Lapin granuliittikaari

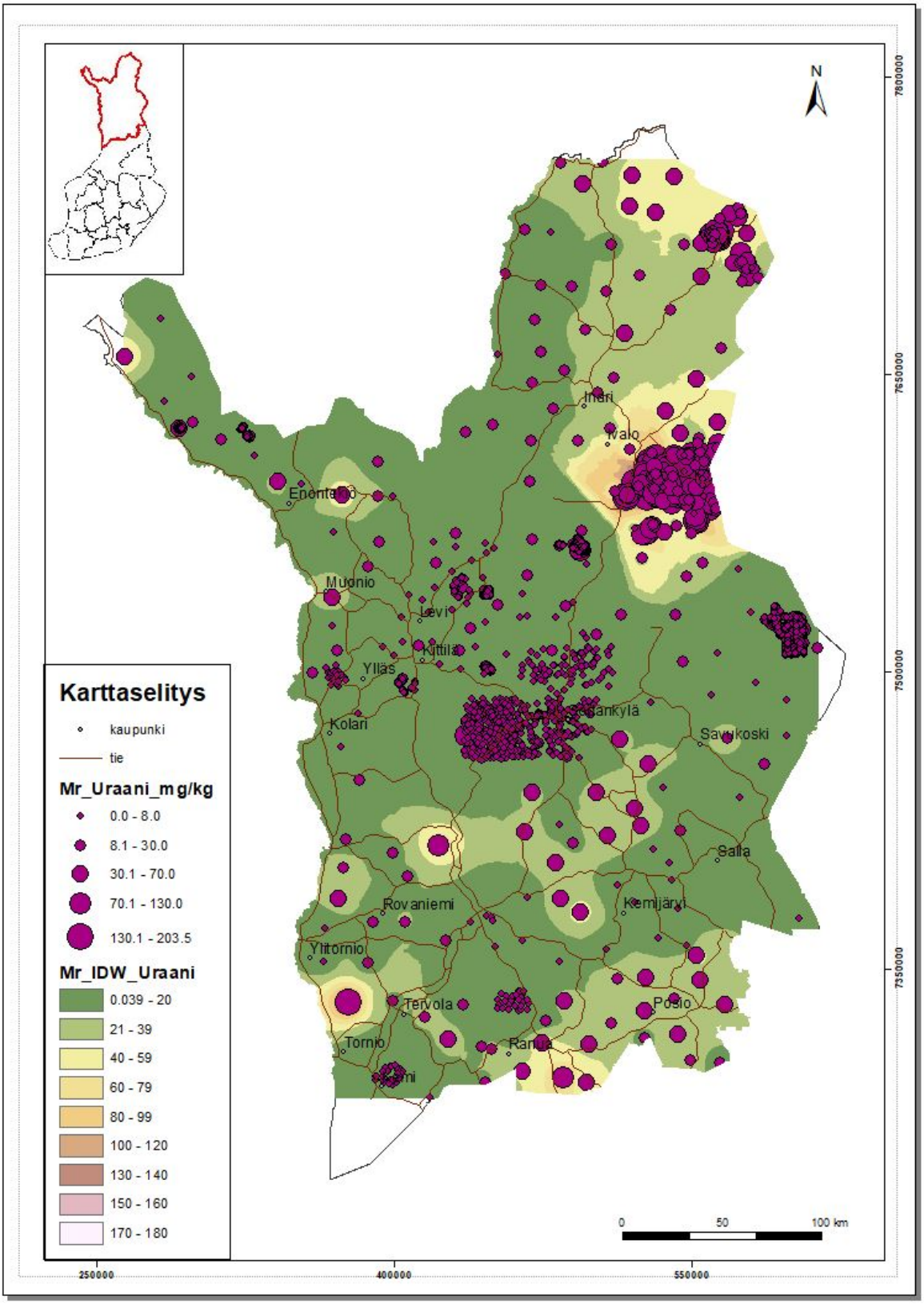
Lapin granuliittikaari, joka kulkee Raja-Joosepilta Outakoskelle (kuva 1), edustaa kivilajeiltaan maapallon keskikuorta, joka tunkeutui yläkuoren päälle muinaisten mannerlaattojen törmätessä Fennoskandian kilpeen n. 1,95 miljardia vuotta sitten. Alueen kivilajit ovat pääasiassa korkean paineen ja lämpötilan granuliitteja, joissa uraanipitoisuus on hyvin alhainen. Lapin granuliittikaaren alueelta tunnetaan yksi pitoisuudeltaan vähäinen uraanimalmiviite kalliosta (kuva 3). Ivalon alueelta on otettu tiheästi moreeninäytteitä ja niiden uraaniarvot muodostavat selkeän anomalisen alueen Lapin Kaiku-hankkeen aineistossa (kuva 2).

5.3 Itä-Lapin arkeeinen alue

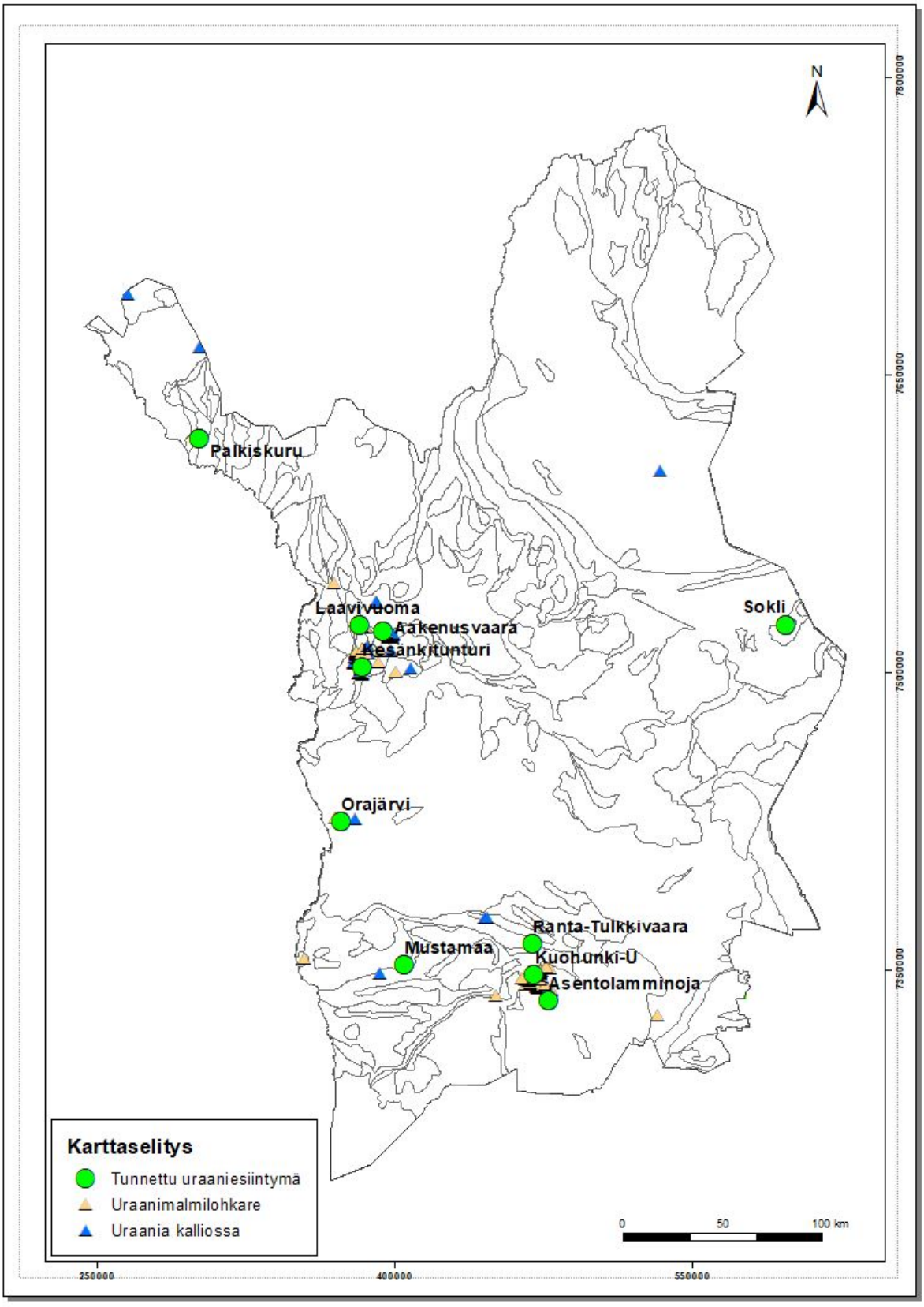
Itä-Lapin arkeeinen alue käsittää Sodankylän ja Savukosken alueella olevan gneissi-alueen, Tuntsan kiillegneissijakson ja granuliittikaaren alapuolella olevan Tana-vyöhykkeen, jotka kaikki ovat iältään >2,7 miljardia vuotta (kuva 1). Alueelta löytyy lisäksi nuorempia graniitteja sekä n. 380 miljoonaa vuotta vanha Soklin karbonatiitti-intruusio, johon sisältyy yksi Suomen tunnetuista uraaniesiintymistä (kuvat 3 ja 4). Karbonatiitissa on tosin laajemmin toriumia kuin uraania. Molemmat alkuaineet esiintyvät pyrokloori-mineraalissa. Lisäksi Soklin fosfaattimalmissa, joka on karbonatiitin päällä oleva rapauma, on hajonneesta pyrokloorista peräisin olevaa toriumia ja uraania. Soklin lisäksi alueelta ei tunneta muita uraanimalmiviitteitä.



Kuva 1: Lapin kallioperäkartta 1:1000 000 geologisine suuryksiköineen, Lapin Kaiku –hankkeen aineiston moreeninäytepisteet (GTK). 1=Kolari; 2=Sokli; A=Inarin Arkeeinen alue; B=Lapin granuliittikaari; C=Itä-Lapin arkeeinen alue; D=Käsivarren arkeeinen alue; E==Keski-Lapin liuskejakso; F=Kuusamo-Salla liuskejakso; G=Keski-Lapin graniittialue; H=Peräpohjan liuskealue; I=Itä-Suomen ja Pudasjärven arkeeinen alue.



Kuva 2: Lapin Kaiku –hankkeen aineiston moreeninäytepisteet kuningasvesiliukoisine ja IDW-interpoloiduin uraanipitoisuuksineen (GTK).



Kuva 3: Lapin tunnetut uraaniesiintymät ja malmiviitteet (GTK). Kivilajirajat ovat samat kuin kuvassa 1.

Soklin alueella on tehty pitkiä moreeninäytteenottolinjoja, joiden näytteistä uraani on analysoitu (kuva 4). Tulokset osoittavat heikohkoja anomalioita, mutta itse intruusion päältä olevat näytteet ovat luultavasti jääneet pois Lapin Kaikun yhdenmukaisuus-vaatimuksen vuoksi. Siinä uraanipitoisuudet olisivat oletetusti korkeampia. Soklin karbonatiittikompleksi tulee gammasäteilynsä ansiosta selvästi esiin lentoradiometrisessä kartassa (Kuva 4).

5.4 Käsivarren arkeeinen alue

Käsivarren alueella on sekä vanhoja gneissejä että nuorempia graniitteja ja liuskeita (kuva 1). Kilpisjärven ja Haltin alueen kivilajit poikkeavat muun Suomen kallioperästä, sillä ne kuuluvat n. 450 miljoonaa vuotta vanhaan Kölivuoristoon. Käsivarren alueelta tunnetaan yksi malmiviite kalliosta Haltin alueelta sekä Palkiskurun pieni uraani-esiintymä (kuva 3). Lapin Kaiku-hankkeen moreeninäytteistä muutama yksittäinen näyte edustaa jokseenkin korkeampia arvoja (kuva 2).

5.5 Keski-Lapin liuskejakso

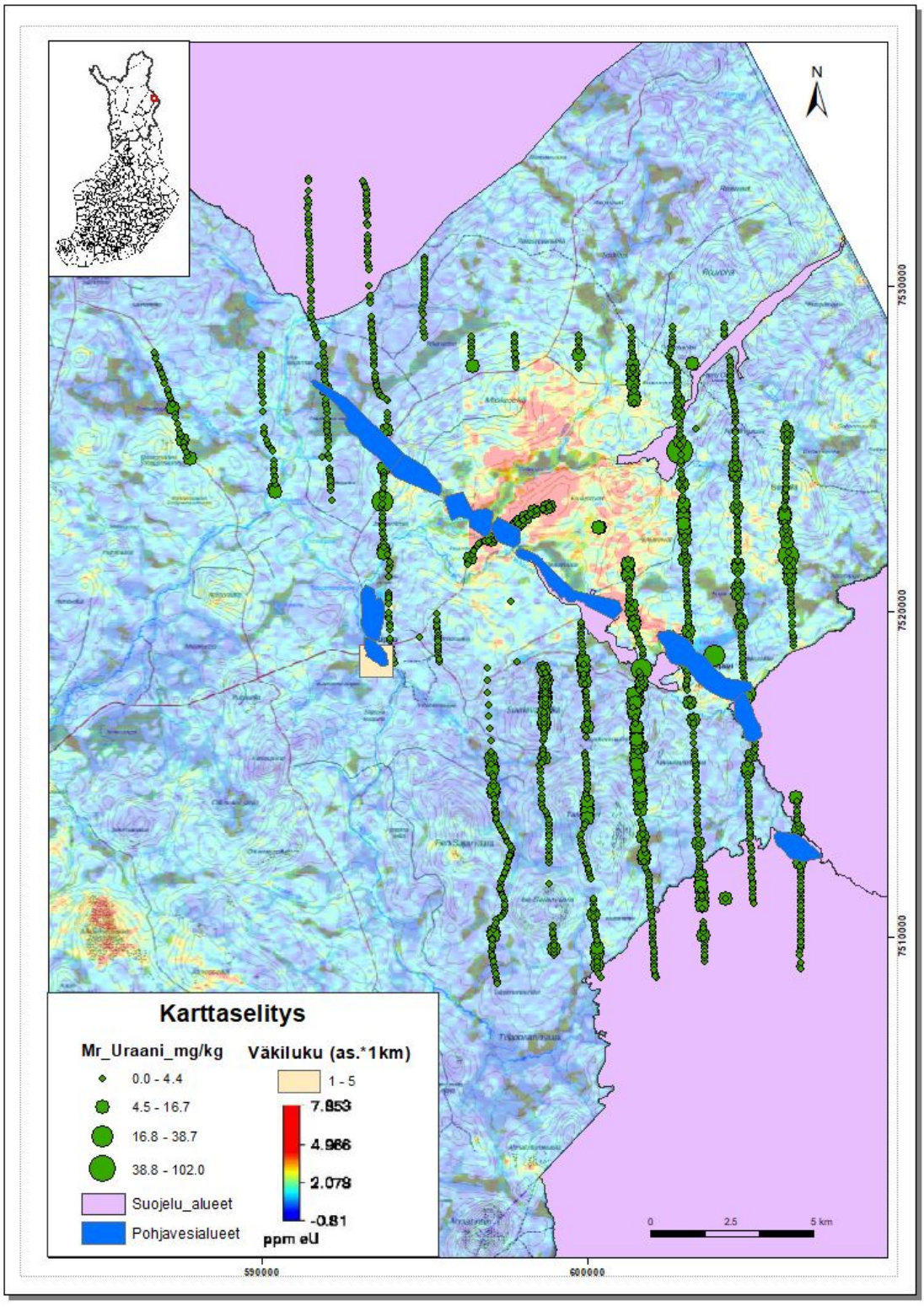
Keski-Lapin nuorempi liuskejakso (kuva 1) on yksi Suomen malmipotentiaalisimmista alueista. Siltä tunnetaan suuri määrä kulta-, kupari- ja rautamalmiaiheita ja alueella on lukuisia toimivia ja suljettuja kaivoksia. Kallioperä koostuu valtaosin pintasyntyisistä kivistä kuten vulkaniiteista, kvartsiiteista ja kiilleliuskeista. Alueella on lisäksi grano-dioriittisia ja graniittisia syvällä sulasta magmasta kiteytyneitä kivilajeja. Keski-Lapin liuskejakson alueelta tunnetaan runsaasti uraanimalmiviitteitä sekä lohkareina että kalliosta (kuva 3). Alueella on lisäksi neljä tunnettua uraaniesiintymää (Laavivuoma, Pahtavuoma, Aakenusvaara ja Kesänkitunturi, kuva 3), joista kolmessa ensimmäisessä uraani esiintyy pikivälkejuonina. Ne kuuluvat Kolari-Kittilän uraaniprovinssiin (kuva 5). Lapin Kaiku-hankkeen moreeniaineistossa Kolari-Kittilän alue näkyy kuitenkin vain pienenä näyterykelmänä melko pienine uraanipitoisuuksineen (kuva 2). Kemijärven länsi- ja pohjoispuolen korkeammat arvot liittyvät puolestaan alueen kvartsiitteihin Pyhä-Luoston ympäristössä (kuva 2).

5.6 Kuusamon-Sallan liuskejakso

Kuusamon-Sallan liuskejakso on kivilajeiltaan pitkälti Keski-Lapin liuskejakson kaltainen. Liuskejakso koostuu nuoremmista vulkaanisista kivistä ja niiden päälle kerrostuneista kvartsiiteista, joihin on tunkeutunut emäksisiä diabaasijuonia. Kuusamon-Sallan liuskejakso on potentiaalinen erityisesti kullan, kuparin ja koboltin suhteen ja monissa alueen kulta-kobolttiesiintymissä on mukana myös uraania (esim. Juomasuo Kuusamossa). Sallan alueella Vaara-Tuohilammen alue on radioaktiivisesti anomaalinen, mutta kivilajit eivät ole suotuisia uraaniesiintymälle. Sallan alue ei tule ollenkaan esiin Lapin Kaiku-hankkeen aineistossa (kuva 2).

5.7 Keski-Lapin graniittialue

Keski-Lapin graniittialue peittää laajoja osia Kolarin, Pellon, Rovaniemen, Sodankylän, Kemijärven ja Posion kunnista (kuva 1). Graniitit ovat syntyneet n. 1,8 miljardia vuotta sitten tapahtuneen mannerlaattojen törmäyksen seurauksena, jolloin maankuori



Kuva 4: Soklin alueen lentoradiometrinen kartta moreeninäytteenottolinjoineen ja Lapin Kaiku –hankkeen aineiston moreeninäytepisteet kuningasvesiliukoisine uraanipitoisuuksineen (GTK), pohjavesi- ja luonnonsuojelualueet (SYKE) sekä asukastiheys (Väestötietorekisteri).

paksuuntui ja suli osittain tuottaen suuren määrän graniittista magmaa. Graniittien joukosta löytyy jäänteitä kivilajeista, joiden sekaan graniitit tunkeutuivat. Koska uraani ja torium rikastuvat graniittisiin suliin, näkyy Keski-Lapin graniittialue säteilykartoilla ympäröiviä alueita radioaktiivisempana. Alueelta ei tästä huolimatta tunneta kuin yksi pieni ja pitoisuudeltaan heikko esiintymä (Orajärvi, kuva 3), jossa on toriumia huomattavasti runsaammin kuin uraania. Graniittialue näkyy myös Lapin Kaiku-hankkeen aineistossa harvoina mutta suhteellisen korkeina pitoisuuksina (kuva 2).

5.8 Peräpohjan liuskejakso

Peräpohjan liuskejakso (kuva 1) on samankaltainen kuin Keski-Lapin ja Kuusamon-Sallan liuskejaksot. Eteläreunassa liuskejakson vulkaaniset ja sedimenttiset kivilajit ovat hyvin säilyneitä ja muuttumattomia, mutta jakson pohjoisreunaa kohti metamorfoosiaste kasvaa ja Keski-Lapin graniittialueen vaikutus lisääntyy, jolloin liuskejakson kivilajit ovat kokeneet deformaatiota ja muuttumista. Peräpohjan liuskejakson alueella malminetsintä ei ole ollut yhtä aktiivista kuin Keski-Lapin tai Kuusamon alueilla, mutta alueelta tunnetaan joitakin uraanimalmiviitteitä sekä lohkareina että kalliosta. Peräpohjan alueelta tunnetaan pieniä uraaniesiintymiä (Mustamaa ja Ranta-Tulkki-vaara) sekä uraani- ja kultamalmiaihe liuskealueen pohjoisosista Romppaan-Rumavuoman alueelta (kuva 3). Lapin Kaiku-hankkeen aineistossa yksi merkittävä korkea pitoisuus näkyy Karungin alueella (kuva 2).

