

**Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituut**

**Eesti graptoliitargilliidis leiduvate raskemetallide ja  
teiste elementide keskkonnamõju mudel ning  
leostumise dünaamika**

**Aruanne**

Sigrid Hade  
Margus Voolma  
Alvar Soesoo

Tallinn, 2017

## Sisukord

1. Sissejuhatus .....	4
2. Eesti geoloogiline ehitus ja Eesti graptoliitargilliidi lasundi läbilõige .....	6
2.1 Aluspõhi .....	6
2.2 Olulisemad aluspõhjalised pinnavormid ja pinnakate (Kvaternaari setted) .....	8
2.3 Graptoliitargilliit .....	10
3. Graptoliitargilliidi keemiline koostis .....	11
3.1 Jälgelemendid graptoliitargilliidis .....	14
4. Graptoliitargilliidist tulenevad keskkonnamõjud ja terviseriskid .....	19
4.1 Graptoliitargilliit ja radoon .....	20
5. Graptoliitargilliidi keskkonnaohtlikkuse mudeli koostamisel kasutatud andmestik ja digitaalne materjal .....	23
6. Projekti raames koostatud teemakaardid .....	24
6.1 Uraan .....	25
6.2 Molübdeen .....	27
6.3 Plii .....	28
6.4 Tsink .....	29
6.5 Vanaadium .....	30
6.6 Metallide summaarsed kogused .....	31
6.7 Kütteväärtus .....	32
6.8 Graptoliitargilliidi ala maapinna kõrgusmudel (DEM) .....	33
6.9 Muldade uraanisisalduse mudel .....	34
6.10 Mõõdetud radooni ja graptoliitargilliidis oleva uraani suhte mudel .....	36
6.11 Rahvastiku tihedus ja graptoliitargilliidi uraani ning pinnase radooni sisaldused .....	38
6.12 Kvaternaarisetted, setete paksus ja mõõdetud Rn sisaldus pinnases .....	40
7. Graptoliitargilliidi keskkonnaohtlikkuse mudel .....	43
7.1 Keskkonnaoht tulenevalt graptoliitargilliidi uraani, tsingi, plii, molübdeeni ja vanaadiumi sisaldusest .....	45
7.2 Keskkonnaoht tulenevalt graptoliitargilliidi uraani radioaktiivsest lagunemisest ja tekkivast radoonist .....	47
8. Kokkuvõte .....	51
KASUTATUD KIRJANDUS .....	52

## ANNOTATSIOON

TTÜ Geoloogia instituudi poolt täidetav KIK projekt nr 10224 "Eesti graptoliitargilliidis leiduvate raskemetallide ja teiste elementide keskkonnamõju mudel ning leostumise dünaamika".

Geokeemilistele analüüsidele ning GIS-meetoditele toetuvalt on modelleeritud graptoliitargilliidis leiduvate raskemetallide ja teiste keemiliste elementide keskkonnamõju sõltuvalt elanike asustustihedusest ja paikkonna geoloogia iseärasustest Põhja- ja Kirde-Eesti piirkonnas. Laboris on läbiviidud katse graptoliitargilliidi leostumise uurimiseks. Metallide ning teiste elementide sisaldust leostumisproduktides analüüsiti nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt. Saadud tulemusi kasutati graptoliitargilliidis sisalduvate metallide keskkonnaohtlikkuse potentsiaali hindamiseks ajalises lõikes.

Käesoleva töö teostamist finantseeris SA Keskkonnainvesteeringute Keskus ja TTÜ Geoloogia instituut



## 1. Sissejuhatus

Käesoleva töö eesmärk on graptoliitargilliidi keskkonnamõju hinnangu GIS mudeli koostamine. Põhja-Eesti pankrannikul, klindipiirkonnas, kujutab graptoliitargilliit looduslikku ohtu elanikkonnale, kuna soodsates lagunemistingimustes eralduvad temast mitmed kahjulikud metallid. Uraani radioaktiivsel lagunemisel tekkiv kõrgradioaktiivne gaas radoon annab suurima osa looduslikust kiirgusest, mille üle inimesel kontroll puudub. Kõrge Rn-sisalduse tase pinnaseõhus on peamiseks põhjuseks, miks majade siseõhus on Rn-sisaldus kõrge. Nii pinnaseõhus, kui hoonete siseõhus on usaldusväärse hinnangu andmiseks kindlasti vajalik otsemõõtmiste monitooringuvõrku tihendada, jätkata mõõtmisi, kuid seejuures on oluline hinnata ka teisi parameetreid, alates pinnase litoloogiast kuni ilmastikunäitajateni ja selgitada välja aluskorras olevate kahjulike ühendite migreerumistunnused. Kui palju radooni eraldub, oleneb kivimi (või ehitusmaterjali) poorsusest ja lõhelisusest: mida poorem ja lõhelisem, seda rohkem eraldub. Selle projekti raames täiustatud graptoliitargilliidi andmestik ja koostatud temaatilised kaardid lähtuvad seni olemasolevast geoloogilisest ja topograafilisest kaardiinformatsioonist, mis saadi Eesti Geoloogiakeskusest ja Maa-ametist. Mõnede vanemate geoloogiliste andmekihtide korral puudus visuaalse kaardipildi juurest sisuline andmestik ja legend või digitaalset materjali ei saadud. Looduskaitseandmed pärinevad Keskkonnaagentuuri keskkonnaregistrist EELIS - Eesti Looduse Infosüsteem, 2016. a. dets. seisuga (KeM Info- ja Tehnokeskus), rahvastikuandmed Statistikaametist, jaan. 2017.

Saadud ruumiline andmemudel kajastab graptoliitargilliidis (GA) määratud metallide kontsentratsioone ja pinnases mõõdetud Rn-sisaldusi võttes arvesse piirkonna rahvaarvu, asustustihedust ning maastikul esinevaid looduskomponente ja suuremaid tehisobjekte. Tsoneeringu tegemisel arvestati antud projekti ühe tegevusena läbiviidud GA leostumiseksperimenti tulemusi ning vastavalt kõikide riskifaktorite kogumõjule hinnati nende keskkonnaohtlikkust elanikkonnale ja vahetule looduskeskkonnale, sh. Läänemere ökosüsteemile. GIS-mudel võimaldab edaspidi hinnata keskkonnaseisundi muutusi GA otsese keskkonnaohuga alal esinevate looduskoosluste ja asustuse intensiivistumise lõikes.

Projekti teise olulise eesmärgina viidi läbi GA-s sisalduvate ohtlike raskemetallide ja teiste elementide lahustumisprotsessi uurimiseks leostumiseksperiment. Uuringu käigus kogutud vedelikproovide materjal analüüsiti kasutades geokeemilisi meetodeid (ICP-MS). Saadud andmestiku põhjal koostati hinnang selle kohta, millises mahus ja millise kiirusega eralduvad erinevad elemendid GA-st vedelikufaasi. Elemendipõhine leostumise dünaamika mudel täiendab GIS-i baasil loodud keskkonnaohtlikkuse mõjude mudelit. Saadud informatsiooni alusel hinnati looduslikku GA leostumist ja selle võimalikku mõju.

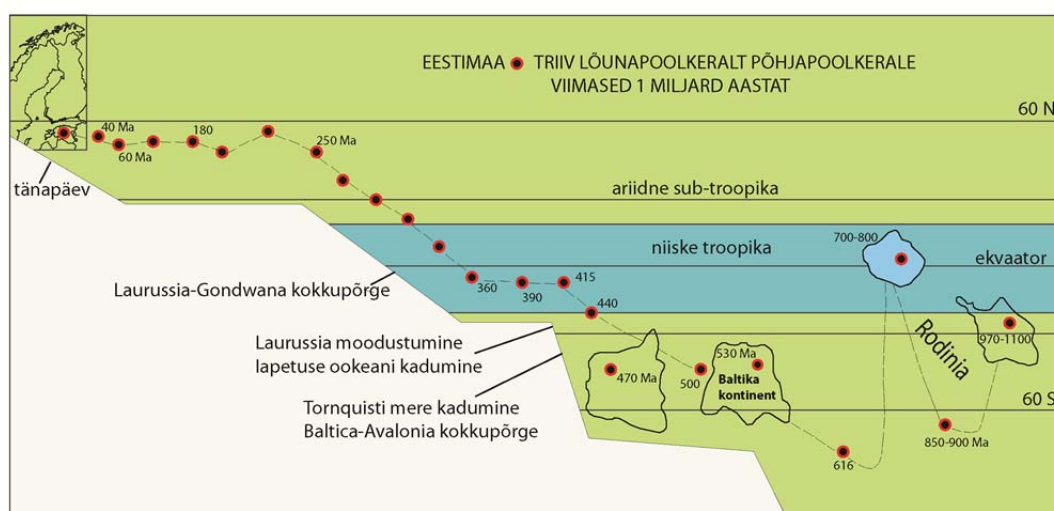
Projekti käigus koguti täiendavat proovimaterjali Eesti Põhja- ja Kirde-rannikul olevatest paljanditest ja ka olemasolevatest puursüdamikest. Proovimaterjali analüüsiti põhielementide ja jälgelementide lõikes röntgenfluorestsents- ja ICP-

MS meetoditel TTÜ Geoloogia Instituudi laborites. Kombineerituna olemasoleva andmestikuga loodi valitud elementide kohta detailsed territoriaalsed jaotusmudelid.

Projekti tulemused on kasutatavad uute elamukruntide ja ühiskondlike hoonete ehitustegevuse planeerimisetapil, omavalitsuste detailplaneeringutes, keskkonnamõjude hinnangutes, edasistes uurimustöodes, samuti ministeeriumitöötajatele, kes on seotud antud valdkonnast tulenevate õigusmeetmete täitmise tagamisega. Tulemused aitavad hinnata täiendavate geoloogiliste ja hüdroloogiliste uuringute, radoonimõõtmiste vajadust ja ulatust. Juba kavandatava arenduse asukohavalikul on tark väljaselgitada radooniohtlikkuse tase. Radooniohu vähendamiseks on oluline ennetavate meetmete järgimine juba ehitusprotsessi käigus, kuna olemasoleva hoone radoonikindlaks muutmine renoveerimistöde käigus on kulukam võrreldes riskist lähtuva radoonikindla uue hoone ehitamisega. Pidev teabe uuendamine, kajastamine ja teadlikkuse tõstmine radooni ja teiste raskmetallidega kaasnevast terviseriskist propageerib omakorda nende kiirgustaseme alandamist ärahoidvate meetmete järgimist hoonetes.

## 2. Eesti geoloogiline ehitus ja Eesti graptoliitargilliidi lasundi läbilõige

Eesti asub iidse kristalsetest kivimitest struktuuri – Fennoskandia kilbi lõunanõlval ja teinud viimase 500 miljoni aasta jooksul läbi märkimisväärse teekonna lõunapoolkera külmast parasvööttest praegusesse asukohta. Eesti maakoore võib jagada kolme ossa. Kõige ülemise osa moodustavad Kvaretnaariajastu jää- ja jää-veelised setted – moreenid, liivad, savid ja kruus. Eesti aluspõhja moodustavad selle all lasuvad Paleosoikumi vanusega (540-360 miljonit aastat tagasi ladestunud) moondumata settekivimid, millede paksus on Põhja-Eestis ca 150 meetrit (Lõuna-Eestis ulatub kuni 770 meetrini). Maakoore läbilõikes kõige all lasuvad umbes 1,9 kuni 1,6 miljardi aasta vanused kristalsed kivimid, mis Eesti territooriumil kusagil ei paljandu, kuid mõjutavad siiski pinnakatte mineraalset ja keemilist koostist. Nende, Proterosoikumi vanusega kivimite avamusi võime muidugi näha mitmete kuni 150 m sügavuselt aluspõhja lõikunud klindilahtede põhjas ja rohkete rändkivide näol üle Eesti. Proterosoikumi perioodi hilisemas osas (1,6 – 0,8 miljardit aastat tagasi) toimunud ulatusliku maapinna kulutamise käigus kulutati ära ka meie aladel asunud tollased mäeahelikud, mis ilmselt moodustasid koos Skandinaaviaga ühtse kõrge mäesüsteemi. Kuna kulutusperioodil setteid maha ei jäänud, puudub detailsem info tollal toimunu kohta. Umbes 750 miljonit aastat tagasi hakkas lagunema hiidkontinent nimega Rodinia. Lagunemisel moodustus 4 põhilist kontinenti, millest Baltika oli üks. Selle kontinendi osaks oli ka Eesti ning kogu Eesti geoloogiline areng oli mitmesaja miljoni aasta jooksul seotud Baltika kontinendi piiriga (Joonis 2.1).



Joonis 2.1: Baltika mandri triiv, millel asus ka Eesti, viimase miljardi aasta jooksul.

### 2.1 Aluspõhi

Soome lahe lõunaosas ja kogu Eesti territooriumil on kristalse aluskorra kivimid kaetud Ediacara (ehk Vendi, 630 kuni 542 miljonit aastat tagasi) ja Paleosoikumi settekivimitega. Paleosoikumiks ehk Vanaaegkonnaks nimetavad geoloogid aegkonda, mis algas umbes 542 miljonit aastat tagasi ja kestis kuni perioodini

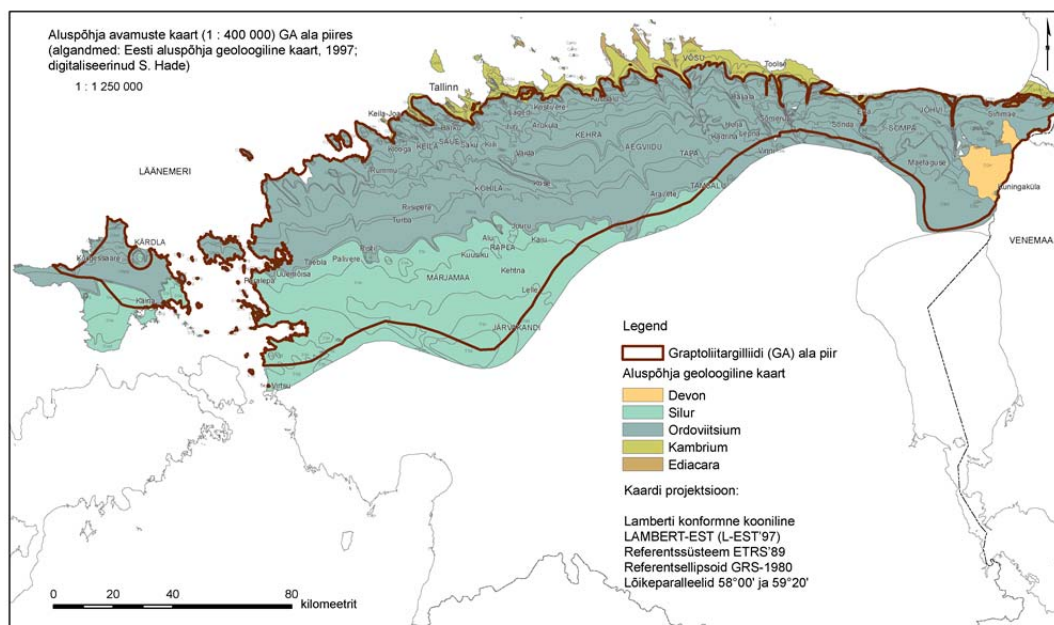
251 miljonit aastat tagasi. Nende ladekondade kivimid koos aluskorra pealispinnaga on kallutatud lõunasse, langusega ligi 3 m ühe km kohta. Sellest tulenevalt avanevad aluspõhjajakivimid lääne-idasuunaliste vöönditena, kus vanemaid kivimeid katavad lõuna suunas järjest nooremad kivimid ja kompleksi paksus suureneb samas suunas nii kihtide kallakuse kui ka maapinna tõusu tulemusel.

Põhja-Eestis maapinnale laialdaselt ulatuvad vanimad settekivimid kuuluvad Kambriumi ajastusse. Kambrium kestis 542 - 488 miljonit aastat tagasi. Baltika kontinent asus lõunapoolkeral külma lõuna-parasvöötme ja parasvöötme piirimail. Valitsesid külmemad tingimused kui praegu. Merelistes tingimustes kuhjusid jämedateralised rannalähedased liivad, mis hiljem asendusid saviaine settimisega. Sellest perioodist saime vanima maavara – kuni 90 m paksuseni küündiva savilasundi, mida tunneme Eesti põhjarannikul avaneva “sinisavi” nime all. Savide peale settisid hiljem liivakivid. Meri oli madal, asendudes tihti maismaaga - tolleaegsed setted koosnevadki peamiselt kvartsist, päevakividest, villkudest ja savimineraalidest. Mereelustikku oli vähe, aga mainimata ei saa siiski jätta fosfaatsete kodadega brahhiopoodide ehk käsijalgsete massilist madalmere piirkonna asustamist. Tekkis oobolusliivakivi ja kohati, kus liivakivis karbipoolmete kontsentratsioon on kõrgem, nimetatakse seda Kambriumi lõpul-Ordoviitsiumi algul madalmere-tingimustes tekkinud kivimit fosforiidiks.

Kambriumi kivimite peal lasuvad Ordoviitsiumi kivimid. Ordoviitsiumi ajastu kestis 488 kuni 443 miljonit aastat tagasi. Seda ajastut võib pidada merede valitsemise ajastuks, kuna kunagisest Gondwana hiidkontinendist olid eraldunud mitmed suured kontinentaalsed plokid ning ümber millede laiusid madalad mered. Baltika kontinent asus Ordoviitsiumi alguses lõunapoolkera suhteliselt jahedas kliimavöötmes. Praegused Eesti alad olid üleujutatud madala merega, kus settisid alguses liivad, siis erinevad lubimudad ja hiljem karbonaatsed kivimid koos Eesti põlevkivi – kukersiidiga. Ordoviitsiumi algusperioodil ladestusid pruunikad savikad kõrge orgaanika- ja metallisisaldusega argilliidid. Need argilliidid on varasemalt teada diktüoneemakilda, musta kilda või siis praeguse nime - graptoliitargilliidina. Ordoviitsiumi lõpuks oli Baltika jõudnud juba 15-20nda laiuskraadini lõunapoolkeral. Ordoviitsiumi ajastu lõpul toimus äkiline jahenemine, mis lõppes mandrijää tekkega lõunapooluse kohal paiknenud Põhja-Aafrikas. See üldine külmenemine - nn. Sahara jäätumine - mõjutas maakera arengut eelkõige sellega, et jäätumisega kaasnunud ookeanipinna alanemine 50 kuni 100 meetri võrra muutis paljud mandreid katnud madalmered kuivaks maismaaks.

Graptoliitargilliidi lasuvusalast Hiiumaa lääneosa ja Lääne-Eesti GA lõunapiiril paljanduvad Siluri vanusega kivimid. Siluri ajastu kestis 443 kuni 416 miljonit aastat tagasi. Eesti asus tollal juba lõunapoolkera soojades tingimustes. Keskmine temperatuur võis ületada tänapäevast kuni 10 kraadiga. Mere madalamas, rannalähedases osas settisid karbonaatsed setendid – hilisemad lubja- ja dolokivid, sügavamas avameres aga savikad setendid – praegused merglid, savid, savikildad. Esimest korda Maa ajaloos liikus elu meredest maismaa suunas ja just Siluris hakkasid mitmed kontinendid taas üksteisele lähenema. Lähenesid ka Baltika ja Põhja-Ameerika (Laurentia), mis ajastu lõpuks

ka liitused, ehk kokku pörkasid. Kuna iga kokkupõrge on geoloogiliselt ja tektooniliselt väga aktiivne protsess kerkiski endise lapetuse ookeani asemele Kaledoniidide mäestik. Graptoliitargilliidi ala pinnakatte all avanevatest aluspõhjakiivimitest annab ülevaate aluspõhja geoloogiline kaart (Joonis 2.2).



Joonis 2.2: Põhja-Eesti aluspõhja geoloogiline kaart ja graptoliitargilliidi ala levikupiir.

## 2.2 Olulisemad aluspõhjalised pinnavormid ja pinnakate (Kvaternaari setted)

Ligikaudu 350 miljonit aastat kestnud mandrilise kulutuse tulemusel kujunesid kulumiskindlamatel aluspõhjakiivimitel (lubja- ja dolokivi) Viru-Harju lavamaa, Pandivere kõrgustik ja ida pool sellest madalam Jõhvi kõrgendik ning Lääne-Eesti tasandik koos väiksemate pinnavormide Nõva nõo, Noa-Rootsi ja Matsalu nõoga tasandiku lääneosas. Arvatavasti juba Devoni ajastu lõpust oli olemas ka nõgu praeguse Soome lahe kohal ehk klindiesine tasandik, nüüdne Põhja-Eesti rannikumadalik. Maastikuüksus, mis piirab praegu GA esinemisala põhja poolt. Aluspõhja pealispinda on oluliselt mõjutanud Kvaternaari jäätumised. Eesti territoorium allus vähemalt kolmel korral Skandinaavia mägedest lähtunud mandrijäätumistele, mis tasandasid reljeefi ja kandsid minema arvatavasti mitmekümne meetri paksuse setendite kihi. Iga uus pealetunginud liustik hävitas muidugi üsna suuresti varem tekkinud setted ja pinnavormid (Raukas ja Kajak, 1997).

GA esinemisala ääristab põhjast Põhja-Eesti paekallas ehk Põhja-Eesti klint. Siiani pole veel päris selge, millal ajalisel toimus ja mis põhjustas toleaege ulatusliku erosiooni praegustelt Põhja- ja Lääne-Eesti aladelt. Põhja-Eesti klint on selle kulutuse kõige markantsem pinnavorm, moodustades osa 1200 km pikkusest Balti klindist. Klindi näol on tegemist Baltika ürgmandrit katva varapaleosoliste settekivimite lasundi enam kui 100 km ja kuni 55 m kõrge paljandiga. Klindi geoloogilise läbilõike ajaliseks ulatuseks on umbes 80 miljonit

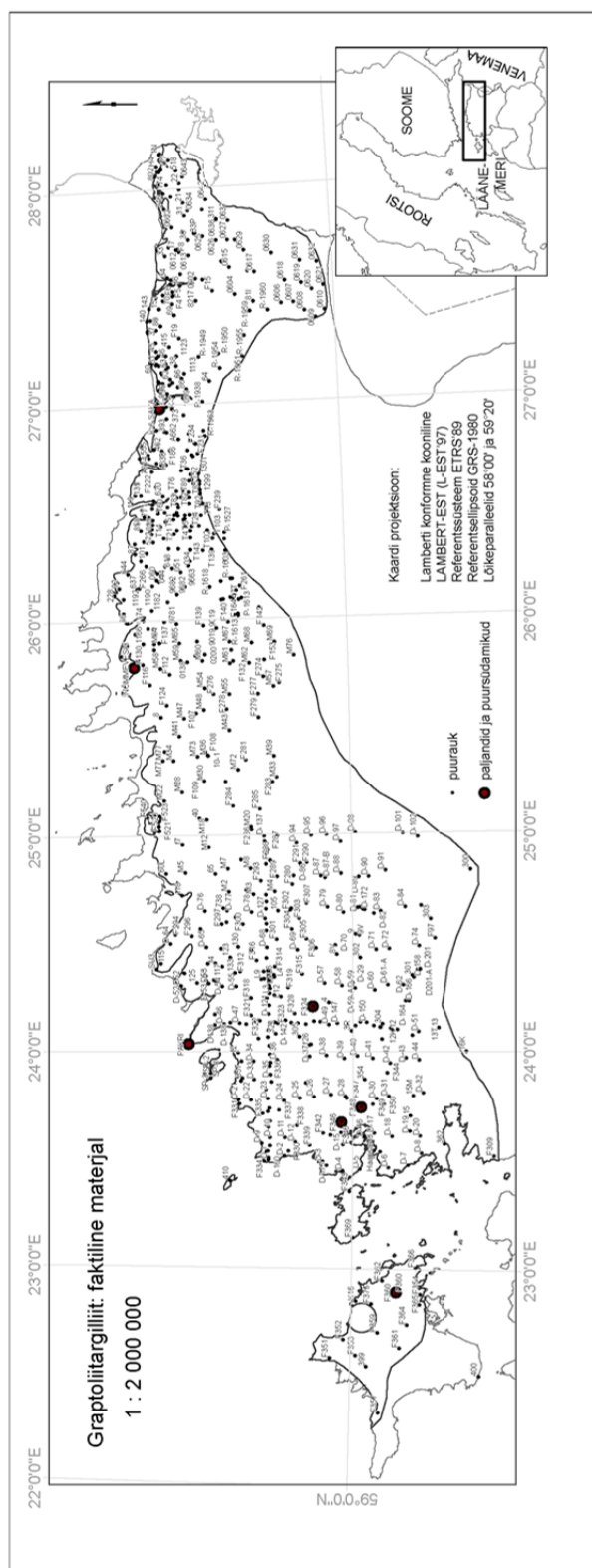
aastat, sellel paljanduvad kivimid jäävad vanusevahemikku 540–460 miljonit aastat.

