

Eesti Looduseuurijate Selts
Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut
Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut

PIIRIDETA GEOLOOGIA

Schola Geologica V

Tartu 2009

Autoriõigused: autorid, toimetajad ja Eesti Looduseuurijate Selts

TOIMETAJAD: Evelin Verš, Leeli Amon ja Liina Laumets

Kirjastanud OÜ Sulemees

Esikaane foto: "Isegi piirideta geoloogial on piirid ees", ehk selleks et puurida 3 m kaugusel Vene piirist Solova soos Võrumaal on vaja julgestuseks piirivalvurit, et geoloogid üle piiri ei läheks...

Autor: Siim Veski

Kaanekujundus: Kadri Sohar

Soovitav viitamise vorm:

Kogu väljaandele:

Verš E., Amon L., Laumets L. (toim.) 2009. Piirideta geoloogia. Schola Geologica V. Sulemees, Tartu, 160 lk.

Artiklile:

Kaplinski J. 2009. Katastroofiline intellekt. Rmt.: Verš E., Amon L., Laumets L. (toim.) Piirideta geoloogia. Schola Geologica V. Sulemees, Tartu, lk. 11–12.

Viienda geoloogia sügiskooli toimumist ja seotud teadusettekanete sarja "*Schola Geologica*" väljaandmist toetasid **Keskkonnainvesteeringute Keskus**, Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut ja Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut.

Sügiskool ja kogumik kuuluvad UNESCO ja Rahvusvaheliste Geoloogia-teaduste Liidu (IUGS) Rahvusvahelise Planeet Maa Aasta tegevuste kavva.

ISSN 1736-3241

ISBN 978-9985-9943-3-7

"Change is the only constant."

Heraclitus

"With their four-dimensional minds, and in their interdisciplinary ultraverbal way, geologists can wiggle out of almost anything."

John McPhee

„If our small minds, for some convenience, divide this glass of wine, this universe, into parts – physics, biology, geology, astronomy, psychology, and so on – remember that Nature does not know it!

So let us put it all back together, not forgetting ultimately what it is for. Let it give us one more final pleasure: drink it and forget it all!“

Tony Hey ja Patrick Walters

The New Quantum Universe (2003), Epilogue

EESSÕNA

Mõttetasandilt viienda sügiskoolini

Evelin Verš

Algus oli raske ja võttis aega aastat paar

Kui kõik ausalt ära rääkida, tuleb alustada päris algusest. Aastad võisid olla siis 2001 ja peale, kui toleaeagsed värsked magistrandid ja doktorandid tundsid, et midagi oleks justkui puudu. Ainuüksi õppekavas olnud loengusarjadest, kohustuslikest kraadiõppurite seminaridest ja välitöödest jäi neile väheseks. Ka prof. Kirsimäe eestvedamisel korraldatud mitte-akadeemilised koosviibimised ei täitnud neis olnud tühimikku. Taheti midagi enam. Nagu bioloogidel – õhkkonda, kus professor, teadur ja tudeng õlg õla kõrval teaduse ja looduse põhimõtete üle kõik koos arutleda saaks.

Mis olid need esimesed raskused, mis ees seisid? Esmalt tajuti, et üksinda ei tee ära midagi. Oli vaja toetajaskonda. Ja enda peaski polnud kontseptsioon veel päris selge. Nii hakatigi otsima mõttekaaslasid. Üheks esimeseks neist leiti mõtet kahe käega toetanud Ivar Puura, kes tundis rõõmu sellest, et vanemate kolleegide seas juba aastaid peaskeerelnud mõtted nüüd noorte hakkajate tudengite poolt teoks saavad. Lubati toetada vajalike finantsvahendite ja katusorganisatsioonide leidmisel. Võib julgelt öelda, et Ivarist on saanud omamoodi sügiskooli maskott või vapilõvi, kelle tugevatele ja kogemusterohketele õlgadele tema noored kolleegid rasketel hetkedel alati toetuda on saanud.

Nii leitigi lahendus: taaselustada Eesti Looduseuurijate Seltsi geoloogia seksioon ja pöörduda finantsvahendite leidmiseks Keskkonnainvesteeringute Keskuse (KIK) poole. Nüüd tuli vastu võtta otsus – kas nüüd või mitte kunagi? 2005. aasta kevadel võeti süda rindu ning otsustati asi ära teha. Tuumikuks olid tol ajal TÜ doktorandid Evelin Verš, Kadri Sohar, Ulla Preenen ning esimese kogumiku toimetamisele pani oma tugeva õla alla Reet Nemliher. Ideele leiti geoloogide suvapäevadel toetajaskonda ka Tallinna Tehnikaülikooli ja Eesti Geoloogiakeskuse noorte geoloogide seast (Olle Hints, Tarmo All, Rutt Hints, Tuuli Kalberg), kelledest Rutt Hints mõtte tulihingelise toetajana jõudis esimesse sügiskooli esinema kohe kahe ettekandega, rääkides oma nägemusest geoloogilise aja tajumisel.

Järgmine ülesanne oli leida vajalikud esinejad. Esimene katse, kesken- dudu 90% ettekandjate osas kraadiõppuritele ja huvilistele tudengitele, põrus ausalt öeldes suures osas läbi. Tuli välja, et teiste ette astumine ja filosoferimine geoloogilistel teemadel ei olegi üldse kerge ülesanne. Korraldajatel tuli leppida kurva tõsiasjaga ning pöörduda abi küsides oma vanemate kolleegide poole – ju siis ei olnud aeg veel selleks küps. Õnneks

panid oma tugeva õla alla Juho Kirs, Volli Kalm, Väino Puura, Jüri Plado, Leho Ainsaar jt. Esimene sügiskool oli päästetud! Kohale õnnestus meelitada ka ajaloolasi (Aivar Kriiska), kunsti- ja kultuuriinimesi (Mall Hiiemäe, Marje Mee, Mari-Liis Tammiste). Mul on siiani meeles Kalle Kirsimäe sõnad „Ma ei taha oma nägu sügiskooli lähedal näidata, isegi aknast mitte sisse vaadata, et mitte mõjutada tudengite-kraadiõppurite häälestatust.“ See mõte toob siiani sõbraliku muige näole. Alati ei ole toetus käegakatsutav, vaid piisab ka sellest, kui mõttetasandil on keegi sinuga.

Alates esimesest sügiskoolist on olnud asjaga seotud ka mäemehed ehk TTÜ Mäeinstituut. Alguses külalisena, hiljem juba Veiko Karu tugeval eestvedamisel nii ettekandjate kui korraldusmeeskonnaliikmena.

Kuhu me siis tänaseks välja oleme jõudnud?

Seljataga on neli sügiskooli ja kogumikku, mille käigus on mitmed kraadiõppurid saanud toimetajakogemusi või õppinud projektijuhil rollis olemist. Kirjutatud taotlused on leidnud KIKi-poolset toetust ning aastail 2007–2009 on sügiskool kuulunud Rahvusvahelise Planeet Maa Aasta ürituste sarja. Korraldajate ja eestvedajate arv on kasvanud paarilt üksikult hingelt tugeva 10-liikmelise meeskonnani. See arv kasvab iga aastaga.

Ette on tulnud igasuguseid ootamatuid olukordi, mis on tähendanud ettevaatlikku balansseerimist mõistuse ja vabahingelise elukorralduse vahel. Nii on korraldajate jätkuvat boheemlaslikku poolt kandnud oma õlgadel Kadri Sohar, lisades kogumikku ja kavasse omapoolset võrtsi lustlike pildiallkirjadega, uurimustööga doktorantide rahulolust ja lustlik-tarvilike auhindade jagamisel. Maile Polikarpus on oma õlgadel kandnud mõistuslikkuse ja asjalikkuse kadalippu. Esindades kaunis värvikirevat seltskonda, on tulnud seista silmitsi ka „nohik *versus* mullivann“ situatsioonidega, mis tõenäoliselt jäävad meelde kogu eluks.

Võib julgelt väita, et sügiskoolil on oma mõju kindlalt olemas. Tudengite jaoks oli vast kõige olulisem teise sügiskooli kandev teema „Vasaraga tähtede poole“, kus keskenduti geoloogia õppimisele ja õpetamisele nii põhi- kui jätkuõppes, püüdes tuua tudengini tema ees laiuvat võimaluste kogumit. Võibolla oli just see viimaseks vajalikuks tõukeks kraadiõppurite kaasamisele Türi Kolledži üldgeoloogia loengute läbiviimisel.

Juubeliaasta kogumik kannab piirideta geoloogia pealkirja. Ma arvan, et siia oleme olnud teel juba algusest peale. Nii kannavadki 2009. a. ettekanded endas kogu sügiskooli olemust – maailm on üks tervik, mis ei tunne inimese poolt sõnadega sätestatud piire ja piiranguid ning ükski eriala ei saa läbi teisteta. Võime näha puid ja puude taga metsa kehtib nii humanitaar- kui loodusteadustes.