5.9 Itä-Suomen ja Pudasjärven arkeeinen alue

Itä-Suomen ja Pudasjärven arkeeinen alue Suomen laajin, yhtenäinen arkeeisten kivien alue ulottuu Etelä-Lapista Oulun seudulle, Savoon ja Pohjois-Karjalaan (Kuva 1). Valtaosa alueen kivistä on iältään arkeeisia (3.5-2.7 miljardia vuotta), mutta alueen keskiosaa halkoo kapea proterotsooinen liuskejakso, jolla sijaitsevat esim. Talvivaaran musta-liuskemuodostumat. Alueen eteläreunassa arkeeisten kivien sekaan on tunkeutunut proterotsooisia graniitteja. Arkeeinen kuori voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: (1) syväkivigneissialueisiin, jotka koostuvat tonaliittis-granodioriittisista gneisseistä ja leukograniiteista sekä (2) vihreäkivivyöhykkeisiin ja kiillegneissialueisiin, jotka koostuvat pintasyntyisistä kivilajeista. Itä-Suomen ja Pudasjärven arkeeiselta alueelta tunnetaan suuri määrä uraanimalmiviitteitä sekä lohkareina että kalliosta (Kuva 3). Alueella on myös useita uraaniesiintymiä, joista osa on arkeeisissa kivilajeissa ja osa proterotsooisten kivien puolella. Kaikki tutkitut arkeeisissa kivilajeissa olevat uraaniesiintymät ovat kuitenkin iältään proterotsooisia.

Pudasjärven arkeeisella alueella sijaitsevat Kuohungin uraaniesiintymä ja Asento-lamminojan uraanilohkareikko (Kuva 3). Puolangan, Paltamon ja Sotkamon kuntien alueelta löytyvät puolestaan Puokion, Nuottijärven ja Losonvaaran uraaniesiintymät (kuva 3), jotka sijaitsevat proterotsooisissa kivilajeissa.

Lapin Kaiku-hankeen uraanipitoisuuksien karttaa (kuva 2) tarkasteltaessa suuremmilla pitoisuuksillaan mutta harvapisteisenä erottuu selkeästi Posion ja Ranuan alue.

6 LAPIN URAANIPROVINSSI: KOLARI-KITTILÄ

Suomessa on tähän mennessä paikannettu yksi laajempi uraanipotentiaalinen vyöhyke, jossa uraanin arvot ovat selvästi alueellisesti koholla kallioperässä ja radiometrisissä lentomittauksissa (edempänä) ja missä on tunnettuja uraaniesiintymiä. Alue muodostaa uraanirikkaan vyöhykkeen, joka ulottuu Kolarin Kesänkitunturilta Kittilään Länsi-Lapissa (kuva 5). Tätä kutsutaan Kesänkitunturin uraanialueeksi (Pohjolainen 2012). Se sijaitsee Keski-Lapin liuskejakson lounaisosassa. Alueella havaitut uraaniesiintymät liittyvät kvartsiitteihin ja niitä leikkaaviin juoniin. Neljä esiintymää tunnetaan (Kuva 3, 5) ja kahdesta näistä on tehty malmiarvio.

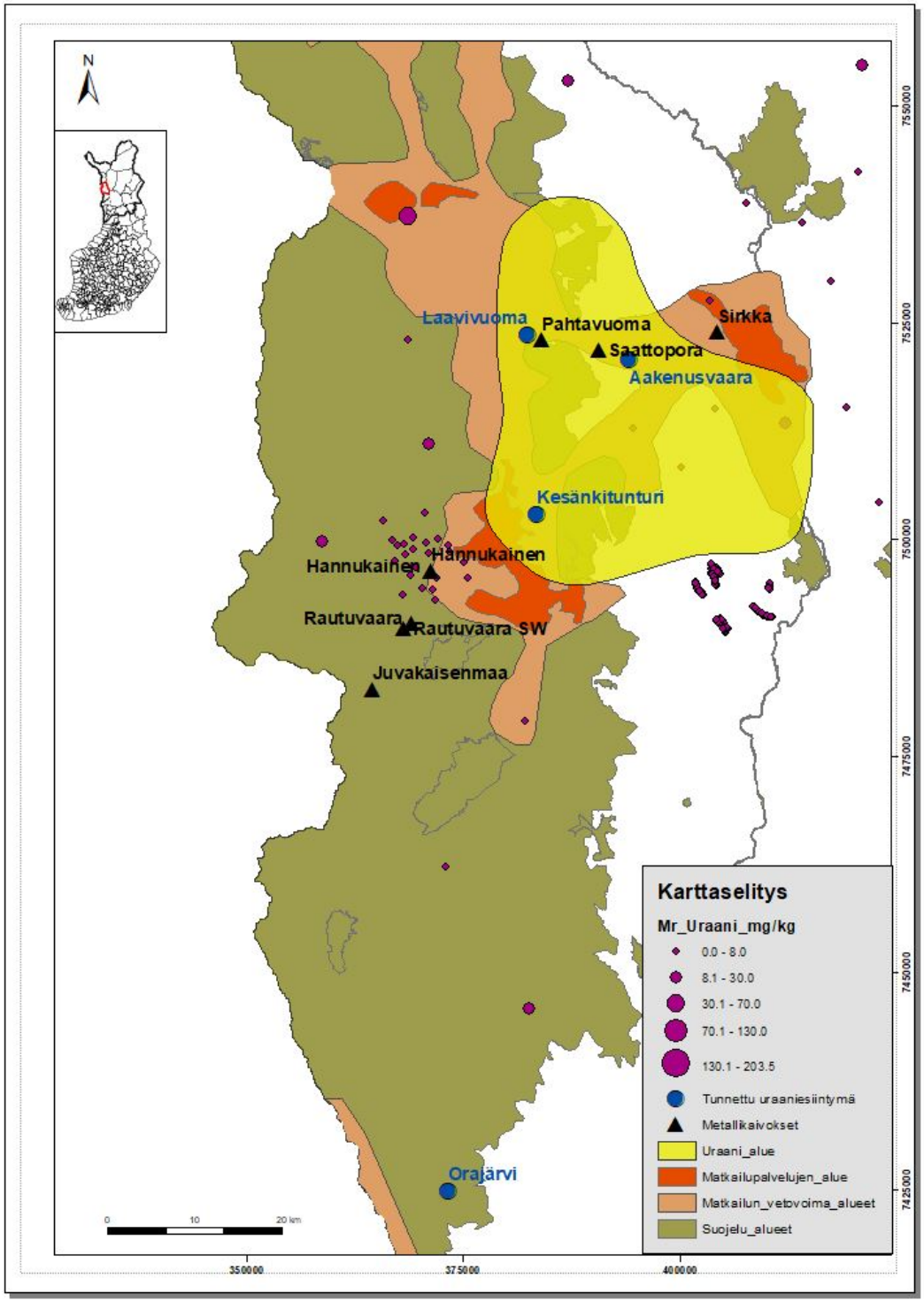
Kesänkitunturin muinainen hiekkaperäinen uraaniesiintymä tavataan Ylläksen serisiittikvartsiitissa. Kesänkitunturissa on laskettu olevan 950 t uraania, keski-pitoisuutenaan 0,065 % U 1 – 4 Mt malmia. Uraani esiintyy uraniniitti-mineraalina. Toisena mineraalina on uraniniitista liuennutta ja uudelleen kiteytynyttä torberniittiä; siinä tavataan myös kuparikiisua ja rikkikiisua. Esiintymä sijaitsee kokonaan Pallas-Yllästunturin kansallispuistossa.

Pahtavuoman juonityyppinen uraaniesiintymä koostuu kolmesta esiintymästä jotka tavataan myös muinaisissa kerrostuneissa kivissä. Uraania sisältävät melkein pystysuorat juonet ja linssit ovat muutaman sentin-metrien levyisiä ja pituus ja syvyydet 100 m. Uraani esiintyy juoniverkostoissa tai pesäkkeinä. Kahden rikkaimman mineralisaation uraani on laskettu olevan 500 t U, keskipitoisuutenaan 0,39 % U. Pääuraanimineraali on uraniniitti, joka esiintyy yhdessä rauta- ja wolframimineraalien kanssa. Uraanin lisäksi esiintymässä tavataan myös 0,14 Mt hopeaa (keskim. 24 g/t), kobalttia (0,01 %), kuparia (0,24 %) ja lyijyä (0,09 %). Pahtavuoman uraanipitoiset juonet liittyvät kallioperän heikkousvyöhykkeisiin. Uraniniitti-juonia on myös Laavivuomassa 1,5 km länteen Pahtavuomasta. Uraniniitti esiintyy juonissa rakeina. Myös pikivälkettä esiintyy juonissa ja pesäkkeinä.

Aakenusvaaran esiintymä sijaitsee 10 km itään Pahtavuoman esiintymästä. Uraani-pitoisia liuskekivenkappaleita tavataan muinaisen soran muodostamassa radio-aktiivisissa kalliopaljastumissa 5 km Aakenusvaaran esiintymästä kaakkoon. Etsiessä muinaisen soran muodostaneiden kivien alkuperää, löytyi Aakenusvaaran esiintymä. Se sijaitsee 2 km kaakkoon Saattoporan kultakaivoksesta. Uraniniitti esiintyy eri tavalla muuttuneina pyöreähköinä rakeina liuskekivikerroksissa levittäytyneenä tai ketjuissa. Pikivälke täyttää pieniä halkeamia.

7 LÄNSI-LAPIN RAUTAOKSIDI-KUPARI-KULTAESIINTYMÄTYYPPI

Alue ja esiintymätyyppi, joka tulee luultavasti jatkossa ansaitsemaan malminetsijöiden huomion Lapissa, ovat GTK:n paikantamat rautaoksidi-kupari-kultaesiintymäalue Länsi-Lapissa (Niiranen 2012, kuva 6). Siihen kuuluvat kaivokset kuten Hannukainen, Pahtavuoma, Saattopora ja Rautuvaara (Nykänen ja muut 2008, Niiranen ja Nykänen 2017). Ruotsin, Suomen, Norjan ja länsi-Venäjän kattava Fennoskandian kilpi tunnetaan merkittävänä malmipotentiaalisena alueena, missä esiintyy yleensä pieniä rauta-kupari-kultaesiintymiä. Niissä on mm. Australiasta tunnettujen suurten ja merkittävien



Kuva 5: Kittilä-Kolarin uraaniprovinssi (Pohjolainen 2010), Lapin Kaiku –hankkeen aineiston moreeninäytepisteet kuningasvesiliukoisine uraanipitoisuuksineen, uraaniesiintymät ja kaivokset (GTK), Kolarin alueen suojelualueet (SYKE) sekä matkailun palvelukeskukset ja vetovoimatekijät (Lapin liitto).

esiintymien tunnusmerkkejä (Niiranen 2012). Esiintymissä voi olla myös merkittäviä määriä uraania. Australian Olympic Dam-monimetalliesiintymässä on yksi maailman tunnetuimmista ja suurimmista uraanikaivoksista.

Rautaoksidi-kupari-kultaesiintymät syntyivät vanhempiin liuskekiviin tunkeutuneiden suolarikkaiden nesteiden vuorovaikutuksessa ympäröivien kivien kanssa (Niiranen 2012). Nämä kuumat nesteet toivat syvyyksistä mukanaan metalleja (mm. rautaa, kultaa, kuparia, uraania), muuttivat ympäröiviä kiviä karsikiviksi ja rikastivat metalleja kallioperän heikkousvyöhykkeisiin, kuten Kolarin siirrosvyöhykkeeseen. Ne voivat muodostaa merkittäviä monimetalliesiintymiä.

Tiedot, joihin tämän Lapin uraanipotentiaalisen rautaoksidi-kupari-kultaesiintymätyypin arvio perustuu, koostuvat alueellisista geotieteellisistä aineistoista, joita GTK on pitkäjänteisesti kerännyt Suomessa vuosikymmenten ajan (Nykänen ja muut 2008, Niiranen ja Nykänen 2017). Tarkat geofysikaaliset matalalentomittaukset (30 m) linjavälillä 200 m ja 10–50 m mittauspistevälillä kattavat melkein koko maan. Koko Suomen maaperän alkuainekoostumus on saatu alueellisesti selville laajoilla systemaattisilla moreeninäytteenotoilla ja analyyseillä. Aineisto koostuu näytteistä, joita otettiin 1 näyte/4 km², ja joista analysoitiin 27 alkuainetta mukaan lukien kullan, harvinaisia maametalleja ja palladiumia joiltakin valituilta alueilta. Analyysissä käytettiin myös koko maan kattavia geologisia karttoja sekä mineraaliesiintymätietokantoja, jotka sisältävät 9800 mineralisoitunutta lohkaretta ja kalliopaljastumaa Suomessa.

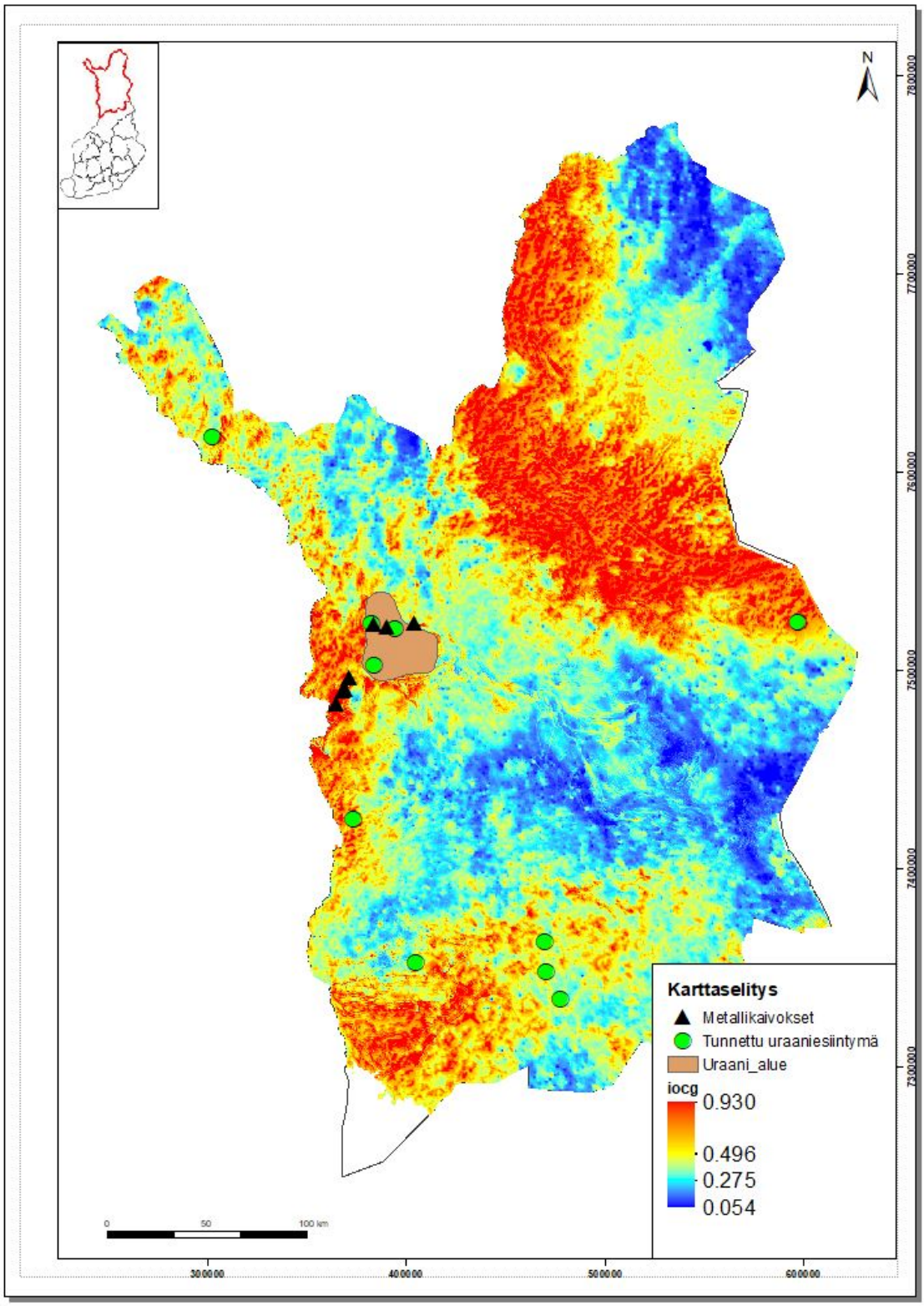
On harvinaista, että valtion keräämiä, melkein koko maan kattavia aineistoja on käytettävissä kohteellisen ja alueellisen malminetsintäpotentiaalin tarkasteluun (Nykänen ja muut 2008, Niiranen ja Nykänen 2017). Näiden aineistojen avulla on voitu määrittää Länsi-Lapissa alue, joka on mahdollisesti potentiaalinen rauta-kupari-kulta-esiintymätyypin uraanillekin. Kittilä-Kolarin tunnetut uraaniesiintymät sijaitsevat juuri tällä alueella. Länsi-Lapin rautaoksidi-kupari-kulta-esiintymätyypin tarkempi alueellinen rajaus ja tarkastelu julkaistaan Lapin Kaiku-hankkeen loppuraportissa.

8 URAANIN ETSINTÄ LAPISSA

Suomessa valtakunnallisilla matalalentomittauksilla saatujen radiometristen karttojen korkeita arvoja, eli anomalioita, on tarkastettu maastossa ja etsitty ja radiometrisesti mitattu niitä aiheuttavia kivilajeja ja mineralisaatioita. Näin on paikannettu kaikki Suomen tunnetut uraaniesiintymät.

Uraanitutkimuksia on tehty Lapissa kolmessa vaiheessa (Lauri 2012) Ensimmäisten, 1950-1960-lukujen taitteessa tehtyjen tutkimusten tuloksena paikallistettiin muutama vaatimaton mineralisaatio, joista yksikään ei ollut taloudellisesti hyödynnettävissä.

1960-1980-lukujen aikana uraaninetsintää Lapissa tekivät ainakin Outokumpu Oy, GTK ja Rautaruukki Oy. Tämän tuloksena löytyi useita uusia uraanimalmiaiheita. Outokumpu löysi Kolarista Kesänkitunturin malmiaiheen vuonna 1965 (Sarikkola 1972). Kesänkitunturiin suunniteltiin vinotunnelia, jonka avulla malmiesiintymä olisi voitu



Kuva 6: Rautaoksidi-kulta-kupariesiintymätyypin (IOCG=Iron oxide –cupper-gold) potentiaalisuus Lapissa, Lapin tunnetut uraaniesiintymät sekä Kolari-Kittilä-alueen kaivokset ja -uraaniprovinssi (GTK).

louhia. Pahtavuoman kupariesiintymän yhteydestä löytyi Outokummun tutkimuksissa uraniniittijuonia vuonna 1971 ja GTK jatkoi aiheen tutkimuksia vuosina 1982-1985 (Pääkkönen 1988).

Outokumpu Oy:n tutkimusten tuloksena löytyi myös Rovaniemen Kuohungin uraani-esiintymä vuonna 1973. GTK tutki Kuohungin aihetta kairaamalla vuosina 1978-1980 ja 1982-1985 (Pääkkönen 1983, 1989). Outokumpu-yhtiön 1970-luvun tutkimukset Lampinsaaren ja Pahtavuoman esiintymistä osoittivat, ettei uraanimalmin hyödyntäminen niistä ollut taloudellisesti mahdollista (Äikäs 2013).

Rautaruukki Oy:n tutkimukset keskittyivät Soklin karbonatiitti-intruusioon, joka löytyi vuonna 1967. Soklissa tutkittiin varsinaisen fosforimalmin lisäksi myös pyrokloori-mineraalissa esiintyvää uraania (Lindqvist & Rehtijärvi 1979). Muita Rautaruukki Oy:n löytämiä esiintymiä olivat Peräpohjan liuskealueella Tervolassa ja Rovaniemellä sijaitsevat fosforiittiset Mustamaan (1979) ja Ranta-Tulkkivaaran (1984) aiheet (Korvuo 1982, Kvist 1987). GTK:n tutkimuksissa löytyneitä aiheita ovat muun muassa Palkiskuru (1980), Aakenusvaara (1981) ja Laavivuoma (1983).

Uraanin etsintää vastustettiin mm. Pahtavuomassa, minne perustettiin aktivistileiri (Koivunen ja muut 1980). Tämä oli ensimmäinen kaivostoimintaan liittyvä kiista Suomessa, osana suomalaisen ympäristöprotestin toista aaltoa (Rannikko 1994).