Võimalik, et Põhja-Eesti klindi tekkimine on seotud ulatusliku hiiglasliku Eridanose jõgedesüsteemiga umbes 10 miljonit aastat tagasi. Ka aluspõhja lõikuvad mattunud orud (sügavusega 100 meetrit) markeerivad seda jääajaelset jõgedevõrku - piki tänast Soome lahte kulges Eridanose lisajõgi Ürg-Neeva, mis põhjustas praeguse Põhja-Eesti ja Lääne-Eesti ulatuslikelt aladelt setete ärakande. Tõenäoliselt kujunes Eridanose jõgedesüsteem välja Fennoskandia kilbi kerke tagajärjel ja Põhjamere basseini taandumisel. Seda hüpoteesi toetab terrigeensete setete olemasolu Põhjameres 100 000 km<sup>2</sup> suurusel alal ja Miotseeni (23,0...5,3 miljonit aastat tagasi) kuni Vara-Pleistotseeni (ajastu algus 2,588 miljonit aastat tagasi) vanusega fluviaalsete setete olemasolu Saksamaa ja Hollandi piirkonnas. Samuti on leitud Eridanose deltaaladele transporditud materjali hulgast Fennoskandia kristalseid kivimeid, Ordoviitsiumi vanusega terrigeenset materjali ja rändkive Ordoviitsiumi-aegsete fossiilidega, mis sarnanevad Põhja-Eesti ja St. Peterburi regioonile. Niisiis, suure tõenäosusega Alam-Paleosoikumi vanusega kivimite, ka graptoliitargilliidi ärakanne Lääne-Eesti aladelt on seotud protsessidega, mis põhjustasid klindi tekke.

Kvaternaar jaotatakse paleokliimaatilisel Holotseeniks (nn. jääajajärgne aeg) ja Pleistotseeniks (nn. jääaeg). Nendevaheliseks piiriks loetakse aega 10000 radiosüsiniku aastat tagasi, kui Põhja-Euroopas algas jääajajärgse kliima oluline paranemine ning organogeensete järvesetete kuhjumine ja soode areng. Üldiselt moodustavad pinnakatte aluspõhja kivimeid katvad setted, mis on tekkinud murenenud aluspõhjativimeist või pärinevad Fennoskandia kilbi aladelt koosnedes purdsetteist (liiv, kruus, moreen), kemogeensetest (järvelubi) ja biogeensetest (turvas) setetest. Jääaja setted on valdavalt, kuid ka soojaperioodidest (jäävaheaegadest) on säilinud setteid, mis katavad Holotseeni setteid katkendlikult ja õhukese kihina.

Kvaternaari setete paksus on Põhja-Eestis erinev, ulatudes mõnekümnest sentimeetrist alvarite piires kuni kümnete meetriteni ja maksimaalselt 125 m ürgorgude suudmeala piires. Kvaternaari setete hulgas on kindlasti esikohal mandrijää liustikusetted: moreen ja Balti jääpaisjärve, kohalike jääjärvede ning vooluvete aleuriit ja liiv, harva kruus ja savi. Läänemere Litoriina ja Limnea arengustaadiumide aleuriit ja liiv levivad klindieelsel tasandikul. Tagasihoidlikumalt on meil esindatud Holotseeni soo-, jõe- ja tuulesetted. Moreen olla kaetud nii jääjärve- kui ka meresetetega. Alvarite piires levib tavaliselt moreen, põhjaosas, ürgorgude piires levivad erinevad litotüübid, kohati ka graptoliitargilliidi peenfraktsioonirikkad setted. Omaette settetüübiks on kujunenud klindinõlva ja -jalami setted. Põhiliselt koosnevad need moreenist või aleuriidi ja liiva segust, kuid pea kõikjal esineb nendes muutlikus koguses graptoliitargilliidi ja fosforiidi purdu ning peenmaterjali. Omaette klassi moodustavad tehnogeensed setted. Valdavalt on need ümberpaigutatud kohalikud setted, mis sisaldavad kivist ehitiste lammutusjätmeid, sageli kivisöe- ja põlevkivituhka, kaugemalt veetud moreeni ja isegi klindi nõlvaseteid.

## 2.3 Graptoliitargilliid

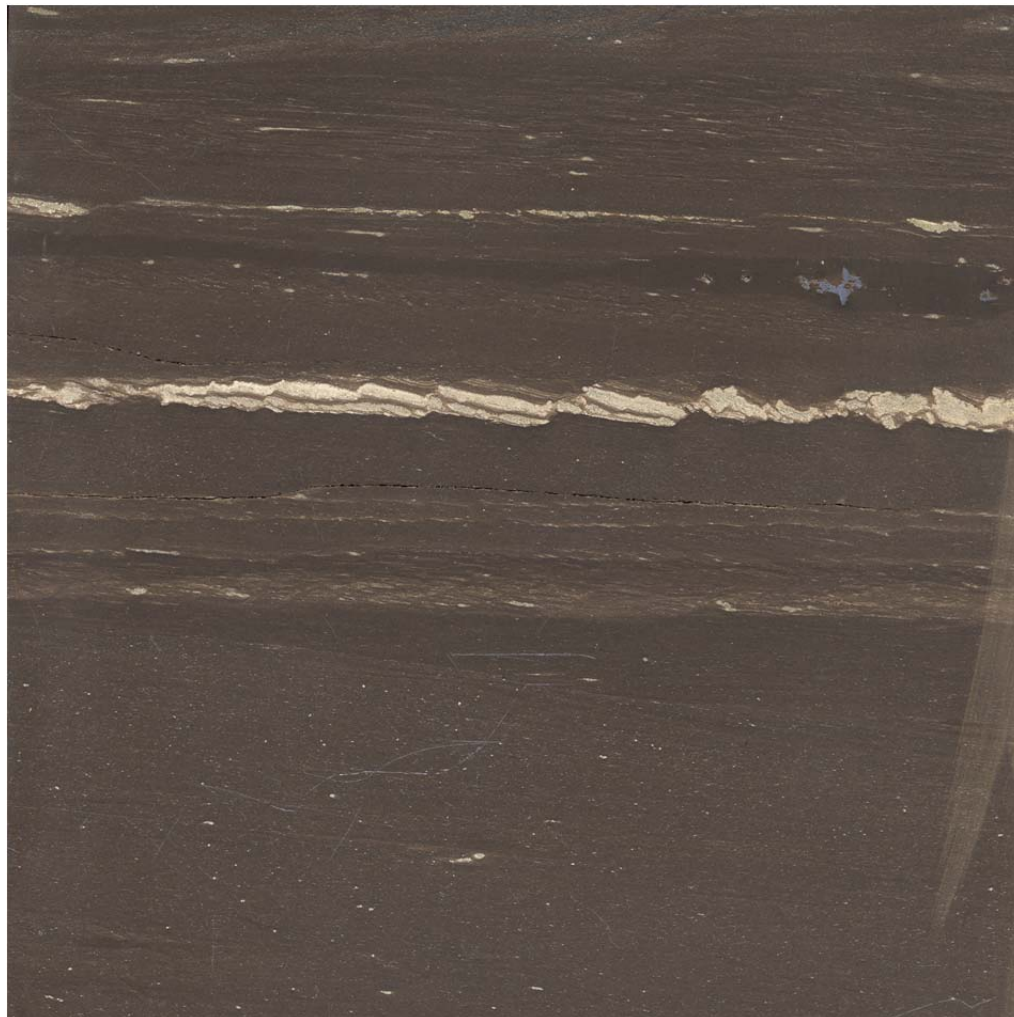


Eesti graptoliitargilliid (GA) hõlmab umbes 12210 km<sup>2</sup> ala ja kivimi maht on 31,92 miljardit m<sup>3</sup>. GA kogumass, arvestades eritihedust 2100 kg/m<sup>3</sup> kohta, on 67 miljardit tonni (Hade jt, 2013). Sellele lisandub ligikaudu 18,9 miljardit tonni kivimit, mahuga 9,02 miljardit m<sup>3</sup>, mis paikneb (ja on põhjaosas kohati ära erodeeritud) umbes 3190 km<sup>2</sup> alal Mandri- ja Lääne-Eesti saarte vahel. Eestis leidub graptoliitargilliiti Kesk-Eestist põhja poole jääval alal (Joonis 2.3). GA kihi paksus on suurim Loode-Eestis (7 m) vähenedes ida ja lõuna suunas. GA moodustab Ordoviitsiumi ladestu Pakerordi lademe Türisalu kihistu. Tulenevalt Eesti aluskorra geoloogilisest ehitusest on GA maapinnale kõige lähemal Põhja-Eestis ja kihi sügavus kasvab lõuna suunas. Otseselt keskkonna mõjudele on GA lasund avatud Põhja-Eesti pankrannikul (näiteks Pakri poolsaar, Türisalu pank). Maapinna lähedal on GA kiht näiteks Tabasalus. Nõmmeveskil lõikub Valgejõe kanjonorg läbi GA lasundi.

*Joonis 2.3: Projekti käigus võeti argilliidi keemilise koostise määramiseks lisaproovid neljast puursüdamikust (F360, F346, F348, F324). Põhja-Eesti rannikult uusi täit läbilõiget pakkuvaid paljandeid proovide võtmiseks ei leitud, varasemalt on võetud ja analüüsitud paljanditest korjatud proove Pakrilt, Nõmmeveskist ja Sakalt.*

Graptoliitargilliid (GA) on tumepruuni kuni musta värvusega orgaanikarikas settekivi (Joonis 2.4). Orgaanikasisaldusest tingituna liigitub GA põlevkivide hulka, kuid orgaanilise aine madala sisalduse (ca 10-20%) tõttu ei ole

majanduslikult otstarbekas GA toorainena kasutada. Peendispersele orgaanilisele ainele lisaks koosneb graptoliitargilliit erinevatest mineraalidest. Mineraalosas domineerivad silikaatsed mineraalid kvarts, kaaliumpäevakivi ja savimineraalid, mille kõrval arvestatava osa moodustavad sulfiidsed mineraalid – peamiselt püriit, aga ka galeniit, sfaleriit, markasiit. Karbonaatsete ja fosfaatsete mineraalide osakaal on väike.



Joonis 1.4: Graptoliitargilliit Suur-Pakri saarelt (puursüdamik SP3), foto laius 9 cm.

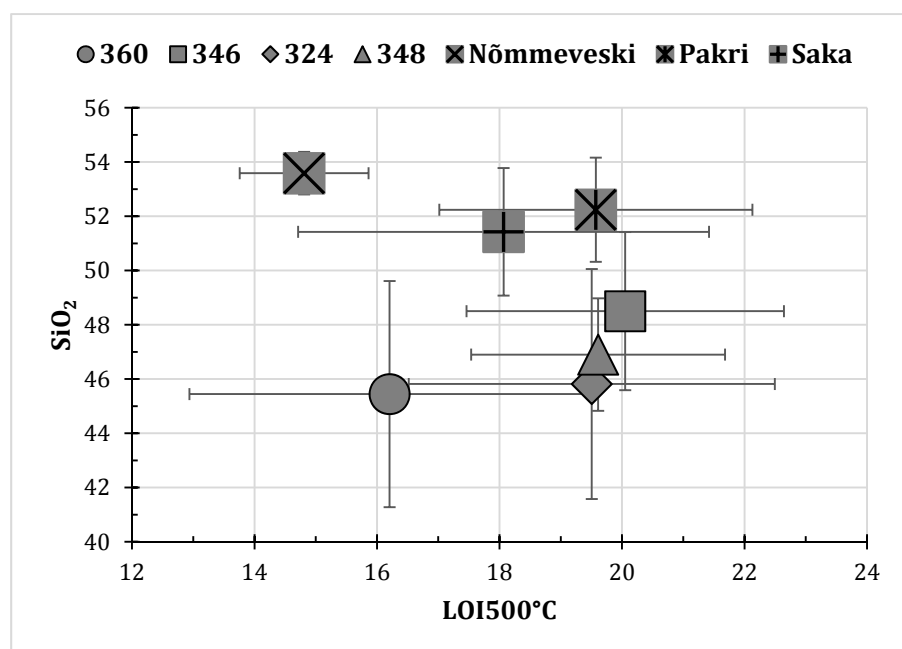
Mineraalsest koostisest tulenevalt moodustab argilliidi keemilisest koostisest valdava osa Si, Al, K (silikaatsed mineraalid) ja Fe ning S (sulfiidsed mineraalid). Lisaks põhielementidele leidub argilliidis palju haruldasi raskmetalle (Cd, Co, Sb, Pb, Cr, Zn, Ni, Cu, U, V, Mo, As, Tl), kohati väga kõrgetes kontsentratsioonides.

### 3. Graptoliitargilliidi keemiline koostis

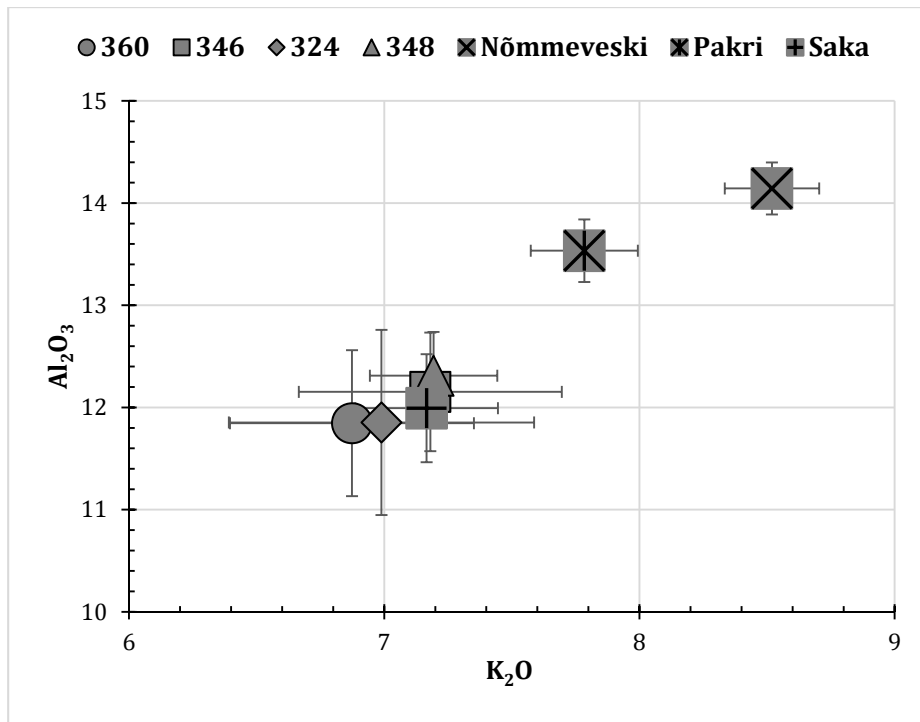
Orgaanikarikas sette kivim graptoliit argilliit koosneb valdavalt silikaatsetest mineraalidest. Ligi saja analüüsitud argilliidi proovide põhikomponentide osakaalud varieeruvad nii läbilõikes, kui ka erinevate asukohtade vahel. Järgnevatel graafikutel on demonstreeritud argilliidi põhielementide ja valitud raskmetallide sisaldused analüüsitud puursüdamikes ja paljandi proovides erinevatest asukohtadest Lääne-Eestist kuni Ida-Eestini (Joonised 3.1 – 3.4).

Tabel 1: Graptoliitargilliidi oluliste põhielementide (kaalu%-s) omavaheline seos korrelatsioonikoefitsientide tabelina. Tugev positiivne korrelatsioon on mägitud rohelisega, tugev negatiivne punasega, kollane näitab enamasti korrelatsiooni puudumist.

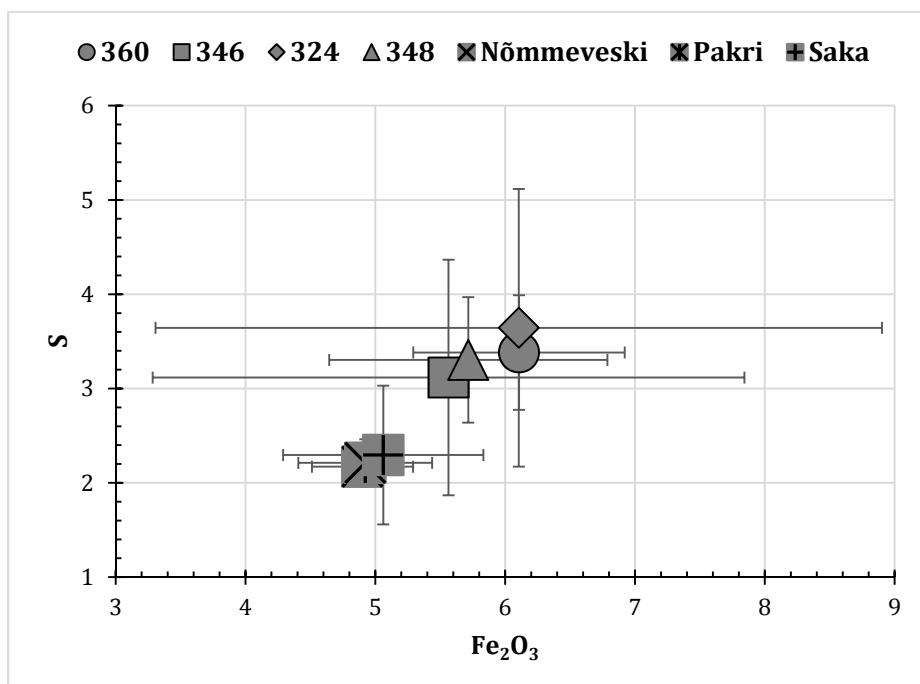
	LOI 500°	LOI 920°	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	F
LOI 500°C	1.00											
LOI 920°C	0.89	1.00										
SiO <sub>2</sub>	-0.64	-0.89	1.00									
TiO <sub>2</sub>	-0.41	-0.60	0.67	1.00								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.34	-0.52	0.65	0.89	1.00							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.10	0.16	-0.36	-0.39	-0.30	1.00						
MgO	0.12	0.23	-0.35	0.06	0.17	0.09	1.00					
CaO	-0.26	-0.10	-0.26	-0.28	-0.35	0.28	0.51	1.00				
K <sub>2</sub> O	-0.45	-0.62	0.72	0.91	0.94	-0.41	0.04	-0.33	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.37	-0.33	0.13	-0.36	-0.43	0.15	-0.31	0.48	-0.38	1.00		
S	0.15	0.48	-0.66	-0.70	-0.65	0.75	-0.02	0.19	-0.69	0.10	1.00	
F	-0.22	-0.01	-0.23	-0.38	-0.45	0.25	-0.02	0.39	-0.37	0.42	0.34	1.00



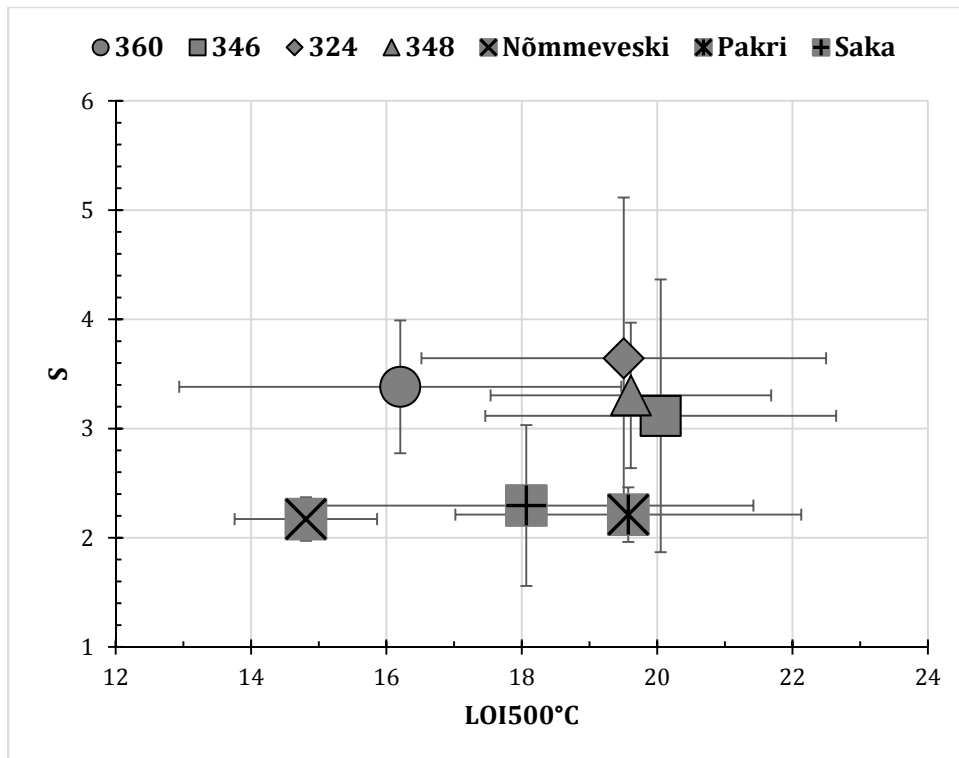
Joonis 2.1: SiO<sub>2</sub> versus LOI 500°C. SiO<sub>2</sub> on graptoliitargilliidis seotud erinevate silikaatsete mineraalidega (kvarts, K-päevakivi, savimineraalid, vilgud), LOI500°C peegeldab kivimi orgaanika sisaldust. Valdavalt jääb SiO<sub>2</sub> sisaldus 45-55 massi% vahele ja orgaanika sisaldus varieerub keskmiselt 14-20 massi% vahel. Kõige madalam orgaanika sisaldus on Nõmmeveski proovides, kus vastukaaluks on kõrgeim SiO<sub>2</sub> sisaldus. Selline seaduspära kehtib GA-le üldiselt - mineraalosa kasvades orgaanika sisaldus väheneb.



Joonis 3.2:  $K_2O$  ja  $Al_2O_3$  on graptoliitargilliidis seotud silikaatsete mineraalidega, peamiselt K-päevakiviga, aga vähesel määral ka vilkude ja savimineraalidega. GAs üldiselt on nende elementide vahel tugev korrelatsioon, vaadeldes erinevate piirkondade järgi võib öelda, et Nõmmeveski ja Pakri argilliit on kõrgema kaaliumi ja alumiiniumi sisaldusega.



Joonis 3.3:  $Fe_2O_3$  versus S graafikult on näha, et raud on GAs peamiselt seotud sulfiidsete mineraalidega (püriit, markasiit). Valdavalt jääb väevli sisaldus GAs 2 ja 4 massi% ning  $Fe_2O_3$  kontsentratsioon 4 kuni 7 massi% vahele. Graptoliitargilliidis kohati väga kõrgetes kontsentratsioonides esinevaid raskmetalle seostatakse peamiselt orgaanikaga ja sulfiididega.



Joonis 3.4: Väevli ja orgaanika (LOI500°C) sisalduste vahel argilliidis mingit selget seaduspära ei esine. Orgaanika sisalduse suur variatsioon 12 ja 24 massi% vahel on tingitud silikaatsete mineraalide hulgast GAs. Väävel, mis peamiselt peegeldab püriidi hulka argilliidis on selgelt kitsamates piirides varieeruv, samas igas puursüdamiku läbilõikes esineb vähemalt üks püriidi-rikas proov.