SISUKORD

<i>Evelin Verš</i> Eessõna. Mõttetetasandilt viienda sügiskoolini.....	4
<i>Jaan Kaplinski</i> Katastroofiline intellekt.....	11
<i>Liisa Lang ja Ivar Puura</i> Biominaeralid me ümber ja me sees.....	13
<i>Evelin Verš ja Getter Leppik</i> Geoloogiliste silikaatsete materjalide lahustuvusest mikro- ja jälg- elementide mõõtmisel – lahustamine mikrolaineahju meetodil.....	20
<i>Marge Uppin ja Enn Karro</i> Fluoriidid ja boor Siluri–Ordoviitsiumi põhjaveekompleksis.....	42
<i>Karin Robam</i> Veekõrvalduse uuringud komplekssetes maardlates.....	50
<i>Rein Perens</i> Veesooned Eesti paeses aluspõhjas.....	55
<i>Ülo Sõstra</i> Kivimite mõju elusloodusele ehk kuidas geoloogia, geokeemia, keemia ja bioloogia põimuvad meid ümbritsevas looduskeskkonnas.....	59
<i>Marge Kõnsa, Atko Heinsalu ja Jüri Vassiljev</i> Arheoloogilise objekti geoloogilisi aspekte: muinaslaev Salme muinasrannal.....	68
<i>Helle Perens</i> Kõnekad paeseinad ehituses.....	74
<i>Krista Täht-Kok</i> Kuidas valiti Eesti esinduslikumad 25 geotoopi.....	78
<i>Madis Rubel</i> Stratigraafia ülesanne ehk kuidas teha stratigraafiat.....	84

<i>Rein Einasto</i>	
Lünkadest ja pidevusest kivimkehade piiridel.....	89
<i>Oive Tinn</i>	
Ühest unustusehõlma vajanud evolutsiooniteooriast ning sellest, kuidas Eestist tõendusmaterjali otsiti.....	97
<i>Veiko Karu</i>	
Varinguoht Kukruse–Jõhvi maanteelõigul.....	104
<i>Veiko Karu</i>	
Altkaevandatud alale ehitamisel tuleb arvestada võimalike stabiilsusprobleemidega.....	109
<i>Martin Liira</i>	
Hüdratiseeritud põlevkivituhasette fosfori sidumisvõime aktiivse filtratsiooni tingimustes.....	114
<i>Vivika Väizene</i>	
Piiritu graniidimassiiv sügavustes.....	120
<i>Ivar Puura</i>	
Järelsõna. Piirideta geoloogia ajas ja ruumis.....	125
VÄRVILINE LISA	
Artiklite joonised	
K. Robam <i>Veekõrvalduse</i>	129
Ü. Sõstra <i>Kivimite</i>	138
M. Konsa jt. <i>Arheoloogilise</i>	140
K. Täht-Kok <i>Kuidas</i>	141
V. Karu <i>Varinguoht</i>	147
V. Karu <i>Altkaevandatud</i>	148
V. Väizene <i>Piiritu</i>	149
Fotomeenutused neljandast geoloogia sügiskoolist	152

AJAKAVA

"Piirideta geoloogia"

V geoloogia sügiskool

Viljandimaa Tuhalaane küla, Kopra talu

Reede, 16. oktoober

- 15:00 buss Tallinnast
- 16:00 buss Tartust
- 18:00 Tervituskohv
- 18:30 Avamine, slideshow eelnevatest sügiskoolidest, tutvustamine
- 18:45 Sissejuhatus; Geoloogia enne ja pärast Charles Darwinit – Ivar Puura (TÜ)
- 19:15 Kalafossiilidest – Elga Mark-Kurik (TTÜ)
- 20:15 Õhtusöök
- 21:00 Kes me oleme? Kust me tuleme? Kuhu me läheme? – Jaan Kaplinski (LUS)
- 21:45 Hüva leili! – Ulla Preeden (TÜ)

Laupäev, 17. oktoober

- 07:00 Varahommikune jalutuskäik
- 08:00 Hommikusöök
- Materjaliteadusest meditsiinini***
- 09:00 Grafeen - vaid ühe aatomkihi paksune tulevikumaterjal – Harry Alles (TÜ)
- 09:45 Biomineraalid me ümber ja me sees – Liisa Lang, Ivar Puura (TÜ)
- 10:15 Geoloogiliste materjalide lahustuvus jälgelementide mõõtmisel – Evelin Verš, Getter Leppik (TTÜ)
- 10:45 Meditsiiniline geoloogia – Marge Uppin (TÜ)
- 11:00 Kohvipaus
- 11:30 Eesti turba kasutamise võimalused balneoloogias – Mall Orru (TTÜ)
- 12:00 Veekõrvaldus komplekssetes maardlates – Karin Robam (TTÜ)
- 12:30 Seismilisus Eesti vaatepunktist – Heidi Soosalu (TTÜ)
- 13:00 Veesooned Eesti paases aluspõhjas – Rein Perens (EGK)
- 13:30 Lõuna
- Uurimismeetodid ja keskkonnageoloogia***
- 15:30 Geoloogilise tagapõhja mõju elusloodusele – Ülo Sõstra (TTÜ)
- 16:00 Nuclear Power and Geologic Disposal of High-level Radioactive Waste – Alan Tkaczyk (TÜ)
- 16:30 raamatu Rein Einasto "Nähtust ja tehtust" eeesitlus – Rein Einasto
- 17:00 Kohvipaus

Geoloogia, teadus ja kultuur

- 17:30 Geoloogia ja arheoloogia koostööst Salme muinasaegse laevaleiu tõlgendamisel – Marge Konsa (TÜ)
18:00 Kõnekad paeseinad – Helle Perens (EGK)
18:30 Kuidas valiti Eesti esinduslikumad 25 geotoopi – Krista Täht-Kok (EGK)
19:00 Vaba aeg
20:00 Õhtusöök
21:00 Üllatus

Pühapäev, 18. oktoober

- 09:00 Hommikusöök

Kivid ja kihid

- 10:00 Stratigraafia ülesanne – Madis Rubel (TÜ)
10:30 Lünkadest ja pidevusest läbilõigetes – Rein Einasto (TTK)
11:00 Ühest unustusehõlma vajunud evolutsiooniteooriast ning sellest, kuidas Eestist tõendusmaterjali otsiti – Oive Tinn (TÜ)
11:30 GPlates - mandrid liiguvad – Ulla Preeden (TÜ)
12:00 Kojusõit

Kasutatud lühendid:

TÜ – Tartu Ülikool

TTÜ – Tallinna Tehnikaülikool

EGK – Eesti Geoloogiakeskus

LUS – Eesti Looduseuurijate Selts

TTK – Tallinna Tehnikakõrgkool

GEOLOGIA SÜGISKOOLID

SCHOLAE GEOLOGICAE

- I 2005 Kiidi – Teadus geoloogias
- II 2006 Reiu – Vasaraga tähtede poole
- III 2007 Pikajärve – Mudelid ja modelleerimine
- IV 2008 Mäetaguse – Suured teooriad
- V 2009 Tuhalaane – Piirideta geoloogia**

Katastroofiline intellekt

Jaan Kaplinski

Astrobioloogia tunneb nn. Fermi paradoksi – kord seltskonnas, kui räägiti elu võimalikkusest teistel taevakehadel, olla Fermi hüüatanud: "Aga kus nad siis on?" Tõepoolest, meie Päikesesüsteem on suhteliselt noor ja on temast tunduvalt vanemaid süsteeme, kus on kahtlemata küllalt planeete, millel võiks eksisteerida elu. Ning osal sellest elust võiks olla mõistus, mille abil võime oma tegevust planeerida ja teiste omasugustega suhelda.

Läänemaailmas valitseb omamoodi intellekti kultus, mis on jõudnud isegi kristlikku teoloogiasse. Inimese kõige "ülevamaks" omaduseks peetakse tema mõistust (*ratio*'t) mis tegevat inimese eriliseks, Jumala taoliseks. Ka Jumalat nähakse enamasti mõistusega olendina, kuigi tema mõistus võib olla meie omast määratult suurem. Niisiis, mida enam mõistust, seda enam jumalikkust. Pole juhus, et tänapäeva kreatsioonistid räägivad tihti "arukast disainist" (*intelligent design, ID*), vastandades seda looduses ilmnevat arukust evolutsioonijõudude stohhastilisele toimimisele, mis ID pooldajate meelest kuidagiviisi poleks saanud tekitada elu kõiges tema mitmekesisuses ja keerukuses. Iroonilise kõrvalepõikena võib öelda, et selle jumaliku intellekti suurte saavuste hulka tuleks lugeda kindlasti endoparasiitide keerukad kohanemisviisid ja eriti nende mitmeastmeline areng ja kulgemine ühelt peremeesloomalt teisele. Paelussi ei ole aga Jumala loomistöö imede hulka enamasti arvatud...

Huvitav on, et intellekti peetakse nii kreatsioonistide hulgas kui mujalgi millekski absoluutseks, iseendas ja iseenda jaoks eksisteerivaks. Ometi on intellekt midagi, mille ökoloogilist ja evolutsioonilist tausta ei ole raske näha ja seletada. Intellekt on elusolendi võime modelleerida oma käitumist. Selleks peab ta hindama olukorda, tegema "*cost-benefit*" analüüsi ja leidma võimalike tegevusvariantide hulgas optimaalse. Nii aitab intellekt elul end kõige paremini säilitada. Organismide asemel, kes käituvad valesti ja hukkuvad (või ei saa järglasi), praagitakse välja valed kujutlused, tegevusmudelid. Intellekt (mida ei tohi lahutada emotsioonidest, nagu rõhutavad tänapäeval psühhofüsioloogid) on omamoodi evolutsiooni ülekandmine "odavamasse" ainesse, närviimpulssidesse, biovooludesse, inimese puhul juba ka paberile, tahvlile, nüüd siis kompuutrisse.