Uraanin hinnan romahdettua Tchernobylin ydinonnettomuuden jälkeen uraanin etsintä päättyi Suomessa 1980-luvun lopulla (Äikäs 2006). Suomen sijainti Fennoskandian peruskalliokilvellä, arkeeisten ja proterotsooisten kivilajien rajalla, on kaikesta huolimatta edelleen otollinen uraanimalmien etsinnälle (Äikäs 2006, 2013). Suomen kallioperä on samanlaista ja –ikäistä kuin Kanadassa ja Australiassa, missä on tunnettuja uraanintuotantoalueita. Uraaninetsintä alkoikin Suomessa uudelleen vuonna 2004, jolloin haettiin ensimmäiset valtausvaraukset. Toukokuussa 2006 lähes kaikki tunnetut uraaniaiheet olivat varauksessa, ja viisi yhtiötä oli hakenut valtauksia useille alueille Etelä-, Itä- ja Pohjois-Suomeen (Äikäs 2006). Aiemmasta poiketen, 2000-luvulla uraanitutkimuksia tekivät ulkomaiset yksityisyritykset. Yhtiöt keskittyivät pääasiassa tekemään lisätutkimuksia (kairauksia ja radonmittauksia) tunnetuissa malmikohteissa, mutta tulokset jäivät vaatimattomiksi (Lauri 2012). Uusia uraanimalmiaiheita löytyi 2000-luvulla Lapista kolme kappaletta AREVA Resources Finland Oy:n tutkimusten tuloksena (Lauri 2012). Ranuan Mätäskairasta Asentolamminojan varrelta löytyi vuonna 2007 laaja uraanimalmilohkareikko. Maastotutkimukset osoittivat malmilohkareikon laajuudeksi ainakin 9 km², mutta sen alueelta ei löydy yhtään kalliopaljastumaa. Asentolamminojan lohkareikko sijaitsee noin 15 km Kuohungin uraani-malmiaiheen eteläpuolella. Uraaniviitteet jatkuvat Asentolamminojalta noin 10 km eteläkaakkoon Isokankaalle, jossa on säteileviä paljastumia. Asentolamminojan aihetta ei ole toistaiseksi tutkittu tarkemmin, mutta vaikuttaa siltä, että Kuohungin ja Isokankaan välille voidaan rajata uraanipotentiaalinen vyöhyke. Toinen 2000-luvun löytö tehtiin Ylitornion ja Rovaniemen rajalta Rumavuoman alueelta, missä oli jo GTK:n kupari-malmitutkimuksissa 1990-luvulla saatu viitteitä säteilystä. Rumavuoman uraaniaihe

sijaitsee Peräpohjan liuskejaksolla samassa kerrostasossa Mustamaan 1970-luvulla löydetyn uraaniaiheen kanssa. Tosin Mustamaasta poiketen Rumavuoma ei näytä olevan fosforiitti-tyypin esiintymä. Rumavuoman alueella ei ole toistaiseksi tehty tarkempia tutkimuksia.

Merkittävin uusi löytö oli Ylitornion Rompaksen kultauraaniesiintymä, joka löytyi vuonna 2008 AREVA Resourcesin työn tuloksena (Lauri 2012). Rompaksen malmiaihe sijaitsee Peräpohjan liuske-vyöhykkeen ja Keski-Lapin granitoidikompleksin rajavyöhykkeessä geologisesti huonosti tunnetulla alueella.

Maastohavaintojen perusteella Rompaksen alueella on kultaa ja uraania sisältäviä paljastumia 6 km pitkällä ja yli 200 m leveällä vyöhykkeellä. Mawson Oy on tehnyt alueella kairauksia vuodesta 2012 lähtien. Kulta ja uraani esiintyvät sivukiviä leikkaavissa kvartsi-kalkkisilikaattijuonistossa. Esiintymässä on myös kobolttia ja tämän hetkinen etsintä keskittyykin kultaan ja kobolttiin ja on laajentunut Rajapalon alueelle, missä ei tavata uraania.

Suomessa ei ole tällä hetkellä yhtään uraaniesiintymää, joka olisi kaupallisesti hyödynnettävissä: kaikki tunnetut esiintymät ovat liian pieniä ja niiden uraanipitoisuudet ovat liian matalia (Lauri 2012, Äikäs 2013).

Uraanin etsintä aiheutti uraanikiistaksi kutsutun ympäristöprotestiliikehdinnän (Eerola 2008, 2015, Litmanen 2008). Tämä oli toinen kaivostoimintaan liittyvä kiista Suomessa. Lapissa tämä ilmeni Soklin kaivoshankkeen- ja uraanin etsinnän vastustuksena Kesänkitunturin, Ranuan ja Rompaksen alueilla (Eerola 2015, 2017).

Uraanikiistaa ja meneillään olevaa kaivoskiistaa voidaan mahdollisesti pitää vuosituhannen vaihteen globalisaatiokriittisen liikkeen (ks. Lindholm 2005) jälkeisen suomalaisen ympäristöprotestin kuudentena aaltona, vaikka sen arviointi saattaa olla vielä liian aikaista (Eerola 2015).

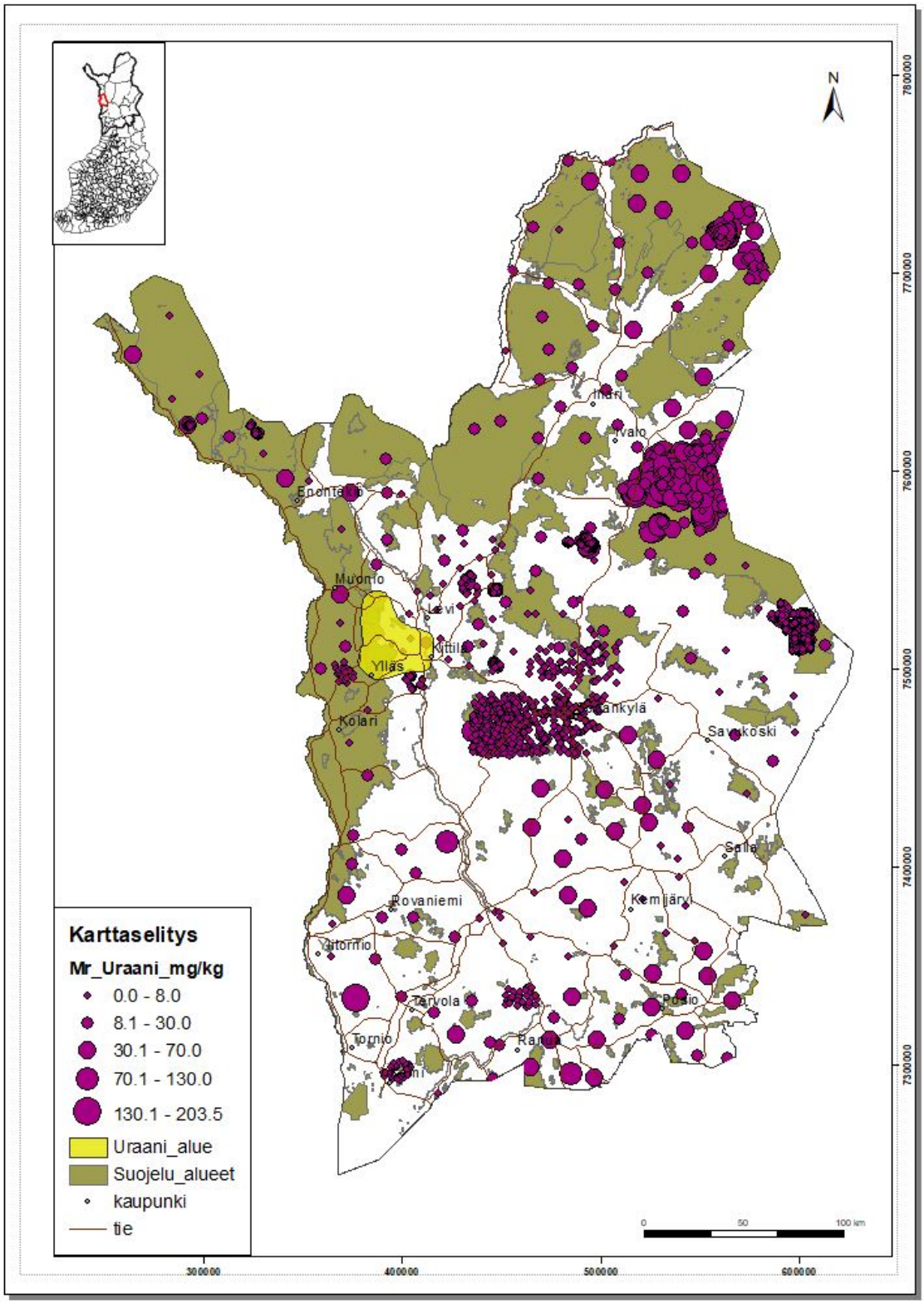
Vuosien 2006-2008 uraanikiista johti kaivoslain uusimiseen vuonna 2011 (Äikäs 2013, Eerola 2015, 2017). Siinä huomioidaan ympäristö- ja sosiaaliset näkökohdat aiempaa voimakkaammin, mikä muutti lupamenettelyä. Aikaisemmin uraanin ja thoriumin kaivostuotannon ja rikastusluvan antoi valtioneuvosto, mutta uuden kaivoslain mukaan siihen tarvitaan myös sijaintikunnan puolto. Paikallistason vaikutusmahdollisuudet paranivat ratkaisevasti, kun sijaintikunta voi estää uraanikaivostoiminnan alueellaan. Tämä aiheuttaa kaivosyhtiöille haasteita suunnittelemansa toiminnan turvallisuudesta ja ympäristökelpoisuudesta sekä niiden vakuuttamisesta asukkaille ja kunnan päätöksentekijöille. Uraanikiista toi keskusteluun myös kaivostoiminnan yhteiskuntavastuun, sosiaalisen toimiluvan ja sidosryhmätoiminnan merkityksen (Eerola 2008, 2009). Uraanikiistan päättyessä joidenkin uraanin etsinnän vastustajien huomio kiinnittyi kaivos- ja malminetsintähankkeisiin, joiden malmissa on pääkaivannaisten lisäksi myös uraania, kuten Rompas ja Sokli Lapissa (Eerola 2015).

9 URAANI JA MAANKÄYTTÖ LAPISSA

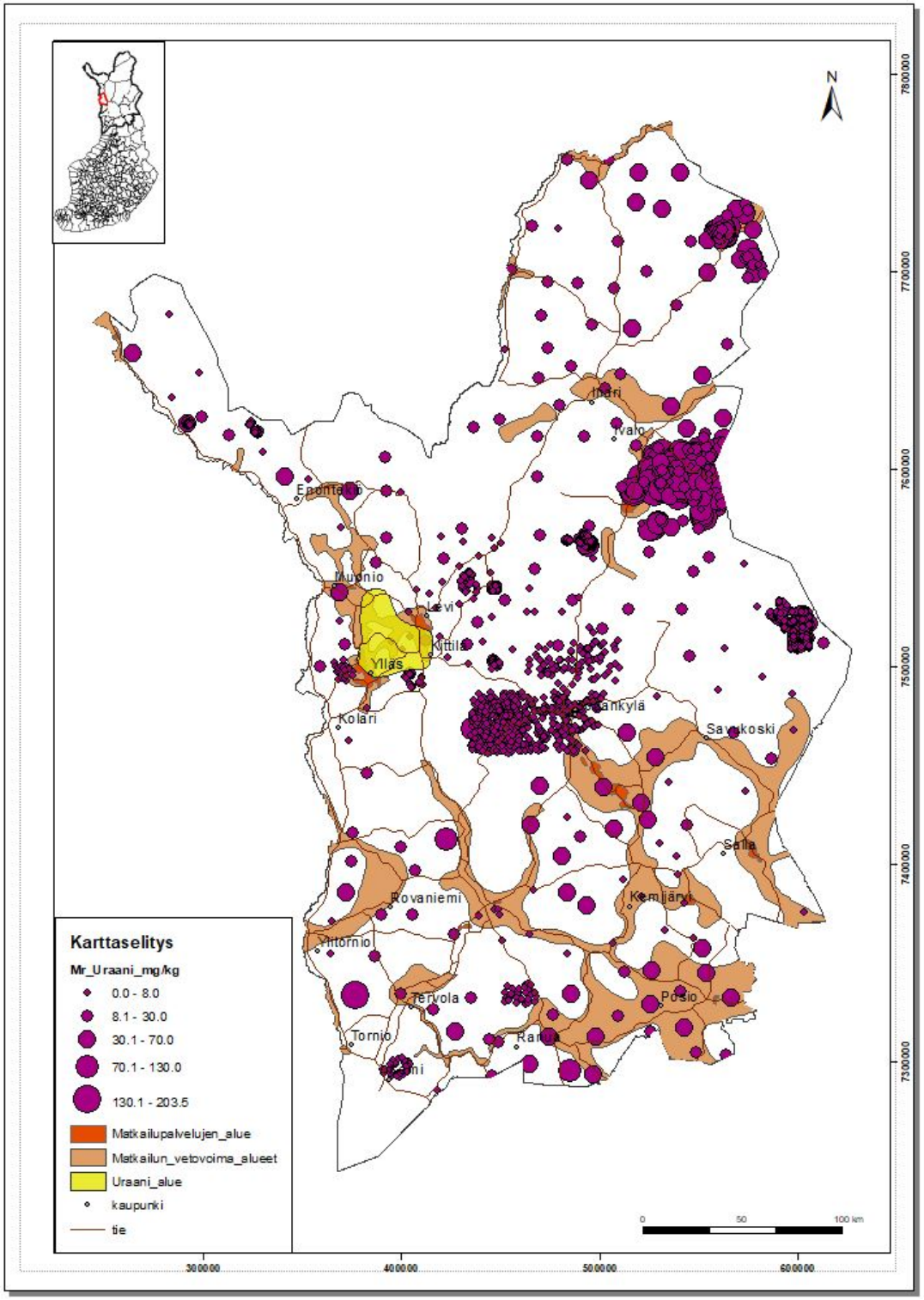
Erilaisten paikkatietoaineistojen kasvava saatavuus ja käyttö mahdollistavat erilaisten temaattisten karttojen päällekkäisen alueellisen tarkastelun. Tämä on tärkeää mm. suunnittelun ja kaavoituksen kannalta. Näin esimerkiksi geokemiallisen ja erilaisten maankäyttöön liittyvien paikkatietoaineistojen pohjalta on mahdollista tarkastella maankäyttöä myös sellaisilla alueilla, joilla uraania esiintyy. Lapissa, kuten koko Suomessa, ei ole uraanikaivoksia, mutta uraani liittyy esiintymiin, suljettuihin kaivoksiin, suunnitteilla oleviin kaivoshankkeisiin sekä aktiivisiin malminetsintäkohteisiin. Suljettujen kaivosten tai kaivoshankkeiden uraanilla saattaa olla Lapissa merkitystä Saattoporan kulta- ja Pahtavuoman kuparikaivosten, Rautuvaaran rauta-kupari-kaivoksen rikastusjätealtaiden sekä Soklin fosfaattiesiintymän kaivoshankkeen ympäristöissä. Malminetsintäkohteista Rompas-Rajapalon kulta-kobolttiesiintymässä on myös uraania.

Länsi-Lapin Kolari-Kittilän uraaniprovinssin esiintymät ovat pieniä ja epätaloudellisiksi todettuja, eikä niihin todennäköisesti tule kohdistumaan uraanin etsintää tai hyödyntämistä, mutta sitä ei voida kokonaan sulkea pois. Suomi lisärakentaa ydinvoimaa ja pienetkin tunnetut uraanimalmiot voivat olla potentiaalisia poikkeustilanteiden kansallisia huoltovarmuusvarantoja. Alueen sijainti rautaoksidi-kupari-kultapotentiaalisella esiintymätyyppivyöhykkeellä merkitsee myös sitä, että siihen saattaa kohdistua muiden kaivannaisten malminetsintää ja kaivostoimintaa, joissa uraani pitää ottaa huomioon tai on jopa mahdollinen sivutuote. Esiintymätyyppivyöhykkeen ja uraaniprovinssin sijainti luonnonsuojelualueella (Kuvat 5, 7), Ylläksen ja Levin matkailukeskusten välissä ja läheisyydessä (kuva 8) sekä poronhoidon sydänalueella (luokka 4, kuva 9) saattaa tosin vaikuttaa malminetsintätoimiin ja kaivoshankkeisiin. Useiden herkkien alueiden päällekkäisyys muodostaa eräänlaisen ”*hot spotin*”. Tällaisia alueita on luokiteltu ja ehdotettu *no-go zone*:iksi, eli alueiksi, joille ei suositella malminetsintää ja kaivostoimintaa (Goodland 2012). Uraanin etsintä tuollaisella alueella ei aina välttämättä ole kestävän kehityksen ja yritysten yhteiskuntavastuun mukaista toimintaa ja se saattaa herättää kiistoja. Kiistojen välttämiseksi yritysten olisi otettava nämä seikat huomioon toimintansa suunnittelussa.

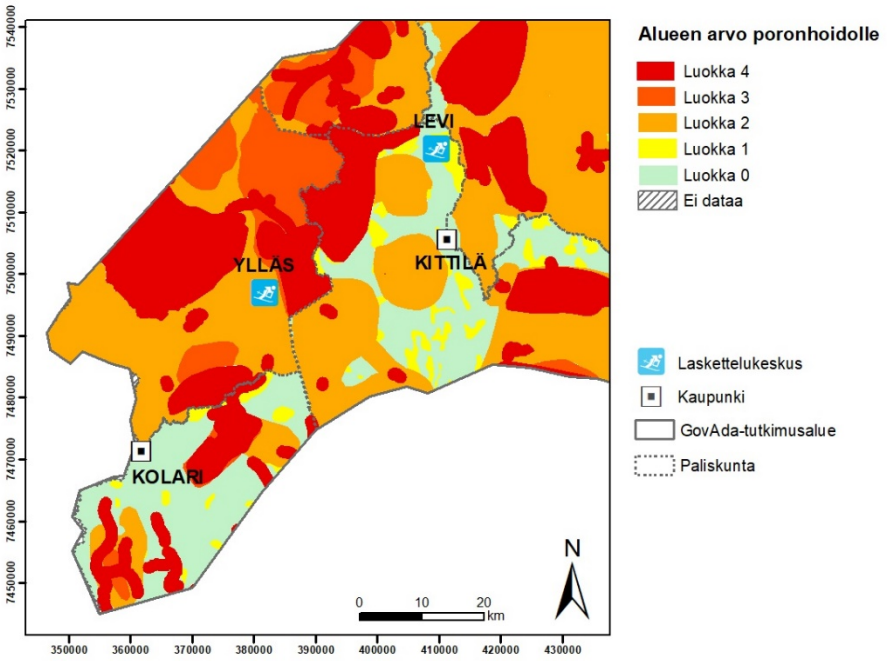
Juomasuon, Hannukaisen, Pahtavuoman ja Saattoporan kaivosten uraania on myös Rautuvaaran kaivoksen (kuva 5) rikastejätealtaissa, jonne näiden kaivosten malmit tuotiin rikastettavaksi. GTK tutki Rautuvaaran kaivoksen rikastusjätealtaita ja totesi niiden sisältävän runsaasti uraania vain hyvin ohuessa pintaosan rikastushiekka-kerroksessa (50-60 cm syvyydellä, Juomasuon malmin rikastushiekka, Räisänen ja muut 2015). Määrä on suurempi kuin esim. luonnontilaisilla, kosteilla irtomaa-alueilla. Uraani on sitoutuneena uraanioksideihin, joista uraania voi liueta em. hapettumisreaktioiden seurauksena. Säteily on kuitenkin alueen taustasäteilyn tasoa (Räisänen ja muut 2015.) Uraanipitoisuudet olivat pohjoisen vyöhykepadon suotovesissä 59-466 µg/l, rikastushiekan jätealueen entisen saostusaltaan vedessä <4,5 µg/l, jätealueen



Kuva 7: Lapin suojelualueet (SYKE) ja Lapin Kaiku-hankkeen moreeninäytteiden kuningasvesiliukoiset uraanipitoisuudet sekä Kittilä-Kolarin uraaniprovinssi (GTK).



Kuva 8: Lapin matkailun palvelukeskukset ja vetovoimatekijät (Lapin liitto) ja Lapin Kaiku-hankkeen moreeninäytteiden kuningasvesiliukoiset uraanipitoisuudet ja Kittilä-Kolarin uraaniprovinssi (GTK).