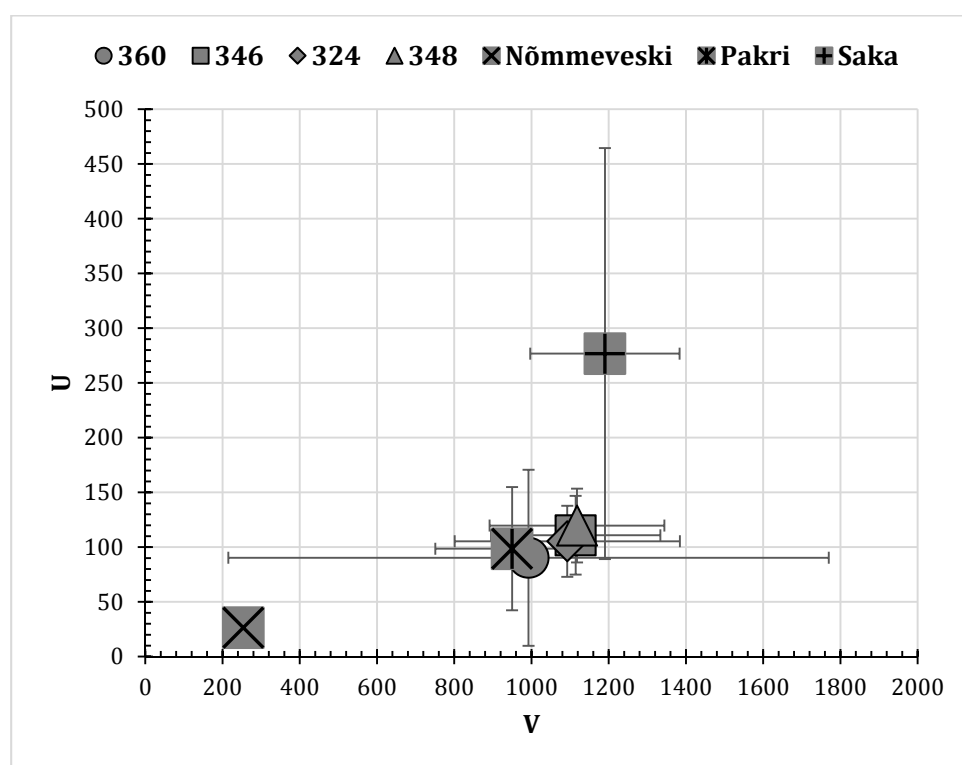
### 3.1 Jäljelemendid graptoliitargilliidis

Raskmetallide sisaldused graptoliitargilliidis erinevad kordades nii läbilõikes kui ka lasundi piires, mida peegeldavad ka üsna madalad korrelatsioonikoefitsiendid erinevate elementide vahel (Tabel 2). Tabelis toodud elementidest Zr, Cr ja Rb sisaldust settekivimites seostatakse silikaatsete mineraalidega, kui Cu, Ni, Pb, Zn ja As seostuvad sulfiidsete iseseisvate mineraalidena või lisandina püriidis. V, U ja Mo seostatakse orgaanikarikastes settekivimites peamiselt orgaanika sisaldusega. Kuigi korrelatsioonid on kohati nõrgad, siis eelpool loetletud seaduspärad üldjuhul kehtivad. V, U, Mo (+Ni ja As) näitavad negatiivset korrelatsiooni Zr, Cr ja Rb.

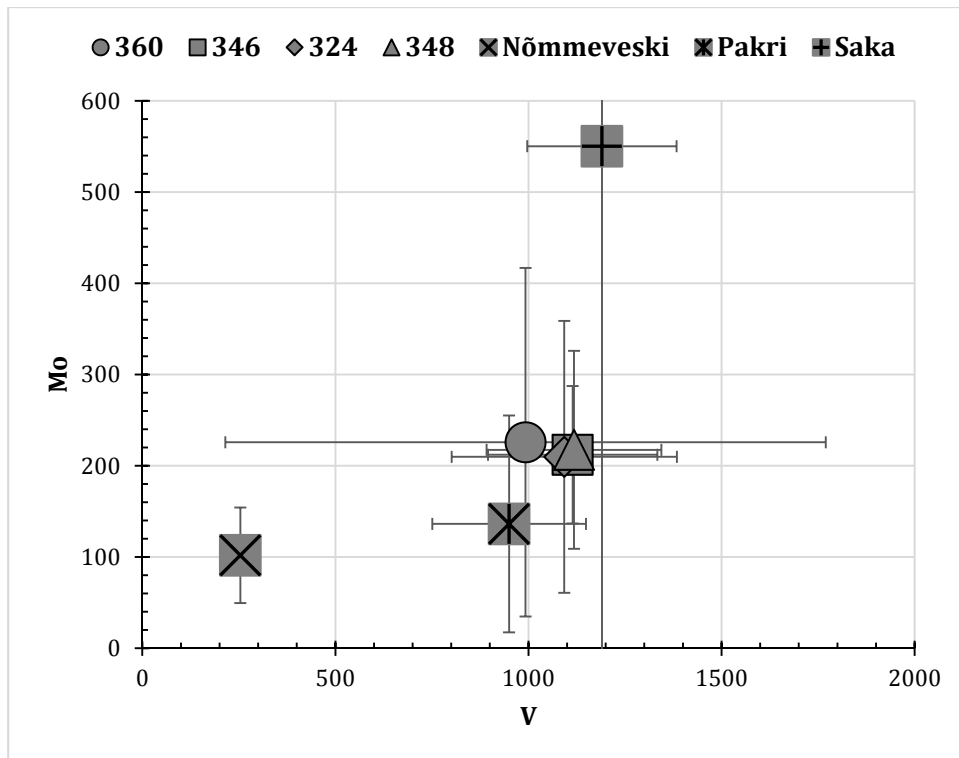
Graafikutel (Joonised 3.5 – 3.11) on kuvatud elemendi keskmine kontsentratsioon ja standardhälve, mis peegeldab elemendi muutlikkust läbilõikes.

Tabel 2: Graptoliitargilliidi peamiste jälgelementide (sisaldused grammides tonni kohta) korrelatsioonikoeffitsientide tabel. Tugev positiivne korrelatsioon on märgitud rohelisega, tugev negatiivne punasega, kollane näitab enamasti korrelatsiooni puudumist.

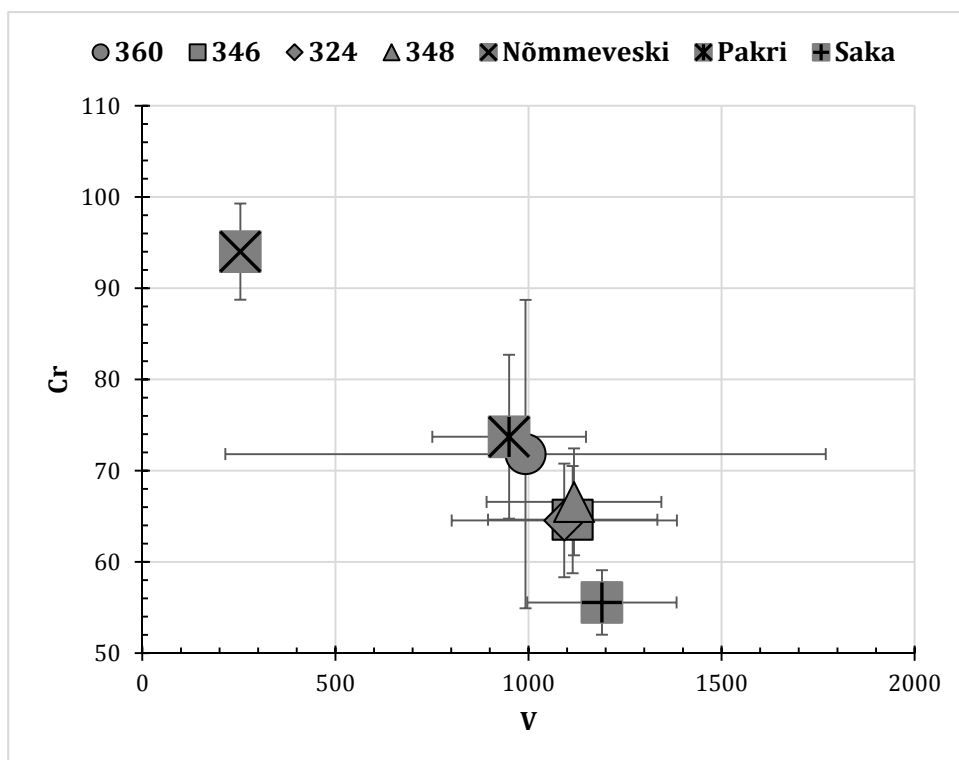
	Cu	Ni	Pb	Zn)	Cr	V	U	Mo	As	Rb	Zr
Cu	1.00										
Ni	0.32	1.00									
Pb	0.00	0.36	1.00								
Zn	-0.20	0.14	0.19	1.00							
Cr	0.14	-0.54	-0.37	-0.17	1.00						
V	-0.08	0.66	0.33	0.14	-0.76	1.00					
U	-0.07	0.40	0.24	0.07	-0.71	0.61	1.00				
Mo	-0.41	0.40	0.23	0.27	-0.55	0.61	0.63	1.00			
As	0.17	0.57	0.51	-0.04	-0.42	0.36	0.19	0.12	1.00		
Rb	-0.04	-0.13	-0.45	0.00	0.18	0.13	-0.02	0.19	-0.54	1.00	
Zr	-0.13	-0.42	0.02	-0.05	0.18	-0.36	0.04	-0.09	-0.16	-0.15	1.00



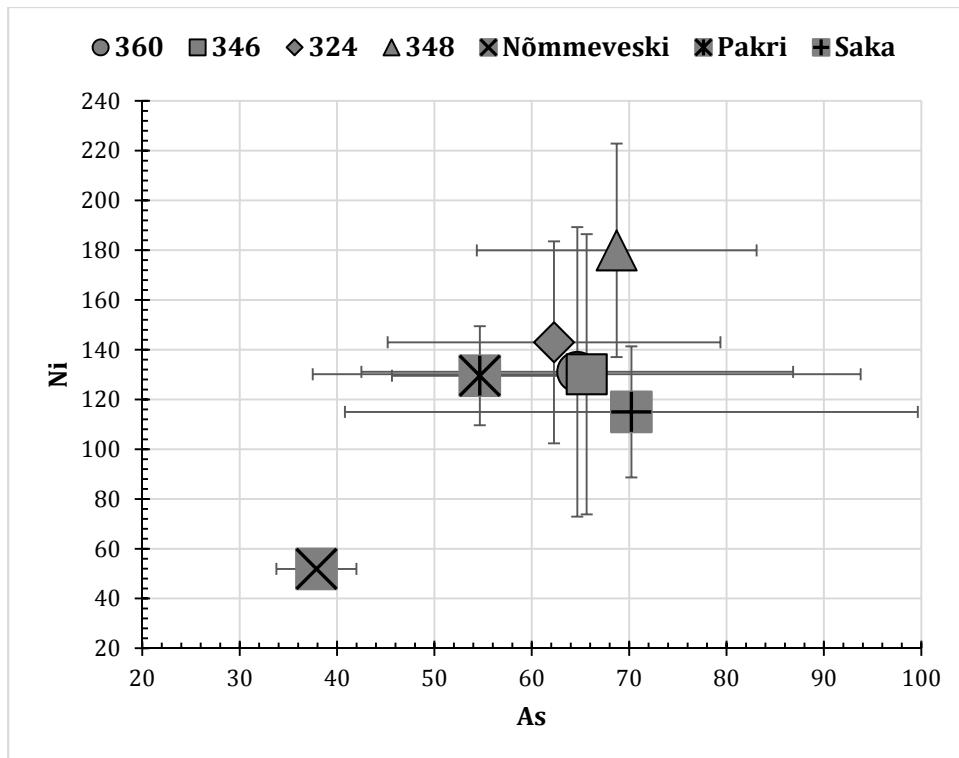
Joonis 3.5: Vanaadium versus uraan. Vanaadiumi sisaldus graptoliitargilliidis on keskmiselt 1000-1200ppm. Võrreldes teiste proovidega on Nõmmeveski graptoliitargilliit anomaalselt madala V sisaldusega, sarnaseid proove esineb ka puuraugu F-360 läbilõikes. Uraani keskmine sisaldus jääb keskmiselt 100 ppm lähedale. Nõmmeveski proove iseloomustab jällegi anomaalselt madal uraani sisaldus, kuid näiteks Saka läbilõikes esineb anomaalselt kõrge uraani sisaldusega intervalle võrreldes proovidega teistest asukohtadest.



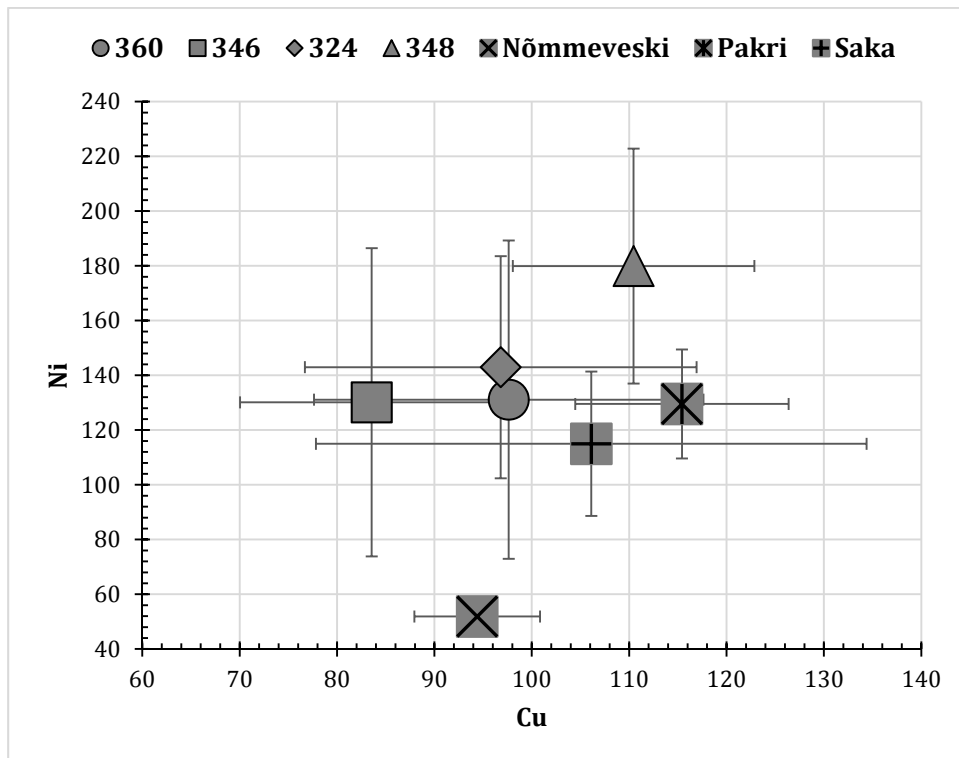
Joonis 3.6: Vanaadium versus molübdeen. Molübdeeni sisaldus kõigub suurtes piirides, eriti Saka ja puuraugu F-360 läbilõigetel. Analüüsitud läbilõigetel varieerub keskmine kontsentratsioon enamasti 100-225 ppm vahel v.a. Saka, kus keskmine sisaldus on 550 ppm.



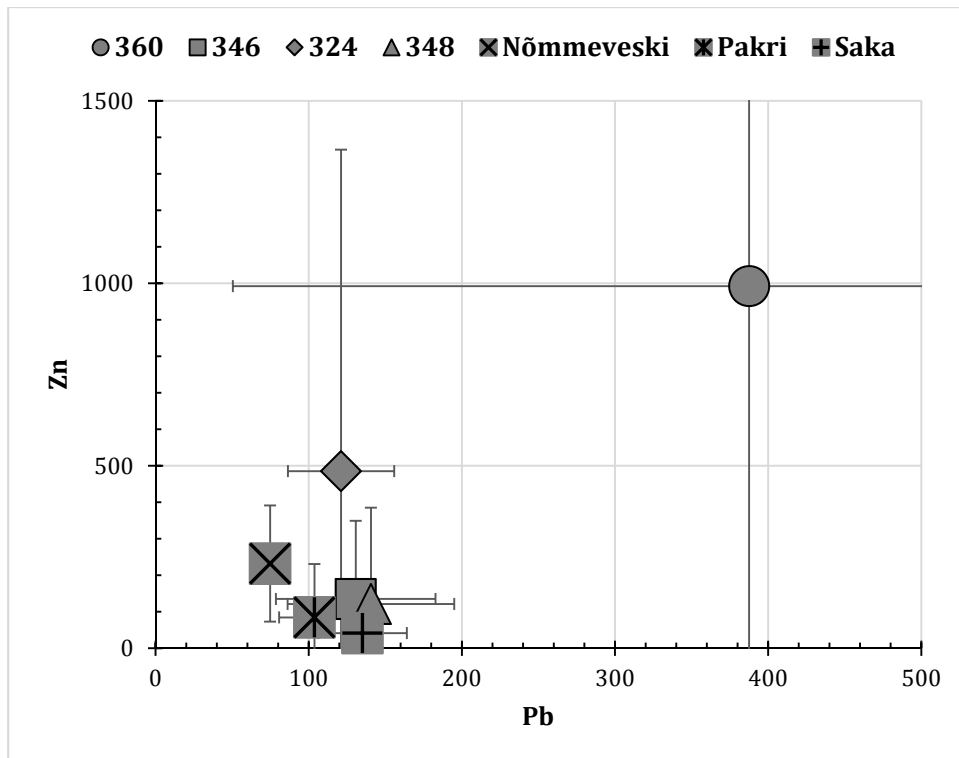
Joonis 3.7: Vanaadium versus kroom. Kroomi keskmised sisaldused erinevates läbilõigetel varieeruvad 55-95 ppm vahel. Kui puuraugu F-360 läbilõikes sarnasel V sisaldusele ka Cr kontsentratsioon kõigub suurtes piirides, siis teiste läbilõigete puhul on Cr sisaldused üsna vähe muutlikud.



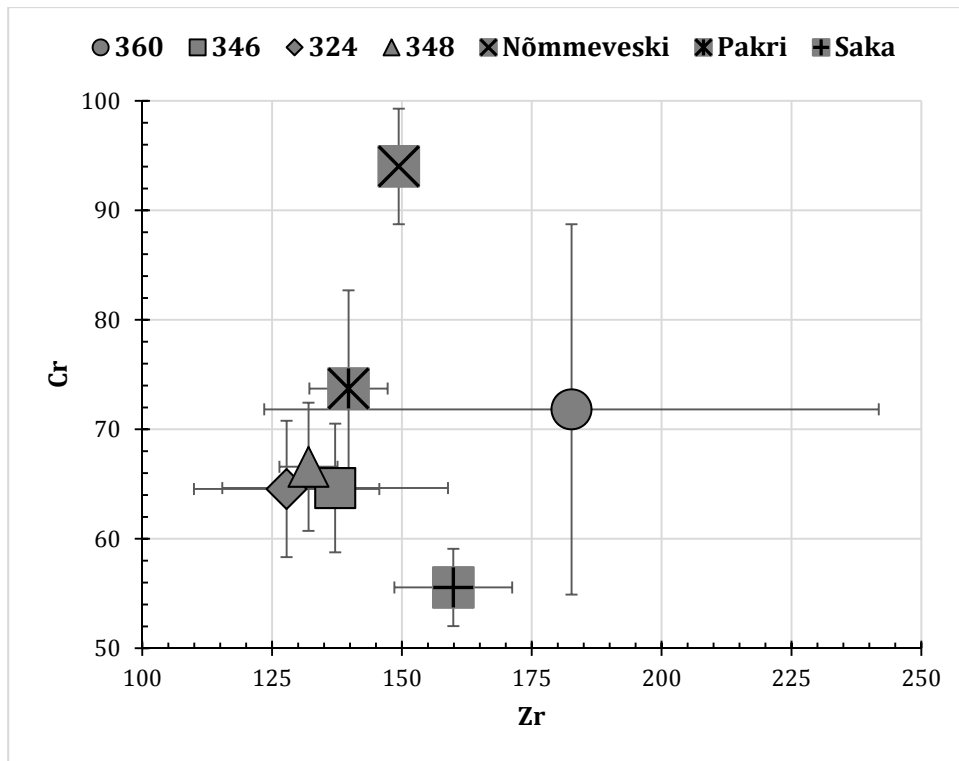
Joonis 3.8: Arseen versus nikkel. Arseeni ja nikli sisaldused on muutlikud erinevates läbilõigetes, kusjuures arseeni muutlikus on selgelt suurem. Madalaim sisaldus on Nõmmeveski läbilõikes. Nikli keskmine sisaldus on valdavlt 130 ppm, mõnevõrra kõrgem sisaldus on puuraugu F-348 läbilõikes ulatudes 180 ppm. Arseen varieerub keskmiselt 55 ja 70 ppm vahel.



Joonis 3.9: Vask versus nikkel. Võrreldes nikliga on vase sisaldused erinevates proovides muutlikumad jäädes keskmiselt 85 ja 115 ppm vahele.



Joonis 3.10: Plii versus tsink. Plii sisaldused jäävad keskmiselt 75 ja 130 ppm vahele v.a. puuraugu F-360 läbilõikes, kus esineb väga kõrge plii sisaldusega proove, mis kergitavad läbilõike keskmise plii kontsentratsiooni ligi 390 ppm-ni. Sarnane trend selles läbilõikes kehtib ka tsingi puhul. Anomaalselt kõrgeid tsingi sisaldusi leiab ka puuraugu F-324 läbilõikest. Nõmmeveski proovides võrreldes teiste läbilõigetega nii anomaalseid tsingi sisaldusi ei esine, kuid ometi on keskmine sisaldus üsna kõrge - 230 ppm.



Joonis 3.11: Kroom versus tsirkoonium. Tsirkooniumi keskmised sisaldused varieeruvad valdavalt 130-160 ppm vahel. Puuraugu F-360 läbilõikes esineb kõrgema kontsentratsiooniga intervall.

## 4. Graptoliitargilliidist tulenevad keskkonnamõjud ja terviseriskid

Maakoor sisaldab oma tekkimisest peale radioaktiivseid elemente, mis tekitavad looduslikku kiirgusfooni. Kivimites, atmosfääris, pinnases, taimedes ja elusorganismide kudedes leidub radioaktiivseid isotoope nagu kaalium-40, rubiidium-87, uraan-235 ja toorium-232. Mõned nukliidid on ligi 4,5 miljardit aastat vanad. Kogu Põhja-Eesti kõrge asustustihedusega piirkonnas on loodusliku radiatsiooni, eelkõige kõrgradioaktiivse radooni esinemine oluliselt suurem klindiasangu piirkonnas ja sellesse lõikuvates kuni 100 meetri sügavustes orgudes, kus paljanduvad graptoliitargilliit ja fosforiit. Kallavere kihistusse kuuluva oobolusliivakivi (fosforiit) lõikes on eristatud 3 kihistikku: graptoliitargilliidi vahekihtidega oobolusliivakivi (Orasoja kihistu tüüppaljandiga Narva klindilõigul Orasoja kanjonis), detriitne oobolusliivakivi (Suurejõe Lääne-Viru klindilõigul Vihula klindiorus) ja Ida-Harjus Kallavere-Ülgase klindipoolsaarel Maardu kihistu oobolusliivakivi paljand, mis sisaldab terveid oboliidide kojapoolmeid. Fosforiidi lasuvusaladel kahjuks detailsemad geokeemilisi uuringuid läbi viidud ei ole. On arvatud, et U-sisaldus fosforiitides on otseses korrelatsioonis  $P_2O_5$ -ga (Loog, Petersell, 1994; Petersell, 1991). Kahjuks pole ka Tallinna piires nende kivimite keskkonnaohtlike elementide sisaldust selgitatud, kuid nii linna ida- kui ka läänepiiri taga ületab kildas U-, Mo-, V- ja paiguti As-, Cd-, Pb- jt ning oobolusliivakivis F- ja U-sisaldus elumaal soovitusliku siht- ja isegi lubatud piirarvu. Need kõrged sisaldused kajastuvad nii mulla lähtekivimis kui ka huumushorisondis.

Varasemad ja viimaste aastate uuringud näitavad, et graptoliitargilliit sisaldab kõrgetes ja väga kõrgetes kontsentratsioonides väga mitmeid raskmetalle (Cd, Co, Sb, Pb, Cr, Zn, Ni, Cu, U, V, Mo, As, Tl). Raskmetallide sisaldused on siiski varieeruvad suurtes piirides piirkonniti, Ida- ja Lääne-Eesti GAs on kontsentratsioonid kõrgemad võrreldes Kesk-Eesti graptoliitargilliidiga. Samuti varieeruvad kontsentratsioonid lasundi läbilõikes. Kõrge sisaldusega raskmetallide kooslused võivad samuti varieeruda, näiteks tšingi sisaldus läbilõikes võib olla kõrgeenenud väga kitsas intervallis (<0.5 m Pakri poolsaarel), millega ei kaasne teiste raskmetallide kõrgeid sisaldusi. Raskmetallid on argilliidis seotud orgaanikaga ja sulfiidsete mineraalidega, mis porsumise käigus võivad keskkonnale potentsiaalselt ohtlikud olla. Õhuhapnikuga ja veega kokkupuutudes hakkavad orgaanika ja püriit oksüdeeruma, mille tulemusena moodustuvad uued/sekundaarsed mineraalid (kips, anhüdriit, jarosiit) ning keskkonda kandub happeline vesi, mis kannab sulfiididest ja orgaanikast vabanenud raskmetalle.

Raskmetallide suuremat ja laiehaardelisemat liikuvust soodustab Põhja-Eestis poorne ja lõheline lubjakivi, suure tõenäosusega ka karstumisnähtused. Kahjuks pole selleteemalisi uuringuid siiani läbi viidud.