Niisugune evolutsiooni odavnemine on teinud võimalikuks arengu, mida näeme praegu oma planeedil ja mis on viinud lõpuks olendite tekkimiseni, kes suudavad muuta oma keskkonda. Inimese kohta võib öelda, et intellekt lubab tal paremini, täielikumalt rahuldada oma vajadusi, soove, tahtmisi. Või ellu viia oma unistusi. Maailm, milles elavad inimesed "arenenud" maades, on üsna lähedane maailmale, mida kohtame muinas-

juttudes. Meie kasutada on lendavad vaibad, seitsmepenkoorma saapad, lauake-kata-end, nuiad, mis võivad tappa korraga terve vaenuväe ja palju muud. Oleme muutnud muinasjutud tegelikkuseks. Ent peab küsima, kas inimene ja meie planeedi ökosüsteemid on kohanenud sellise muinasjutulise tegelikkusega. Vastus on EI. Muule elule on inimene saanud suureks ohuks, inimene on hävitanud juba hulga liike ja ökosüsteeme ning ohustab juba tõsiselt terve biosfääri tasakaalu. Praegu me ei märka biosfääris toimuvaid muutusi, tema vaesustumist, elu võrgustikku lisanduvaid katkestusi ja lünki. Kuid toetudes perkolatsiooniteooriale, võime olla päris kindlad, et selline areng viib varem või hiljem järskude, katastroofiliste muutusteni biosfääris. Ning teisalt: ka inimene pole kohanenud eluga praeguses muinasjutumaailmas. Inimene pole kohanenud rikkuse ja küllusega. Inimene on kohanenud vaesuse ja kasinusega, keskkonnagaolukorraga, kus ta peab tõsiselt pingutama nii oma muskleid kui intellekti, võitlema ja tegema koostööd teiste omasugustega, olema valvel ja valmis tõrjuma ohtusid. Inimene ei ole ka kohanenud praegu tema kaela kallatavate informatsioonivoogudega, ta ei suuda neis orienteeruda.

Kui *Homo sapiens* oma käitumist oluliselt ei muuda, ootab meid ja planeeti tõesti katastroof. Inimkond on nagu piduriteta auto, mis sööstab kiirendusega edasi. Kas on võimalik leida, konstrueerida tsivilisatsioonile pidurid? Ajalooliselt on seda mõnevõrra olnud religioonid oma tabusüsteemidega. Religiooni pidurid ei ole aga töötanud piisavalt hästi. Teoreetiliselt võiks piduriks olla ka seesama intellekt. On ju roheline liikumine (ka püüd minna tagasi lihtsama, vähenõudlikuma elu juurde) maailmas saavutanud teatavat tuntust ja tunnustust. Ent esialgu ei ole märgata tsivilisatsiooniauto pidurdumist ja kui majanduskriis puhuti selleni viib, püüavad valitsused teha kõik, et inimesed taas rohkem tarbiksid, kulutaksid, et tööstus jälle rohkem toodaks. Aktsioon on, et vajame aina rohkem energiat, toitu, maanteid jne. jne. Nii on tõenäoline, et katastroofist pääsu ei ole. See on programmeeritud meisse, ent juba intelligentsesse elusse üldse. Olendid, kes suudavad olelusvõitluses liiga hästi toime tulla, oma keskkonda liiga hästi endaga kohandada, viivad tõenäolikkult oma biosfääri kollapsini. Me ei tea, kas ja kui sageli seda on juhtunud meie galaktikas, kuid sellise arengu tõenäosus võib olla vastus Fermi paradoksile. Neid ei ole, sest nad on end hävitanud. Või viinud tagasi väga kasina elulaadi juurde, mis välistab kosmosereisid ja kontaktid teistega. Viimane võimalus on minu arvates vähe tõenäoline. Tõenäolisem on paraku esimene.

Jaan Kaplinski (jaan.kaplinski@gmail.com) – Eesti Looduseuurijate Selts, Struve 2, 51003 Tartu.

Biomineraalid me ümber ja me sees

Liisa Lang ja Ivar Puura

*„There was a lag before acceptance,
usually from ten to fifteen years.
And by the time they were all running down that avenue,
I was doing something else.“*

Heinz. A. Lowenstam
biomineralisatsiooni uurimise algataja

Esimesed objektid, mida teadustöös kivistiseks peeti, olid teadaolevalt haihambad, mida arstiõpingute järel kodusest Taanist Itaaliasse rännanud ning Toscana piirkonna geoloogiast huvitunud Nicolaus Steno (1669) oma Firenzes kaitstud dissertatsioonis kirjeldas. Varem olid samad objektid tuntud keelekivide (*glossopetrae*) nime all ning neid peeti müütiliste lohemadude keelte tükkideks. Nii nagu juba Steno meditsiinialased teadmised talle kivististe päritolu selgitamisel kasuks olid, on ka tänapäeval elusorganismide skelettides esinevad mineraalid uurimisobjektid meditsiini ja geoloogia, samuti ka mitmete bioloogia harude, keemia ja materjaliteaduse huviorbiidis. Elusorganismide poolt tekitatud mineraale, mida kutsutakse biomineraalideks, on tänapäeval teada 60 ringis.

Biominalisatsioon rambivalguses

Asjaolu, et inimeste ja selgroogsete loomade luud koosnevad kaltsiumfosfaadist ning limuste kujud kaltsiidist ja pärlmutrist, on teada juba sajandeid. Samuti ei ole uudis, et kondid, selgroogsete fragmendid ning ka fosfaatsed kujud käsijalgseid pakuvad huvi kui bioklastilised fosforiidid, mida kaevandatakse väetiste tootmiseks. Kriidi ladestu lubivetikatest (kokkolitoforiididest) on moodustunud koolikriit, mis oli kasutusel vanaisade aegadel ning pole veel päris kadunud praegugi. Kõiki neid nähtusi on läbi aegade võetud üsna loomulikuna, kuid klassikalises õpetuses on kivid jäänud kivideks, mis tekivad magmalisel või settelisel teel ning „elus asjade“ puhul õpitakse peensuseni biokeemiat ja pehmete kudede moodustumist. Mis saab aga siis kui settekeskkond asub organismi sees? Või kui pehme kude ei ole enam nii pehme?

Biominalisatsiooni kui uurimissuuna avalöögiks võib pidada Heinz A. Lowenstami (1981) artiklit ajakirjas „*Science*“, kus pööratakse tähelepanu tol ajal teada olnud 40 mineraalile, mida elusorganismid on võimelised moodustama. Kuid juba peaaegu 20 aastat varem oli Lowenstam (1962a, b) kirjeldanud magnetiiti soomuslimuste (*Polyplacophora*) hulka

kuuluva mardiklimuse (*Chiton*) hammastes ning götiiti meretigude hammastes. Mõttele nende limuste hambaid uurida tuli autor siis, kui ta välitööl nägi, et kividel, kuhu *Chiton* kinnitub, märgivad tema liikumisteed sageli kõvasse lubjakivisse uuristatud sügavad vaod. Nende urete tekitamiseks vajab loom midagi tugevat – nagu selgus, magnetiidikihiga kaetud hambaid.

Praegu peetakse neid avastusi teedrajavateks, kuid alguses ei olnud maailm veel valmis uskuma, et mõnedel limustel võivad olla sõna otseses mõttes raudhambad. Skepsis hakkas leevenema alles 13 aastat hiljem, mil ilmus Woods Hole'i laboris töötanud järel doktor Richard Blakemoori (1975) artikkel magnetotaktilistest bakteritest. Blakemoor oli märganud, et kui Petri tassi lähedale asetati magnet, hakkasid bakterid selle suunas ujuma ning kui magnet ümber pöörati, ujusid nad vastassuunas. Blakemoori ülemused kutsusid Heinz Lowenstami uurima, kas saadud tulemused on korrektsed. Lowenstam soovitas neil baktereid analüüsida röntgen-difraktsioonanalüüsiga. Tulemusena leidis kinnitust, et bakterid sisaldasid magnetiiti. Tänapäevaste seisukohtade järgi on kuni 2 miljardi aasta vanused magnetotaktilised bakterid vanimad organismid, kes suudavad enda sees biomineraale moodustada, kasutades selleks spetsiaalset elundit – magnetosoomi (Bengtsson ja Conway-Morris 1992).

Biomineraalid organismide kudedes

Biomineraale moodustavad peaaegu kõigi elustikurühmade esindajad – bakterid, protistid, vetikad, taimed, paljud selgrootud ja kõik selgroogsed loomad, nende hulgas ka inimene.

Biomineraalid kuuluvad nt. luude, hammaste, kuulmekivide, muna-koorte, molluskite ja käsijalgsete kodade, koorikloomade välisskeleti, käsnade siseskeleti, radiolaaride ja diatomeede skeleti jne koostisesse. Eriti väärtuslikuks teeb biomineraalid aga asjaolu, et tegemist on geoloogilisele ajaloole hästi vastu pidavate materjalidega – biomineraliseerunud objektid on leitavad kivististena juba Eel-Kambriumi (Ediacara) vanusega kivimitest. Nii koosneb suur osa Eesti settekivimitest ning aluspõhja maavara-dest loomade skeletifragmentidest, mis on algselt tekkinud biomineralisatsiooni teel. Eesti ning kogu Baltoskandia Ordoviitsiumi, Siluri ja Devoni karbonaatkivimid on moodustunud valdavalt mereloomade kaltsiitsetest välisskelettidest ning Eesti karbifosforiit käsijalgsete apatiitsetest kodadest. Ajas tagasi vaadates võib öelda, et nii elu kui ka elukeskkond on märkimisväärselt muutunud sellest ajast alates, kui organismid hakkasid skelette moodustama.

Tänapäeval on teada üle 60 erineva biomineraali, millest olulisemad on neli rühma:

1. **Kaltsiumkarbonaadid** biomineraalid on kõige levinumad biomineraalid. Kaltsiumkarbonaadist, enamasti kaltsiidist või aragoniidist koosnevad paljude selgrootute (teod, karbid, käsijalgsed, peajalgsed) välisskeletid, trilobiitide silmad, oksasnahksete plaadid ja okkad, lindude munad ning korallide skeletid. Limuste kodades esinevad kaltsiit ja aragoniit sageli koos; ka pärilmutterkiht koosneb aragoniidist. Kaltsiidist on ka inimese kuulmekivikesed (*otoconia*) ja kala kuulmekivi ehk otoliit, mis on tasakaaluelundi osaks, taimelehtedes esineb aga kaltsiumkarbonaat amorfsetel kujul kui kaltsiumi reservuaar (Mann 2001). Ka varaseim teadaolev torukojuline skelett Ediacara ladestust, mis kuulub loomale nimega *Cloudina*, oli tõenäoliselt kaltsiumkarbonaadist (Bengtson ja Conway-Morris 1992).