Kuva 9. Poronhoitoaineiston luokittelukartta sekä hiihtokeskukset Kolari-Kittilän alueelta. Poronhoitoaineiston luokittelu perustuu GovAda-hankkeessa tehtyyn arvottamiseen (Kivinen ja Markovaara-Koivisto 2019). Arvottamisen perusteena on käytetty alueiden merkittävyyttä poroelinkeinon elinvoimaisuuden kannalta. Luokittelukartta perustuu Poronhoidon paikkatiedot -aineistoon (11/2017, © SYKE, LUKE, Paliskuntain yhdistys ja paliskunnat). Luokat: Ei tietoa=Toimitettujen paliskuntien alueiden ulkopuolella; 0=Ei mikään muista luokista GovAda-tutkimusalueella; 1=Luppo- ja jäkäläalueet; 2=Muut laidunalueet; 3=Kevätlaitumet; 4=Erotusaita- ja kokoamisalueet, kuljetusreitit (1 km bufferoinnilla) ja parhaat kesä- ja talvilaitumet.

ylivuotovesissä, alapadon suotovedessä ja ympärysojassa <6 µg/l ja Niesajoen ylä- ja alajuoksulla <1 µg/l. Talousveden uraanipitoisuudelle ei ole asetettu Suomessa raja-arvoa. Säteilyturvakeskuksen suosituksen mukainen raja-arvo uraanille on 100 µg/l, mikä vastaa EU:n juomavesidirektiivissä (Council Directive 98/83/EC) esitettyä viitteellistä vuosiannosta 0,1 mSv/vuosi. Maailman terveysjärjestö WHO suosittaa juomaveden uraanipitoisuuden ylärajaksi 15 µg/l.

Jätealtaille suositeltiin jatkohoitotoimenpiteitä, kuten kuivumisen estämistä kyllästämällä ne vedellä, kuivuneiden altaiden peittämistä pölyämisen estämiseksi sekä altaiden aitaamista, jotta porot ja muut eläimet eivät pääsisi juomaan niiden hapanta, metalli- ja uraanipitoista vettä (Räisänen ja muut 2015).

Soklin systemaattisesti otetuista moreeninäytteissä uraanipitoisuudet ovat suuria vain paikoin (kuva 4). Alue on kuitenkin vedenjakaja-alueella, siellä on harjupohjavesialue, se

on Natura 2000-alueiden välissä, ja siellä harjoitetaan poronhoitoa (kuva 4). Siten ympäristön maankäyttöön ja sen mahdollisiin ympäristövaikutuksiin tulee kiinnittää erityistä huomiota, ja rakentavan vuoropuhelun käynti eri toimijoiden kesken on erittäin tärkeää.

Malminetsintäyhtiö Mawson Oy etsii parhaillaan kobolttia ja kultaa Yli-Tornion uraanirikkaalla Rompas-Rajapalon alueella. Tulokset ovat osoittautuneet lupaaviksi, ja tutkimukset tulevat todennäköisesti jatkumaan vielä vuosia tai jopa vuosikymmeniä. Alueella on Natura 2000-luonnonsuojeluohjelman alueita, ja seutu on suhteellisen harvaan asuttua. Alueelle ei kohdistu matkailualan tarpeita, mutta siellä harjoitetaan poronhoitoa. Mahdollista kaivostoimintaa suunniteltaessa uraani ja sen mahdolliset ympäristövaikutukset tulee selvittää ja ottaa huomioon.

Lapissa on myös lupaavia uraaniesiintymiä, joita ei ole vielä tutkittu. Tällaisia ovat Asentolamminoja ja Rumavuoma Etelä-Lapissa (kuva 3).

Uraanin hajoamistuotteena syntyvä radon on mahdollinen terveysriskitekijä uraanialueilla, joita suunnitellaan rakennuskäyttöön. Tämä tulisi ottaa kaupunkisuunnittelussa huomioon. Uraanirikkailla alueilla porakaivojen vesissä saattaa olla myös luontaisesti suuria uraani- ja radonpitoisuuksia. Suomen geokemian atlaksen aineistossa tutkittujen porakaivovesien uraanipitoisuudet ovat huomattavia Keski-Lapin liuskejakson alueella (Koljonen 1992). Tätä käsitellään tarkemmin Lapin Kaiku-hankkeen loppuraportissa.

10 MITÄ GEOFYSIIKKA JA RADIOMETRISET MITTAUKSET OVAT?

Geofysiikka on maan ja lähiavaruuden fysikaalisten ominaisuuksien tutkimista. Käytännössä esimerkiksi pohjavesitutkimuksissa voidaan olla kiinnostuneita kallioperän pinnasta maan sisällä, jotta saadaan määriteltyä pohjavesialueen koko kolmiulotteisesti. Kun taas mitataan sähkönjohtavuutta kaatopaikan ympärillä, voidaan saada selville, leviääkö sieltä saastuneita vesiä ympäristöön. Geofysiikan mittaukset tehdään kuljettamalla mittalaitetta tutkimusalueella kävellen, ajoneuvolla, veneellä tai lentäen. Mittauksia voidaan myös tehdä kairanreiässä maan sisällä, mutta tyypillisesti geofysiikan mittauksissa saadaan tietoa maasta kajoamatta siihen. Mittaukset voidaan jakaa mittaustavan perusteella lento-, maasto- ja reikämittauksiin.

Geologian tutkimuskeskus on tehnyt geofysiikan lentomittauksia Suomessa 50-luvulta alkaen (Kuva 9). Tässä raportissa käytetään vuosina 1972–2007 mitatun matalalentoohjelman radiometrisiä tuloksia. Mittausohjelmaan kuului kolme samanaikaisesti tehtävää mittausta, eli radiometrisen lisäksi tehtiin myös magneettinen ja sähkömagneettinen mittaus. Lentokorkeus oli 30 metriä ja mittauslinjat sijaitsivat 200 metrin päässä toisistaan. Mittausten tarkoituksena on saada koko maan kattavaa tietoa maankamarasta. (Peltoniemi, 2005; Hautaniemi et al. 2005)

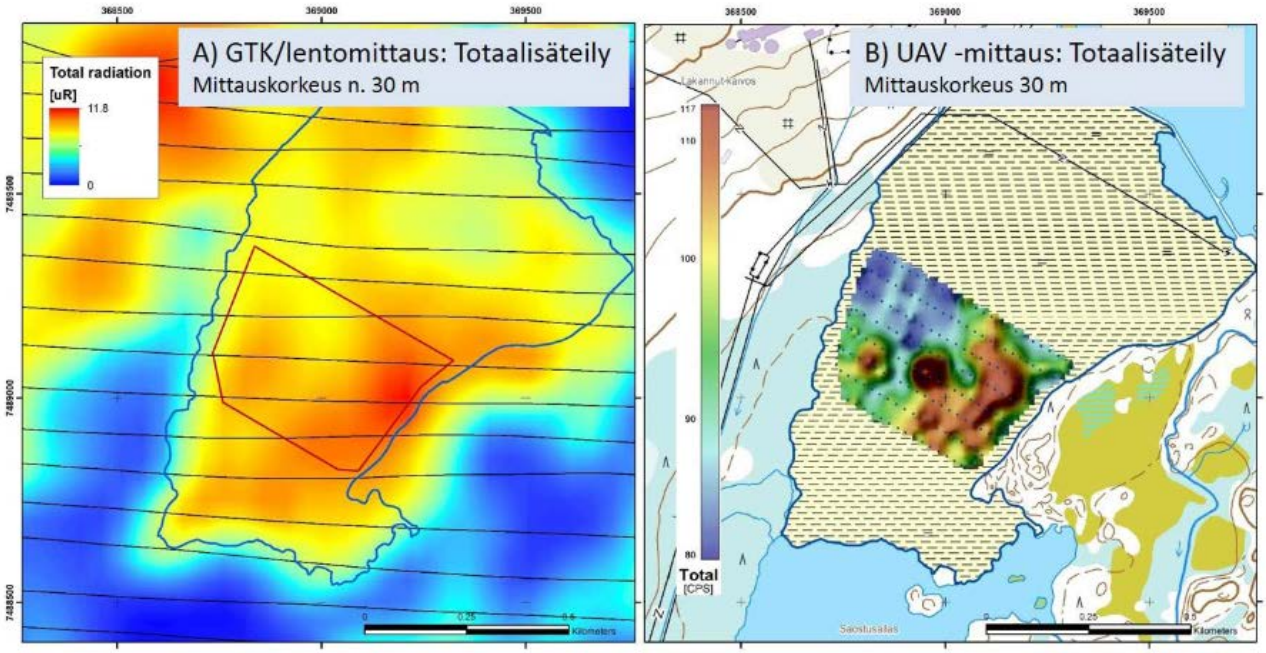
Kuva 9: Geologian tutkimuskeskuksen lentomittausryhmä Lockheed Lodestar -lentokoneen edessä 1960-luvun puolivälissä. Kuva: GTK.

Radiometrisessä mittauksessa tutkitaan toriumin, uraanin ja kaliumin pitoisuutta maassa maan luonnollisen radioaktiivisen säteilyn avulla. Maan mantereisessa kuoressa on runsaasti kaliumia, keskimäärin 2,35 %. Sen sijaan uraani ja torium ovat huomattavasti harvinaisempia, ja niiden pitoisuus mitataan miljoonasosina. Mantereisessa kuoressa on keskimäärin 3 ppm (parts per milloin, miljoonasosaa) uraania ja 12 ppm toriumia. (Hyvönen et al., 2005)

Kaliumin säteilyä mitataan suoraan 40K-isotoopin säteilyenergian perusteella. 40K on kaliumin isotooppi, jossa on yhteensä 40 atomin ytimessä sijaitsevaa hiukkasta, eli protonia ja neutronia. Toriumin ja uraanin pitoisuus sen sijaan mitataan epäsuorasti niiden hajoamistuotteiden mukaan. Uraanisäteily mitataan vismuutin 214Bi-isotoopin ja toriumsäteily talliumin 208Tl-isotooppien säteilyenergian perusteella. Mittaustuloksia käsitellessä oletetaan, että radioaktiivinen hajoamissarja on tasapainossa, eli hajoamissarjasta ei poistu jäseniä eikä siihen tule uusia mukaan. Toriumin kohdalla tämä pitää yleensä paikkansa, mutta uraanin kohdalla ei välttämättä. Tasapaino-oletus tuo epävarmuutta tuloksiin, joten toriumin ja uraanin pitoisuutta ei ilmoiteta

varsinaisena vaan näennäisenä pitoisuutena eli ekvivalenttiuraanina, eU, ja ekvivalentti-toriumina, eTh. Molempien yksikkönä on miljoonasosa, ppm. (Hyvönen et al., 2005; IAEA, 2003)

Radiometriset mittalaitteet mittaavat gammasäteilyä, jonka energian perusteella voidaan tunnistaa, mistä radioaktiivisesta ytimestä se on lähtöisin. Monilla luonnossa esiintyvillä alkuaineilla on radioaktiivisia isotooppeja, mutta vain kaliumia, uraania ja toriumia on niin paljon ja niillä on riittävästi energiaa, että niiden pitoisuutta voidaan selvittää radiometrisellä mittauksella. Datan käsittelyssä tehdään paljon korjauksia, jotta esimerkiksi mittauskorkeus tai avaruuden taustasäteily ei vaikuta lopullisiin tuloksiin. Radiometrisen mittaukset ovat maankamaran magneettisten ominaisuuksien mittausten ohella käytetyimpiä lentogeofysiikan menetelmiä. Kuvassa 10 esitetään esimerkki radiometrisen mittauksen tuloksista samalta alueelta kahdella eri tavalla mitattuna. (Hyvönen et al. 2005)



Kuva 10: Esimerkki radiometrisen lentomittauksen totaalisäteilytuloksista. GTK:N UAV-MEMO-projektissa verrattiin GTK:n lentokoneella tehdyn ja projektissa lennokilla tehdyn radiometrisen mittauksen tuloksia. Kun linjaväli on pienempi, data on huomattavasti yksityiskohtaisempaa. A) GTK:n lentomittaus vuodelta 2002, lentokorkeus 30 m ja linjaväli 200 m. B) Lennokkimittaus, lentokorkeus 30 m, linjaväli 50 m. Kuva: Salmirinne et al, 2017.

Gammasäteily vaimenee nopeasti, joten noin 99 % radiometrisessä mittauksessa mitattavasta säteilystä tulee 0-30 sentin syvyydeltä maanpinnasta (Zotimov, 1971). Tuloksia tulkitessa on otettava huomioon, että Suomessa jääkausi on siirtänyt maapeitteitä eikä maaperän koostumus aina vastaa kallioperän koostumusta. Myös vesi

kaikissa olomuodoissaan vaimentaa gammasäteilyä nopeasti. Radiometristen mittausten tulokset esitetäänkin usein karttoina, joista on poistettu data vesistöjen kohdalta. Toisaalta tämän vuoksi radiometrisiä mittauksia voidaan käyttää mm. suon vesipitoisuuden arviointiin.

Radiometristä menetelmää käytetään suo- ja maaperätutkimuksissa, ympäristön radioaktiviisuuden tarkkailussa, lumen vesipitoisuuden selvittämisessä, geologisessa kartoituksessa, kallioperätutkimuksissa, uraanin etsinnässä ja muussa malmin-etsinnässä. Maaperätutkimuksissa yhdistetään usein GTK:n lentomittauksen sähkö-magneettiset ja radiometriset tulokset, jolloin voidaan esimerkiksi arvioida maapeitteen paksuutta ja luokitella maaperän aineksia. Radiometrinen menetelmä kuvaa kallioperää Pohjois-Suomessa paremmin kuin Etelä-Suomessa, jossa on paksummat maapeitteet ja enemmän peltoja. (Airo et al. 2014)

Radiometrisistä tuloksista lasketaan usein toriumin, uraanin ja kaliumin pitoisuuksien suhteita, joilla saadaan tarkempaa tietoa kuin pelkistä pitoisuuksista. Esimerkiksi kiven hydrotermiseen muuttumiseen liittyy kaliumin määrän kasvaminen ja toriumin määrän pieneneminen, joten suuri K/Th-suhde voi viitata hydrotermiseen muuttumiseen. (Hyvönen et al. 2005).

11 GTK:N LENTOMITTAUS: URAANI, TORIUM JA KALIUM LAPISSA

11.1 Taustatietoa

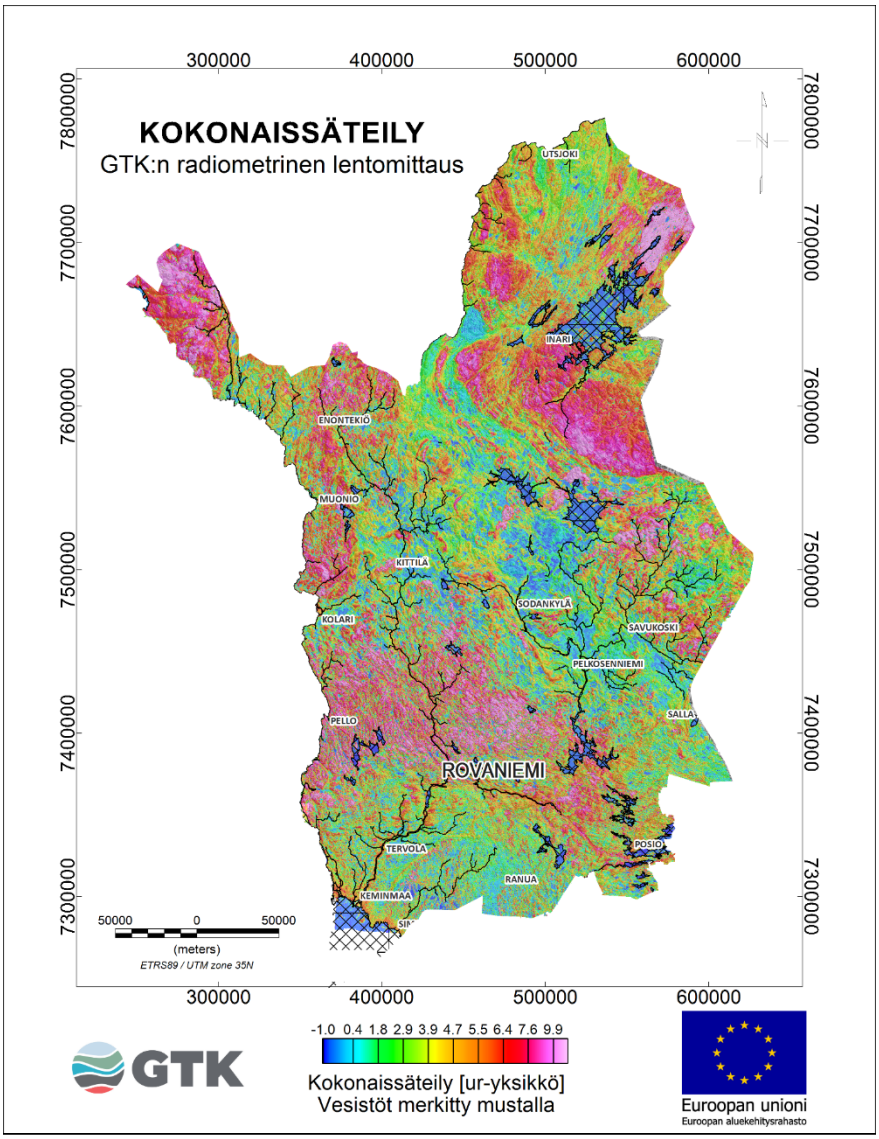
GTK:n radiometrisessä lentomittauksessa mittauspisteiden etäisyys toisistaan eli pisteväli on 60–70 metriä. Mittaustulos ei kuvaa yksittäistä pistettä vaan ellipsoidin muotoista aluetta, jonka halkaisija on arviolta 200 m (Hyvönen et al. 2005). Lento-geofysiikkaa käytetään yleensä kattamaan laajoja alueita, kuten koko valtioita tai maakuntia tai malminetsinnällisesti kiinnostavia alueita. Tulosten perusteella valitaan kiinnostavia kohteita, joissa tehdään tarkentavia maastomittauksia. Esimerkiksi tässä raportissa esiteltävästä koko Lapin lentoradiometrisesta datasta voi katsoa kalium-, torium-, ja uraanipitoisuuden pääpiirteet. Jos tuloksissa näkyy kiinnostava alue, voi verrata, löytyykö siitä myös geokemian havaintoja.

Lisäksi GTK:n lentomittauksista on saatavilla 1:20 000–mittakaavaiset kartat GTK:n Hakku-palvelussa osoitteessa hakku.gtk.fi. Kartat löytyvät Paikkatietotuotteista nimellä Geofysikaaliset matalalentokartat 1:20 000 (tilanne elokuussa 2019). Palvelussa voi valita haluamansa alueen ja ladata kartan itselleen. Suurinta osaa palvelussa olevista aineistoista voi myös tarkastella suoraan Hakku-palvelun karttanäkymässä verkkosivulla.

11.2 Tuloskartat

Lapin radiometriset mittaustulokset esitetään raportin liitteinä. Kokonaissäteily eli kaikki mitattu säteily esitetään liitteenä 1 ja lisäksi esimerkin vuoksi raportin lomassa (Kuva 11). Sen yksikkö on ur (unit of radiation). Jos maassa on yksi miljoonasosa tasapainossa olevaa uraania, sen pitoisuus on 1 ur (Geologian tutkimuskeskus, 2016). Yksikkö on kehitetty, jotta eri tavoin mitattuja kokonaissäteilytuloksia voidaan verrata keskenään

(IAEA, 2003). Karttaan on merkitty vesistöt mustilla viivoilla ja ruudutuksella. Kartasta nähdään, että vesi vaimentaa gammasäteilyä tehokkaasti.



Kuva 11: Lapin alueen kokonaissäteily GTK:n radiometrisen lentomittauksen mukaan.

Esimerkiksi Keski-Lapin graniittialue, Sevettijärven ja Suolisjärven alue aivan koillisimmassa Lapissa sekä Nattasen graniitti Vuotson lähellä Sodankylässä erottuvat voimakkaasti säteilevinä. Paljon piitä sisältävät kivissä, kuten granitoideissa, on muihin kiviin verrattuna paljon kaliumia, toriumia ja uraania, joten ne näkyvät radiometrisillä kartoilla. Geologisilla termeillä ilmaistuna felsisissä kivissä on huomattavasti enemmän kuin säteilyä mafisissa. (Hyvönen et al. 2005).