#### 4.1 Graptoliitargilliit ja radoon

Looduslik radioaktiivne gaas radoon on värvitu, lõhnatu ja maitsetu gaas, mis pärineb maakoorest ning tekib uraani lagunemisel stabiilseks pliiks. Radoon on kõrgradioaktiivne, õhust ligi 7,7 korda raskem (1 m<sup>3</sup> kaalub 9,96 kg) ja väga mürgine väärisgaas.

Ta on looduslikus olekus leiduv element, mis levib õhu koostises või gaasina vees ja tahkestub alles temperatuuril -71 kraadi C. Looduses tekib ta uraan-238 (<sup>238</sup>U), uraan-235 (<sup>235</sup>U) ning toorium-232 (<sup>232</sup>Th) radioaktiivsel lagunemisel ning koosneb vastavalt kolmest isotoobist: <sup>222</sup>Rn ehk radoonist, <sup>219</sup>Rn ehk aktinoonist ja <sup>220</sup>Rn ehk toroonist. Nende poolestusaeg on väga erinev, radoonil 3,82 ööpäeva, aktinoonil 3,92 sekundit ja toroonil 55,6 sekundit. Kuna aktinooni ja torooni poolestusaeg on väga lühike, hõlmab <sup>222</sup>Rn põhjustatud radioaktiivne kiirgus kogu radooni päritoluga kiirgusdoosist üle 93% (UNCEAR, 1993).

Pinnases, täitematerjalis ja ehitusmaterjalides tekib radoon nendes leiduva <sup>238</sup>U tütarlemendi raadiumi (<sup>226</sup>Ra) radioaktiivsel lagunemisel. Tekkivast radoonist eraldub (ekshaleerub) pinnast või ehitusmaterjali moodustavate tahkete osakeste vahelisse õhku üldjuhul 15–40%. Radoon võib tungida pinnasest hoonesse difusiooni või konvektsiooni teel. Radooni levik difusiooni teel on küllalt piiratud, sest radooni radioaktiivne poolestusaeg on lühike. Märkimisväärselt suurem on radooni levik konvektsiooni teel. Liikudes koos õhuga erinevatesse pinnasekihtidesse, võib radoon enne lagunemist kanduda 20-40 m kaugusele. Veelgi kaugemale aga kivimites olevaid lõhesid pidi, kaevanduskäikudes ja kommunikatsioonitorustikes. See sõltub aga eelkõige pinnase omadustest, nagu poorsus, sõmerus, vee läbilaskevõime, lõhede

olemasolu jne (Clavensjö & Åkerblom, 1994). Radooni sisaldab ka põhjavesi. Normaalne radoonisisaldus joogivees on 10-100 Bq/l.

Radooni sisaldus põhjavees määratakse üldjuhul ära raadiumi sisaldusega pinnases, aluspõhjas ja vees (Clavensjö & Åkerblom, 1994). Radooni sisaldus põhjavees sõltub suuresti sellest, millisest kihist pärinevat vett kasutatakse. Kõrgenenud radoonitaset võib leiduda:

- Kambrium-Vendi veelademes;
- veelademes, mis ei ole vettpidava kihiga eraldatud oobulusliivakivi või graptoliitargilliidi kihtidest;
- kvaternaari pealmises veekihis, millest ülesvoolu paikneb oobulusliivakivi, graptoliitargilliidi või nende töötlemisjääkide puistanguid või sealsed moreenid sisaldavad suures koguses uraanirikkaid kivimitükke (Soomest).

Kuna radoon annab suurima osa looduslikust kiirgusest, siis on üks levinumaid looduskiirgusest tulenevaid terviseriske tingitud radoonist. Peamine radoonist tulenev terviserisk inimesele on seotud hingamisteede- ja kopsuvähiga. Radoon satub organismi sissehingatava õhu kaudu. Organismis jätkub radooni ning selle tütarproduktide edasine lagunemine, mille tulemusena vabaneb alfa-kiirgus. Alfa-kiirguse läbitungimisvõime on küll väike, kuid selle suhteline tervisekahjulikkus ehk kiirgusfaktor on 20 korda suurem kui gamma-kiirgusel. Väliskeskkonnast pärinev kiirgus jääb pidama peamiselt surnud rakkudest koosnevas naha välispinnas. Elusrakkusid võib alfa-kiirgus kahjustada siis, kui kiirgav nukliid satub kaitseta epiteeli rakkudele bronhides ja kopsu alveoolides. Radooni tütarproduktid võivad põhjustada otsest mõju DNA struktuurile.

Eesti kuulub Euroopa Liidu kõrge Rn-riski tasemega riikide hulka. Enam kui 1/3 Eesti territooriumil ületab Rn-sisaldus pinnaseõhus piiranguteta ehitustegevuseks lubatud piiri ( $50 \text{ kBq/m}^3$ ) kuni 10 ja enam korda. Süstemaatiliste radooniuuringute tulemusena on Eestis välja selgitatud radooniohtlikumad piirkonnad ja koostatud esialgsed radooni riskialade kaardid kogu Eesti kohta, Harjumaa, Tallinna jt alade kohta (Nirgi jt., 2016; Saarik, 2015; Petersell jt., 2015). Uurimistööd on toimunud peamiselt kahes valdkonnas: ühelt poolt geoloogilised uuringud pinnaseõhu radoonisisalduse selgitamiseks ja teisalt radooni aktiivsuskontsentratsioonide mõõtmised hoonetes. Tänapäevaks enam kui 2000 majas tehtud mõõtmised hõlmavad peamiselt elamuid, vähem töökohti ja lasteasutusi. Samas peaksid lasteasutused olema erilise tähelepanu all, sest laste organism on tavaliselt tundlikum kahjulike keskkonnatingimuste suhtes.

Siiski tuleks radooni seirevõrku märgatavalt tihendada ja intensiivsemalt jätkata mõõtmisandmete kogumist, et need võimaldaksid usaldusväärsete ruumianalüüside tegemist. Detailuuringu koostamine radooni (Rn) migratsiooni ja pinnase aeratsioonitingimuste muutustest tingitud Rn-sisalduse varieerumise kohta on vajalik. Eesti Geoloogiakeskuse poolt 2016. aastal läbiviidud seire tulemused kinnitasid varem teada olnud Rn-sisalduse kõikumist aasta lõikes ning töid selgemini esile varem vähe teadvustatud pinnase eU-sisalduse (pinnase  $^{226}\text{Ra}$  sisalduse) põhjal arvatud Rn-sisalduse kõikumise. Hetkel peetakse gamma-spektromeetriga mõõdetud eU-sisalduse järgi arvatud Rn-taset

vahetult mõõdetava pinnasekihi Rn-riski iseloomustavaks tasemeks. Seire tulemused näitasid, et pinnases *in-situ* mõõdetavat eU-sisaldust võib mõjutada pinnase takistatud aeratsiooni tõttu pinnaseõhus suurenenud Rn-sisaldus ja sh aluspõhjakiivimeist migreeruva Rn arvelt. Majade siseõhu peamiseks Rn-allikaks on majadealune pinnas. Sõltuvalt Rn migratsiooni-võimalustest pinnasest majade siseõhku, ei peaks elamurajoonide pinnase Rn-sisaldus maapinnast 1 m sügavusel pinnaseõhus ületama 50 000 Bq/m<sup>3</sup>. Alates 2000. aastast on meil olemas ehitusstandard ehitatavate hoonete radoonitasemele – 200 Bq/m<sup>3</sup>. 2011. a. sügisest kehtib Vabariigi Valitsuse määrus „Tervisekaitsenõuded koolieelse lasteasutuse maa-alale, hoonetele, ruumidele, sisustusele, sisekliimale ja korrashoiule“, kus öeldakse, et koolieelsete lasteasutuste ruumide siseõhu aasta keskmine radoonisaldus peab olema väiksem kui 200 Bq/m<sup>3</sup>. Pinnaseõhu ja majade siseõhu Rn-sisalduse vahel on piirkonniti jälgitav positiivne korrelatsioon, mida komplitseerib sügavalt migreeruv Rn ja pinnaseõhu migratsioonitingimuste muutlikkus.

Kahtlemata on graptoliitargilliidil määrav osa radoonilevikul, kuid siiski mitte ainus. Üheks radooniallikaks võib olla aluspõhjakiivimitel lamav pinnakate. Arvestades, et graptoliitargilliidi ja fosforiidi kihid ulatusid kaugemale põhja suunas, siis liustiku poolt seal purustatud materjal kandus tagasi ka lõuna suunas, koos juba Soome alalt toodud kivimitega. Rn-allikate levikus võib omada rolli ka inimene, kuhjates ehitustegevusel või muul otstarbel enda teadmata kõrgema U-sisaldusega pinnast või aluspõhja kivimeid. Kuna selline tegevus ei oma kindlat seaduspära ning materjali päritolu ei ole alati kindel, tuleb tehnogeensetesse pinnastesse suhtuda alati ettevaatlikkusega.

## 5. Graptoliitargilliidi keskkonnaohtlikkuse mudeli koostamisel kasutatud andmestik ja digitaalne materjal

Graptoliitargilliidi (GA) keskkonnaohtlikkuse GIS mudeli modelleerimiseks on kasutatud järgmisi andmebaase:

Eesti geoloogilise digitaalkaardistamise käigus koostatud kaardimaterjali ehk geoloogilise baaskaardi (GB, mõõtkavas 1:50 000) geoandmebaasi teemakaarte ja faktilist materjali (FM): puurkaevud, puuraugud, paljandid ja vaatluspunktid, millest antud uuringu juures kasutati informatsiooni puuraukude kohta GA levikuala ulatuses (Maa-ameti geoportaal, 2016). GA ala on vaid osaliselt kaetud GB digitaalsete teemakaartidega. Sellest tulenevalt on analüüsiks kasutatud ka vanemat geoloogilist kaardimaterjali, mis on digitaliseeritud projekti täitmiseks.

Kaardianalüüsi teostamisel rakendust leidnud, sh. osaliselt modifitseeritud, geoloogilise baaskaardi teemakihid:

- aluspõhja geoloogia (AP)
- pinnakatte geoloogia (Q)
- hüdrogeoloogia (HG)
- põhjavee kaitstus (PVK)
- geomorfoloogia (GM)
- aluspõhja reljeef (APR)
- pinnakatte paksus (QP)

1. Pinnases mõõdetud radooni andmebaas 2002-2016 Excel formaadis (Eesti Geoloogiakeskus), kommertsandmeid ei väljastatud ja pole projekti koostamisel kasutatud. Samuti ei esitada projekti materjalides algandmeid.
2. Eesti mulla geokeemia andmebaas Excel formaadis, 1997 (Eesti Geoloogiakeskus). Algandmeid ei edastata.
3. Rahvastiku andmed Statistikaameti elektroonilisest andmebaasist: Rahvaarv ja koosseis, Excel formaadis (Statistikaamet, 2017; <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Rahvastik/databasetree.asp>).
4. Looduskaitse kaardikihid, 2016 detsember, EELIS (Eesti Looduse Infosüsteem - Keskkonnaregister): KeM Info- ja Tehnokeskus.
5. Digitaalsed aluskaardid: Eesti põhikaart – ETAK, Eesti topograafiline kaart

1:50 000, kõrgusmudel: DEM 5m (Maa-amet, leping nr: KA-3209).

Digitaalsete teemakaartide koostamiseks, andmeanalüüsideks ja ruumiliseks modelleerimiseks kasutati ESRI GIS-tarkvara ArcGIS Desktop versiooni 10.1 ja 10.4 ning laiendusi Spatial Analyst, 3D Analyst ja Geostatistical Analyst.

## 6. Projekti raames koostatud teemakaardid

Analüüsitud andmestik ja digitaalne kaardimaterjal lubab koostatud GIS kaartide baasil luua erinevaid temaatilisi kaarte. Loodud informatsioonipindade (keemilised elemendid jm.) klassifitseerimiseks ehk parima informatsiooni muutlikkuse visuaalse kujundi saamiseks, olenevalt andmete iseloomust, on mitmeid interpoleerimismeetodeid ja klassifitseerimisviise.

Käesoleva uuringu puhul on informatsiooni süstematiseerimiseks ja täiustamiseks kasutatud ArcGIS tarkvara algoritmidel baseeruvaid funktsioone ja interpoleerimise teel on loodud rasterpinnad, mille käigus genereeriti teadaolevate andmepunktide väärtuste alusel uued väärtused andmetega kaetud piirkonna piires. Kõik ruumimudelid on koostatud täpseid interpolatsioonimeetodeid kasutades, millede puhul väärtused algetes andmepunktides ei muutu. Graptoliitargilliidi (GA) paksuse ja sügavuse mudelite tegemisel kasutati loomuliku naabri (natural neighbor) meetodit, mis kasutab arvutamisel nii triangulatsiooni kui loomulikke naabruskondi. Geokeemiliste andmete modelleerimisel kasutati stohhastilist (geostatilist) kriging-interpolatsiooni, mis arvestab ka andmepunktide paiknemist üksteise suhtes.

Kriging'u meetod on mitmeetapiline protsess, mis algab algandmete statistilise töötusega, siis arvutatakse vaatlusvariogrammi abil variogramm-mudel, luuakse selle alusel pind, lõpuks tehakse pindade analüüs. Kuna antud töös kasutatud geoloogiliste algandmete ja andmetiheduste juures valdavaid trende ja dominante ei ilmnenu, on pinnad modelleeritud ordinaalse kriging-funktsiooniga (kriging ordinary) ning sobivamateks variogrammi mudeliteks osutusid Gaussi mudel ja mõne elemendi puhul sfääriline mudel. Variogrammi mudeliga kirjeldatakse andmepunktide vahelisest distantsist sõltuvat ruumilist korrelatsiooni (varieeruvust) valemiga või ka graafikuna.

GA ala suurust ja olemasolevate puuraukude tihedust arvesse võttes on kõik rasterpinnad loodud suurusega 400 x 400 m, otsinguraadiusena kasutati muudetavat (variable) sisendparameetrit ja interpretatsioonipunktide arv jäeti vaikimisi 12.

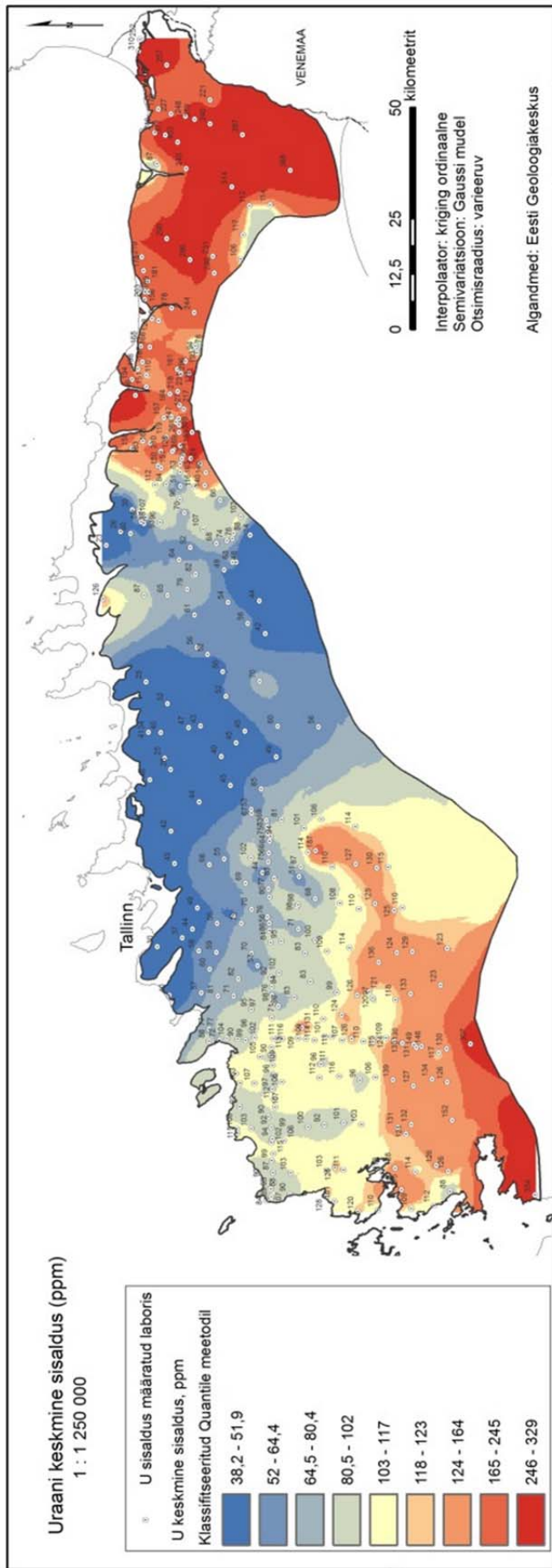
Geokeemilise andmestiku käsitlemiseks on leitud, et sobilikud klassifitseerimismeetodid on geomeetrilise intervalli (geometric interval) ja kvantiilne (quantile) meetodid. Geomeetriliste intervallide meetod baseerub matemaatilisel informatsiooniklasside geomeetrilisel seerial, kus iga klass on korrutatud teatud koefitsiendiga, et produtseerida hierarhiliselt kõrgemalasse klass. Meetod töötab tavaliselt hästi kui algandmestik moodustab jätkuva seeria. Kvantiilne meetod jagab infoükused enam-vähem võrdselt erinevate klasside vahele, saades seeläbi väga balansseeritud lõppväljundi, kusjuures klassidesse võib sattuda erandina üksikuid anomaalsete väärtustega üksuseid. Leiti, et just see meetod on enamkooskõlas looduslike elemendiliste mõõtmistega, kus mõõtmistihedus varieerub ning territoriaalselt üksikud anomaalsed elemendilised sisaldused võivad ette tulla. Samas, mõlema meetodiga loodud

geokeemilise informatsiooni klassid – visuaalsed väljundid - on geokeemilise andmestiku osas suhteliselt sarnased.

Ruumianalüüside täpsuse hindamist ja rasterpindade analüüsiks sobivate interpolaatorite valiku tegemist hõlbustas ESRI ArcGIS lisapaketi Geostatistical Analyst vahendite kasutamine. Olemasolevate andmete (Eesti maavarade kaart: diktüoneemakilt (graptoliitargilliit), mõõtkavas 1:200 000, Eesti Geoloogia-keskus, 2008) ja uute andmete (TTÜ GI, 2015-2017) baasil on analüüsitud mitmete keskkonnaohtlike metallide ruumilist jaotust, sh uraani, molübdeeni, tsingi, vanaadiumi ja plii jaotust graptoliitargilliidis (Joonised 6.1 – 6.6). Nimetatud metallide puhul, üldjuhul, paistab regionaalses plaanis silma metallide kõrgendatud sisaldused Eesti ida- ja lääneosas ning madalamad kontsentratsioonid keskosas. See fakt iseenesest on ammuteada, kuid nimetatud meetod annab esmakordselt võimaluse vaadelda metallikontsentratsioonide muutlikkust väiksemas skaalas ning lubab välja tuua erinevate metallide jaotumuse erinevad kuid eri metallide vahel ka võrreldavad mustrid.

## 6.1 Uraan

Uraani keskmine sisaldus puuraukudes varieerub 15 ja 600 ppm vahel, ulatudes üksikutes graptoliitargilliidi kihiosades vahel ka üle 1000 ja enam ppm-i (projekti raames läbiviidud uuringud). Territoriaalselt jäävad uraani puhul madalamad kontsentratsioonid Klooga ja Võsu vahele (Joonis 6.1), kusjuures madala sisaldusega ala läänepiir on selgelt NNW-SSE suunaline. Sealjuures ala idapiir on NNE-SSW suunaline. Sealhulgas kõrgeima ja madalaima sisaldusega regioonide vahel erineb uraanisisaldus pea kümnekordselt. Pidades uraanisisaldust otseselt seotuks keskkonnoahu ja ka ala radooniohtlikkusega, on oluline arvestada uraanikontsentratsioonide jaotuse iseärasusi keskkonnakasutuse planeeringutes, seda eriti GA vahetu maapinnale avanemise, aga ka madalate sügavuste vööndites. Samas on siiski huvitav mainida, et Harjumaal mõõdetud kõrgemad radoonisisaldused jäävad üldjuhul GA madala uraanisisaldusega vööndisse, viidates inimtekkelisele osale aga ka võimalusele, et radoonisisaldused on seotud ka muude geoloogiliste komponentidega lisaks GA-le. Kirde-Eestis aga korreleerub kõrgem radoonisisaldus hästi GA uraanisisaldusega.

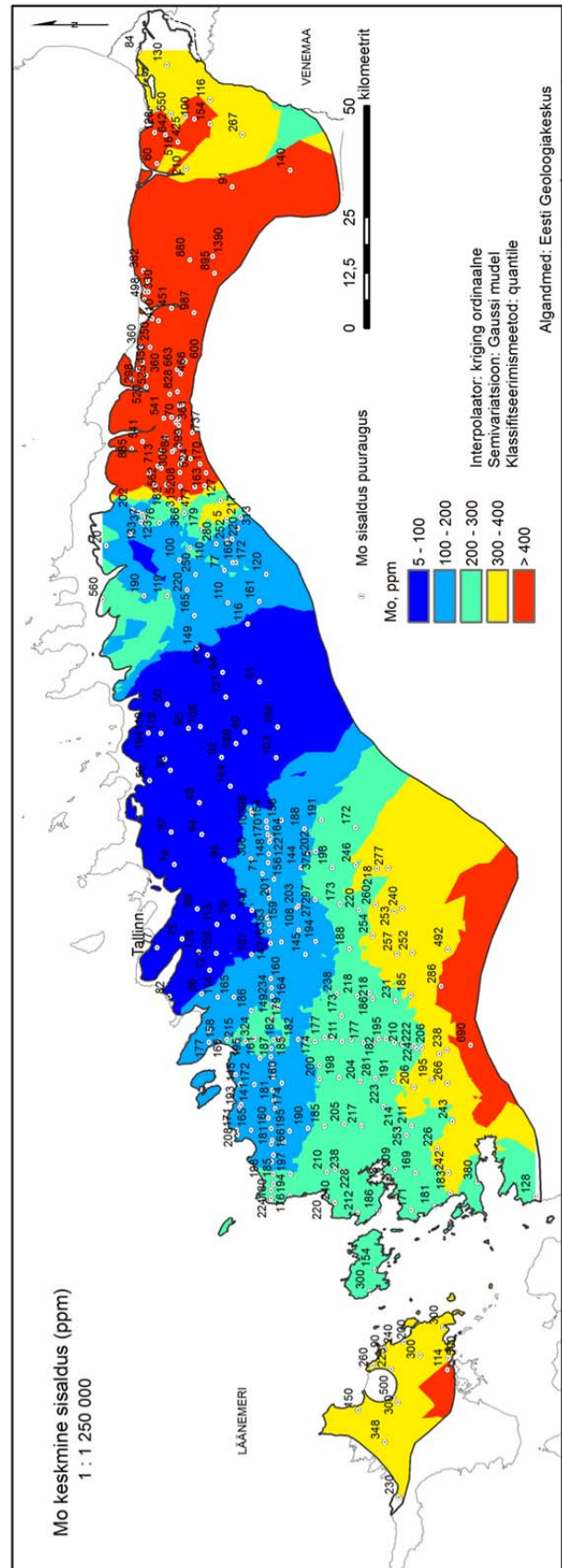


Joonis 6.1: Projekti käigus koostatud uraani sisalduse levikumudel Eesti graptoliitargilliidis. Sisaldused on antud ppm-des, ehk elemendi sisaldus grammides tonni kivimi kohta. Kõrgemad sisaldused on iseloomulikud Ida- ja Lääne-Eesti kivimile. Levikumudeli koostamiseks on kasutatud tavalise krigingu interpolaatorit, variatsioonianalüüsil gaussi mudelit. klassifitseerimine toimus 9 klassi quantile meetodil.