2. **Kaltsiumfosfaadid** biomineraalid on eelkõige tuntud kui selgroogsete luude ja hammaste moodustajad. Luudes ja hammastes esinevad erinevad apatiidi erimid. Lisaks esineb apatiidi erimeid veel lingulaatsete käsijalgsete kodades, kalade soomustes ning polüplakofooride ja tigude hammastes.

3. **Räni** biomineraalid. Elusolenditest moodustavad räni ränikäsnaad ning ränivetikad ehk diatomeed ja radiolaarid. Amorfse räni esinemine on teada ka taimedes, nt. nõgestes, kes kasutavad räninõelakesi kaitseesmärkidel (Mann 2001).

4. **Raua** biomineraalid. Lisaks eespoolmainitud magnetotaktilistele bakteritele on magnetosoomide-sarnaseid elundeid leitud ka kaladel (nt. lõheliste hulka kuuluv nerka, *Oncorhynchus nerka*). Samuti on teada magnetiidi esinemine nii lindude kui mere- ja maismaaimetajate, sealhulgas inimese ajus (Pósfail ja Dunin-Borowski 2009). Mitmel puhul on peetud magnetiiti abivahendiks orienteerumisel. Teine rakendus rauamineraalidele hulkraksetel loomadel tundub olevat hammaste tugevdamine, mitte ainult limustel, vaid ka mitmetel imetajatel, nt. kopralt, nutrialt ja karihiirel.

Bioapatiidi maailm

Valime siin teejuhiks biomineraalide juurde bioapatiidi – paljude erimitega biomineraali – mida me kõige kauem oleme tundma õppinud, kuid mis pidevalt meid uute probleemidega üllatab.

Biomineraalid võivad tekkida väga erinevates keskkonnatingimustes, kuid võrreldes nende anorgaaniliste analoogidega, on biomineraalide tekketingimused üldiselt väga leebed, kuna nad on tihedalt seotud orgaanilise ainega. Inimluudes on apatiidikristallid nii tihedalt kollageenikiududega seotud, et neid on peaaegu võimatu üksteisest eraldada

(Pasteris jt. 2008). Seetõttu vaadeldakse materjaliteaduses biomineraale orgaanilisest ja mineraalsest ainesest koosneva komposiitmaterjalina. Termin "biomineraal", nt. bioapatiit, viitab komposiidist ainult anorgaanilisele komponendile. Sellised orgaanilisest ja anorgaanilisest osast koosnevad materjalid ühendavad endas mineraalide tugevuse ning orgaanilise aine sitkuse, mis teeb neist kokkuvõttes palju vastupidavamama materjali kui lihtsalt mineraal või orgaaniline aine.

Lisaks mineraalide omaduste parendamisele orgaanilise maatriksi lisamise näol, on biomineraalidel organismides oma kindel rakendus, vahest isegi mitu. Kui vaadata inimskeletti (luid), siis need on osa meie tugi-elundkonnast – ilma luudeta me ei seisaks ega liiguks. Lisaks on luudel veel teinegi funktsioon – nad on kaltsiumi ja fosfori jt. elutähtsate elementide säilituskohaks, kust vajadusel on vastavaid elemente võimalik kätte saada ja kasutada muude funktsioonide täitmisel. Kui väikelinnud kipuvad kaltsiumipuudusel munema nahkmune, siis näiteks hanelistel lähevad käiku tugevas luustikus peituvad kaltsiumivarud, mis tagavad korralikud koorega munad igal ajal. Ka inimloote kasvamisel mobiliseerib ema organism kõik vajalikud kaltsiumivarud loote tarvis ning kui neid mujalt võtta ei ole, võivad last kandva ema hambad muutuda hapramaks või laguneda. Kuna apatiidi struktuur on piisavalt paindlik, et olla sobiv peaaegu poolele perioodilisuse tabeli elementidest, siis on luud ka organismile toksiliste ainete (elementide) nn. vangistuskohaks (Pasteris jt. 2008).

Välisskelettidel, nagu seda on limuste ja brahhiopoodide kofjad, arvatakse olevat eelkõige kaitsefunktsioon. Sellised skeletid kaitsevad looma pehmet keha kiskjate, parasiitide, aga ka nt. veekaotuse eest. Samas on need kofjad ka rakkudest väljutatud üleliigse kaltsiumi ladestamise koht – eelkõige sellega seletub, miks ühe ja sama liigi limuste kofjad kasvavad kõige paksemaks kõige suurema soolsusega veekogudes. Peale toese ja kaitsefunktsiooni on erinevatel biomineraalidel veel muidki funktsioone, kuna biomineraalide esinemine organismis ei tähenda automaatselt, et nad esinevad skeleti koostises.

Apatiidis talletunud mikro- ja nanostruktuurid

Biomineralisatsiooni uuringuid kui iseseisvat teadussuunda mitmete klassikaliste teadusvaldkondade piiril hakati tunnustama järk-järgult; selle suuna arengule on kaasa aidanud instrumentaalsete meetodite areng, sealhulgas elektronmikroskoopide uued põlvkonnad. Keeruliseks teeb biomineraalide uurimise nende seotus orgaanilise ainega. Kuid kui näiteks Eesti Devonist pärit apatiitse kojaga käsijalgse kivistis madalarõhulise elektronmikroskoobi alla panna, avaneb huvitav vaatepilt – käsijalgse koja sisestruktuur koosneb orienteeritud apatiidikristallidest ning nende vahel

olevatest tühikutest, mida kunagi tõenäoliselt on täitnud praeguseks lagununud orgaaniline aine. Enamikel Paleosoikumi käsijalgsetest on sarnane skeleti sisestruktuur (nn. bakulaarne struktuur), kuid on ka teistsuguse (kolumnaarse) struktuuriga käsijalgseid ja tänapäevase *Lingula* skelett on hoopiski nn. botrüoidaalse struktuuriga, mille iseloomulikeks elementideks ei ole mitte apatiidist nõelakesed, nagu kahel eelneval struktuuril, vaid hoopis apatiidist pallikesed. Niimoodi, käsijalgsete koja sisestruktuuri tüüpe kaardistades saavad paleontoloogid käsijalgsete fülogeneesipuude koostamisel arvesse võtta ka seda faktorit.

Soodsatel tingimustel võib sadu miljoneid aastaid vanades kivististes vaadelda äärmiselt peeneid nanoskaalas struktuurielemente, sarnaseid struktuurielementidele, mida ka retsentsete käsijalgsete kodadest leida võib (Schmahl jt. 2008). Peenete struktuuride ja nanoskaalas kristallide esinemine on üks bioloogiliste skelettide suure vastupidavuse põhjustest. Nii luud kui käsijalgsete kujud on tegelikult hierarhilise ehitusega: et suured struktuurielemendid koosnevad väiksematest elementidest, mis omakorda koosnevad veel väiksematest elementidest jne., kuni nanoskaalani välja. Näiteks selgroogsete luud koosnevad põhiliselt apatiidist (kui mineraalsest osast) ning kollageenist (kui orgaanilisest osast). Kollageeni peeneim ehitustase on kolmikheeliks läbimõõduga umbes 1,5 nanomeetrit. Kollageenimolekulid koos mineraalse osaga moodustavad fibrille, mis omakorda moodustavad liitudes ning erinevates suundades pöördumise teel nn. helikoide. Sarnane ehitus on ka näiteks lüljalgsete ja limuste väliskelettidel. Lüljalgsete puhul ühinevad peened kitiinifibrillid jämedamateks fiibrteks, mis omakorda on kaetud valkudega. Edasi ühinevad kitiinifibrillid kitiinseteks kihtideks, millesse on seotud ka kaltsiidikristalle, edasi ühinevad juba üksteise suhtes nurga all olevad kihid jämedamateks kihtideks, mis omakorda moodustavad koorikloomade välisskeleti struktuure (Meyers jt. 2008).

Skeletibiomineraalide väike suurus on väga oluline parameeter. Pasteris kaasautoritega (2008) kirjeldab täiskasvanud lehma luudes olevat apatiiti: kristalliidid on keskmise laiusega 64 nm ja keskmise pikkusega 90 nm; 98% kristalliitidest on vähem kui 2 nm paksud, s.t. ainult ligikaudu kaks apatiidi ühikrakku. Tänu luu mineraali väga väikesele kristalliidi suurusele, on suur osa aatomitest kas otseselt pinnal või seotud aatomiga, mis asetseb kristalliidi pinnal. See aga tähendab väga tugevat haakumist lähedalasuva orgaanilise ainesega (Pasterisjt. 2008).

Nagu juba eelpool mainitud, saab biomineraalide uurimiseks kasutada nt. madalarõhulist elektronmikroskoopi (ESEM), mis on tõenäoliselt hetkel üks parimaid kivististes leiduvate biomineraalide uurimise meetodeid. Elusorganismides olevate biomineraalide uurimine on keerulisem tänu orgaanilise ainese olemasolule. Uurimiseks kasutatakse nt. transmissioon-

elektronmikroskoopi (TEM) ja AFM-i (*atomic force microscope*), kuid nende proovide ettevalmistamine tekitab küsimusi kristalliitide puutumatu säilumise üle (Pasteris jt. 2008).

Järgmine küsimusi tekitav aspekt biomineraalide uurimisel on nende, eriti bioapatiidi, väga varieeruv koostis. Inimluudes esineva bioapatiidi keemiliseks valemiks on pakutud nt. sellist varianti: $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{K}, \text{Sr}, \text{Pb}, \dots)_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3, \text{SO}_4, \dots)_6(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl}, \text{CO}_3)_2$, mis näitab, et väga erinevad keemilised elemendid ja ühendid võivad apatiidis üksteist asendada, sõltuvalt apatiidi settekeskkonnas saadaval olevatest elementidest (Pasteris jt. 2008). Seega ei erine apatiidi keemiline koostis mitte ainult erinevate loomarühmade apatiitides, vaid kui võtta näiteks jällegi inimene, siis isegi sama inimese erinevates skeletiosades on apatiit erinev ning lisaks sellele, muutub inimluudes apatiidi koostis pidevalt. Luudes toimub pidev apatiidi üleslahustumine ja uuesti setitamine ning on kindlaks tehtud, et meie skelett vahetub täielikult iga 5–10 aasta järel, seega sõltub apatiidi koostis ka inimese vanusest, toidust, tervisest, kehalisest aktiivsusest jne. (Pasteris jt. 2008). Samuti on erineva funktsiooniga apatiidi kristallid erinevad (luudes palju pisemad kristallid kui hamba emailis).