Radiometriset tulokset esitetään usein kolmen muuttujan esityksenä (ternary image), jossa uraania vastaa sininen väri, kaliumia punainen ja toriumia vihreä. Valkoinen väri tarkoittaa, että kaikista kolmesta alkuaineesta lähtöisin olevaa säteilyä on paljon. Mustan värin kohdalla kaikkea säteilyä on vähän. Lapin radiometristen tulosten kolmen muuttujan esitys on liitteenä 2. Kolmen muuttujan esitys täydentää kokonaissäteily-kartan antamaa kuvaa alueen kertomalla, mihin alkuaineeseen mitattu säteily liittyy missäkin. Esimerkiksi Keski-Lapin granitoidikompleksi näkyy erottuu vaaleana, eli siellä on runsaasti kaliumia, toriumia ja uraania. Inarijärvestä etelään ja lounaaseen sijaitseva alue erottuu ympäristöön keltaisen ja vihreän sävyisenä, mikä liittyy korkeaan torium-pitoisuuteen uraaniin ja kaliumiin verrattuna. Sama alue näkyy myös kokonaissäteily-kartassa.

Uraanipitoisuus esitetään liitteenä 3. Suurin osa korkeista uraanipitoisuuksista liittyy granittiin ja granitoidiin. Keski-Lapin granitoidivyöhykkeellä on ympäristöään korkeampia uraanipitoisuuksia, samoin edellä mainittu Sevettijärven ja Suolisjärven alue Inarijärvestä koilliseen ja käsivarren luoteisin osa erottuvat kartalta.

Kalium-pitoisuus esitetään liitteenä 4. Kalium-pitoisuuskartta muistuttaa pääpiirteissään uraanipitoisuuskarttaa, mutta esimerkiksi Lapin granuliittikompleksi Saariselältä ja Ivalosta luoteeseen ja lounaaseen erottuu paremmin kalium-pitoisuuskartalla.

Torium-pitoisuus esitetään liitteenä 5. Maakunnan mittakaavassa tarkasteluna se muistuttaa huomattavasti aiempia karttoja.

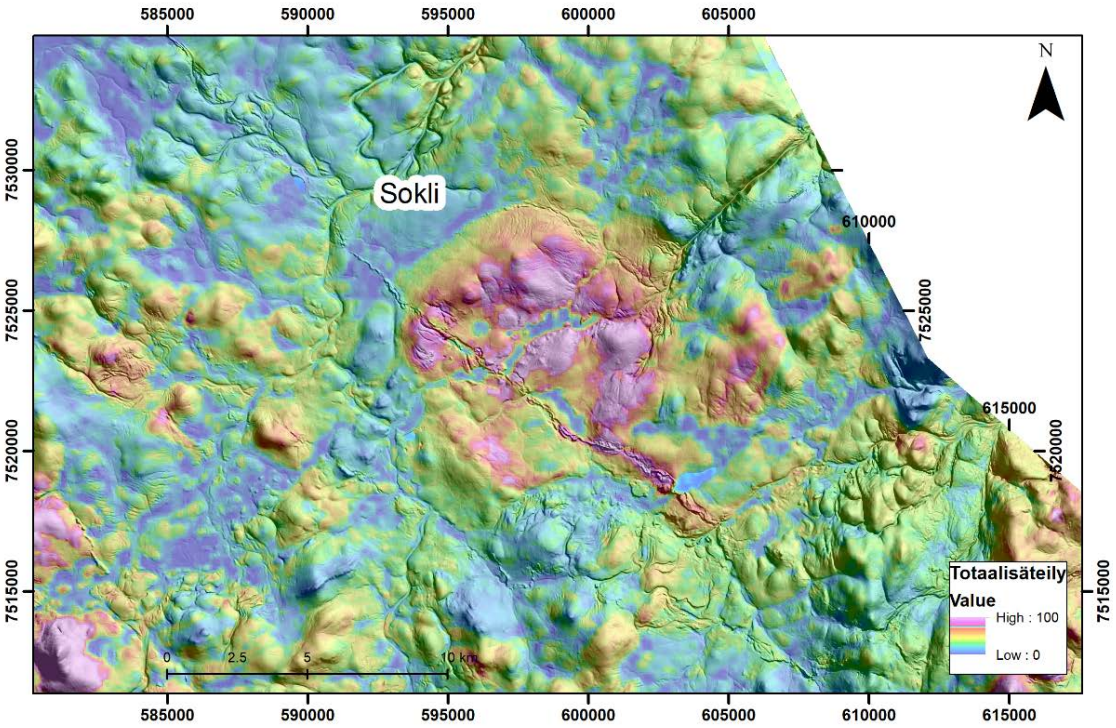
Tuloksista on laskettu kaliumin ja toriumin pitoisuuksien suhde eli K/Th-suhde, joka esitetään karttana liitteenä 6. Laskennassa ei ole huomioitu kaikkein pienimpiä pitoisuusarvoja, joten kartassa on tyhjää eli valkeaa erityisesti vesistöjen kohdalle. Erittäin pienet arvot voivat vääristää suhteen laskemista. Kuten edellä mainittiin, korkea K/Th-suhde liittyy esimerkiksi hydrotermiseen muuttumiseen, joka puolestaan liittyy esimerkiksi tietynlaisiin kultaesiintymiin.

Lisäksi tuloksista on laskettu myös toriumin ja uraanin suhde eli Th/U-suhde, joka esitetään karttana liitteenä 7. Th/U-suhde kuvaa maankamaran geologisia ominaisuuksia, kuten graniitin ja magmakivien piirteitä (Hyvönen et al. 2005).

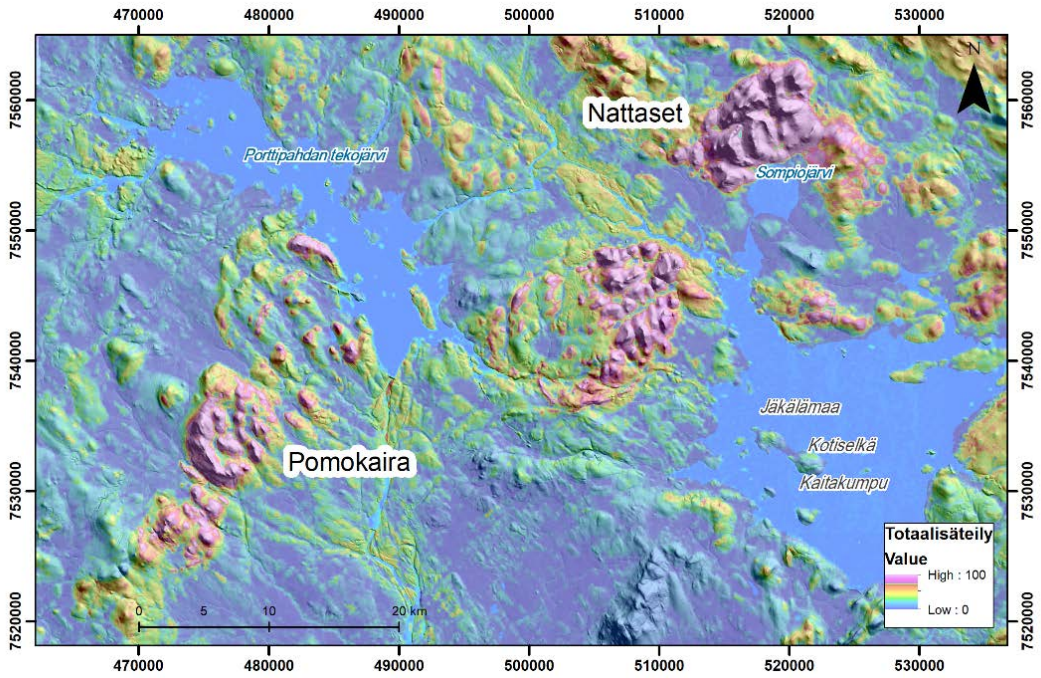
12 KIINNOSTAVIA RADIOMETRISIA KOHTEITA

12.1 Sokli

Sokli erottuu radiometrisessa datassa niin hyvin, että sitä käytetään usein esimerkkinä radiometrisen menetelmän käytöstä Suomessa (Kuva 12). Myös Soklin karbonaattia ympäröivä kehämäinen rakenne on näkyy hyvin radiometrisessa datassa. Tämän luvun kuvissa tarkastellaan kokonaissäteilyä.



Kuva 12: Radiometrinen kokonaissäteily Soklin alueella



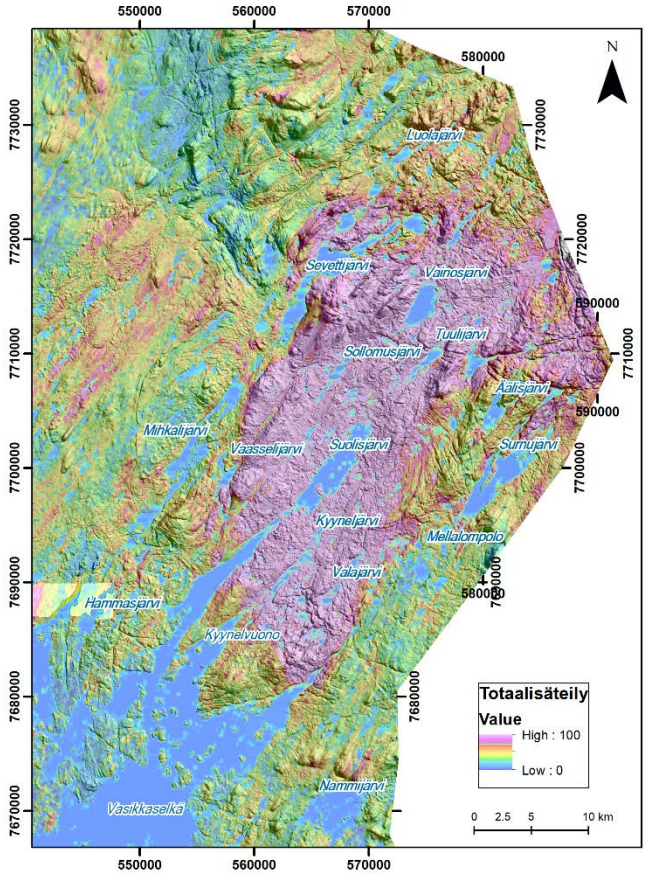
Kuva 13: Radiometrinen kokonaissäteily Pomokairan ja Nattasten alueella

12.2 Pomokaira ja Nattaset

Pomokaira ja Nattaset sekä niiden välissä sijaitseva porfyyrinen graniitti erottuvat selvästi ympäristöstään radiometrisessä kokonaissäteilykartassa (Kuva 13). Nattasten kohdalla korkeat säteilyarvot liittyvät graniittiin, Pomokairassa porfyyriseen graniittiin.

12.3 Sevettijärven ja Suolisjärven alue

Aivan koillisimmassa Lapissa Inarin arkeeisella alueella on ympäristöstään korkeamman säteilyn alue, joka esitetään Kuvassa 14. Alue poikkeaa ympäristöstään myös pienen kalium/torium-suhteen osalta, joten maan pintaosassa on enemmän toriumia kuin kaliumia, mikä poikkea lähialueesta. Myös täällä korkeat säteilyarvot liittyvät graniittiin.

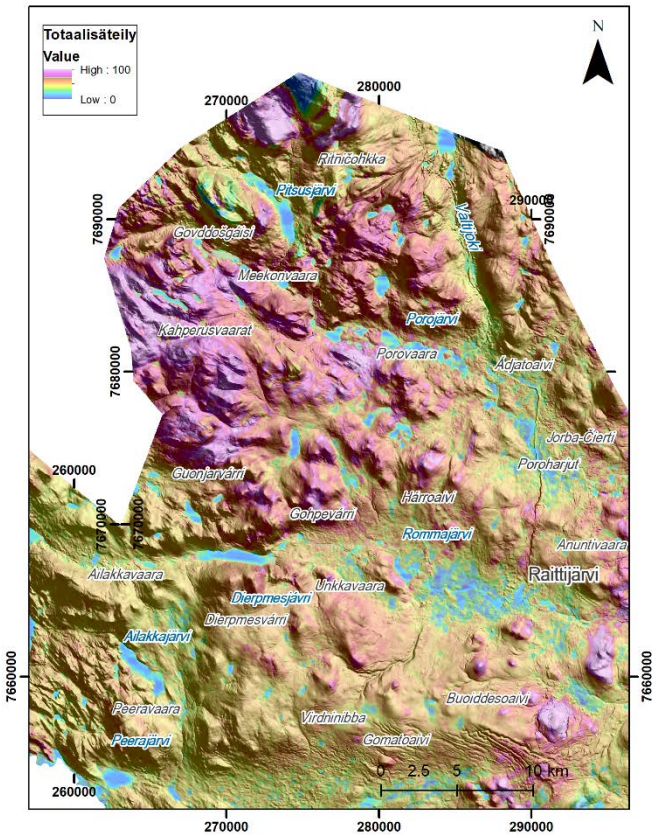


Kuva 14: Radiometrinen kokonaissäteily Sevettijärven ja Suolisjärven alueella.

12.4 Käsivarren pohjoisosa

Uraanin, toriumin ja kaliumin pitoisuudet ovat käsivarressa kaikki suhteellisen korkeita. Tämä näkyy myös kokonaissäteilyssä (Kuva 15). Toisaalta siellä ei erotu Nattasten tai Pomokairan kaltaisia yksittäisiä, selvästi ympäristöstään poikkeavia kohteita. Myös

käsivarressa on paljon graniittia, mutta myös muita kivilajeja, kuten aivan pohjoiskärjen hiekkakivi, gabro ja graniittikiillegneissi.



Kuva 15: Radiometrinen kokonaissäteily Käsivarren pohjoisosassa.

13 GEOFYSIIKKA YMPÄRISTÖTUTKIMUKSISSA

Geofysiikkaa on käytetty yli 80 vuoden ajan öljynetsinnässä, malminetsinnässä ja geologisessa kartoituksessa. Käsite ympäristögeofysiikka on vakiintunut 1990-luvulla. Sillä tarkoitetaan yleensä öljyn- ja malminetsinnän satojen metrien tai jopa kilometrien tutkimussyvyyteen verrattuna pinnanläheisiä tutkimuksia (“near surface geophysics”). Myös pohjavesitutkimukset ja geotekniset kohteet ovat uudempia käyttökohteita. Tutkimuksiin liittyy myös ekologinen, ympäristönsuojelullinen aspekti. (Jokinen, 1996)

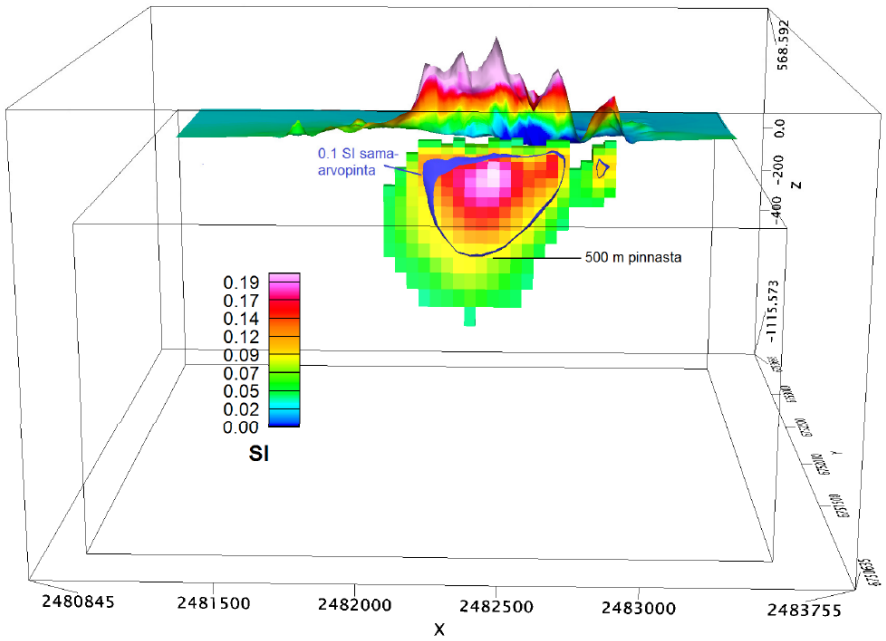
13.1 Geofysiikan käytön edut ja haasteet

Geofysikaaliset mittaukset ovat ympäristöystävällisiä, koska maata ei vahingoiteta eikä sitä tarvitse rikkoa ottamalla näytteitä. Mittausmenetelmästä ja -laitteesta riippuen

maasta saadaan tietoa muutaman sentin syvyydeltä jopa kymmenien kilometrien syvyyteen saakka.

Mittaustavat ja -menetelmiä ovat monipuolisia, mikä lisää käyttökohteiden määrää. Mittauksia voidaan tehdä lentokoneella, helikopterilla, lennokilla, kävellen, moottorikelkalla, mönkijällä, veneellä ja kallioon kairatussa reiässä. Eri mittausmenetelmät perustuvat erilaisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin eli toimivat erilaisissa kohteissa. Jos esimerkiksi tutkimuskohteen materiaalien tiheyksissä ei ole vaihtelua eli tiheyteen liittyvä painovoimamittaus ei tuo tietoa kohteesta, joku toinen menetelmä saattaa toimia hyvin. Mittausmenetelmä ja -tapa tulee aina valita tutkimuskohteen mukaan.

Mittauksilla säästää rahaa. Kairaaminen on hyvin kallista, mutta usein geologisissa tutkimuksissa välttämätöntä. Geofysiikan mittaustulosten perusteella voidaan päättää, minne kannattaa kairata ja minne ei. Mittaukset suunnitellaan tarvitun tarkkuuden mukaan, eli alkuvaiheen tutkimuksissa voidaan kattaa suuri alue harvalla mittausvälillä ja kohdistaa tarkat mittaukset vain erityisen kiinnostaville alueille.



Kuva 16: Esimerkki magneettisten tulosten esittämisestä. Päällä magneettinen mittaustulos korkopintana ja alla magneettinen malli kappaleena. Kuva: Hanna Leväniemi, GTK.

Yhtä geofysiikan mittaustulosta voidaan käyttää moniin eri tarkoituksiin. Esimerkiksi GTK:n geofysikaalisten lentomittausten tuloksia on käytetty monipuolisesti kallio- ja maaperätutkimuksiin vuosikymmenten ajan. Kun lentomittausohjelma aloitettiin 1950-luvulla, ei nykyisistä tavoista käsitellä ja esittää dataa 3D-malleina ollut vielä

aavistustakaan. Kuvassa 16 esitetään esimerkki magneettisen maastomittauksen tuloksista ja mallinnuksesta.

Geofysiikka toimii parhaiten mahdollisimman häiriöttömässä ympäristössä. Osa ympäristötutkimuskohteista sijaitsee lähellä asutusta tai muuta rakennettua infrastruktuuria, jolloin kaapelit, sähkölinjat ja rakennukset voivat häiritä varsinkin sähköisiä ja sähkömagneettisia mittauksia. Myös luonnon omat geologiset rakenteet vaikuttavat mittauksiin. Esimerkiksi saastuneiden vesien aiheuttamaa sähkönjohtavuuden muutosta maassa on vaikea havaita geofysiikan avulla, jos maan sähkönjohtavuus vaihtelee tutkimusalueella luonnollisesti yhtä paljon kuin mitä saastuneisuus vaikuttaisi. (Jokinen, 1996)

Kun geofysiikan mittaus tehdään maan päällä tai ilmassa, tuloksista ei voi sanoa täsmällisen varmaksi, millä syvyydellä maassa on mitäkin. Esimerkiksi magneettisen mittauksen tulos on tieto maan magneettivuon tiheydestä mittauspaikalla. Kun siirrytään mittauslinjaa eteenpäin, arvot vaihtelevat ja saadaan tietoa magneettisten ominaisuuksien vaihtelusta mittausalueella. Erityisen magneettisten kappaleiden tai rakenteiden kokoa, syvyyttä ja asentoa selvitetään erilaisilla tulkinta- ja mallinnusmenetelmillä. Kuitenkin jos tarvitaan erittäin yksityiskohtaista tietoa, kannattaa kairata maahan reikä ja mielellään tehdä geofysiikan mittauksia myös kairanreiässä. (Turunen, 1993).