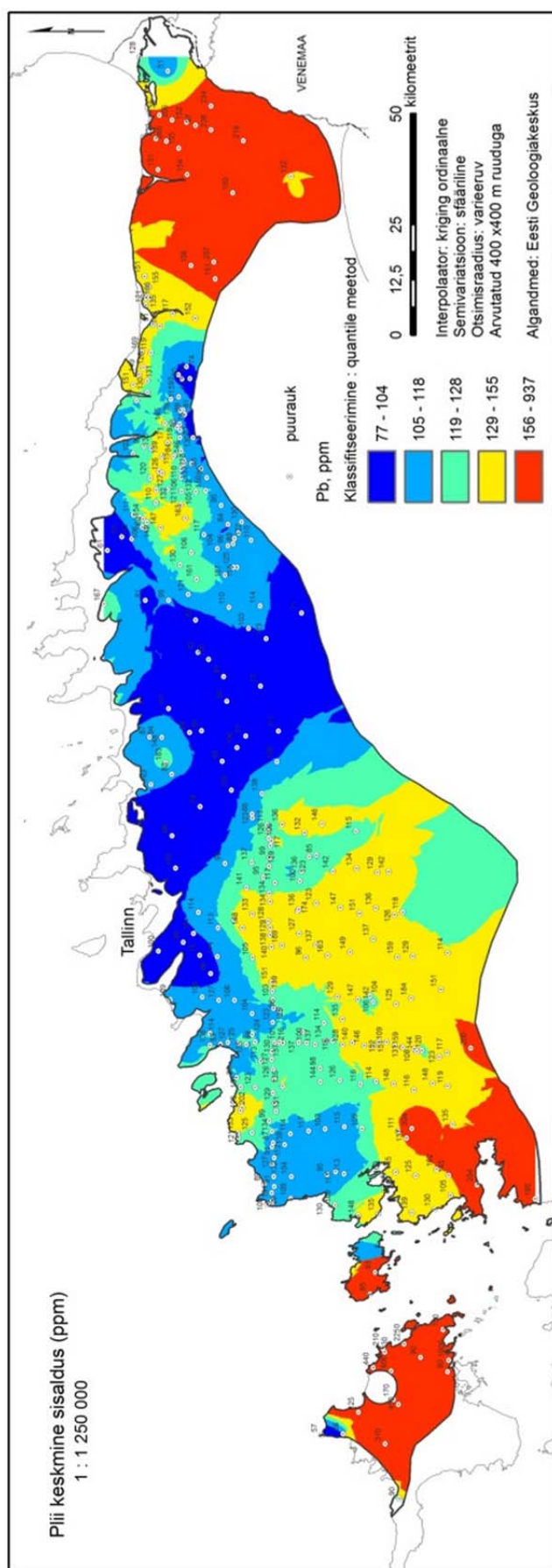
## 6.2 Molübdeen

Molübdeeni keskmine sisaldus puuraukudes varieerub 5 ja 1400 ppm vahel, ulatudes üksikutes graptoliitargilliidi kihiosades ka üle 2000 ppm-i. Molübdeeni sisalduste territoriaalne pilt on suhteliselt sarnanes uraani jaotusega (Joonis 6.2). Ainukeseks erinevuseks on sisalduste mõnetine vähenemine kirdenurga suunas. Madalaimate sisaldustega ala jääb taas Klooga ja Võsu vahele ning ala piirid langevad kokku uraani omaga. Molübdeen allub hästi leostumisele, kuid tema koguseline väljaleostumine läbiviidud eksperimentides jäi enam kui 10 korda alla uraanile (algkogusest leostus välja hinnanguliselt 0,15% molübdeeni, uraani puhul aga kuni 2,5%). Kirde-Eestis pinnalähedastes tingimustes on siiski vajalik pöörata tähelepanu ka GAs olevale molübdeeni.

*Joonis 6.2: Projekti käigus koostatud molübdeeni sisalduse levikumudel Eesti graptoliitargilliidis. Sisaldused on antud ppm-des, ehk elemendi sisaldus grammides tonni kivimi kohta. Kõrgemad sisaldused on iseloomulikud Ida- ja Lääne-Eesti kivimile. Levikumudeli koostamiseks on kasutatud tavalise krigingu interpolaatorit, variatsioonianalüüsil gaussi mudelit, klassifitseerimine toimus viide klassi quantile meetodil. Kaardi koostanud S. Hade.*

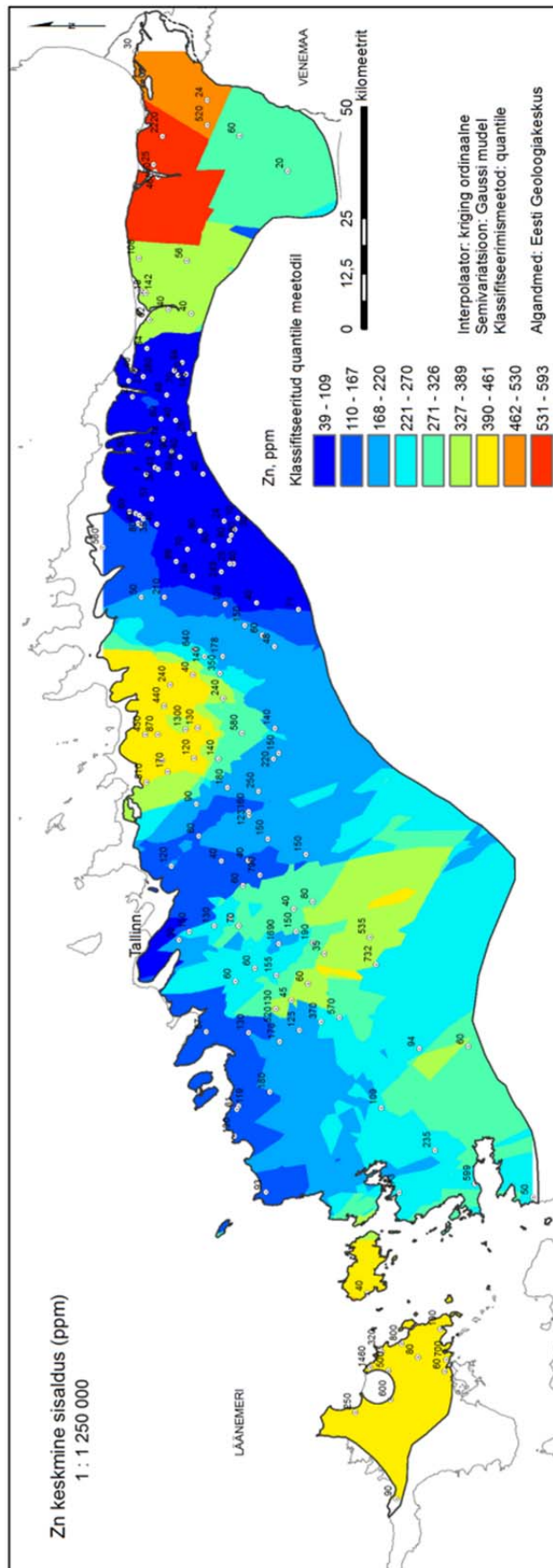


## 6.3 Plii



Plii keskmine sisaldus puuraukudes varieerub 0 - 2300 ppm, ulatudes üksikutes graptoliit-argilliidi kihiosades vahel ka üle 10000 ppm. Plii ruumilises jaotuses võib selgelt eritada taas Põhja-Eesti keskosa, kus plii sisaldus GAs on oluliselt madalam kui Kirde-Eestis (Joonis 6.3). Madalate sisalduste vööndi läänepiir suundub Tallinna lähedalt kagusse, jäädes pisut ida suunda võrrelduna uraani ja molübdeeni vastavate aladega. Plii-sisalduste jaotusmuster on keerulisem kui ülalpoolnimetatud elementidel. Ida- ja Lääne-Eestis on siiski vajalik avamusalal ja madalal GA sügavusel arvestada plii leostumise ohuga.

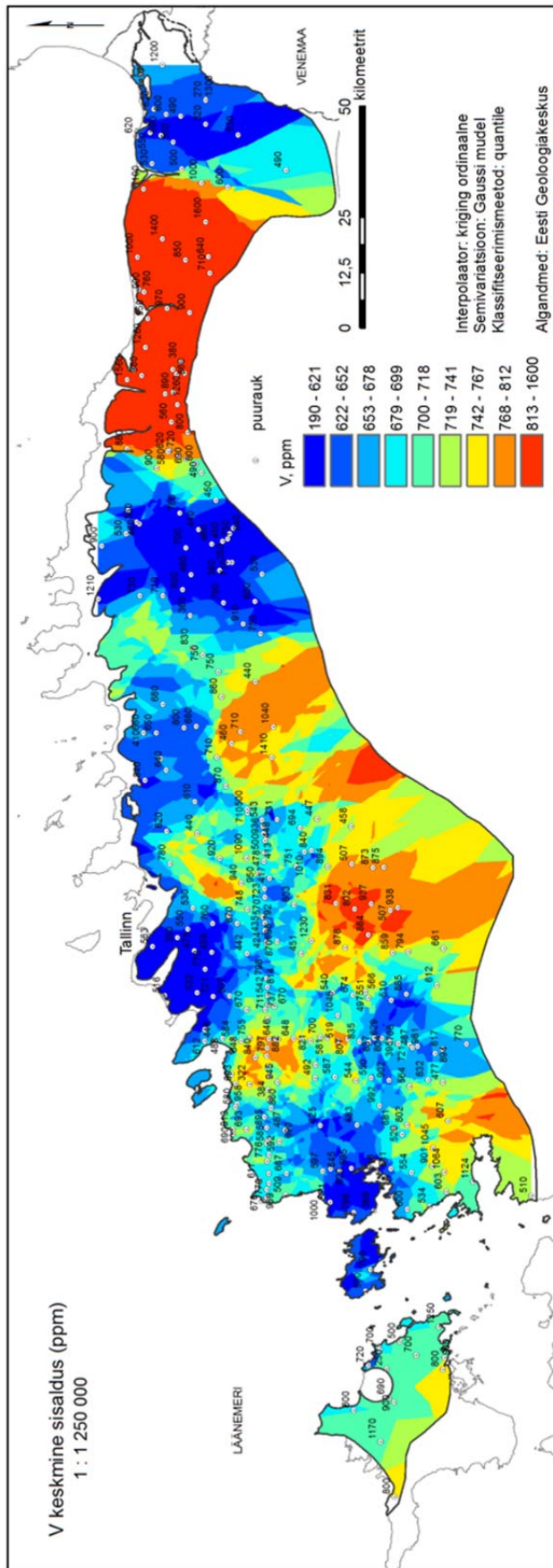
*Joonis 6.3: Projekti käigus koostatud plii sisalduse levikumudel Eesti graptoliitargilliidis. Sisaldused on antud ppm-des, ehk elemendi sisaldus grammides tonni kivimi kohta. Kõrgemad sisaldused on iseloomulikud Ida- ja osaliselt ka Lääne-Eesti kivimile. Leviku-mudeli koostamiseks on kasutatud tavalise krigingu interpolaatorit, variatsioonianalüüsil sfäärilist mudelit, klassifitseerimine toimus viide klassi quantile meetodil. Kaardi koostanud S. Hade.*



## 6.4 Tsink

Tsingi keskmine sisaldus puuraukudes varieerub 7 - 10000 ppm vahel, ulatudes üksikutes kihiosades ka oluliselt üle nende väärtuste. Tsingi territoriaalne jaotus GAs on keeruline, madala sisaldusega piirkonnad on Loode-Eestis, Tallinna-Viimsi joonele jääv vöönd ja Loksa- Toila vahele jääv ala kogu oma ulatuses (Joonis 6.4). Ometi on leitud väga kõrged tsingi sisaldused mitmes puurauku kitsa kihi piires ka üldiselt madala sisaldusega aladel, näiteks Pakri saartel (ulatudes > 2000 ppm, TTÜGI uuringud). Eksperimenti tulemused näitasid, et tsink allub kergelt väljaleostumisele ja juba esimestel päevadel võib kivimist välja leostuda 3-4% tsingist, pikemal perioodil kuni 6% ümber. Sellest johtuvalt tuleb GA avanemise aladel suhtuda tõsiselt tsingi leostumisse ja hilisemasse ümberjaotumisse pinnases.

*Joonis 6.4: Tsingi sisalduse levikumudel Eesti graptoliit-argilliidis. Sisaldused ppm-s, (elemendi sisaldus grammides tonni kohta). Kõrgemad sisaldused on iseloomulikud Ida-Eesti ja Kuusalu regiooni kivimile. Levikumudeli koostamiseks on kasutatud tavalise krigingu interpolaatorit, variatsioonanalüüsil gaussi mudelit, klassifitseerimine toimus üheksasse klassi quantile meetodil. Kaardi koostanud S. Hade.*



## 6.5 Vanaadium

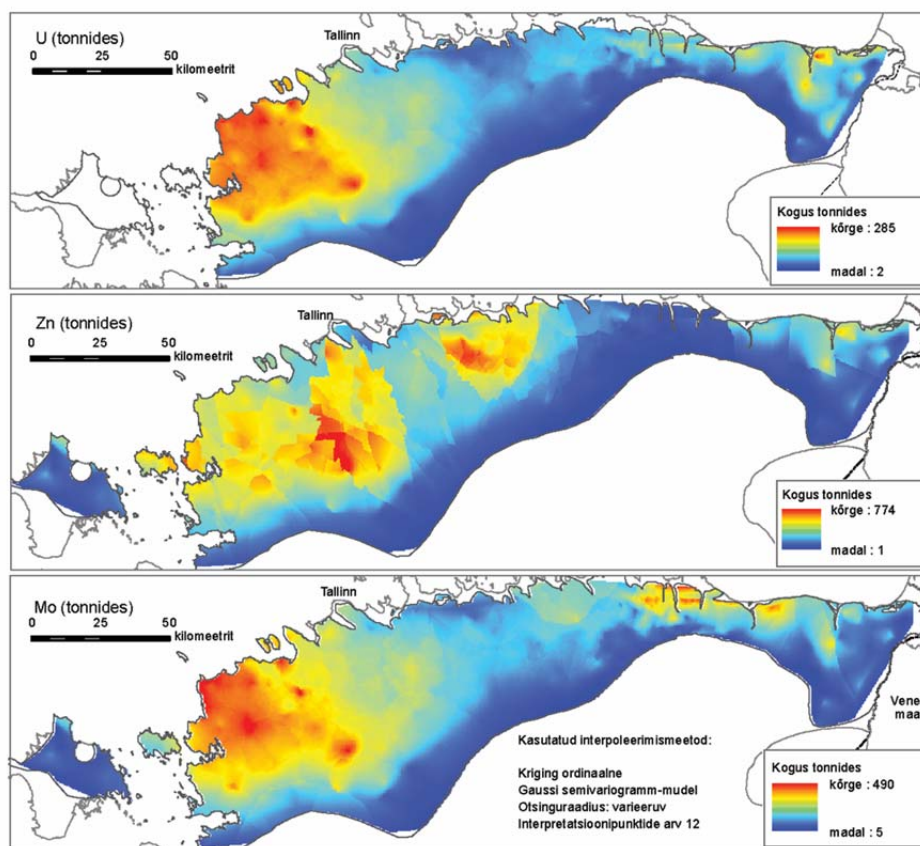
Vanaadiumi keskmine sisaldus puuraukudes varieerub 190 - 1600 ppm vahel, ulatudes üksikutes graptoliit-argilliidi kihi-osades vahel ka üle 3000 ppm-i. Vanaadiumi pindalase jaotumise muster on väga keeruline. Madalaima sisaldusega alad moodustavad kaks N-S suunalist ala Kirde-Eesti ida-poolses otsas ja Loksa-Toila vahele jääval alal (Joonis 6.5). Neile lisandub Tallinna ümbrus ja Maardu ja Kolga vahelise ala põhjaosa. Kõrgeima sisaldusega ala jääb Voka ja Kunda vahele ja fragmenditi Riisipere ja Rapla ümbrusesse. Vanaadium leostub GAsst välja mõõdukates kogustes (eksperimentil jäi alla 1%), kuid leostumine on kiire (mõne päevaga saavutatakse 0,6%).

*Joonis 6.5: Vanaadiumi sisalduse levikumudel. Sisaldused on antud ppm-s, ehk elemendi sisaldus grammides tonni kivimi kohta. Kõrgemad sisaldused on iseloomulikud Kirde-Eesti lääneosale ja mitmetele piirkondadele Lääne-Eesti lõunaosas. Mudeli koostamiseks on kasutatud tavalise krigingu interpolaatorit, variatsioonianalüüsil gaussi mudelit, klassifitseerimine toimus üheksasse klassi quantile meetodil. Kaardi koostanud S. Hade.*

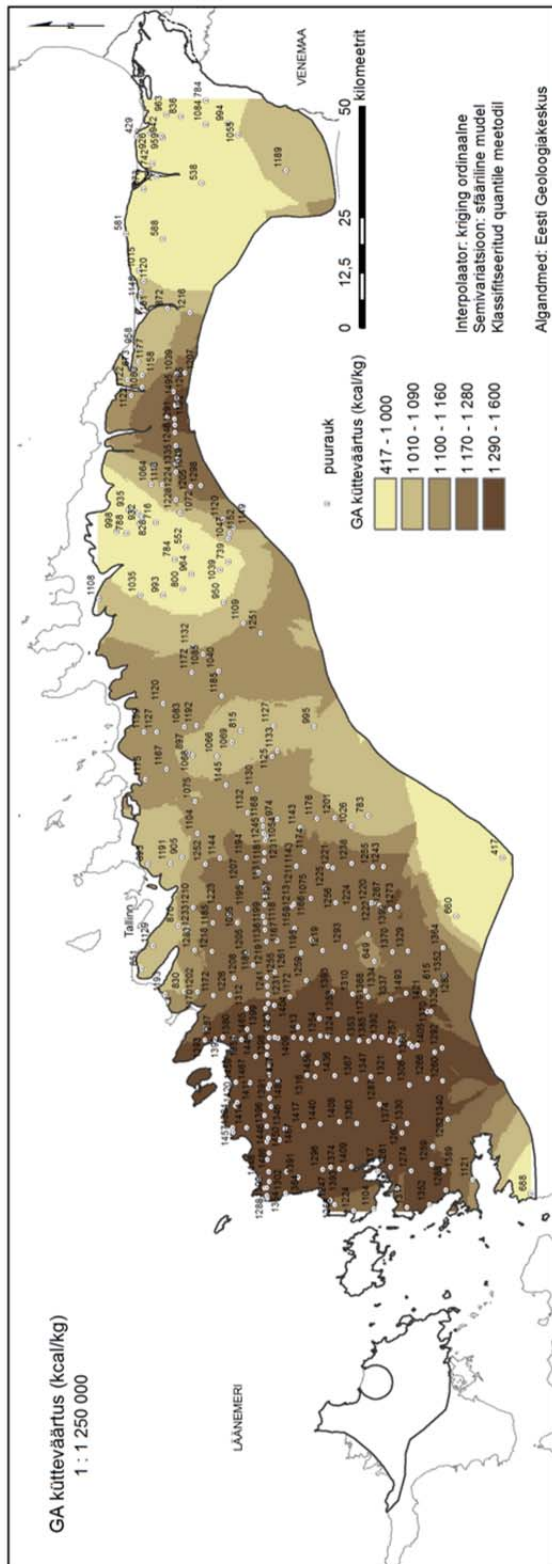
Muude mikroelementide osa kahjuks puuduvad kogu Eestit hõlmavad usaldusväärsed andmed. Viimastel aastatel on läbi viidud uuringuid üksikute puursüdamike (< 10) ja 3 paljandi ulatuses (Saka, Pakri ja Nõmmeveski), mis ei anna piisavat alust oluliste territoriaalsete üldistuste tegemiseks. Arvestades leostumiskspereimendi tulemusi tuleks kahtlemata tõsiselt suhtuda Cr, Co, Ni, Cu, As aga eriti Cd võimalikku leostumisse soodsate tingimuste olemasolul (hapniku juurdepääs, ajutine vee-faasi olemasolu jm).

## 6.6 Metallide summaarsed kogused

Mitmete metallide kogused GAs võivad olla uute tehnoloogiate arenedes ka tootmisväärsed. Ühe GA metallide koguste modelleeritud näitena on toodud joonisel 6.6 uraani, tsingi ja molübdeeni tonnaaž Eesti lõikes. Mudel põhineb 400 korda 400 meetrise sammuga arvatatud metalli keskmiste sisalduste hinnangul. Kuigi näiteks uraani puhul olid sisaldused kõrgemad Kirde-Eestis, siis tänu sellele, et Lääne-Eestis on GA kihi paksus ligi 3 korda suurem on uraani koondhulk seal ka märgatavalt suurem Koguseliselt kehtib sama ka molübdeeni ja tsingi kohta. Molübdeeni osas võib majanduslik huvi tõusta ka Toolse piirkonnas.



Joonis 6.6: Projekti käigus koostatud uraani, tsingi ja molübdeeni koguste mudel Eesti graptoliit-argilliidis. Vaatamata sellele, et elementilised sisaldused on tihti just kõrged Kirde-Eestis, on metallide summaarsed kogused kahtlemata suurimad Lääne-Eestis. Mudeli koostamiseks on kasutatud tavalise krigingu interpolaatorit, variatsioonianalüüsil Gaussi mudelit. Mudeli samm on 400x400 meetrit. Kaardi koostanud S. Hade.



## 6.7 Kütteväärtus

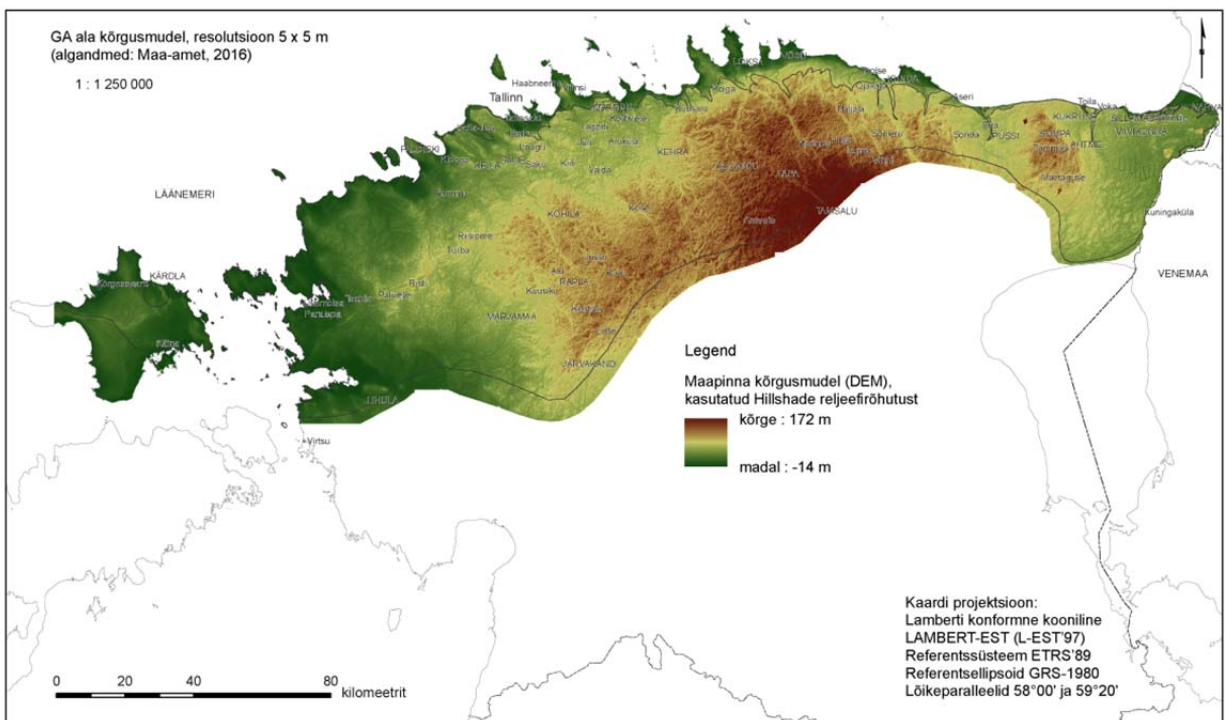
Graptoliitargilliit sisaldab erinevates kogustes orgaanilist ainet (süsivesinike seguna) – kerogeeni. Kivimi kerogeeni koostis on lähedane sapropeliidile. Varasemate andmete alusel analüüsitud GA kütteväärtus jääb vahemikku 417 kuni 1600 kcal/kg kohta. Võrdluseks olgu öeldud, et puhta kerogeeni kütteväärtus on keskmiselt 8350 kcal/kg. Kütteväärtus, on üldiselt seotud orgaanilise aine hulgaga. Paljude määrangute keskmisena saadud 10–15% orgaanilise aine sisaldus kivimis tähendab, et selle kivimi kütteväärtus on umbkaudu 1200 kcal/kg. Oluliselt suurem on GA kütteväärtus ala lääneosas, kus on ka kihi paksus kõige kõrgem (Joonis 6.7). Selles osas ulatub kütteväärtus paljudes puuraukudes 1400–1500 kcal/kg-ni. Oluliselt väiksem piirkond kõrgema kütteväärtusega paikneb Kundast lõunasse jäävas regioonis. Keskkonnaaspektist on orgaanikasisaldus oluline kuna mitmed metallid on seotud orgaanikaga, sh uraan ja vanaadium. Orgaanilise aine oksüdeerumisel satubki osa neist elementidest kergesti keskkonda. Eeskätt võib mõjutada see Pakri - Paldiski ja Toolse-Kunda-Sõmeru

regiooni.