Biomineralisatsiooni uurimise perspektiivid

Biomineraalide uurimisel on omaette tähtsus – kuid seda mitte asjana iseeneses, vaid nagu piirteadusele kohane, väljunditega väga paljudesse valdkondadesse. Nagu juba mainitud, on biomineraalid oluliseks inspiratsiooniallikaks materjaliteadlastele, kes püüavad välja töötada bioloogilistele materjalidele võrdväärseid sünteetilisi variante. Samal ajal üritavad bioloogid välja selgitada kuidas organismid funktsioneerivad ning uurivad seega biomineralisatsiooni molekulaarseid ja füsioloogilisi aluseid. Paleontoloogide jaoks on aga nii biomineraalid koos skelettide fossiliseerimisel toimunud muutuste ja diagenesis lisandunud mineraalidega geo-keemilised arhiivid, mille abil püütakse rekonstrueerida sadu miljoneid aastaid tagasi valitsenud keskkonnaparametreid või kliimatingimusi (Skinner 2005). Evolutsioonilisest aspektist üritatakse biomineraale ära kasutada organismide fülogeneesi ja taksonoomia selgitamiseks. Biomineraalid pakuvad suurt huvi ka astrobioloogias, hindamaks elu esinemise võimalusi teistel taevakehadel.

Tänuavaldus

Käesolev artikkel populariseerib uuringuid, mille läbiviimisel on Liisa Langi toetanud ETF grant 6460, Kristjan Jaagu Fond ning Sir Alwyn

Williamsi Fond (Suurbritannia), Ivar Puurat TÜ Loodusmuuseum ning mõlemat autorit sihtteema SF0180051s08.

Kasutatud kirjandus

- Bengtsson S. ja Conway-Morris S. 1992. Early radiation of biomineralizing phyla. Rmt: *Origin and Early Evolution of the Metazoa*. Lipps, J.H. & Signor, P.W. (Toim.). Plenum Press, New York, 447–481.
- Blakemoor R.P. 1975. Magnetotactic bacteria. *Science* 190: 377–379.
- Lowenstam H.A. 1962a. Magnetite in denticle capping in Recent Chitons (Polyplacophora). *Geol. Soc. Amer. Bull.* 73(4): 435.
- Lowenstam H.A. 1962b. Goethite in radular teeth of Recent marine gastropods. *Science* 137 (3526): 279.
- Lowenstam H.A. 1981. Minerals formed by organisms. *Science* 211: 1126–1131.
- Mann S. 2001. *Biomineralization Principles and Concepts in Bioinorganic Materials Chemistry*. Oxford University Press, 198 lk.
- Meyers M.A., Chen P.-Y., Lin A.Y.-M. Seki, Y. 2008. Biological materials: structure and mechanical properties. *Progress in Material Science* 53: 1–206.
- Pasteris J.D., Wopenka B., Valsami-Jones E. 2008. Bone and tooth mineralization: why apatite? *Elements* 4: 97–104.
- Pósfail M. ja Dunin-Borowski R.E. 2009. Magnetic nanocrystals in organisms. *Elements* 5: 235–240.
- Schmahl W.W., Griesshaber E., Merkel C., Kelm K., Deuschle J., Neuser R.D., Göetz A.J., Sehrbrock A., Mader W. 2008. Hierarchical fibre composite structure and micromechanical properties of phosphatic and calcitic brachiopod shell biomaterials – an overview. *Mineralogical Magazine* 72(2): 541–562.
- Skinner H.C.W. 2005. Biominerals. *Mineralogical Magazine* 69(5): 621–641.
- Stenonius N. 1669. *De solido intra solidum naturaliteter contento*. Dissertationis prodromus. Ad serenissimum Ferdinandum II Magnum Etruriae Ducem. Florentiae. Ex Typographia fub figno Stellae MDCLXIX superiorum permissu.

Liisa Lang (Liisa.Lang@gmail.com) – Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu.

Ivar Puura (Ivar.Puura@gmail.com) – Tartu Ülikooli Loodusmuuseum, Vanemuise 46, 51014 Tartu.

Geoloogiliste silikaatsete materjalide lahustuvusest mikro- ja jälgelementide mõõtmisel – lahustamine mikrolaineahju meetodil

Evelin Verš ja Getter Leppik

Sissejuhatus

Juba sajandeid on keemikud otsinud anorgaaniliste ja orgaaniliste materjalide erinevaid lahustamise võimalusi – seda ühte meetodit, mis oleks võimalikult täpne ja automaatne ning ennekõike analüütikust sõltumatu. Proovide ettevalmistamine on analüütilise keemia üks aeganõudvamaid, veatundlikumaid ning keerulisemaid samme kogu materjali analüüsi protsessis. Üks uuemaid märgkeemia valdkonda kuuluvaid ettevalmistustehnikaid kasutab uuritava materjali proovide kuumutamiseks mikrolaineid.

Proovide eeltöötlemisel materjali lahustamist kasutatakse geoloogias nt. kogukivimi mikroelemendilise koostise määramisel induktiivplasma massispektrometriga (ICP-MS). Eesmärgiks on uuritava materjali kõik elemendid viia lahusesse, et tulemusena saada selge, homogeenne lahus. Lisaks kivimitele kasutatakse sellist proovide töötlemist ka muude geoloogiliste ning bioloogiliste, botaaniliste ja metallurgiliste uurimismaterjalide korral. Üks põhjus, miks selline proovide ettevalmistamine üha populaarsemaks on muutumas, on proovide analüüsimise koguprotsessi lihtsamaks ja täpsemaks muutumine.

Ükski meetodika ei ole aga ilma puudusteta – niisamuti ka mikrolaineahju suletud keskkonnas toimuv lahustumisprotsess, mis sõltub tugevasti temperatuuri ja rõhu vahekorra, lahustuva materjali koostisosade keemiliste sidemete tugevusest ning reaktsiooni agressiivsusest. See on tundlik protsess, mida otseselt mõjutavad lahustamiseks valitud happed ja nende kogused. Aga kuidas leida parim hapete kogum ning nende omavaheline suhe, mis töötaks nii silikaatsete magma- kui moondekivimite puhul, olgu uuritavaks materjaliks aluseline basalt või gabro, happeline graniit või keskmise koostisega andesiit? See on küsimus, millele alljärgnevas loos püüame vastust leida. Võtmeküsimuseks kujuneb (1) erineva tugevusega räniühendite alluvus lahustumisprotsessile ning (2) vesinik-fluoriidhappe mõju toimivatele reaktsioonidele. Erinevad fluoriidühendid on selles protsessis varmad tekkima ning välja sadestudes tõmbavad oma koostisesse erinevaid, ka uurimise all olevaid metalle.

Kuidas saada (mikrolaineahjuga lahustades) 100% lahuses olev proov? See oli meie peamiseks ajendiks tehtud katsete valikul, mille käigus kümme erinevat tüüpi silikaatset kivimit (rahvusvahelist tugimaterjali) lahustati varieeruvates happekogumite keskkonnas. Lahustumisprotsessi järgselt

tekinud sade filtreeriti ning selle makrokomponente uuriti skaneeriva elektronmikroskoobiga röntgenmikroanalüüsi meetodil. Sademe mikroelementide uurimine laserablatsiooniga ühendatud ICP-MS abil ja fluoriühendite röntgenstruktuuranalüüs jääb uurimisrühma edasiseks tööks.

Kivimi keemilise koostise määramisel huvituvad geoloogid nii tema makro- kui mikrokomponentide ja jälgelementide sisaldusest, sõltuvalt sellest, millist teaduslikku probleemi püütakse lahendada. Analüütilises keemias nimetatakse aines sisalduvat elementi jälgelementiks, kui tema kontsentratsioon jääb alla 100 ppm (*parts per million*, s.t. üks osa miljonist ehk üks miljondik; ehk 0,01%) (Bowen 1966). Geokeemias (just petroloogide seas) on seevastu **jälgelement** määratletud sisaldusega alla 1000 ppm ehk 0,1% ning **mikrokomponent** kontsentratsiooniga 1–0,1% (kaaluprotsent) kivimist. Kõiki teisi elemente, mille sisaldus kivimis ületab 1%, vaadeldakse kui selle kivimi **makrokomponente**. Viimast terminoloogiat (rakendatuna lahusest tekkiva sademe kirjeldamise maailmale) on kasutatud ka käesolevas uuringus.

Hapete kasutamine (geoloogiliste) materjalide lahustamisel

Materjali edukas lahustamisprotseduur sõltub reagentide valikust ning spetsiaalsest temperatuuri ja rõhu profiilist. Need kaks parameetrit määravad ära protsessi mehhanismi ja reaktsiooni kineetika. See on vajalik materjali täielikuks lahustamiseks, samuti ka proovi lahustuvuse ja lahuse stabiilsuse analüüsimiseks ning kogu protsessi ohutuse tagamiseks. Seega, lahustamisprotsessi kiirus ning efektiivsus on tagatud eelkõige õigete reagentide valikuga.

Kvantitatiivsete analüüside tegemisel eelistatakse enamiku uurimismeetodite puhul uuritava materjalina lahuseid. Lahuse kujul on kogukivimi mikroelementilise koostise määramine tunduvalt täpsem, mida näitab väiksem standardhälve ning see on suurema tundlikkusega meetodika, mis võimaldab mõõta väiksemaid koguseid kui nt. pulbristatud tableti kasutamine röntgenfluoresents- või laserablatsiooniga ühendatud ICP-MS meetodil. Masina valik sõltub uuritavatest elementidest, isotoopidest ja kontsentratsioonidest (% , ‰, ppm või ppb tase).