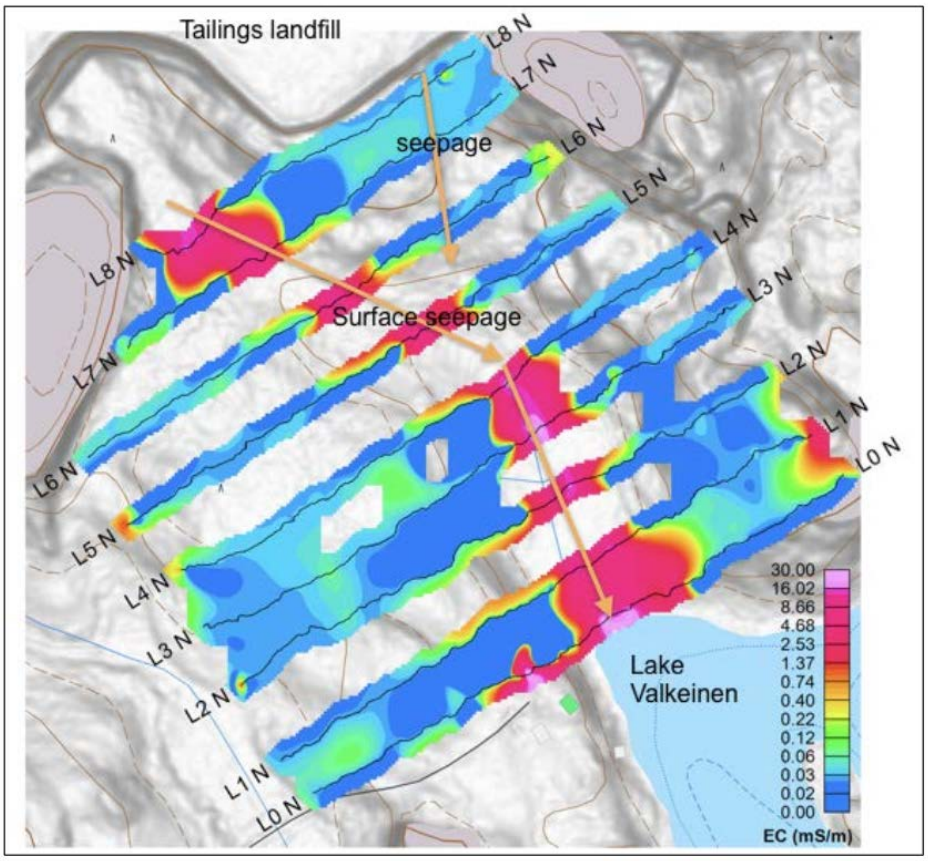
13.2 Käyttökohteet

Ympäristötutkimukset ovat laaja käsite, jolla ei ole tarkkoja rajoja. Geofysiikkaa käytetään suoraan tutkittavan asian havainnointiin tai epäsuorasti, jolloin mittauksilla selvitetään ympäristöongelmaan tai muuhun tutkittavaan asiaan liittyviä geologisia tekijöitä. Esimerkiksi jos tutkitaan myrkyllisten aineiden kulkeutumista maassa, siihen saadaan oleellista lisätietoa selvittämällä maapeitteen paksuus ja peruskallion rikkonaisuutta.

Geofysiikan avulla tutkitaan maankamaraa luonnontilassa sekä ihmistoiminnan ja luonnonilmiöiden vaikutusta siihen. Kun luonnontila tunnetaan, sitä voidaan käyttää apuna muutosten, kuten saastumisen, huomaamiseen. Tieto maasta ja sen rakenteesta on hyödyksi mm. geologisten raaka-ainevarojen etsinnässä, niiden käytön suunnittelussa, kallio- ja muussa rakentamisessa, luonnonsuojelussa ja maankäytön suunnittelussa.

Jokisen (1996) mukaan mittauksilla voidaan esimerkiksi huomata saasteiden leviäminen kaatopaikalta tai teollisuuslaitoksesta ympäristöön, seurata kaivosaltaiden ja muiden patojen pitävyyttä, kartoittaa pohjavesialueita ja tutkia pohjaveden suolaisuutta rannikkoseuduilla, tutkia kallion ominaisuuksia ydinjätteen sijoituspaikkaa varten ja etsiä maassa olevia metalliesineitä, kuten tynnyreitä. Vesistöalueille rakennettaessa geofysiikan avulla voidaan varmistaa, ettei pohjassa ole räjähtämättömiä ammuksia. Maapeitteen paksuus ja maan lämpöominaisuudet ovat oleellinen tieto geoenergian, kuten kalliolämmön, suunnittelijalla ja käyttäjälle. Geofysiikkaa käytetään myös routa- ja

ikiroutatutkimuksissa. Kuvassa 17 esitetään esimerkki sähkömagneettisesta tutkimuksesta kaivoksiin liittyvässä ympäristötutkimuksessa (Lerssi & Huotari, 2018).



Kuva 17: Sähkömagneettinen GEM2-mittaus Kotalahden vanhan nikkelikaivoksen rikastushiekka-altaan ja Valkeinen-järven ympäristössä Leppävirralla. Sähkönjohtavuusmittauksilla tutkittiin valuntaa Kotalahden rikastushiekka-altaalta kohti Valkeista. (Lerssi & Huotari, 2018)

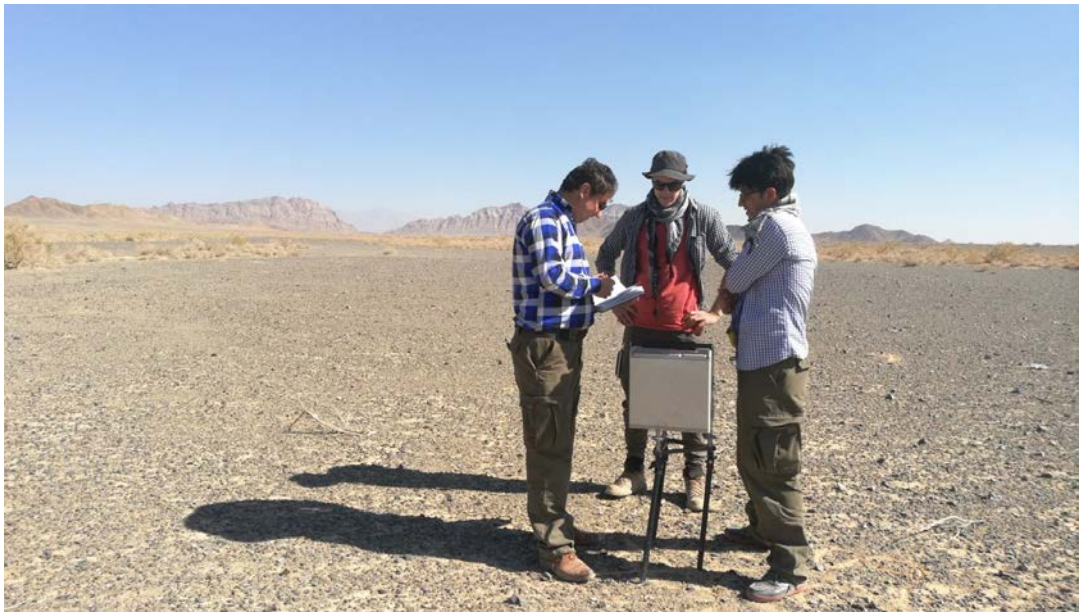
Pääsääntönä voidaan sanoa, että geofysiikkaa voi käyttää aina, kun tutkittavaan asiaan liittyy joku fysikaalisten ominaisuuksien ero, joka on tarpeeksi iso näkyäkseen mittaustuloksissa. Esimerkiksi maaperän materiaalit kuten savi ja moreeni on paljon kevyempiä kuin kallioperä, joten ne voi erottaa toisistaan tiheyseroihin liittyvän painovoimamenetelmän avulla. On hyvä pitää mielessä, että fysikaaliset ominaisuudet voivat vaihdella saman kivilajin sisällä ja toisaalta monella kivilajilla tai muulla geologisella yksiköllä voi olla samat ominaisuudet.

13.3 Tutkimusmenetelmät

Magneettisessa mittauksessa mitataan maapallon magneettivuon tiheyttä, johon maan eri ainesten magneettiset ominaisuudet vaikuttavat omalta osaltaan. Magneettinen

mittaus on eräs yleisimmistä geofysikaalisista menetelmistä, sillä sen tulokset kertovat maan rakenteesta ja koostumuksesta. Ympäristötutkimuksissa magneettista mittausta käytetään mm. räjähtämättömien ammusten etsintään, kun merialueelle vedetään putkia ja rakennetaan tunneleita ja satamia.

Painovoimamenetelmässä mitataan maapallon painovoimakenttää (Kuva 18). Maa- ja kallioperän tiheysvaihtelu vaikuttaa painovoimakenttään pieneltä osalta, joten mittalaitteiden tulee olla hyvin herkkiä. Painovoimamittausten avulla mm. selvitetään maapeitteen paksuutta ja kallionpinnan tasoa pohjavesitutkimuksissa ja tutkitaan kaatopaikan jätekasan painumista.



Kuva 18: Painovoimamittausta GTK:n koulutusprojektissa Iranissa. Kuva: Maarit Nousiainen, GTK, 2017.

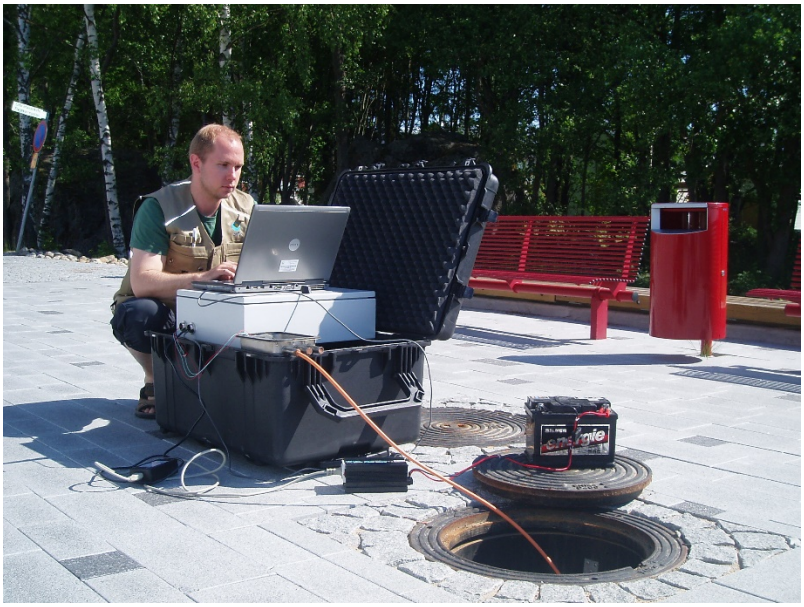
Sähköiset tutkimusmenetelmät ovat iso kimppu erilaisia menetelmiä, jotka liittyvät sähkönjohtavuuteen ja muihin sähköisiin ominaisuuksiin, kuten sähkökemialliseen polarisoituvuuteen. Sähköiset ja sähkömagneettiset tutkimusmenetelmät ovat yleisiä ympäristötutkimuksissa, sillä maan vesipitoisuus ja vedessä mahdollisesti olevat suolat vaikuttavat maan sähkönjohtavuuteen.

Myös erilaisia sähkömagneettisia mittausmenetelmiä ja –laitteita on paljon erilaisia käyttötarkoituksia varten. Sähkömagneettiset menetelmät liittyvät maan sähkönjohtavuuden lisäksi muihin sähkömagneettisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi maatutkamittauksissa hyödynnetään sähkömagneettisten aaltojen taittumista ja heijastumista sähköisiltä ominaisuuksiltaan erilaisten aineiden rajapinnoilla (Peltoniemi, 1988). Maatutkalla voidaan selvittää maan kerrosrakennetta ja ominaisuuksia ja esimerkiksi kartoittaa kallioperän pintaosan rako- ja ruhjevyöhykkeitä kalliorakentamisen pohjatutkimuksissa (Turunen, 1993). Eräs toinen

ympäristötutkimuksissa käytettävä sähkömagneettinen tutkimusmenetelmä on aika-alueen sähkömagneettinen mittaus eli TEM-mittaus (time domain electromagnetics), jota käytetään mm. vesipitoisten hiekka- ja sorakerrosten paikallistamiseen pohjavesitutkimuksissa (Auken et al. 2003).

Seismiset tutkimukset perustuvat seismisten aaltojen etenemiseen maassa. Esimerkiksi maanjäristysaallot ovat seismisiä aaltoja ja niitä voidaan myös aiheuttaa keinotekoisesti räjäytyksillä ja tärytyslaitteilla. Seismisten aaltojen etenemisnopeus riippuu maan seismisistä ominaisuuksista, joten seismisillä tutkimuksilla voidaan erottaa maapeite kalliosta ja havaita maan rakenteita. Myös kuiva ja veden kyllästämä maa eroavat toisistaan seismisesti.

Termisillä mittauksilla tutkitaan maan lämpöominaisuuksia, kuten lämmönjohtavuutta ja kykyä varata lämpöä. Erityisesti suuria, kymmenten tai satojen lämpökaivojen kalliolämpö-järjestelmiä suunnitellessa kannattaa selvittää maan termisiä ominaisuuksia mittauksilla. Kuvassa 19 esitetään esimerkki geoenergiajärjestelmän lämpötilamittauksista.



Kuva 19: Geoenergiajärjestelmän lämpötilamittauksia kuidulla. Kuva: Maarit Nousiainen, GTK, 2009.

Petrofysiikka tarkoittaa kaikkia kiven fysikaalisia ominaisuuksia. Petrofysiikan mittauksissa mitataan esimerkiksi kiven tiheyttä tai seismisiä ominaisuuksia. Tarkimmat mittaukset tehdään laboratoriossa. Lisäksi on olemassa laboratoriolaitteita yksinkertaisempi käsikäyttöisiä mittalaitteita, joilla voi mitata petrofysiikan ominaisuuksia suoraan kalliosta maastotyössä tai kivinäytteestä. Petrofysiikan mittauksista on hyötyä esimerkiksi silloin, kun tehdään geofysikaalista mallia maasta ja sen rakenteesta.

Yhteistä kaikille geofysiikan mittauksille on, että ne tulee suunnitella kohteen mukaan käyttäen kaikkea olemassa olevaa geologista ja muuta hyödyllistä tietoa, jotta mittauksesta saada mahdollisimman paljon hyötyä. Datan käsittelyn ja tulkinnan jälkeen tuloksista tehdään kartta ja/tai kaksi- tai kolmiulotteinen malli, joka kertoo maan ominaisuuksista.

13.4 Lennokkimittaukset

Erilaiset lennokki- eli UAV-mittaukset (unmanned aerial vehicle, miehittämätön ilma-alus) ovat lisääntyneet nopeasti viime vuosina. Tällä hetkellä erilaisilla lennokeilla tehdään ainakin ilmakuvausta, laserkeilausta, hyperspektrikuvausta, lämpökuvausta sekä magneettisia ja radiometrisia mittauksia. Lisäksi ainakin suomalainen Radai Oy kehittää sähkömagneettista lennokkimittausta. UAV-mittausten arvellaan kehittyvän voimakkaasti lähivuosina. Lennokkimittausten etuja kävellen tai ajoneuvolla tehtävään mittaukseen verrattuna ovat nopeus ja turvallisuus. Vaikea tai vaarallinenkaan maasto estä mittaamista. Lentokone- tai helikopterimittauksiin verrattuna UAV-mittaukset ovat joustavampia ja ympäristöystävällisempiä ja laitteistokulut pienempiä, mutta lentoaika huomattavasti lyhyempi. Lennokin kantokyky rajoittaa mittalaitteiston painoa, mikä on haaste geofysiikan mittauksille. (Salmirinne et al 2017)

Geologian tutkimuskeskus on testannut radiometrista mittausta UAV-alustalla kesällä ja syksyllä 2016 Kolarin Rautuvaaran vanhan rauta-kuparikaivoksen rikastushiekka-altaalla, jossa tiedetään GTK:n lentomittausaineiston perusteella olevan säteilevää materiaalia (Kuva 20). Mittaukset urakoi Radai Oy. Rautuvaaran rikastamolla on prosessoitu vuosien 1962–1995 aikana viiden eri esiintymän malmia. UAV-mittauksen lisäksi rikastushiekka-allas mitattiin kävellen 50 metrin linjavälillä RS-230-spektrometrillä. UAV-mittauksen lentokorkeudet olivat 5, 10 ja 30 metriä. (Salmirinne et al 2017)

Rautuvaaran mittauksissa todettiin, että käytössä ollut mittalaite sopii totaalisäteilyn mittaukseen 10 metrin lentokorkeuteen saakka, kun säteilevää materiaalia on tarpeeksi. Kalium-, torium- ja uraanipitoisuuksien erottelu onnistuu vain matalammilla lentokorkeuksilla. Säteilyn määrä on sielläkin vähäinen, joten heikot säteilylähteet eivät erotu mittaustulosten kohinasta. Lennokilla tehtävien radiometristen mittausten haasteena on tarkan mittauksen vaativan laitteiston paino.

Kuva 20: Rautuvaaran UAV-mittaukset Radai Oy:n kanssa. Kuva: Heikki Salmirinne, GTK.

14 YHTEENVETO

Uraani on muodostunut Lapin kallioperään miljardeja vuosia sitten sille suotuisissa geologisissa prosesseissa ja olosuhteissa. Se on geologinen luonnontuote jota tulee esiintymään kallio- ja maaperässä vielä pitkän aikaa. Siksi uraanin esiintymistä pitää tutkia ja ottaa se huomioon mm. suunnittelussa.

Lapin Kaiku-hankkeessa tutkittiin Lapin moreenin uraanipitoisuuksia olemassa olevia aineistoja hyödyntämällä. Kartoissa esitetyistä uraanianomalioista ainoastaan Peräpohjan ja Etelä-Lapin anomaliat liittyvät tunnettuihin uraaniesiintymäalueisiin. Muut heijastelevat kyseisten alueiden kallioperän kivilajeihin liittyvää korkeampaa ominaista uraanipitoisuutta, mikä näkyy selvästi myös lentoradiometrisissä kartoissa. Suurin osa korkean uraanipitoisuuden ja korkeiden säteilyarvojen alueet kuuluvat geologisesti Lapin vanhimpaan eli arkeeiseen kallioperään.

Vaikka mm. Kolari-Kittilän alueella ja Soklissa on uraaniesiintymiä, alueet eivät tule Lapin Kaiku-hankkeen aineistossa mitenkään erityisesti esiin. Tämä johtunee aineiston valintakriteereistä ja mahdollisesti näytteenoton puutteista juuri kriittisiltä paikoilta. Näillä alueilla saattaa kuitenkin merkitystä jatkossa mahdollisten malminetsinnän ja kaivoshankkeiden kannalta.

Uraanin etsintää on harjoitettu Lapissa 1950-luvulta 2000-luvulle kolmessa eri vaiheessa. 1980- ja 2000-luvuilla se aiheutti kiistoja. Tulevien kiistojen mahdollisuutta ei voida sulkea pois jos kiinnostus uraania kohtaan kasvaa. Lapissa on vielä tutkimattomia uraaniesiintymiä. Uraania on myös joissakin kaivoshanke- ja malminetsintäkohteissa. Siksi uraanipitoisuuksia, esiintymiä, malminetsintää ja kaivoshankkeita tarkasteltiin myös maankäytön näkökulmasta. Matkailu-, luonnonsuojelu-, poronhoito- ja

pohjavesialueiden sekä uraani- että muiden potentiaalisten kaivannaiskohteiden sijainnissa on päällekkäisyyksiä, jotka asettavat haasteita eri intressitahojen tavoitteiden yhteensovittamiselle. Eri elinkeinojen ja/tai maankäytön kannalta tärkeiden kohteiden sijainti saattaa vaikuttaa malminetsintään ja kaivoshankkeisiin. Siten keskinäinen vuoropuhelu päättäjien, eri toimijoiden ja paikallisen väestön kesken on erittäin tärkeää.

15 KIITOKSET

Kirjoittajat kiittävät EAKR:n rahoitusta Lapin kaiku-hankkeelle, joka mahdollisti uraanin esiintymisen tarkastelun ja siihen liittyvän maankäytön huomioon ottamisen Lapissa. Svetlana Saponin (GTK) panos paikkatietoperusteisten karttojen laadinnassa oli korvaamattoman arvokasta. Paliskuntain yhdistyksen Marja Anttosta sekä Geologian tutkimuskeskuksen Mari Kivistä ja Mira Markovaara-Koivistoa kiitetään Poronhoitoaineiston luokittelukartan esittelystä ja luovuttamisesta Lapin Kaiku-hankkeen käyttöön. Luokittelukartta toi lisävaloa Kolari-Kittilä-alueen maankäyttöön tämän elinkeinon osalta.