*Joonis 6.7: Projekti väljundina koostatud graptoliitargilliidi kütteväärtuse (kcal/kg) pindalaline mudel. Väärtuste pinna modelleerimiseks on interpolaatorina kasutatud tavalise kriginu meetodit, väärtuste variatsioonianalüüs on läbi viidud sfäärilise mudeli alusel, klassifitseerimine quantile meetodil. Algandmed: Eesti Geoloogiakeskus, 2008. Kaardi koostanud S. Hade.*

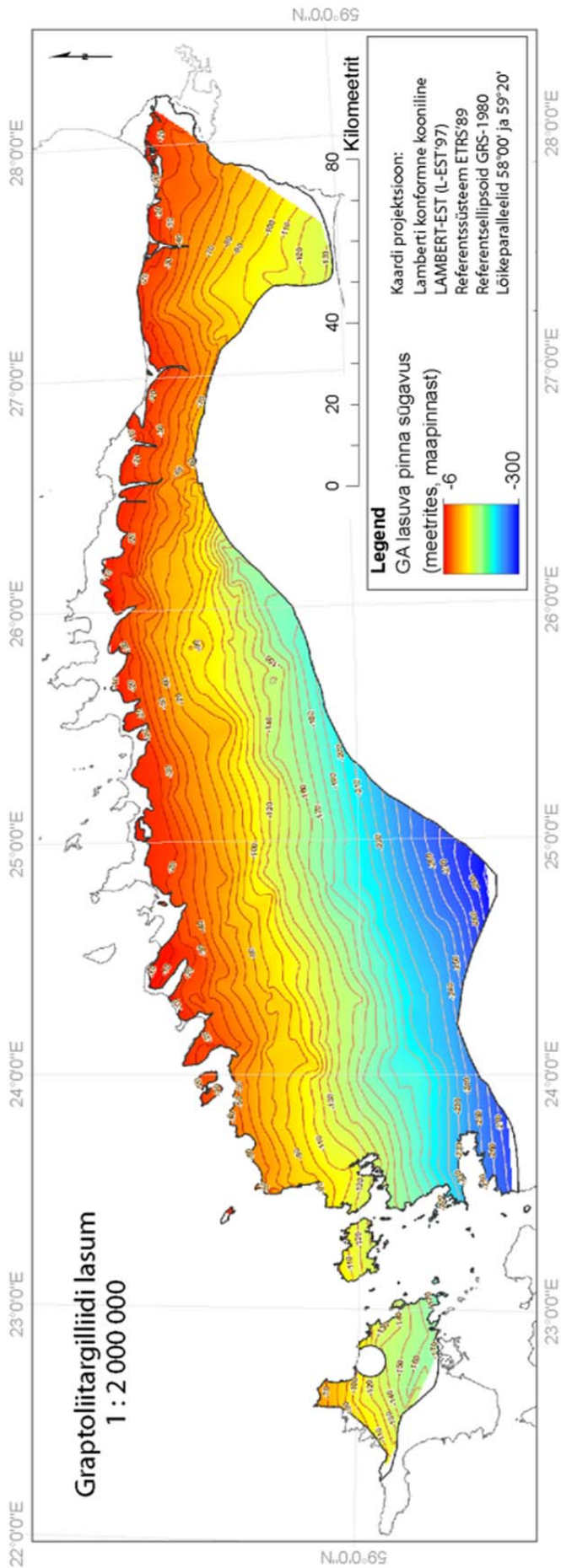
## 6.8 Graptoliitargilliidi ala maapinna kõrgusmudel (DEM)

Projektis toodud eesmärkide täitmiseks - hindamaks puuraukude informatsiooni vastavust ning maapinna keskkonnakaitselist ja –seisundilist faktilist materjali - loodi ala kõrgusmudel. Kõrgusmudeli (Joonis 6.8) loomisel kasutati Maa-ameti kõrguspunktidest toodetud võrgustik-tüüpi kõrgusmudelit (DTM - Digital Terrain Model) lennukõrgusega 2400 m ja lahutusega 5 meetrit (piksli suurus 5x5 meetrit). Kogu GA ala kattev DEM mudel on esitatud interpoleeritud rasterkujutisena ja saadud algselt 5x5 m suuruste kaardiruutude mosaiikimisel ESRI „Mosaic to new raster“ funktsiooni abil, kusjuures mõõdistatud z (kõrgus) väärtustega maapinna punktide väärtused asusid 5x5 m ruutudest koosneva võrgustiku silmades.



Joonis 6.8: GA ala maapinnamudel ehk DEM (digital elevation model), kasutatud on ülevaatlikkuse tõstmiseks Hillshade-funktsiooni, kõrgussüsteemiks on Balti 1977 (BK77). Kaardi koostanud S. Hade.

Ühe kaardikihina GA ala kattev mudel kiirendas andmetöötlusprotsessi märgatavalt. Sellest oli praktiline kasu puuraukude faktilise materjali kontrollimisel ja andmete täpsustamisel, andmebaaside korrastamisel, kuna varasemalt, kui terviklikku mudelit polnud, oli tülikas ja aeganõudev pisikeste 5x5 m kaardiruutude kaupa kõrgusandmete kasutamine, kaardiprogrammis avamine ja interpoleerimisel pindade genereerimine polnud tehniliselt võimalik. Selle täpsusastmega (5x5 m) kogu GA ala kattev maapinna kõrgusmudel võimaldab Spatial Analyst ja 3D Analyst täiendavate pinnatöötlus-vahendite kasutamise näol geo- ja reljefianalüüside tegemist. Mudel on vajalik nt.



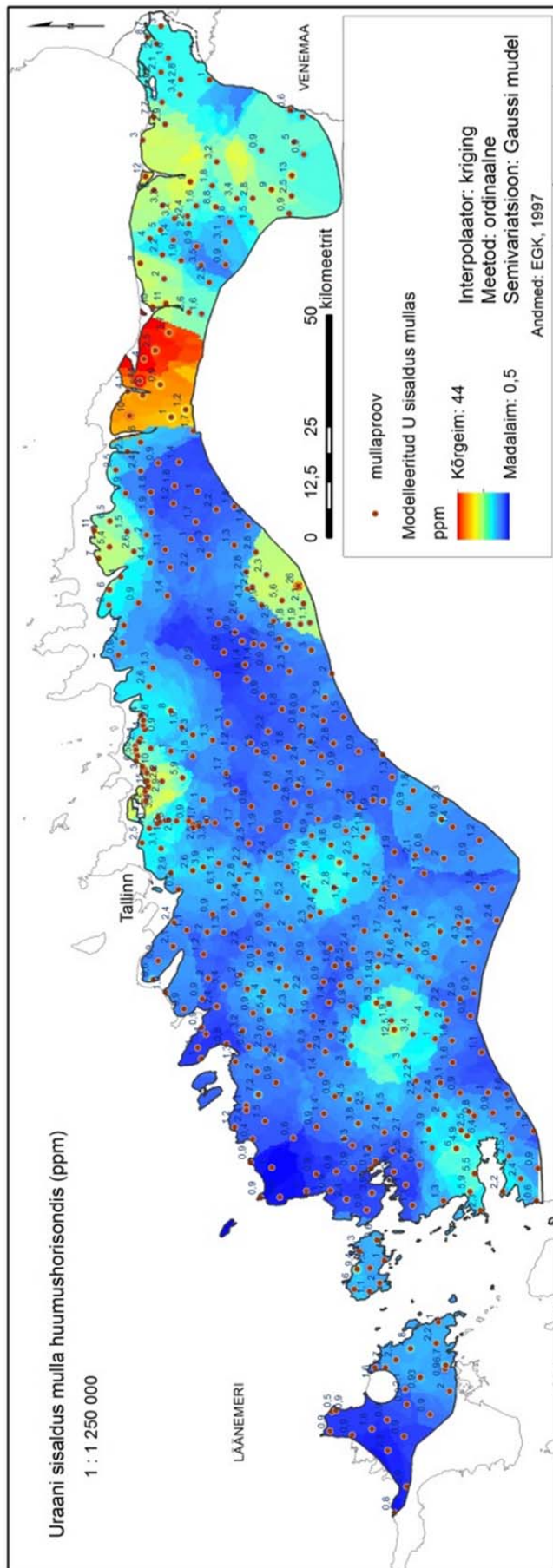
pinnavormide täiendavaks määratlemiseks, setete litoloogilise iseloomu, pinnakatte paksuse hindamiseks, Kvaternaari vooluvee-kihtide voolusängide piiritlemiseks, hüdrooloogilisel modelleerimisel, maavara varu ja mahuarvutusteks jpm.

Kasutades puuraukude informatsiooni ja kõrgusmudelit on projekti käigus konstrueeritud detailne graptoliitargilliidi lasumi mudel (Joonis 6.9).

## 6.9 Muldade uraanisisalduse mudel

Ühe GA kõrgest metallisisaldusest tulevane keskkonnafaktorina võiks käsitleda muldade saastumist. Näitena on esitatud allpool muldade uraanisisalduse mudel (Joonis 6.10). Selle projekti väljundina koostatud mudeli aluseks on võetud Eesti muldade geokeemiline andmestik (Eesti Geoloogiakeskus, 1997), kahjuks ei olnud uuemat versiooni Eesti muldade metallide sisaldusest võimalik kätte saada.

Joonis 6.9: Graptoliitargilliidi kivi pealispinna sügavus maapinnast. Koostaja S. Hade.



Teiseltpoolt, arvestades intensiivset majandustegevust, sh kaevandamistegevust oleks mõttekas muldade raskemetal-lide osas viia pilootaladel läbi seiret. Keskkonnaseisundi adekvaatsemaks hindamiseks ja reaalajas jälgimiseks on vajalik detailne metallide jaotuse kaardistamine Eesti linnades.

Vastavalt loodud muldade uraanijaotumise mudelile (Joonis 6.10) on kõrgeimad U kontsentratsioonid mõõdetud /teada Kunda – Aseri piirkonnas. See piirkond ühtib hästi piirkonnaga, kus uraani loomulikkontsentratsioon on kõrge ka GAs ning GA paikneb maapinnal ja maapinnalähedal. Punktrestusega alasid on teada ka Toila – Voka, Viitna, Maardu, Aravete ja Risti piirkonnas. Maardu piirkonnas on kõrgeid uraaniväärtused seotud enamasti inimtekkelise reostusega (GA ja fosforiidi-kaevandamise produktide ümberpaigutamine jm), muudes piirkondades tuleb reostumise allikaid otsida laiemalt. Kasu-tatud andmetiheduse baasil ei ole võimalik täpsemaid järeldusi kahjuks teha, ega eraldada regionaalseid reostumisallikaid punkt-reostumisest.

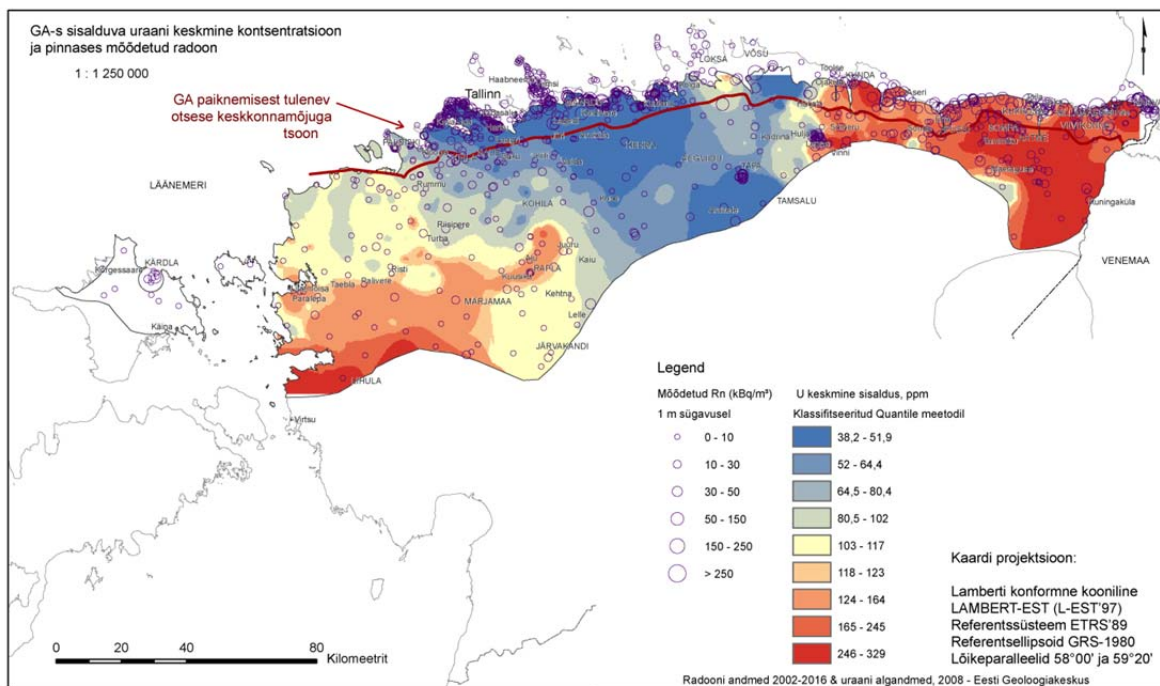
Joonis 6.10: Uraani sisaldus GA ala huumusehorisondis. Pindalalise mudeli aluseks on Eesti Geoloogiakeskuse andmestik (1997). Kunda – Aseri ja Voka – Toila alad on korreleeritavad

oluliselt kõrgema uraanisisaldusega graptoliit-argilliidis. Kaardi koostanud S. Hade.

## 6.10 Mõõdetud radooni ja graptoliitargilliidis oleva uraani suhte mudel

Radooni aktiivsuskontsentratsiooni määramiseks pinnases kasutatakse paralleelselt kahte meetodit –radooni otsemõõtmise ja pinnase Ra-226 (või eU) sisalduse alusel arvutamise meetodit. Pinnase radooniriski määramisel kahe mõõtmisviisiga võetakse arvesse suurem mõõtetulemus. Pinnases radooni mõõtmise optimaalseks tasemeks on hinnatud 0,8 m. Sellel sügavusel, otsemõõtmisel emanomeetriga (Markus 10) saadud radooni väärtused arvutatakse ümber 1 m tasemele (EGK, 2008; Saarik, 2015).

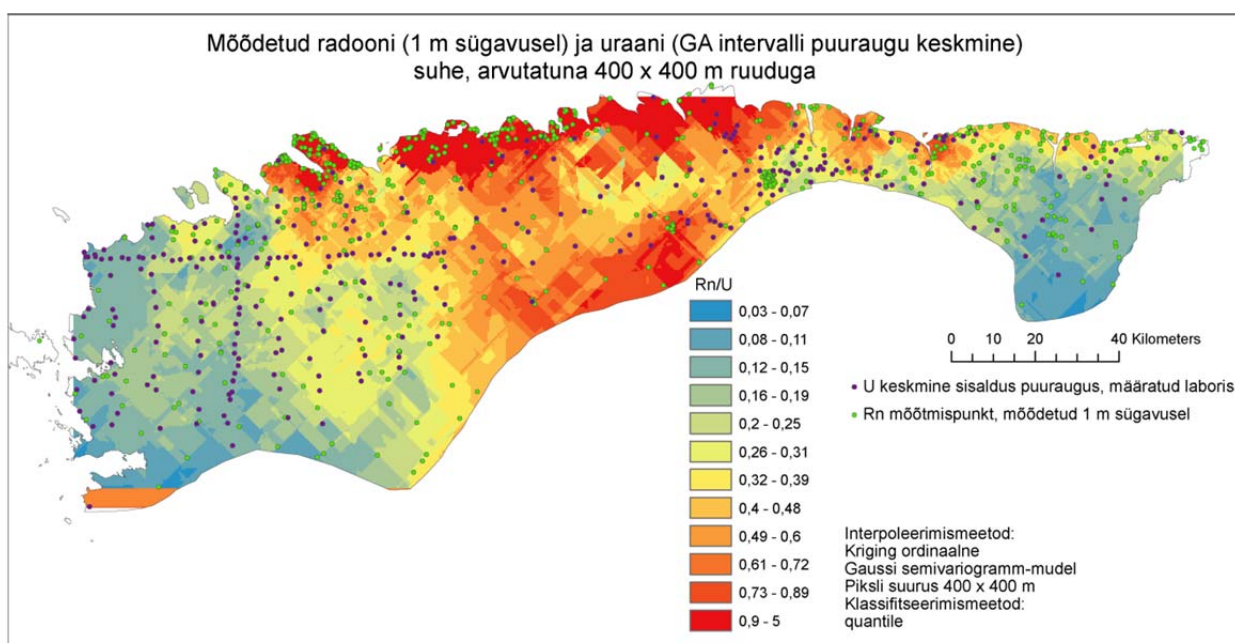
Kivimis, pinnases, täitematerjalis ja ehitusmaterjalides tekib radoon nendes leiduva  $^{238}\text{U}$  tütarelemendi radiumi ( $^{226}\text{Ra}$ ) radioaktiivsel lagunemisel. Tekkivast radoonist eraldub pinnast või ehitusmaterjali moodustavate tahkete osakeste vahelisse õhku üldjuhul 15–40%. Kuna radoon annab suurima osa looduslikust kiirgusest, siis on üks levinumaid looduslikust kiirgusest tulenevaid terviseriske tingitud radoonist. Eesti kuulub Euroopa Liidu kõrge Rn-riski tasemega riikide hulka. Enam kui 1/3 Eesti territooriumil ületab Rn-sisaldus pinnaseõhus piiranguteta ehitustegevuseks lubatud piiri tihti enam kui 10 korda. Süstemaatiliste radooniuuringute tulemusena on Eestis välja selgitatud radooniohtlikumad piirkonnad ja koostatud esialgsed radooni riskialade kaardid kogu Eesti kohta, Harjumaa, Tallinna jt alade kohta (vt. Nirgi jt., 2016). Kahtlemata on graptoliitargilliidil määrav osa radoonilevikul, kuid siiski mitte ainus.



Joonis 6.11: Keskmine uraanisisaldus puuraugus ja mõõdetud radoon pinnases. Algandmestik Eesti Geoloogiakeskus. Kaardi on kombineerinud S. Hade.

Et selgitada mõõdetud radooni leviku ja kivimi uraanisisalduse põhitrende, siis loodi teemakaardina mudel (Joonised 6.11 ja 6.12), kus vaadeldakse radooni ja uraani omavahelist suhet. Mudeli resolutsiooniks on 400 x 400 m. Ruumilisel

modelleerimisel on kasutatud ESRI ArcGIS Desktop programmi lisapaketti Geostatistical Analyst'i kriging ordinaalset interpolatsiooni. See baastarkvara funktsionaalsust suurendav laiendus lubab genereerida mudeli kohta eelnevalt prognooskaardi (prediction map), hindamaks mudelis kasutatavate andmete - GA-s määratud uraani ja pinnases mõõdetud radooni ruumilist varieeruvust (autokorrellatsiooni) ja lisaks teisi tunnuseid kasutades ka kriging interpoleerimist ja trendanalüüsi. Antud andmete puhul trend puudus nii kaalutud keskmises kui varieeruvuses. Andmepunktide ruumilise varieeruvuse modelleerimisel kasutati Gaussi mudelit, mille puhul arvatud poolhajuvus kaugustsoonide kaupa oli väikseim.



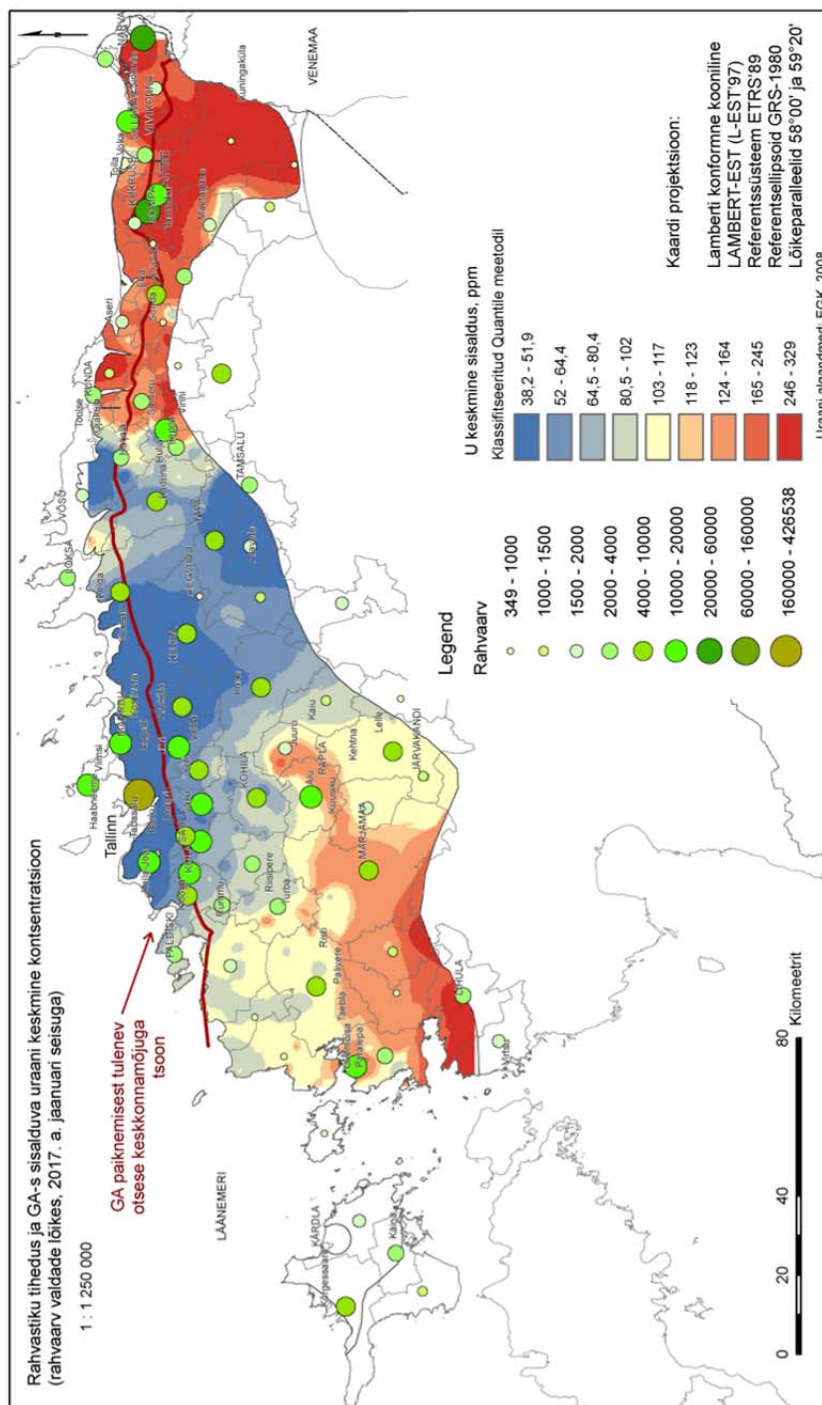
Joonis 6.12: Ühe meetri sügavusel mõõdetud radooni sisalduse (algandmed: Eesti Geoloogiakeskus) ja GA-s määratud uraani keskmise sisalduse suhe. Väga kõrged radoonisaldused on teada põhjaranniku piirkondadest, eriti näiteks Maardu regioonist, aga samuti on radoon kõrge mitmetes muudes piirkondades, kus GA asub suhteliselt sügaval. Rn/U suhe ilmestab radooni muutlikkuse trendi GA esinemisalal. Punakate toonidega aladel on mõõdetud radooni sisaldus kõrgem kui seda võiks eeldada graptoliitargilliidi uraanisisaldusele toetudes, järelilikult tuleks otsida ka muid radooniallikaid ja mõista paremini selle gaasi liikumise dünaamikat muldades ja erinevate setetes. Projekti raames koostanud S. Hade.