Mineraalsed happed mängivad lahustamisprotsessis olulist rolli, kuna vabastavad elementide ioonid molekulaartasandil homogeensesse lahusesse, mille koostist saab seejärel koheselt mõne massispektromeetria aparatuuriga mõõta. Kontsentreeritud happeid, mida kasutatakse proovide lahustamisel, tuntakse juba 14. sajandist, mil väävel- ja lämmastikhapet esmakordselt alkeemikute katsetes kirjalikult ära mainiti. Mineraalsete hapete avastamine on üks olulisemaid keemilisi edusamme pärast rauatootmist maagist, mis algas umbes 3000 aastat varem. Kõige enam

kasutatavad reagentid lahustumisprotsessis on lämmastikhape (HNO_3), vesinikkloriidhape (HCl), vesinikfluoriidhape (HF), väävelhape (H_2SO_4), perkloorhape (HClO_4) ja vesinikperoksiid (H_2O_2). Hapete valikul tuleb lähtuda konkreetsete reagentide omadustest: lenduvus, reaktiivsus, lahustuvus, stabiilsus, katalüütiline efekt jms. Peale selle tuleb hinnata hapete reaktiivsust uuritavate materjalide matriksi ehk põhimassi suhtes, sest iga matriks võib anda erineva reageeringu.

Lämmastikhape (HNO_3) on oksüdeeriv hape, mis lahustab enamuse metallidest. Samuti on see enimkasutatavaid happeid oksüdeerimaks orgaanilisi materjale. Lämmastikhappe reageerimisvõime kasvab koosmõjul teise happega, näiteks vesinikkloriid- ehk **soolhappega** (HCl). Viimasega saab kergesti lahustada karbonaate, peroksiide ning aluselisi hüdroksiide. Mõned metallid, nagu kuld (Au), kaadmium (Cd), raud (Fe) ja tina (Sn), on samuti soolhappes lahustuvad, kuid reaktsioonid toimuvad mõne teise happe juuresolekul märksa kiiremini. **Kuningvesi** (*aqua regia*) on soolhappe ja lämmastikhappe segu vahekorras 3:1. Kuningvesi on hea lahusti paljude maakide, sulamite ning väärismetallide lahustamisel.

Mitteoksideeriv on ka **vesinikfluoriidhape** (HF). Seda kasutatakse enamasti anorgaanilistes analüüsidest, kuna HF on üks vähestest hapetest, mis suudab lahustada silikaate. Tulemusena tekivad saadud lahuses SiF_6^{2-} ioonid. Kuna aset leidev reaktsioon on sageli väga tormiline, siis on vaja eelnevalt „niisutada“ silikaatset proovipulbrit mingi teise happega. Oma olemuselt on tegemist ühe ohtlikuma happega, ülimalt sööbiva ning mürgise vedelikuga, mis läbib rakke kiiremini kui teised happed. Vere ringesse sattudes võib HF põhjustada südameseiskumist, reageerides veres oleva kaltsiumiga. Mürgitusohtu vähendab kaitsevahendite (prillid, kindad, kaitseriietus, inhalaator) kasutamine (Potts 1992).

Käesolevas töös mitte kasutatud leidnud hapetest on veel oluline kontsentreeritud **väävelhape** (H_2SO_4), mis on võimeline oksüdeerima mitmeid aineid. Seda kasutatakse tihti koos teiste hapete või reagentidega (näiteks koos perkloorhappega või vesinikperoksiidiga). **Vesinikperoksiid** (H_2O_2) on juba iseseisvalt võimeline plahvatuslikult reageerima paljude orgaaniliste materjalidega, eriti kontsentreeritud vormis. Kasutades perkloorhapet ja vesinikperoksiidi pärast esmast lahustamist, on võimalik vältida potentsiaalset ägedat reaktsiooni.

Lahustamisprotsessi efektiivsus sõltub eelkõige valitud lahustamis-metoodikast: õige hapete vahekordade kasutamisest ning vastavalt uuritavale proovile lahustamiskeskkonna määramisest. Mikrolaineahjud, mis 1980-ndatel leidsid laboratooriumites laialdasemat kasutust, tagavad stabiilse ning ohutu reaktsioonikeskkonna.

Mikrolaineahi teaduse abivahendina

Materjalide lahustamist on võimalik viia läbi kas kõrge temperatuuri või kõrge rõhu (>1 atmosfäär ehk >1 bar) tingimustes. Kuna mõnede, eriti silikaatsete mineraalide lahustuvustemperatuur on päris kõrge, siis võimalus muuta protsessi käigus ka keskkonna rõhku (kõrgem rõhk reaktsiooninumas toob kaasa materjalide lahustumistemperatuuri alanemise), aitab lahendada rasketilahustuvaid mineraale sisaldavate kivimite kogukivimi lahustuvusega seotud probleeme. Üheks selliseks, nii rõhu kui temperatuuri muutmist võimaldavaks laboratoorseks aparatuuriks, on mikrolaineahi. Alternatiivina on tänapäeval kasutusel veel kõrgrõhupommide kasutamine, paakumis- või fusioonimetoodika (nt. Meisel jt. 2002) või tudengipõlvest tuttav kivimmaterjali „küpsetamine“ kuumutusplaadil. Viimasel juhul on tegemist avatud keskkonnaga, kus on protsessi käiku võimalik mõjutada vaid temperatuur muuttes (nt. Riley 1958).

Nüüd pisut lähemalt sellest, kuidas mikrolaineahi laboritesse jõudis. 1950-ndatel ilmusid USA-s tähelepanekud, et mikrolained võivad kuumutada vett väga kiiresti ning soojendada ja küpsetada toitu. Mikrolained käituvad kui kõrgsageduslikud elektriväljad ja võivad seetõttu kuumutada mistahes materjali, mis sisaldab liikuvat elektrilaengut – näiteks polaarsed molekulid lahustis või laetud ioonid tahkes aines. Kodumajapidamistes võeti mikrolaineahjud kasutusele laialdaselt 1970–80-ndatel. Nende mass-tootmine odava hinnaga muutis nad kättesaadavaks kõigile.

1980-ndatel aastatel leidsid mikrolaineahjud laiaulatuslikku kasutust ka laboratooriumites, mis oli tingitud mitmetest muutustest tolleaegses tehnoloogias. Esiteks hakati neis kasutama terasümbriseega teflonist balloone. Teiseks võeti kasutusele otsesed energiaülekanded (kasutades avatud reaktsioonianumaid), kuni varajastel 1980-ndatel töötati välja nn. hermeetiline happelahustamine terasest ümbristega suletud klaastuubides.

Lahustamisprotsesse kontsentreeritud hapetega viidi esialgu läbi kasutades kodumikrolaineahje, millel puudus nii temperatuuri kui võimsuse mõõtmise võimalus ja nende reguleerimine. Oluline muutus selles vallas toimus, kui kirjeldati energia kontrolli võimalusi. Temperatuuri kontroll saavutati, kui kogu protsess isoleeriti suletud, hermeetilistesse teflon anumatesse. 1987. aastaks oli mikrolainetehnoloogia sellisel tasemel, et kuulus saja parima arenenud tehnoloogia hulka nii uurimistöodes kui tööstustegevuses.

Mikrolaineefekti kasutamine võimaldab kontrollida lahustamiskeskonda ning reaktsiooni tingimusi, isoleerides proovid laborikeskkonnast. Selline meetod lubab koguda rohkem informatsiooni kogu reaktsiooni protsessi kohta ning kontrollida materjalide omadusi ja reaktsiooni selektiivsust.

Koos ICP-MS (induktiivplasma massispektromeetria) labori loomisega Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituuti 2008. aasta kevadel loodi samaaegselt ka ICP-MS proovide ettevalmistuse laboriosa. Uuritava proovi kogukivimi analüüsiks ICP-MS'ga on vajalik viia proov lahusesse, et saada koostiselt homogene proov. Selleks otstarbeks muretseti mikrolaineahi Microwave 3000 (Anton Paar) koos rootoriga 16HF100 (tabel 1). Viimane on mõeldud raskesti lahustuvate proovide (geoloogilised proovid, metallid, sulamid, klaas, kvarts, saastatud pinnas) töötlemiseks, kuna võimaldab kasutada mõnevõrra kõrgemat rõhku (max 70 bar) ja temperatuuri (max 240°C) võrreldes teiste analoogsete rootorigega. Juhul kui rõhk reaktsioonianumas tõuseb üle lubatud piiri, lülitub mikrolaineenergia välja ja ahi jahutatakse maha. Anumad ja kaelustihend on valmistatud tetrafluoroetüleenist (PTFE-TFM, modifitseeritud). Ümbrised, mis tagavad anumatele mehhaanilise stabiilsuse, on tehtud keraamikast. Ülerõhu tuvastamiseks on anumate korgi küljes spetsiaalne metalne plaat (*safety disc*).

Ka laboratoorses mikrolaineahjus on näha tuttavat aluse ringi liikumist. Rootori pöörlemine lahustumisprotsessi käigus võimaldab ühtlast kuumutamist kogu protsessi ajal. Reaktsiooni kulgu kontrollitakse temperatuuri mõõdiku (infrapuna ehk IR-sensori) kaudu, mis mõõdab anumate välis-temperatuuri jooksvalt iga reaktsioonianuma põhjas; ning sisemise rõhu/temperatuuri (p/T) sensori abil, mis on ühe reaktsioonianuma korgi küljes. Tabelis 1 toodud temperatuuri väärtused on maksimaalsed vastavale reaktsiooninõu tüübile. Vastavalt reaktsiooninõus tekkivale gaasirõhule võib temperatuuriväärtus mõnel juhul olla ka märgatavalt madalam.