16 LIITTEET

Liite 1: Radiometrinen kartta: Kokonaissäteily

Liite 2: Radiometrinen kartta: Kolmen muuttujan esitys uraanin, toriumin ja kaliumin määrästä

Liite 3: Radiometrinen kartta: Uraanipitoisuus

Liite 4: Radiometrinen kartta: Kalium-pitoisuus

Liite 5: Radiometrinen kartta: Torium-pitoisuus

Liite 6: Radiometrinen kartta: Kaliumin ja toriumin suhdekartta

Liite 7: Radiometrinen kartta: Toriumin ja uraanin suhdekartta

17 LÄHTEET

Adger, N.W. Benjaminsen, T.A., Brown, K. & Svarstad, H. 2001. Advancing a political ecology of global environmental discourses. Development Change 32, 681–715.

Airo, M-L., Hyvönen, E., Lerssi, J., Leväniemi, H. & Ruotsalainen, A. 2014. Tips and tools for the application of GTK's airborne geophysical data. Geologian tutkimuskeskus, tutkimusraportti 215, 33 s.

Auken, E., Jørjensøn, F & Sørensen, K. 2003. Large-scale TEM investigation for groundwater. Exploration Geophysics 34, 188-194.

Boss, C.B. & Fredeen K.J. 2004. Concepts, instrumentation and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectrometry. 3rd edition. Chicago: Perkin Elmer.

Conde, M. 2017. Resistance to mining. A review. Ecological Economics 132, 80-90.

Conde, M. & Le Billion, P. 2017. Why do some communities resist mining projects while others do not? The Extractive Industries and Society 4, 681-697.

Eerola, T. 2008. Uranium exploration, non-governmental organizations, and local communities. The origin, anatomy, and consequences of a new challenge in Finland. Estonian Journal of Earth Sciences 57, 112–122.

Eerola, T. 2009. Sidosryhmätoiminta malminetsinnässä (geo-antropologisia kokemuksia kentältä). Julkaisussa: Ojala, J., Lahti, M. & Heikkinen, E. (toim.) Kaivoksen perustaminen: etsinnästä jälkihoitoon – mitä se vaatii. Vuorimiesyhdistyksen geologijaoston laivaseminaari 2009 Viking Mariella, 16.–17.2.2009. Vuorimiesyhdistyksen julkaisuja B89, 43–46.

Eerola, T. 2015. Kansalaisaktivismin kehitys ja sen vaikutus kaivosyritysten toimintaan Suomessa. In: Kivinen, M. & Aumo, R. (eds) Kaivostoiminta ja malminetsintä Suomessa: teollisen arvoverkon tukijalasta kansainvälisen verkostoyhteiskunnan osaksi. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 221, 39–52.

Eerola, T. 2017. Yritysten yhteiskuntavastuu malminetsinnässä – Viestinnän ja sidosryhmätoiminnan merkitys sosiaalisen toimiluvan ansaitsemisessa ja ylläpidossa. Geologian tutkimuskeskuksen tutkimusraportti 230, 68 s. http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_230.pdf

EU 2007. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2007/2/EY, 14.3.2007, Euroopan yhteisön paikkatietoinfrastruktuurin (INSPIRE) perustamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti L108/1. Saatavilla https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex:32007L0002

EU 2010. Eurooppa 2020. Älykkään, kestävän ja osallistavan kasvun strategia. Komission tiedonanto. Bryssel 3.3.2010, KOM(2010) 2020 lopullinen. Elektrooninen julkaisu, saatavana: http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/1_FI_ACT_part1_v1.pdf

Geologian tutkimuskeskus, 2016. Metatiedot: Lentogeofysikaalinen radiometrinen rasteriaineisto (kalium, torium, totaali, uraani). Metatiedon päivämäärä 2016-07-01. http://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/aeroradiometric_raster_data_of_finland.html

Goodland, R. 2012. Responsible mining: The key to profitable resource development. Sustainability 4, 2099−2016.

Hautaniemi, H., Kurimo, M., Multala, J., Leväniemi, H. & Vironmäki, J., 2005. The "three in one" aerogeophysical concept of GTK in 2004. Teoksessa: Airo, M-L. (toim.) Aerogeophysics in Finland 1972-2004. Methods, System Charasteristics and Applications. Geologian tutkimuskeskus, Special Paper 39, 21-74.

Hietala, S. 2017. Kansannäytetoiminnan merkitys Suomen mineraalipotentiaalin kartoituksessa. Pro gradu –tutkielma, Geologia - Kallioperägeologia ja taloudellinen geologia. Helsingin yliopisto, 153 s.

Hyvönen, E., Turunen, P., Vanhanen, E., Arkimaa, H. & Sutinen, R., 2005. Airborne gamma ray surveys in Finland. Teoksessa: Airo, M-L. (toim.) Aerogeophysics in Finland 1972-2004. Methods, System Charasteristics and Applications. Geologian tutkimuskeskus, Special Paper 39, 119-134.

Internal Atomic Energy Agency IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, 173 s.

Jartti, T., Rantala, E. & Litmanen, T. 2014. Sosiaalinen toimilupa ja kaivannaisteollisuus. Uudenmaan, Pohjois-Karjalan, Kainuun ja Lapin maakuntien asukkaiden näkemykset kaivannaistoiminnan hyväksyttävyydestä. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, Yhteiskuntatieteiden ja filosofian laitos. 145 p. + liitteet.

Jokinen, T. 1996. Geofysikaaliset menetelmät ympäristötutkimuksissa. Teoksessa: Nysten, T., Suokko, T & Tarvainen, T. Ympäristögeologian sovelluksia. GTK – SYKE - ympäristötutkimusseminaari 1.10.1996. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 71, 31-36.

Kauppila, P., Räisänen, M. L. & Myllyoja, S. 2011. Metallikaivostoiminnan parhaat käytännöt. Suomen ympäristö 29. 213 p

Koivunen, K., Tammilehto, O. & Nevakivi, L. (toim.) 1980. Uraani ja ympäristö. Uraaninlouhinnan vaarat ja vaihtoehdot Lapissa. Energiapoliittinen yhdistys –Vaihtoehto ydinvoimalle ry., 67 s + liite.

Koljonen, T. 1992. Suomen geokemian atlas, osa 2: moreeni. Espoo, Geologian tutkimuskeskus, 218 s.

Korvuo, E. 1982. Mustamaa 1-2 tutkimukset. Outokumpu Oy Malminetsintä, raportti 080/2631,2633/EK/82.

Kvist, M. 1987. Uraanimalmitutkimukset Ranta-Tulkkivaaran ja Mustaselän alueella vuosina 1984-1986. Geologian tutkimuskeskus, raportti M19/3613/-87/1/60, 19 s

Kröger, M. 2015. Spatial causalities in resource rushes: notes from the Finnish mining boom. J. Agrarian Change 16, 543–570.

Lassila, M.M., 2018. Mapping mineral resources in a living land: Sami mining resistance in Ohcejohka, northern Finland. Geoforum 96, 1-9.

Lauri, L. 2012. Uraani. Teoksessa Sarala, P. (toim.) Lapin geologiset luonnonvarat 2010. Acta Lapponica Fenniae 25, 95-96.

Lauri, L. Pohjalainen, E. & Äikäs, O. 2010. Selvitys Suomen kallioperän U-pitoisuudesta. Pohjois-Suomen yksikkö/Itä-Suomen yksikkö, M10/2020/53, 28 s.

Lehmuspelto, P. & Sarala, P. 2012. Geokemiallinen kartoitus. Teoksessa Sarala, P. (toim.) Lapin geologiset luonnonvarat 2010. Acta Lapponica Fenniae 25, 43-53.

Lerssi, J. & Huotari, T. 2018. Geophysical surveys in the vicinity of the Kotalahti mine tailings landfill. Geologian tutkimuskeskus. GTK Open File Work Report 97/2018. 26 s.

Lindholm, A. 2005. Maailmanparantajat. Globalisaatiokriittinen liike Suomessa. Helsinki: Gaudeamus. 238 s.

Lindqvist, K. & Rehtijärvi, P. 1979. Pyrochlore from the Sokli carbonatite complex, Northern Finland. Bulletin of the Geological Society of Finland 51(1-2), 42-43.

Litmanen, T. 2008. Uraanikaivoksien vastustaminen. Paikallistason nimbyilyä vai transnationaalia liikehdintää geopolitiikkaan ja globalisoituneen talouden muutoksiin. Teoksessa Kopomaa, T., Peltonen, L. & Litmanen, T. (toim.) Ei minun pihalleni! Paikalliset kiistat tilasta. Helsinki, Gaudeamus, 123–152.

Mononen, T. & Sairinen, R. 2011. Kaivostoiminta ja paikallisen hallinnan haaste. Terra 123, 125–126.

Mustonen, R., Ikäheimo, T., Kurttio, P., Vesterbacka, P., Nikkarinen, M., Tenhola, M. & Äikäs, O. 2007. Uraani-malmin koelouhinnan ja -rikastuksen ympäristö-vaikutukset (URAKKA). Säteilyturvakeskuksen ja Geologian tutkimuskeskuksen projektiryhmän loppu-raportti ympäristöministerölle. Espoo: GTK, Helsinki: STUK. 42 p.

Niiranen T. 2012. Rautaoksidi-kupari-kultaesiintymät. In: Sarala, P. (toim.) Lapin geologiset luonnonvarat 2010. Acta Lapponica Fenniae 25, 82-87.

Niiranen, T. & Nykänen, V. 2017. Knowledge-driven prospectivity model for iron oxide-Cu-Au (IOCG) deposits in northern Finland. Mineral Prospectivity, current approaches and future innovations – Orléans, France, 24-26 October 2017, 59-60.

Nykänen, V, Groves, D.I. , Ojala, V.J. Eilu, P. and Gardoll, S.J. 2008 Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland, Australian Journal of Earth Sciences, 55, 25-38.

Peltoniemi, M. 1998. Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo 411 s.

Peltoniemi, M. 2005. Airborne Geophysics in Finland in Perspective. Teoksessa: Airo, M-L. (toim.) Aerogeophysics in Finland 1972-2004. Methods, System Charasteristics and Applications. Geologian tutkimuskeskus, Special Paper 39, 7-21.

Pohjolainen, E. 2012. F042 Kesänkitunturi. In: Eilu, P. (toim.) Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. Geological Survey of Finland Special Paper 53, 312-313.

Pohjolainen, E. 2015. Uranium deposits in Finland. In: Maier, W.D., Lahtinen, R. and O'Brien, H. (toim.) Mineral deposits in Finland. Amsterdam, Elsevier, 659-683.

Prno, J. 2013. An analysis of factors leading to the establishment of a social licence to operate in the mining industry. Resources Policy 38, 577–590.

Prno, J. & Slocombe, D. S. 2012. Exploring the origins of 'social license to operate' in the mining sector: perspectives from governance and sustainability theories. Resources Policy 37, 346–357

Pääkkönen, K. 1983. Tutkimustyöselostus Rovaniemen mlk:ssa valtausalueella Kuohunki 1, kaiv. rek. n:o 2997 suoritetuista malmitutkimuksista vuosina 1978-1980. Geologian tutkimuskeskus, raportti M06/3613/-83/1/60, 4 s.

Pääkkönen, K. 1988. Uraanimalmitutkimukset Pahtavuoman–Kolvakeron alueella Kittilässä ja Muoniossa vuosina 1982-1985. Geologian tutkimuskeskus, raportti M19/2741/-88/1/60, 34 s.

Pääkkönen, K. 1989. Tutkimustyöselostus Rovaniemen mlk:ssa valtausalueella Niittuoja 1, kaiv. rek. n:o 3640/1 suoritetuista malmitutkimuksista vuosina 1982-1985. Geologian tutkimuskeskus, raportti M06/3613/-89/1/60, 7 s

Rasilainen, K., Lahtinen, R., & Bornhorst, T.J. 2007. The Rock Geochemical Database of Finland Manual. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti Geological Survey of Finland, Report of Investigation 164, 38 p.

Rasilainen, K., Lahtinen, R., & Bornhorst, T.J. 2008. Chemical characteristics of Finnish bedrock - 1:1 000 000 scale bedrock map units. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti Geological Survey of Finland, Report of Investigation 171, 94 p.

Räisänen, M-L., Väisänen, U., Lanne, E. Turunen, P. ja Väänänen, J. 2015. Rautuvaaran suljetun kaivoksen rikastushiekan jätealueen kemiallinen nykytila, vaikutukset pinta- ja pohjavesiin vuosina 2005-2006 sekä suositukset jälkihoidolle. Geologian tutkimuskeskuksen arkistoraportti 64/2015, 44 s.

Sairinen, R. 2011. Kaivosteollisuuden yhteiskuntavastuu ja muuttuva suhde paikallisyhteisöihin. Terra 121, 273–284.

Salmirinne, H., Hyvönen, E., Karinen, T., Konnunaho, J., Kurimo, M., Middleton, M., Niiranen, T., Panttila, H., Pasanen, A. ja Turunen, P., 2017. UAV-MEMO-projekti, osa I. Miehittämättömät ilma-alukset malminetsinnässä ja kaivostoiminnassa. Tutkimusraportti 232 – Geological Survey of Finland, Report of Investigation 232, 2017.

Sarala, P. 2012. Johdanto. In: Sarala, P. (toim.) Lapin geologiset luonnonvarat 2010. Acta Lapponica Fenniae 25, 3-8.

Sarikkola, R. 1972. Väliraportti, Kolari, Kesänkitunturi. Outokumpu Oy, Malminetsintä, raportti 035/2732/RSA-72, 6 s.

Turunen, P., 1993. Geofysikaalisten menetelmien käytöstä ympäristötutkimuksessa. Geologian tutkimuskeskus. Materiaalia Geologian tutkimuskeskuksen ja Vesi- ja ympäristöhallituksen ympäristötutkimusseminaaarissa Espoossa 18.11.1992 pidettyä esitelmää varten. Q 10.2/1993/1, 46 s.

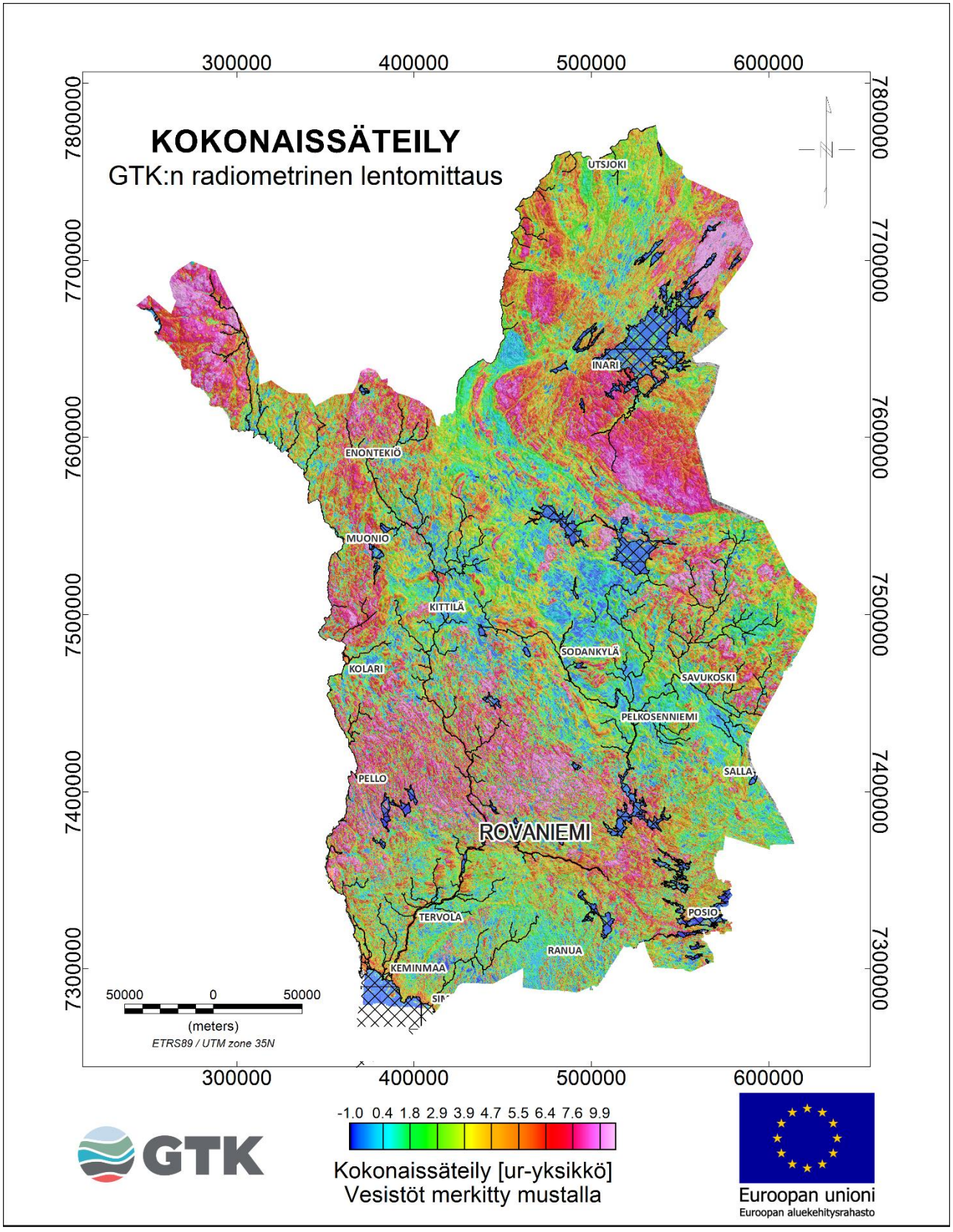
Työ- ja elinkeinoministeriö 2010. Suomen mineraalistrategia.

Äikäs, O. 2006. Uraaninetsintä havahtui Ruususen unesta nykypäivään. Materia 3, 10-15.

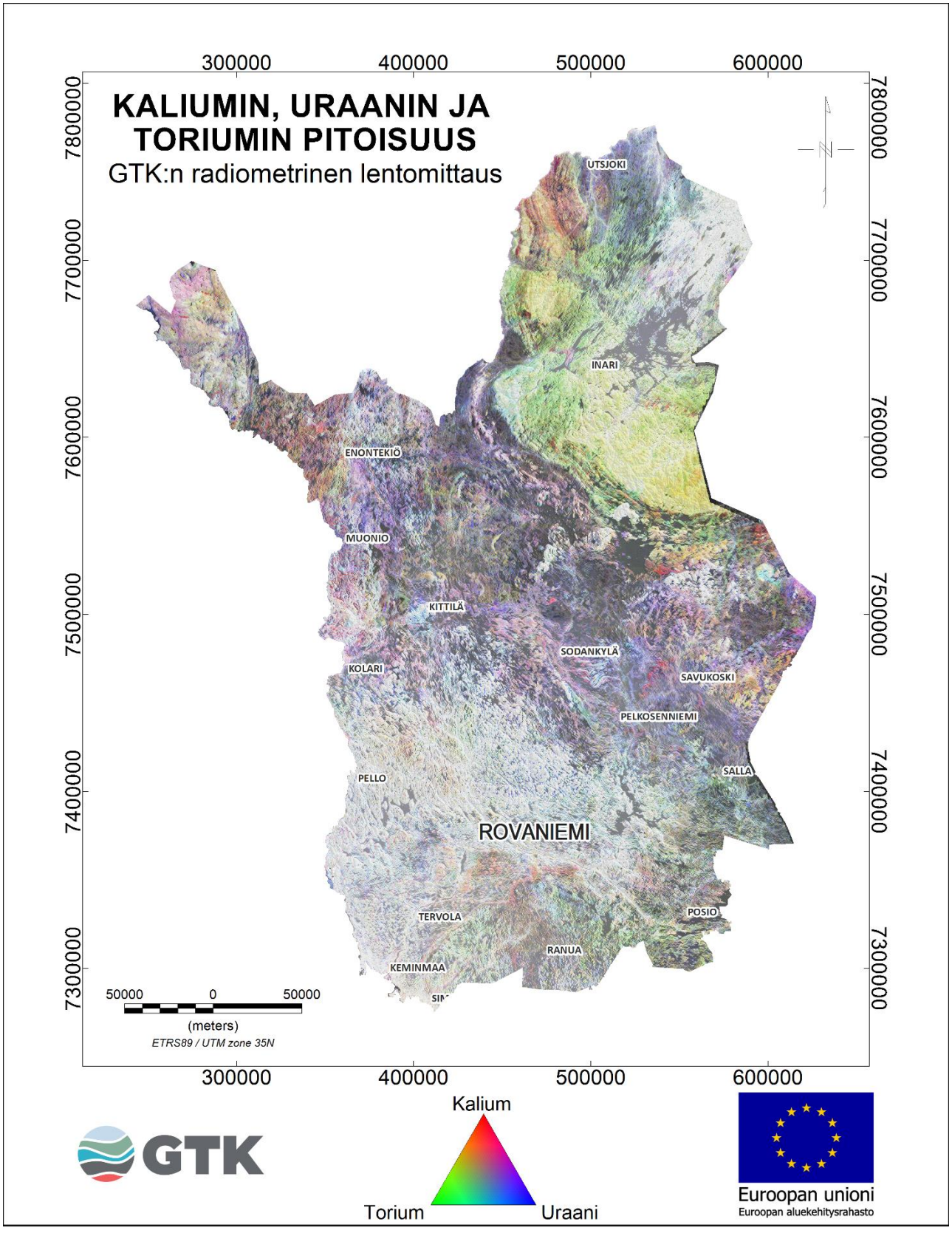
Äikäs, O. 2013. Uraaniryntäys hiipui – uraanikohu jatkuu. Materia 1, 8-10.