Praegusele andmestikule toetudes võib öelda, et oluliselt tuleks radooni seirevõrku tihendada ja intensiivsemalt jätkata mõõtmisandmete kogumist, et need võimaldaksid usaldusväärsete ruumianalüüside tegemist. Detailuuringu koostamine radooni (Rn) migratsiooni ja pinnase aeratsioonitingimuste muutustest tingitud Rn-sisalduse varieerumise kohta on samuti vajalik. Eesti Geoloogiakeskuse poolt 2016. aastal läbiviidud seire tulemused kinnitasid varem teada olnud Rn-sisalduse kõikumist aasta lõikes ning töid selgemini esile varem vähe teadvustatud pinnase eU-sisalduse (pinnase  $^{226}\text{Ra}$  sisalduse) põhjal arvatud Rn-sisalduse kõikumise. Seire tulemused näitasid, et pinnases *in-situ* mõõdetavat eU-sisaldust võib mõjutada pinnase takistatud aeratsiooni tõttu

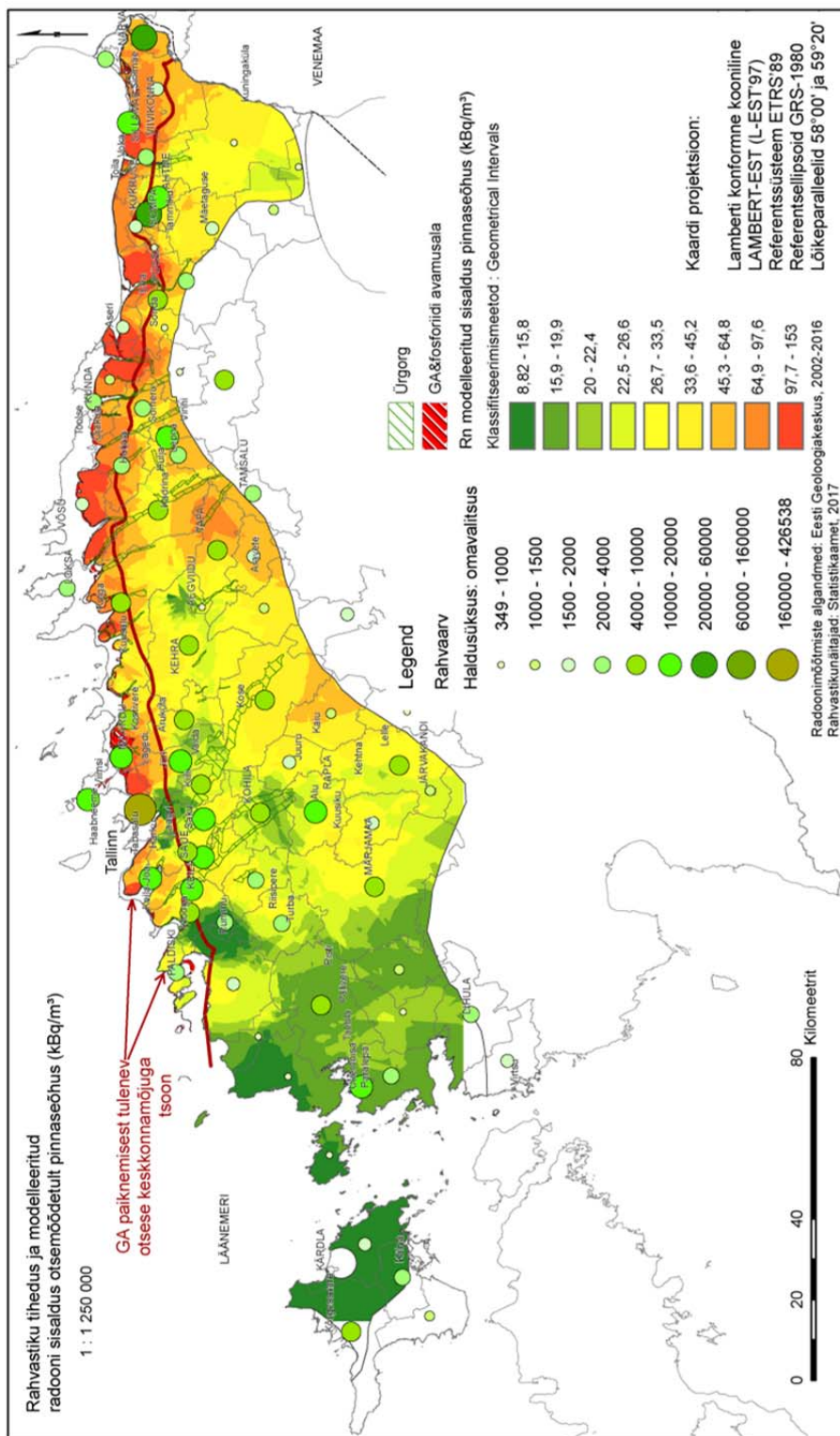
pinnaseõhus suurenenud Rn-sisaldus ja sh aluspõhjakiivimeist migreeruva Rn arvelt.

## 6.11 Rahvastiku tihedus ja graptoliitargilliidi uraani ning pinnase radooni sisaldused

Hindamaks elanikkonna paiknemist ja rahvastiku tihedust Põhja-Eestis, on läbi viidud kivimi uraanisisalduse, pinnase radoonisisalduse ja rahvastikutiheduse analüüs. Analüüsi tulemused on esitatud joonistel 6.13 ja 6.14.



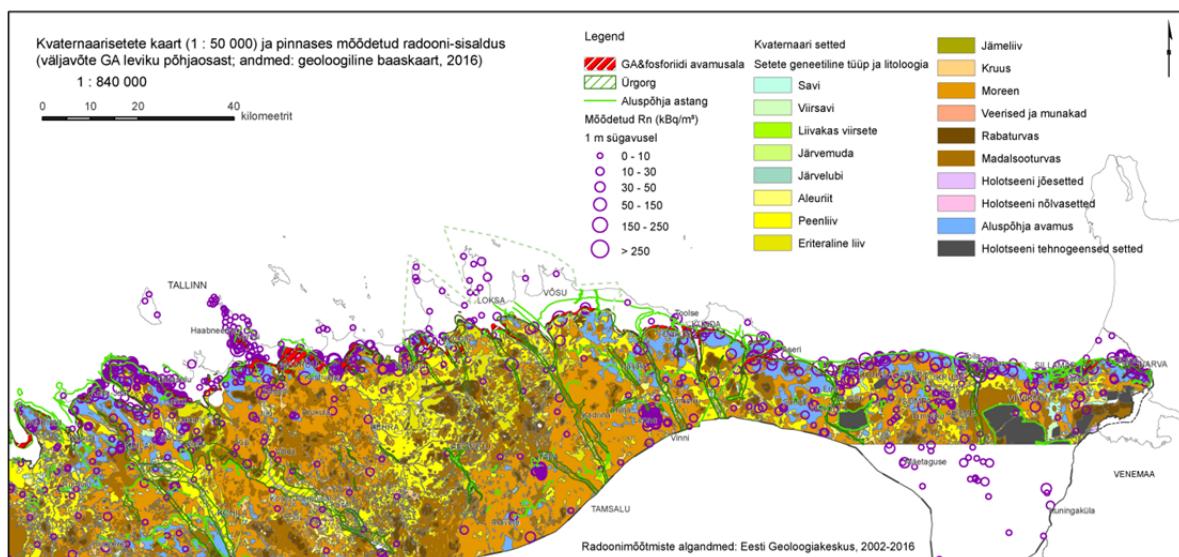
Joonis 6.13: Rahvastiku tihedus Põhja-Eestis ning graptoliitargilliidi keskmise U-sisalduse mudel. Väga oluline hulk Eesti rahvastikust paikneb potentsiaalse keskkonnamõju piirkonnas (punane joon). Algandmed Eesti Geoloogiakeskus, 2008, 2016) ja Statistikaamet, 2017. Koostanud S. Hade.



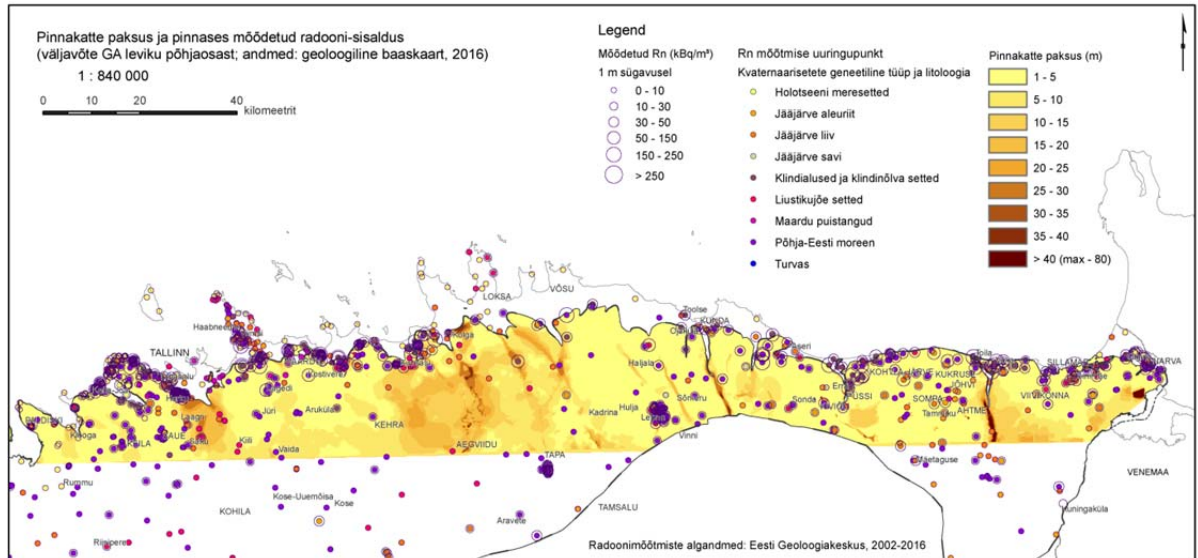
Joonis 6.14: Rahvastiku tihedus ja modelleeritud radooni sisaldus pinnaseõhus mõõdetud andmete alusel (andmed: Eesti Geoloogiakeskus, 2016). Koostanud S. Hade.

## 6.12 Kvaternaarisetted, setete paksus ja mõõdetud Rn sisaldus pinnases

Graptoliitargilliidi keskkonnaohtlikkuse taseme hindamiseks koostati projekti käigus teemakaardid Kvaternaarisetete tüpoloogia ja litoloogia kohta ning kvaternaarisetete paksuse mudel (Joonis 6.15 ja joonis 6.16), millel kajastub EGK poolt mõõdetud pinnaseradooni kontsentratsioon koos Rn uuringupunktides määratud setete geneetilise tüübi ja litoloogilise infoga. Pinnakatte geoloogiline informatsioon pärineb geoloogiliselt baaskaardilt Maa-ameti geoportaalist (2016 andmed). Kuna GB geomorfoloogiat käsitleva teemakaardi infotihedus on suhteliselt hõre, siis pinnavormide määratlemiseks setete asendi ja settimiskeskonna selgitamisel kasutati selle projekti ühe teemakaardina loodud GA DEM mudelit. Töös on esitatud näidisenäidena väljavõtte GA ala põhjaosa kohta, silmas pidades GA paiknemisest tulenevat otsese keskkonnamõjuga tsooni aspekti.



Joonis 6.15: Kvaternaari setete tüübid ja litoloogia. Mõõdetud radooni sisaldused Põhja-Eestis ja Kirde-Eestis. Esitatud GIS kaardiväljundit saaks tulevikus kasutada mõõdetud radooni koguse ning setete tüübi ja litoloogia vaheliste pindalalis-ruumiliste korrelatsioonide tuvastamiseks. Kompilleerinud S. Hade.



Joonis 6.16: Põhja-Eesti graptoliitargilliidi maapinnale lähedaloleva tsooni pinnakatte paksuse mudeli väljavõte. Lisaks kajastab kaardipilt EGK poolt mõõdetud radooni kontsentratsiooni pinnases ja nendes uuringupunktides määratud geneetilisi ja litoloogilisi settetüüpe. Teemakaardi on kompilleerinud S. Hade.

Analüüs pinnakatte setete geneetiliste tüüpide ja litoloogia ning pinnase radooni kontsentratsioonide vahel eeldab detailset lähenemist ja korreleerimist setete paksusega. Radoonisisaldus varieerub üsna piiratud maa-alal ning seda mõjutavaid tegureid on palju. Uuringuid nende hindamiseks läbiviidud senini on vähe.

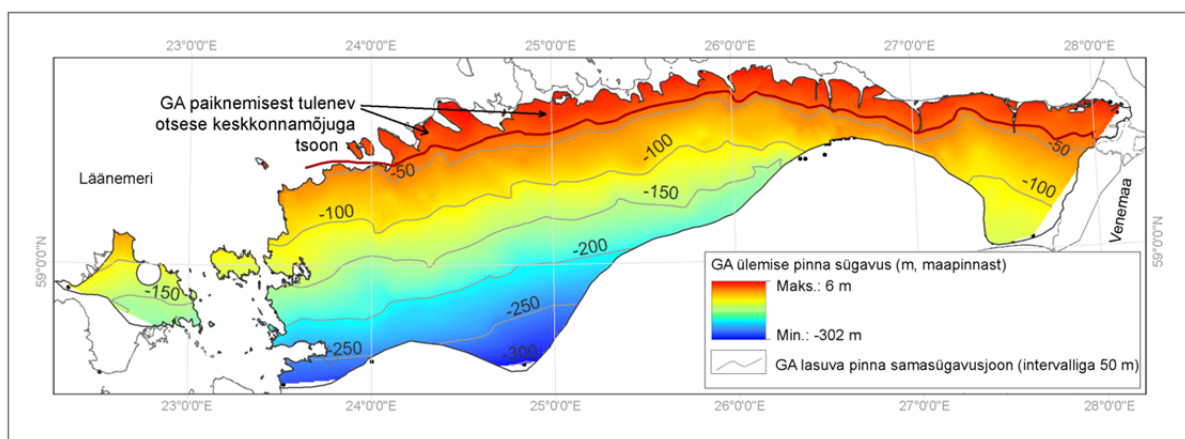
Pinnakatte geoloogiline, geomorfoloogiline, ka hüdrogeoloogiline analüüs koos mullastikukaardil kajastuva teabega hindamaks pinnaseradooni levikut vajab palju-palju tihedamat kaetust Rn mõõtmiste osas, st monitooringuvõrku tuleb tihendada ühtlasemalt ka lõunapool Põhja-Eesti klindivööndit ja samuti väljaspool asulaid. Algandmete auklikkusest ja lünklikkusest tulenevalt antud projekti väljundina koostatud keskkonnaohtlikkuse mudelisse detailseid järeldusi teha polnud võimalik.

Üldiselt on madala radooniriskiga aladena teada pehmetest setetest liivad ja aleuriidid ning maapinnal või alvarite all aluspõhjakiivimitena avanevad lubjakivid, seda Põhja-Eesti puhul. Mõõdetud Rn sisaldused pinnases jäävad nendel aladel vahemikku 0-10 kBq/m<sup>3</sup>, kuid setete heterogeensest levikust tingituna esineb lokaalselt Rn kontsentratsiooni 10-50 kBq/m<sup>3</sup>. Normaalse radooniriskiga alade Rn sisalduseks hinnatakse kontsentratsiooni 10-50 kBq/m<sup>3</sup> ning sellisteks normaalse looduskiirgusega pinnasteks on savikad setted ja savid. Tulenevalt nende halvatest aeratsiooniomadustest ja veega küllastatuse astmest, võib olla Rn migratsioon nii pinnakattes kui aluskorrakivimites raskendatud. Savipinnastes esineb lokaalselt alasid, kus Rn sisaldus vastab kas madala Rn-sisaldusega või kõrge Rn-sisaldusega pinnastele. Kõrgeks Rn-riskiga settetüüpideks loetakse liustikujää tegevusega seotud setteid (võib-olla kohati, kuna kaardianalüüsi puhul ilmsid uuringupunktid, kus nendes setetes sisalduv Rn vastab madala radooniriskiga piirkonnale) nagu glatsiofluviaalsed ja limnoglatsiaalsed setted ning moreen. Selge, et klindialused ja klindinõlva setted

ning Maardu puistangud ja inimtekkelised tehnogeensed setted (millede suuremate Ida-Virumaal olevate kohta mõõdetud Rn sisalduste EGK poolt edastatud nn avalikus andmebaasis andmeid ei sisaldu) on kõrge (150 – 250 kBq/m<sup>3</sup>) ja eriti kõrge Rn-sisaldusega pinnased (>250 kBq/m<sup>3</sup>).

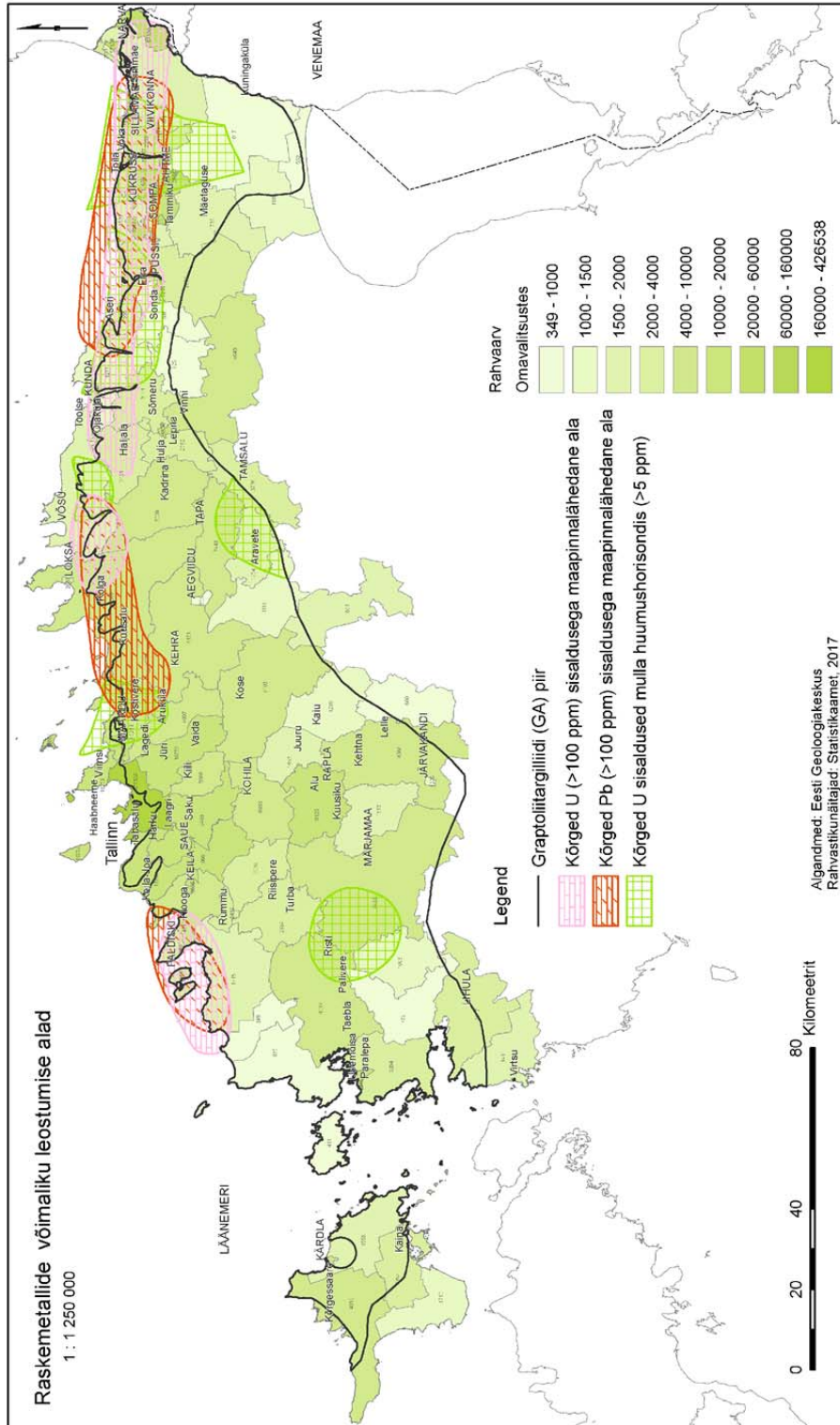
## 7. Graptoliitargilliidi keskkonnaohtlikkuse mudel

Eesti graptoliitargilliit (GA) sisaldab mitmeid metalle (U, V, Zn, Mo jt.) ja elemente, sh keskkonnaohtlikke kõrges kuni väga kõrges kontsentratsioonis. Väga suur osa Eesti rahvastikust asustab territooriumi, kus GA vahetult paljandub või on pinnalähedases sügavuses (Joonis 7.1). Seega mõjutab GA otseselt elu- ja looduskeskkonda, paljudel juhtudel ka põhja- ja pinnavett. Tulenevalt asustustiheduse jätkuvast kasvust rannikualadel ning tulenevalt rangematest keskkonnanõuetest elamuplaneeringus, on matemaatilistel funktsioonidel baseeruvast ruumimudelist kindlasti abi planeeringute ja keskkonnaküsimustega tegelevatele valla- ja ministeeriumiametnikele, seadusandlusest tulenevate nõuete täitmisel või kasvõi kohalikule elanikule huvipakkuva piirkonna valikul (kuhu rajada tulevane kodu, välja arendada elamurajoonid ja ühiskondlikud hooned, kuhu suvepuhkus planeerida jne). Mudelite täpsus oleneb meile tänaseks teadvustunud keskkonda mõjutavate parameetrite teaduslikust uuritustasemest ja ka nende kohta loodud ruumiandmete olemasolust.



Joonis 7.1: Graptoliitargilliidi sügavusest (ülemine pind ehk lasum) ja kivimi paljandumisest tulenev otsese keskkonnamõju piir (punane joon näitab sügavust kuni 40 m maapinnast allpool). Lõuna suunas kivimi lasumissügavus suureneb, vaatamata sellele jääb suur osa tihedalt asustatud Põhja-Eestist graptoliitargilliidi vahetu mõju piirkonda.

Digitaalsed kaardimudelid võimaldavad kergesti tõsta informatsiooni loetavust erinevate klassifitseerimismeetodite rakendamise ja kategoriseerimise teel, ning seda just meile huvipakkuva maa-ala kohta ja soovitud andmetihedusega. GA ala lääne- ja lõunaosas uuem digitaalne geoloogilise baaskaardi (GB) informatsioon puudub. Enam-vähem kuni Paldiski-jooneni on ala põhjapiirkond GB teemakaartidega kaetud. Tõsi, detailuuringuteks ja ajakohase usaldusväärse põhjalikuma info saamiseks peaks ka nende kaardiruutude kaetus geoloogilise teabega olema kordades detailsem. Lähtuvalt GA kihi sügavusest (Joonis 7.1) ja maapinnale paljandumisest, pinnakatte setete litoloogiast, pinnakatte paksusest, elanikkonna asustustihedusest ja paiknemisest jaotub GA ala keskkonnaohtlikkuse taseme mõjutsoonideks.

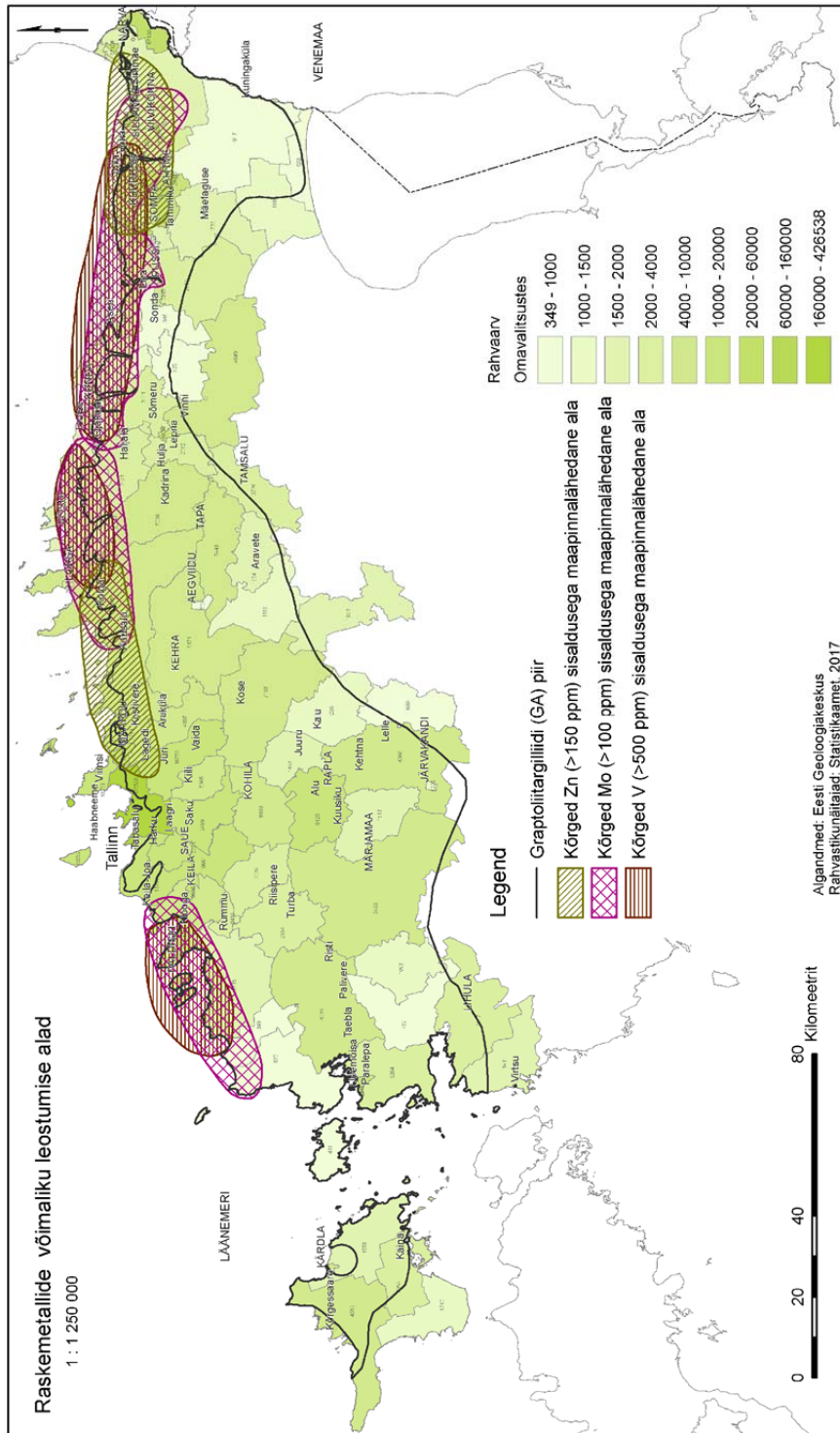


Joonis 7.2: Kaardil on rajoneeritud graptoliitargilliidis sisalduvate raskemetallide uraani ja plii võimaliku leostumise piirkonnad ning mulla huumushorisondis esineva uraani sisaldused Põhja – Eesti regioonis, GA avamuse ja madala sügavuse (40 m maapinnast) aladel. Aluskaardil on näidatud rahvaarv omavalitsustes (algandmed: Statistikaamet, 2017; Eesti Geoloogiakeskus, 2008). Rajoneerimine: S. Hade.