Tabel 1. Mikrolaineahju proovianumate tehnilised andmed (Anton Paar 2006).

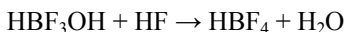
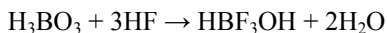
Anumate ja tihendi materjal	Tetrafluoroetüleen (modifitseeritud, PTFE-TFM)
Anumate ümbrised	Keraamilisest materjalist
Max. operatiivne rõhk	40 bar (580 psi)
Avamise rõhk	70 bar (1000 psi)
Max. anumate sisetemp.	240 °C
Max. välistemp. (anumate põhjas)	210 °C
Nominaalne maht	100 mL
Min. lahuse maht	6 mL
Max. lahuse maht	50 mL

MATERJAL JA MEETODID

Silikaatsete kivimite lahustumise katseks võeti 10 erinevat rahvusvahelist tugimaterjali (tabel 2), mis esindavad nii aluselisi, keskmisi kui happelisi kivimeid vulkaaniliste, süva- ja moondekivimite hulgast. Tootja poolt pulbristatud materjali võeti 250 mg. Proov kaaluti ja asetati mikro-laineahju proovianumasse. Anumasse lisati kontsentreeritud happed, kus iga katse käigus muudeti hapete koguseid ja/või nende lisamise aega (tabel 3). Kasutati TraceSELECT® (ultapuhtaid) happeid: 69–70% HNO₃, 34% HCl ja 50% HF (Fluka Analytical, Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Saksamaa). Kuningvesi valmistati ette vahetult enne hapete lisamist, vahekorras HCl:HNO₃ (3:1). Kuningvesi lasti enne proovile lisamist seista 10–15 minutit, et toimuks esmane reaktsioon, mille käigus moodustub piisavas koguses nitrosüülkloriidi (NOCl), lahustamaks väärismetalle ja mõningaid teisi raskesti lahustuvaid elemente:



Proovidele lisati boorhape (H₃BO₃), mis seostub lahusesse jäänud vaba HF-iga kahe eksotermilise reaktsiooni käigus (Potts 1992):



Kasutatud boorhape valmistati samal päeval ≥99,5% boorhappe pulbrist (SigmaUltra; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Saksamaa). Pulber lahustati MilliQ vees umbes 80°C juures ning seejärel jahutati toatemperatuuril.

Kokku tehti viis erinevat katset. Igas katses kasutatud hapete kogused ja lisamise aeg on toodud tabelis 3. Kõige esimese katse (katse nr 1) ajal lisati proovile üksnes kuningvett (5 ml). Kuna kuningvesi üksinda suudab lahustada üksnes maake, sulameid, väärismetalle (Au, Pd, Pt, Rh) ning mõningaid teisi raskesti lahustuvaid elemente, siis saadud tulemusena jäid proovid 90%-ulatuses lahustumata. See katse loeti ebaõnnestunuks ning jäeti edasistest uuringutest välja.

Teisel ja kolmandal katsel kasutati MW3000 standardpaketti kuuluvat meetodit „Al-silikaat“, muudetud kujul. Originaalne meetod soovitab lisada happeid kogustega: 1 ml HNO₃, 1 ml HCl ja 4 ml HF. Võttes arvesse proovide ränidioksiidi (SiO₂) tegelikku protsendilist sisaldust (45–70%) ja lähtudes US-EPA meetodist 3052 (EPA 1996) ning HF-happe võimalikust kahjust inimorganismile (i.e. laborandile), vähendati HF-i kogust 4 ml-lt

Tabel 2. Tugimaterjalide andmed.

Lühend	Kivim	Kivimitüüp	Päritolu	Tootja*
JGb-2	(teuko)gabro	aluseline süvakivim	Tsukuba tunnel nr 2, Yasato, Ibaraki, Jaapan	GSJ
Bir-1a	basalt	aluseline vulkaaniline k.	Reykjaviki doleriidid, Island	USGS
JH-1	(pürokseen) hornblendiid	aluseline moondekivim	Nishi-Dohira, Hitachi-Ota, Ibaraki, Jaapan	GSJ
BHVO-2	basalt	aluseline vulkaaniline k.	Halemaumau kraater, Hawaii	USGS
AGV-2	andesiid	keskmise vulkaaniline k.	Guano Valley, Oregon, USA	USGS
JSI-1	savikilt	keskmise moondekivim	Toyoma-cho, Miyagi, Jaapan	GSJ
JSy-1	nefeliin süeniit	keskmise süvakivim	Nephton, Ontario, Kanada	GSJ
JG-1a	granodioriid	happeline süvakivim	Sori granodioriid, Azuma-mura, Gunma, Jaapan	GSJ
JR-3	rüoliit	happeline vulkaaniline k.	Ashizuri neem, Tosashimizu Kochi, Jaapan	GSJ
JG-2	graniit	happeline süvakivim	Naegi graniit, Hirukawa-mura, Gifu, Jaapan	GSJ

* USGS – United States Geological Survey, GSJ – Geological Survey of Japan.

Tabel 3. Katsetel kasutatud hapete kogused ning maksimum temperatuuri ja rõhu väärtused reaktsiooninumas.

Katse	Hapete lisamise aeg						Max temp., °C		Max rõhk, bar	
	Enne masindamist		Pärast		USGS*	GSJ*	USGS*	GSJ*		
	HNO ₃	HCl	Aq.rg.	HF	H ₃ BO ₃	H ₃ BO ₃				
2.	1 ml	1 ml		2 ml	12 ml		243		30,5	
3.	1 ml	1 ml		2 ml		12 ml	231		34,4	
4.	1 ml			5 ml		44 ml	222	239	25,6	
5.			1 ml	5 ml		44 ml	242	210	31,9	

* USGS – proovid BHVO-2, Bir-1a, AGV-2; GSJ – proovid JR-3, JGb-2, JSy-1, JG-1a, JG-2, JH-1, JSI-1.

Aq.rg. – aqua regia, kuningvesi

2 ml-ni. US-EPA meetodi 3052 kohaselt võib lisada fluorhapet proovile suuremas koguses (>3 ml), kui proovi (SiO₂) kontsentratsioon on kõrgem (>70%); kui SiO₂ kontsentratsioon on aga madalam (<10% kuni 0%) piisab väga vähesest fluorhappe kogusest (<0,5–0 ml).

Erinevus teise ja kolmanda katse vahel seisnes boorhappe lisamise ajastuses: teisel katsel lisati H₃BO₃ enne masindamist, kolmandal katsel pärast masindamist. Kuna boorhappe lisamise põhjus on just lahustamise käigus tekkivate fluoriühendite deaktiveerimine, siis selle lisamise ajaline erinevus tulenes huvist uurida HF-i mõju lahustamise protsessile. Boorhapet lisati igal katsel arvestusega iga 1 ml HF-i kohta 6 ml boorhapet.

Neljanda ja viienda katse puhul kasutati P. J. Potts'i (1992) poolt kirjeldatud koguseid: neljanda katse puhul lisati proovile 1 ml HNO₃ ja 5 ml HF ning viienda katse puhul 1 ml kuningvett ja 5 ml HF. Mõlemal juhul lisati boorhappe peale masindamist, et kõrvaldada vesinikfluoriidhappe ülejääk ning muuta saadud lahus stabiilseks ning ohutuks.

Proovid masindati mikrolaineahjuga MW3000 (Anton Paar, Saksa-maa), kasutades rootorit 16HF100. Kasutati ühesuguseid võimsuse ja ajalise kestvuse parameetreid (tabel 4). Peale masindamist vabastati reaktsioonituubid liigse surve alt (keerati korkide rõhu-avad lahti) ning lasti mõnda aega jahtuda. Katsete 3–5 proovidele lisati boorhappe ning lasti seista jahedas, kuna reaktsioon boorhappe ja vesinikfluoriidhappe vahel on üsna aeglane. Proovid valati tsentrifuugitopsidesse ning lahjendati MilliQ veega koguseni 50 ml.

Tabel 4. Katsetel kasutatud MW3000 lahustamisprogrammi parameetrid.

Faas	Võimsus, W	Max saavutamise aeg, min	võimsuse Max min	Max võimsus, min	Ventilatsiooni tugevus
1.	1400	10:00		30:00	1
2.	0			15:00	3
p-Rate: 0,5 bar/s IR: 210°C p: 40 bar					

Peale kuu aja möödumist topsti põhja sadestunud materjal kirjeldati ning filtreeriti, kasutades MilliPore'i vaakumpumbaga filtreerimissüsteemi XX1004700. Filterpaberile (0,45 µm avadega) jäänud sade lasti kuivada ning uuriti lähemalt Zeiss EVO MA-15 skaneeriva elektronmikroskoobiga (SEM) madalvaakumi keskkonnas (50 Pa, pinge (EHT) 20 kV). Makroskoopiline koostis määrati SEM'i külge ühendatud INCA x-Act SD detektori abil tagasipeegeldunud elektronide (CZ BSD:High) keskkonnas. Elektronkiire (*I probe*) voolu tugevus oli pildistamisel 204 pA, mõõtmisel 1000 pA.