Zotimov, N. V. 1971. Use of the gamma field of the earth to determine the water content of soils. Soviet hydrology: Selected papers, issue 4, 313-320.

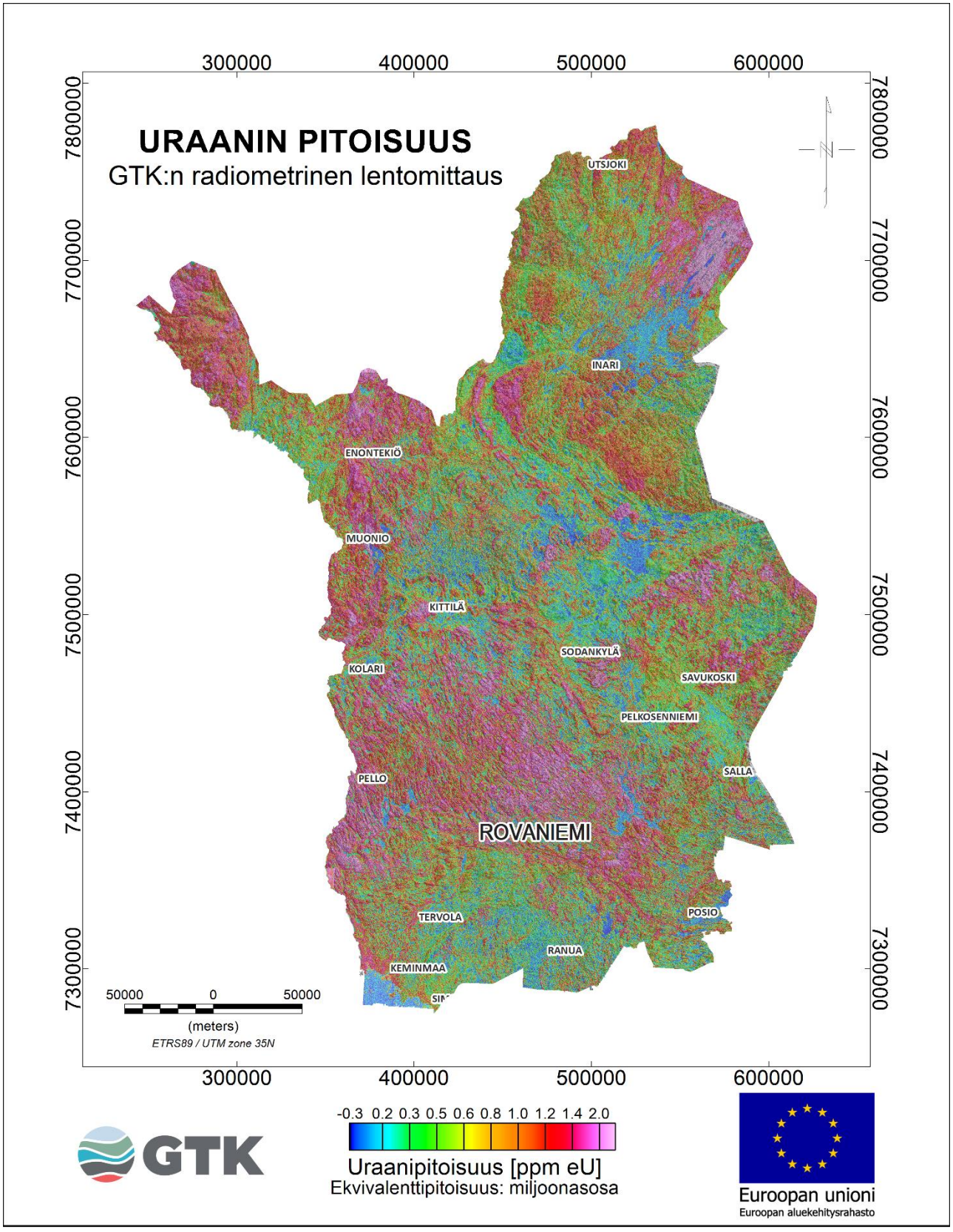
Liite 1: Radiometrinen kartta: Kokonaissäteily



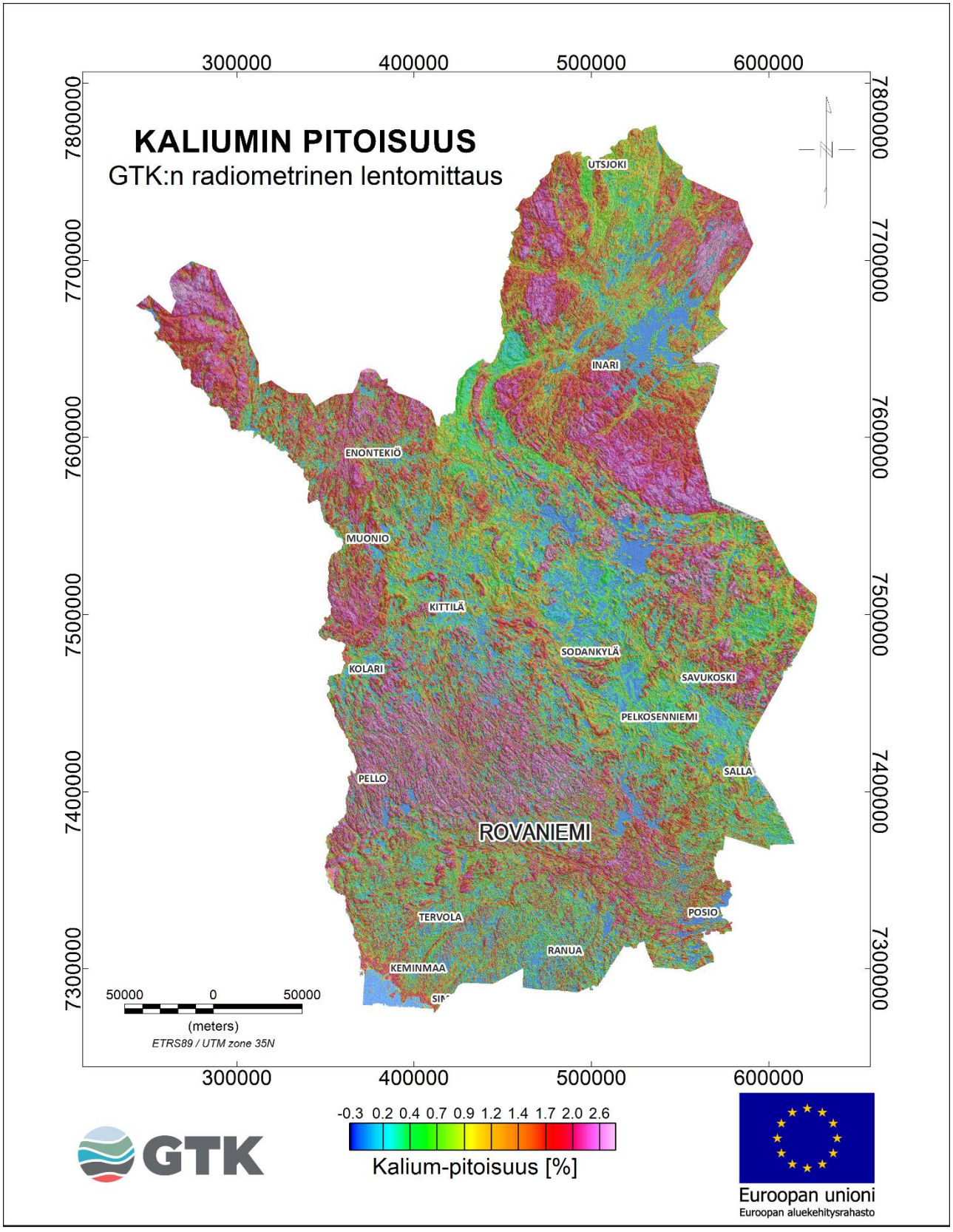
Liite 2: Radiometrinen kartta: Kolmen muuttujan esitys uraanin, toriumin ja kaliumin määrästä



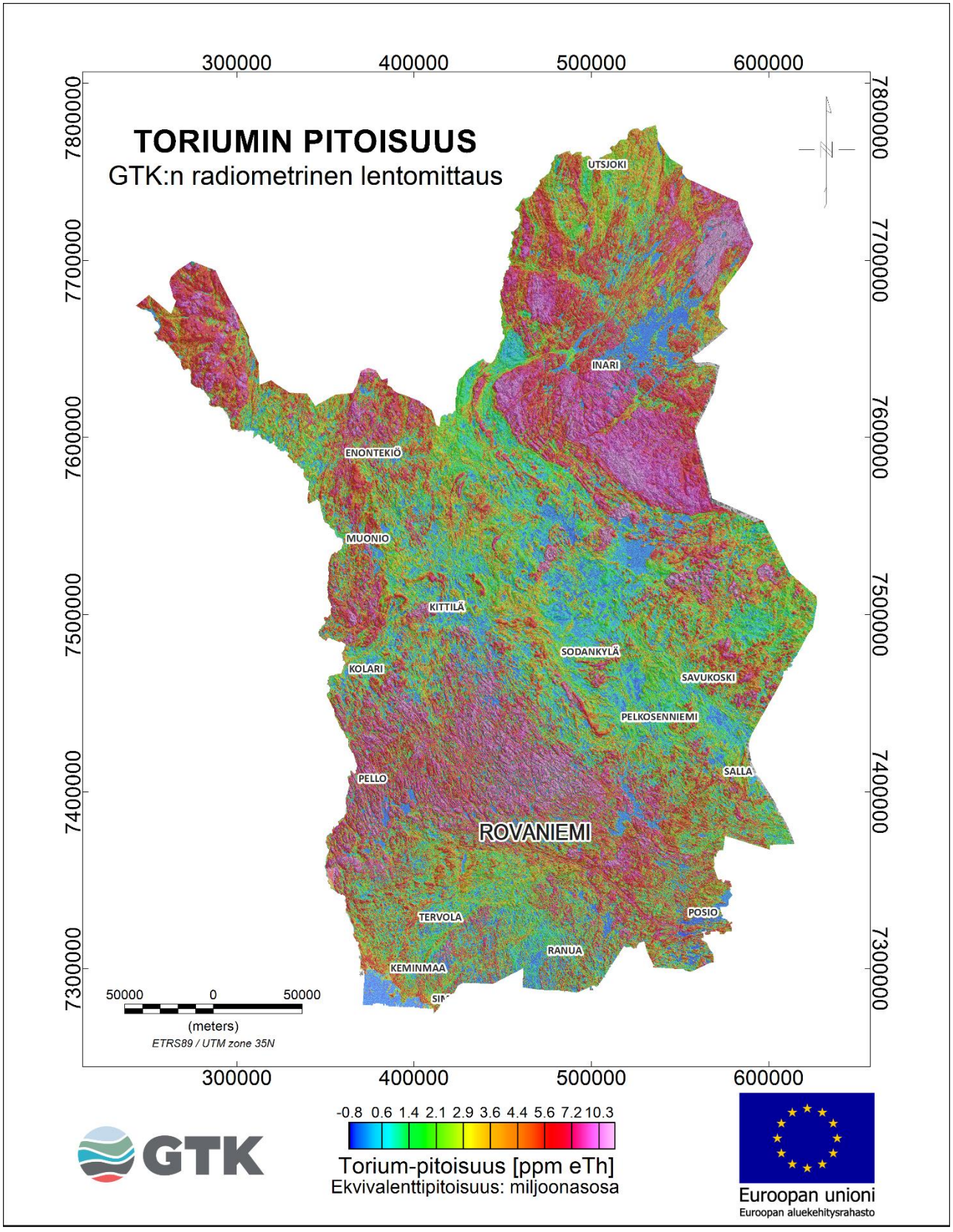
Liite 3: Radiometrinen kartta: Uraanipitoisuus



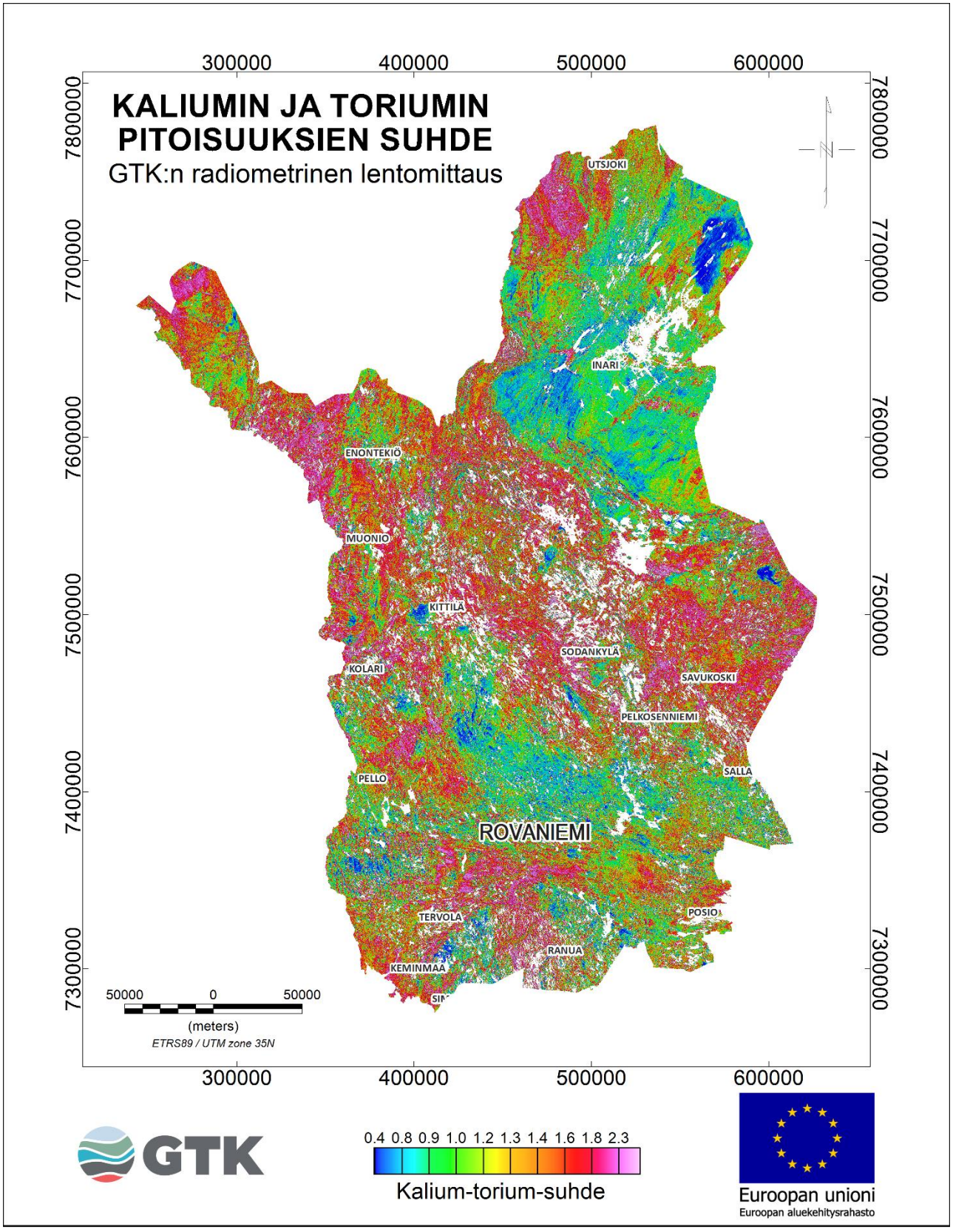
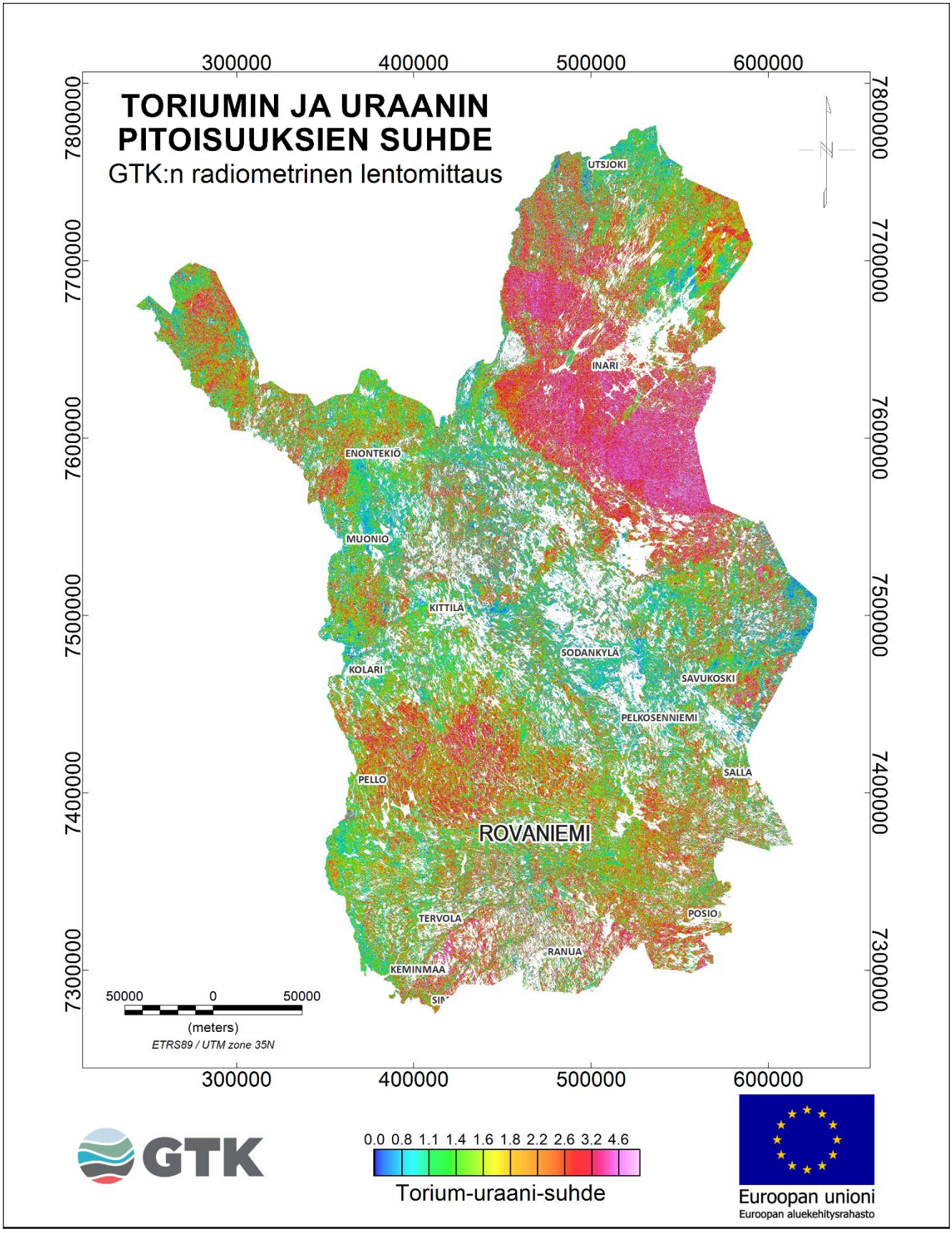
Liite 4: Radiometrinen kartta: Kalium-pitoisuus



Liite 5: Radiometrinen kartta: Torium-pitoisuus



Liite 6: Radiometrinen kartta: Kaliumin ja toriumin suhdekartta



Liite 7: Radiometrinen kartta: Toriumin ja uraanin suhdekartta