## 7.1 Keskkonnaoht tulenevalt graptoliitargilliidi uraani, tsingi, plii, molübdeeni ja vanaadiumi sisaldusest

Antud projekti raames on arvukatele teemakaartidele (vt peatükk 6) ja GIS analüüsile toetuvalt koostatud GA keskkonnaohtlikkuse mudel lähtuvalt kivimis esinevatele metallide ja raskemetallide leostumise aladele (joonis 7.2 ja joonis 7.3).

Graptoliitargilliidis leiduva uraani kõrgeimad kontsentratsioonid on hästi teada ida-lääne-suunalisel ulatuslikul lõigul Kunda ja Narva vahel (Joonis 7.2). Tänu kõrgendatud uraanisisaldusele võib kogu ala pidada kõrgeima ohuteguriga alaks, kus reaalne radoonirisk on kõrgeim ning tulenevalt GA leostumisvõimalustest, samuti ka muude metallide keskkonda sattumise risk (läbi inimese tegevuse). Pisut magalama kategooriaga riskialad paiknevad Pakri-Paldiski regioonis ja Kolgaküla - Loobu vahel. Kui vaadelda uraani sisaldust mulla huumusehorisondis, siis praegune andmetihedus ei anna alust ulatuslikeks regionaalseteks rekonstruktsioonideks, kuigi saastunud alasid saab paljudel juhtudel käsitleda kui punktreostusalasid. Kõrgeima uraanisisaldusega paistab silma Kunda - Aseri ala. Madalamad, kuid siiski üle keskmise (>5 ppm) uraanisisaldused on teada Toila - Voka, Aravete - Roosna, Maardu - Ülgase - Jõelähtme, Risti - Maidla ja Sagadi aladel. Praeguse andmestiku alusel ei ole üheselt võimalik määrata reostuse geneetilist tüüpi. Kõrgeima plii sisaldusega GA levib Aseri - Sillamäe vahel, kujutades plii osas kõrgeimat võimalikku keskkonnariski. Madalaimad, kui keskmisest siiski kõrgemad plii sisaldused on teada Kostivere - Sagadi regioonis ja Loode - Eestis (Joonis 7.2).



Joonis 7.3: Kaardil on rajoneeritud graptoliitargilliidis sisalduva tsingi, molübdeeni ja vanaadiumi võimaliku leostumise piirkonnad Põhja – Eesti regioonis, GA avamuse ja madala sügavuse (40 m maapinnast) aladel. Aluskaardil on näidatud rahvaarv omavalitsustes (algandmed: Statistikaamet, 2017; Eesti Geoloogiakeskus, 2008). Rajoneerimine: S. Hade.

Graptoliitargilliidi tsingi sisaldused on kõrgeimad Ida – Eestis, Kunda – Sillamäe regioonis (Joonis 7.3), seda ala tuleks käsitleda kui kõrgeima loodusliku või tehnogeense riskiteguriga ala. Madalama tsingikontsentratsiooniga ala jääb

Muuga – Kolga vahele. Sarnaselt uraanile ja tsingile, on ka molübdeenisisaldused kõrgeimad Kunda – Sillamäe regioonis (Joonis 7.3). Mõneti madala riskiga on Loode – Eesti ja Kuusalu – Eisma regioonid. Kõrgendatud vanaadiumi-riskiga ala jääb Kunda ja Voka vahele (Joonis 7.3), madalama riskiga on Loode – Eesti ja Kolga – Viitna regioonid. Nimetatud regioonides tuleks ehitus- või kaevandustöödel (mis otseselt puudutavad graptoliitargilliidi kihti või sellele lähedasi kivimeid) jälgida võimalikke metallide leostumisprotsesse. Samas peab siiski mainima, et olemasoleval andmestikul läbiviidid rajoneerimine on siiski esialgne ning detailsema ülevaate saamiseks on vajalik oluliselt tihedama proovivõrgu rajamine ning märksa enamate (keskkonnaohtu omavate) elementide määramine.

## 7.2 Keskkonnaoht tulenevalt graptoliitargilliidi uraani radioaktiivsest lagunemisest ja tekkivast radoonist

Rajoneerimise aluseks on mudelites valdavalt inimese kontrollile allumatu looduslik kiirgus ja sellest ülekaaluka osa moodustab pinnases akumulerev uraani lagunemisprodukt radoon koos tütarelementidega. Õnneks on ohtlikud Rn-sisaldused pinnases jm meile teada, võib-olla tänu 1950-60ndatel USA uraanikaevandustes töötavate kaevurite kopsuvähi tollasele massilisele levikule! Paraku tuleb tunnustada, et paljutki looduses toimuvat teaduslikele printsiipidele toetuvalt lõpuni seletada ei osata ja veelgi raskem on selliseid protsesse mõõta ja kvantitatiivselt hinnata, kui pole tehtud vastavaid detailuuringuid. Hinnatud on, et üldjuhul imendub raadiumi radioaktiivsel lagunemisel tekkivast radoonist pinnaseõhku 15-40% ja ülejäänud jääb suure tõenäosusega kivimitesse, või mujale pooriruumi, kus edasisel lagunemisel tekib stabiilne plii isotoop ( $^{206}\text{Pb}$ ). Jällegi väga ohtlik inimese tervisele, kuid vastavad uuringud vähemalt Eesti ala kohta puuduvad ning sellegi ohuallika ulatuse kohta infot ruumimudelite analüüsiks pole piisavalt. Niisiis on ligi 20 aastat tehtud Rn-mõõtmistest (ehkki võrk on hõre ja regulaarsete mõõtmiste sagedus stiihiline) elanikkonnale kasu suur, sest riski teades saame kasutusele võtta vajalikud abinõud ja välja töötada uued tervist hoidvad tehnoloogiad.

Radooniriski järgi jagatakse Eesti alad üldjuhul järgmiselt:

I Madala radooniriskiga alad: madala looduskiirgusega pinnased on peamiselt liivad ja aleuriidid, samuti aluspõhjakivimid, enamasti lubjakivid, mis avanevad maapinnal või on kaetud õhukese pinnakattega;

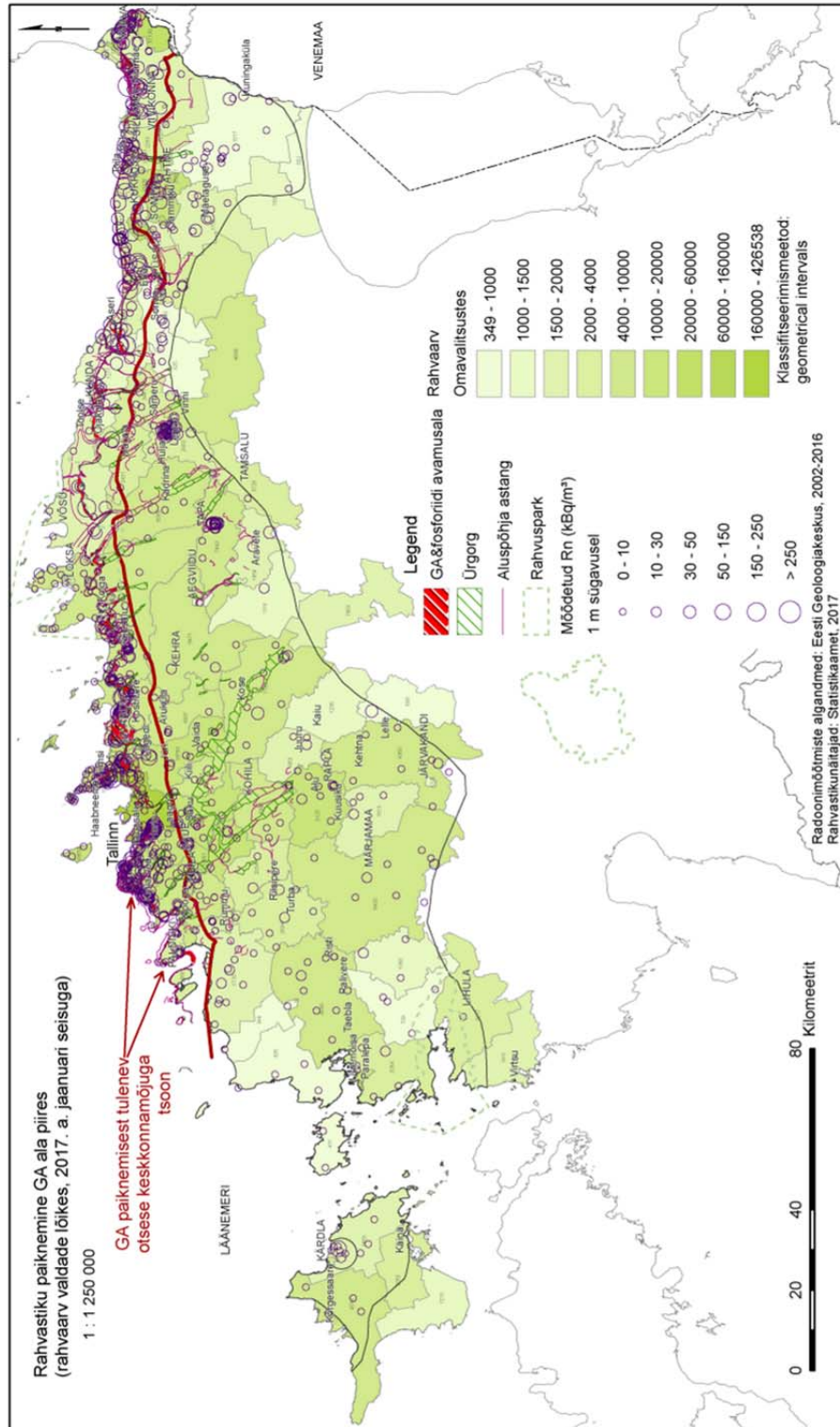
II Normaalse radooniriskiga alad: pinnased normaalse looduskiirgusega: savid, savikad setted, kuna veeküllastunud savipinnaste halvad aeratsiooniomadused takistavad Rn migreerumist (lokaalselt võib esineda selliste alade sees nii kõrge, kui madala Rn-sisaldusega pinnaseid);

III Kõrge radooniriskiga pinnased: jääjärvede ja glatsiofluviaalsed setted ning moreenid.

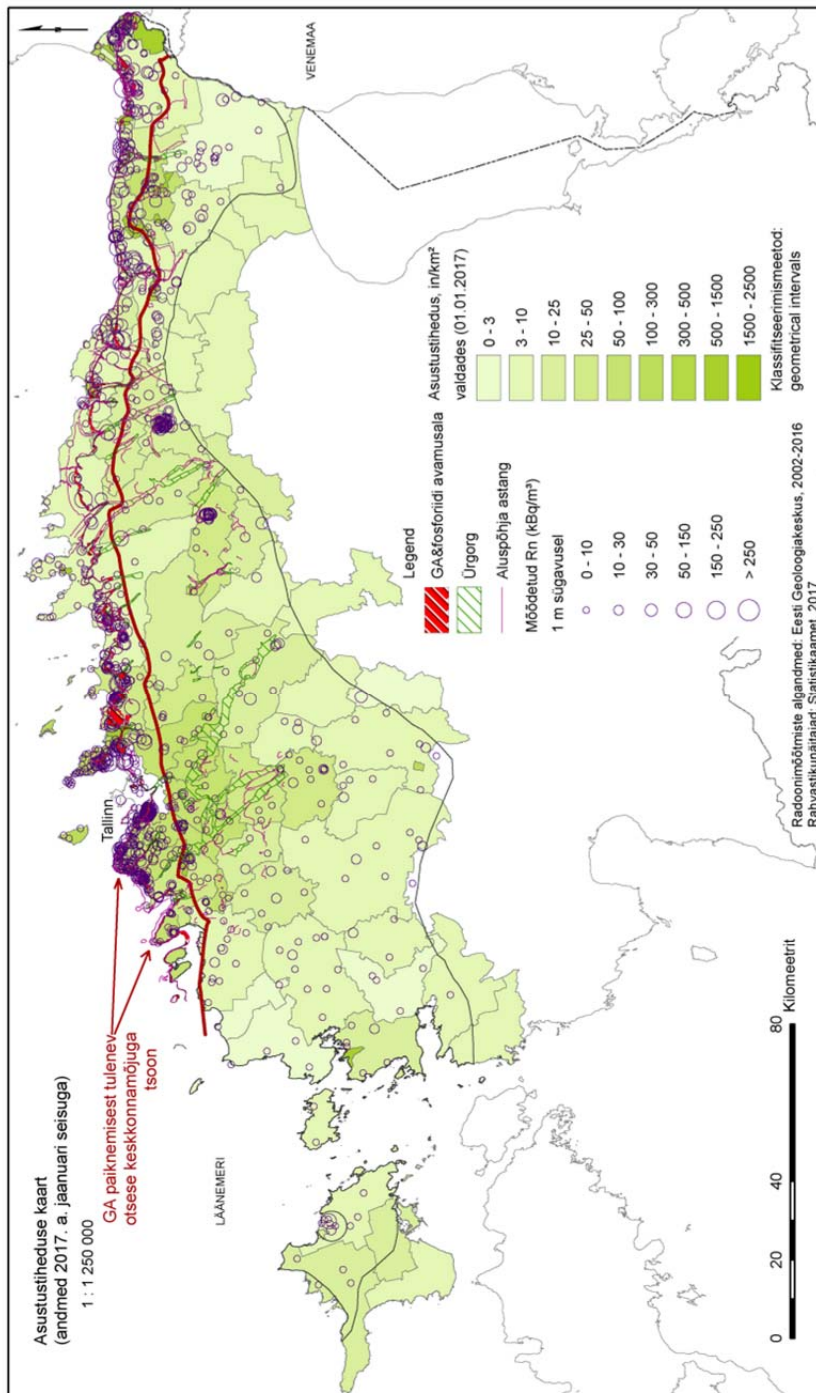
Pinnaseõhus tehtud mõõtmiste alusel võib eristada järgmisi pinnaseid (mõõdetud  $\text{kBq/m}^3$ ):

- A. Eriti kõrge Rn-sisaldusega pinnas (>250)
- B. Kõrge Rn-sisaldusega pinnas (150 - 250)
- C. Kõrge Rn-sisaldusega pinnas (50 - 150)
- D. Normaalse Rn-sisaldusega pinnas (30 - 50)
- E. Normaalse Rn-sisaldusega pinnas (10 - 30)
- F. Madala Rn-sisaldusega pinnas (0 - 10)

Kõrge radoonioht on eeskätt probleemiks kõrge asustustihedusega aladel, kus toimub ka suurim hoonestamine ja muu keskkonda puudutav arendustegevus. Siinkohal saabki hinnata mõju suurust läbi rahvaarvu ja asustustiheduse. Vastavad näitajad on näitlikustatud Joonistel 7.4 ja 7.5, kus rahvastiku tihedus ja rahvaarv on kombineeritud pinnasekihis mõõdetud radoonisisaldusega.



Joonis 7.4: Rahvastiku paiknemine omavalitsuste kaupa ja pinnases mõõdetud radooni kogus. Suuremad mõõdetud Rn-sisaldused pinnases on selgelt tingitud GA kihi paiknemisest maapinnalähedal või ka otsesest paljandumisest klindiaastangul ja sügavates orgudes. Algandmed: Statistikaamet, 2017 ja Eesti Geoloogiakeskus, 2016. Kompilatsioon: S. Hade.



Joonis 7.5: Rahvastiku asustustihedus (inimest/km<sup>2</sup>) ja pinnases mõõdetud radooni kogus. Suuremad mõõdetud Rn-sisaldused pinnases on selgelt tingitud GA kihi paiknemisest maapinnalähedal või ka otsesest paljandumisest klindiaastangul ja sügavates orgudes. Algandmed: Statistikaamet, 2017 ja Eesti Geoloogiakeskus, 2016. Kompilatsioon: S. Hade.

## 8. Kokkuvõte

TTÜ Geoloogia instituudi poolt täidetava KIK projekt nr 10224 "Eesti graptoliitargilliidis leiduvate raskemetallide ja teiste elementide keskkonnamõju mudel ning leostumise dünaamika" uuringud toimusid 2015. - 2017. aastal. Projekti käigus viidi läbi ulatuslik graptoliitargilliidis sisalduvate metallide leostumiseksperiment ja koostati elemendiliste keskkonnamõjudega seonduvaid temaatilisi kaarte.

Projekti käigus leiti, et

- Graptoliitargilliidi leostumine on oluline naturaalne keskkonnaprotsess tänu millele satub muldadesse, vette jm. hulk keskkonnaohtlikke elemente;
- Kõige olulisemaks teguriks analüüsitud elementide kõrgemate kontsentratsioonide taga uuritud leostumislahustes on algkivimi fraktsiooni suurus. Jämedama fraktsiooni puhul, kus pooriruum suurem ja lahuse kontakt kivimiga parem leostub rohkem raskmetalle kui peenema fraktsiooni puhul;
- Rb, Tl, Cs, Sb kontsentratsioonid üldiselt suurenesid kogu eksperimendi kestel s.t, et nende elementide puhul kokkupuuteaeg lahusega on oluline ja mida pikem, seda rohkem leostub neid elemente;
- Teiste analüüsitud raskemetallide puhul toimus kõige intensiivsem leostumine juba esimese 10 päeva jooksul. Eksperimendis kasutatud ajaintervallide põhjal saab öelda, et intensiivne leostumine toimub esimese 3 päeva jooksul ja enamuse elementide puhul toimub kontsentratsioonide tõus lahustes ka 3-10 päeva jooksul. Kauem leostunud (11+ päeva) proovides märgatavat kontsentratsioonide tõusu enam ei toimu;
- Arvestades, et kõige intensiivsem leostumine eksperimendi tulemuste põhjal toimub esimese 10 päeva jooksul on märkimisväärne, et ka proovides, mida periooditi (14 päevane intervall) kuivatati ning seejärel uuesti leostati ei fikseeritud kõrgeenenud raskemetallide sisaldusi;
- Eksperimendis kasutatud graptoliitargilliidis mõõdetud elemendi sisaldusest leostus <0.1% Rb, Cs ja Sb; 0.1-1.0% V, Cr, Co, As, Mo; >1% - 10% Ni, Cu, Zn, Cd, Tl ja U.
- Kõige enam leostunud elementidest on Cd ja Tl sisaldused graptoliitargilliidis väga madalad, kuid Ni, Cu, Zn ja U sisaldused kohati väga kõrged;
- Geokeemilistele analüüsidele ning GIS-meetoditele toetuvalt on modelleeritud graptoliitargilliidis leiduvate raskemetallide ja teiste keemiliste elementide keskkonnamõju Põhja- ja Kirde-Eesti piirkonnas (riskipiirkondade rajoneerimine);
- On analüüsitud mõju sõltuvalt elanike asustustihedusest ja paikkonna geoloogilistest iseärasustest.
  
- Saadud tulemusi saab kasutada graptoliitargilliidist tuleneva loodusliku keskkonnamõju hindamiseks ning arendustegevuse planeerimisel aladel kus GA paljandub või on väikeses sügavuses.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Childs, C. 2004. Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *ArcUser: The Magazine for Esri Software Users*, Summer, 32-35.
- Clavensjö, B., Åkerblom, G. 1994. *The Radon book. Measures against radon*, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 129.
- Hade, S. 2014. *GIS Applications in the Studies of the Palaeozoic Graptolite Argillite and Landscape Change*. PhD. Thesis, TTÜ.
- Hade, S., Soesoo, A. 2014a. Estonian graptolite argillites revisited: a future resource? *Oil Shale*, 31(1), 4–18.
- Hints, R., Hade, S., Soesoo, A., Voolma, M. 2014. Depositional framework of the East Baltic Tremadocian marginal black shale revisited. *GFF*, 1–19.
- Jõgioja, E. 2004. *Radooniohutu elamu*. OÜ Ehitusteave.
- Kumar, A., Kadiyala, A., Sarmah, D. 2014. Evaluation of Geographic Information Systems-Based Spatial Interpolation Methods Using Ohio Indoor Radon Data. *The Open Environmental Engineering Journal*, 7, 1-9.
- Loog, A., Petersell, V. 1994. The distribution of microelements in Tremadoc graptolitic argillite of Estonia. *Tartu Ülikooli Toim.*, 972, Töid geol. alalt XIV. Tartu, lk 57–76.
- Niin, M., Rammo, M. 2008. *Eesti maavarade kaart: diktüoneemakilt (graptoliitargilliit)*. Mõõtkavas 1:400 000 (1:200 000). Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- Nirgi, S., Petersell, V., Karimov, M., Milvek, H., Täht-Kok, K. 2016. *Eesti pinnaseõhu Rn-sisalduse 2-aastane seire ja mõõtmisaparatuuri uuendamine*. OÜ Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Pahapill, L. 1999. *Radoon hoonetes*. Eesti Kiirguskeskus.
- Petersell, V., Täht-Kok, K., Karimov, M., Shtokalenko, M., Milvek, H., Nirgi, S. 2015. *Tallinna Radooniriski Kaart*.
- Petersell, V., Ressar, H., Carlsson, M., Mõttus, V., Enel, M., Mardla, A., Täht, K. 1997. *Eesti mulla huumushorisondi geokeemiline atlas*. Eesti Geoloogiakeskus, Sveriges geologiska undersökning. Tallinn–Uppsala, seletuskiri 75 lk + 37 kaarti. [Eesti ja inglise keeles].
- Petersell, V., Mõttus, V., Täht, K., Unt, L. 1996. *Mulla geokeemilise seire bulletin 1992–1994*. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, 84 lk.
- Petersell, V., Ressar, H., Mõttus, V., Olsson, A., Unt, L., Vösu, M. 1994. *Kirde-Eesti mulla huumushorisondi ja turbalasundite ülemise kihi geokeemiline atlas*. Eesti Geoloogiakeskus, Sveriges geologiska undersökning. Tallinn–Uppsala, seletuskiri 45 lk + 54 kaarti. [Eesti ja inglise keeles].
- Petersell, V. 1991. Geochemistry of F, Sr, REE and U in phosphorites of the East Baltic phosphorite basin. *Exploration Geochemistry 1990*, Prague, p. 278–290.
- Raukas, A., Kajak, K. 1997. Quaternary cover. In: *Geology and mineral resources of Estonia*. Tallinn, 125–136.
- Saarik, K. 2016. *Radon Emissions from the Estonian Quaternary Cover*. PhD. Thesis, TÜ.
- Soesoo, A., Hade, S. 2014. Black shale of Estonia: moving towards a Fennoscandian-Baltoscandian database. *Transactions of Karelian Research Centre, Russian Academy of Science*, 1, 103–114.
- Soesoo, A., Hade, S. 2012. Metalliferous organic-rich shales of Baltoscandia – a future resource or environmental/ecological problem. *Archiv Euro Eco*, 2, 11–14.
- UNSCEAR, 2008. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations, New York.
- Voolma, M., Soesoo, A., Hade, S., Hints, R., Kallaste, T. 2013. Geochemical heterogeneity of the Estonian graptolite argillite. *Oil Shale*, 30(3), 377–401.