TULEMUSED JA DISKUSSIOON

Kas kõik sai lahusesse? – raskestilahustuvate mineraalide lahustamine

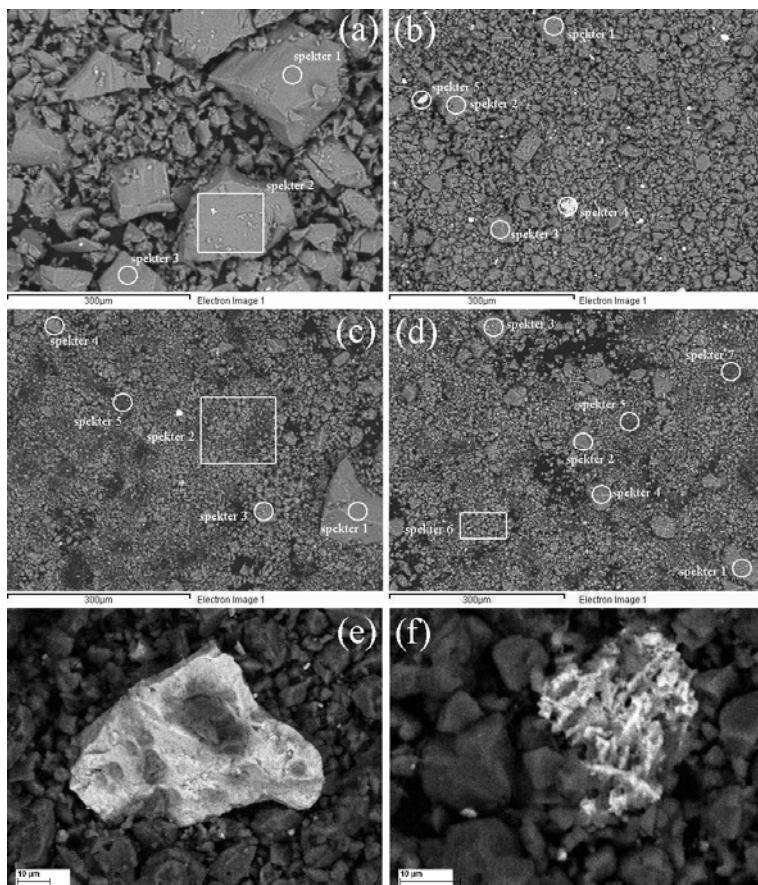
Mõned mineraalid on hapetega lahustumise suhtes eriti vastupidavad. Nende hulka kuuluvad silikaatsete kivimite sellised aktseassoersed mineraalid nagu tsirkoon ($ZrSiO_4$), rutiil (TiO_2), korund (Al_2O_3), spinell ($MgAl_2O_4$), turmaliin ($Na(Mg,Fe,Mn,Li,Al)_3A_{16}O_{18}(BO_3)_3(OH,F)_4$), berüll ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$), kromiit ($FeCr_2O_4$) ja kassiteriit (SnO_2) (Potts 1992). Üks võimalus, kuidas sellest jagu saada, on pikendada lahustumisprotsessi aega või kasutada erinevaid hapete koguseid ja suhtvahetkordi (nt. French ja Adams 1973). Mineraalide lahustuvusprotsess, mis toimub suletud polüpropüleenpudelil, mida kuumutatakse 1–10 tundi auruvannis, ei suuda tagada kõikide mineraalide lahustuvust. Eriti raskesti lahustuvateks osutuvad neis tingimustes küaniit, stauroliit ja turmaliin ning mõningasel määral sillimaniit, andalusiit, granaat, biotiit, kvarts ning leelispäevakivid (French ja Adams 1973). Kui aga samu koguseid kasutades kuumutada proove polükarbonaatsetes pudelites rõhu all kodumajapidamises kasutatavas rõhupotis, paraneb mineraalide lahustuvus kolmekordselt, kuid selline protseduur on aeganõudvam ja vähem käepärane igapäevases laboritöös.

(Rõhu)pomme esimesed katsed geoloogiliste proovide lahustamises tehti 1960-ndate lõpus (Bernas 1968; Langmyhr ja Paus 1968). Tegemist on PTFE-materjalist tehtud reaktsioonianumaga, millel on pealt tihedalt suletud kaas. Anum pannakse rõhku taluvasse roostevabast terasest (või Cu, Fe jt. metalle sisaldavast niklisulamist – monellist) ümbrisanumasse, nn. pommi. Anumasse pannakse 200 mg proovimaterjali ning lisatakse 0,2 ml kuningvett ja 5 ml HF. Pommi kuumutatakse ahjus või kuumutusplaadil temperatuuridel 110° – $150^{\circ}C$ kuni 1 tund (Potts 1992) või isegi kuni 24 tundi. Rõhk reaktsioonianumas ulatub 70–100 atmosfäärini, mis tagab mitme vastupidava mineraali (sh. tsirkooni) lahustumise. Pärast kuumutamist lastakse pommil enne avamist jahtuda toatemperatuurini. Kui saadud lahus sisaldab (jahtumise käigus tekkinud) sadet, on sellest võimalik vabaneda, lisades küllastunud boorhapet ning korrates kuumutamisprotsessi. Pärast lahjendatakse saadud lahus 100 ml-ni (Potts 1992). Seda meetodit kasutades jäävad kõik kivimi makrokomponendid tekkinud lahusesse ning peaaegu ühegi elemendi kaotust ei esine (v.a. germaanium, mis võib ebasoodsate tingimuste korral reaktsioonianumas sadestuda; Van Eenbergen ja Bruninx 1978).

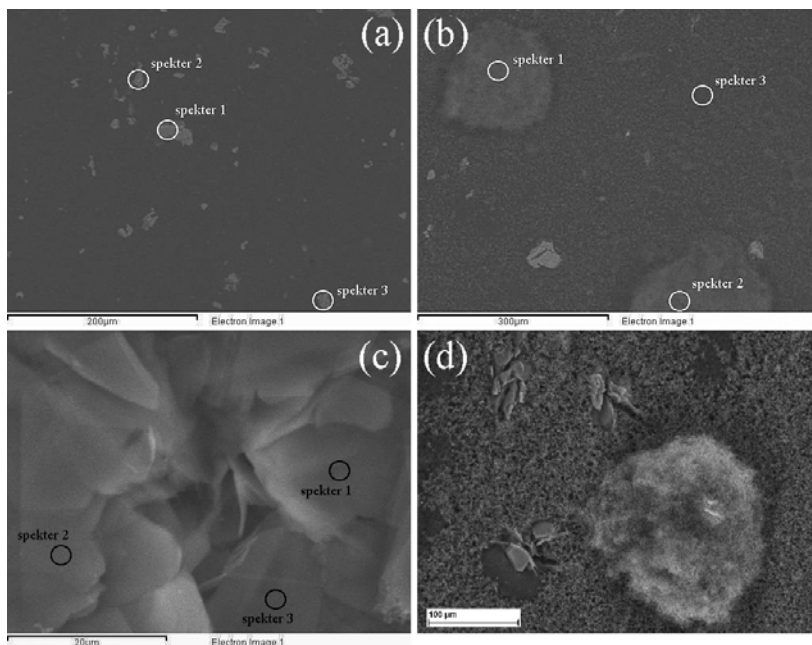
Pommi-meetodi üks olulisi piiranguid on orgaaniliste reaktiivide ja oksüdeerivate ainete kasutamise keeld, kuna toimuv keemiline reaktsioon suletud anumal on plahvatusohtlik (Potts 1992). Kive uurivale geoloogile

see õnneks suuri piiranguid ei sea, kuna mainitud oht kehtib orgaanilise keemia uuringuobjektide lahustamisel kasutatavate ainete kohta. Viimaste hulka kuuluvad kahjuks ka HNO_3 ja H_2O_2 , mille kasutamine geoloogias selle meetodiga ei ole võimalik.

Meie katsete puhul esines proove, kus ahjust tulnud proovianuma põhjas võis täheldada sadet, so lahustamata jäänud materjali (joonised 1 ja 2). Levinumaks mineraaliks osutus kvarts, mis oli tõenäoliselt seotud HF-i vähese kogusega. Tuvastati ka tsirkooni ja teisi mineraale.



Joonis 1. Katse 2 sademed, mis koosnevad lahustamata jäänud kvartsist ja teistest mineraalidest: (a) kvarts proovi JG-1a sademes; (b) kvarts jt. mineraalid proovi JR-3 sademes; (c)-(d) erineva suurusega kvartsi terad JSI-1 sademes; (e) tsirkooni kristall JR-3 sademes; (f) lahustamata mineraali tera JR-3 sademes.



Joonis 2. Katsete 2 (a)-(b) ja 5 (c)-(d) sademed: (a) lahustamata jäänud üksikud kvartsi terad proovi JGb-2 sademes; (b) lahustamata jäänud kvartsi terad ning saaste(?) proovi JGb-2 sademes; (c) plaatjate kristalliitide kogum proovi BHVO-2 sademes; (d) erineva kristallivormiga sademe osad proovi BHVO-5 sademes.

Mis läind see läind, kuid mitte alati – elementide väljaviimine lahusest

Juhul, kui ränisalduse mõõtmine proovis ei ole päevakorral, on võimalik lahust muuta stabiilsemaks ning ühtlasi spektromeetrite tundlikele osadele ja labori klaasanumatele vähem agressiivseks. Kui HF-iga lahustumise protsess leiab aset avatud keskkonnas (nt. avatud anumaskuumutuspliidi peal), aurutatakse tekkiv ränitetetrafluoriid (SiF_4) ära (Potts 1992). Tulemusena saadakse stabiilsem lahus, sest räni sisaldavad lahused on ebastabiilsed, kuna kalduvad hüdrolüüsuma ja sadestuma pikema seismisaja jooksul. Tähelepanu peab seejuures pöörama asjaolule, et koos SiF_4 -ga eralduvad suure tõenäosusega ka teised lenduvad fluoriühendid, viies lahusest välja B, As, Ge ja Sb (Potts 1992).

Lisaks fluorile võivad sademena tekkida ka teised ühendid, näiteks TiO_2 ja KClO_4 (kasutades HF kõrval HClO_4) ning tõenäoliselt ka teised

HFSE-oksiidid (*High Field Strength Elements* ehk kõrge välja tugevusega elemendid, nt. Zr, Hf, Nb, Ta) (Yokoyama jt. 1999).

Fluoriühendite teke

Silikaatsete kivimite lahustumisel tekivad kõige sagedamini erinevad fluoriühendid. Röntgendifraktomeetria abil on tuvastatud $\text{NaUZr}_2\text{F}_{12}$, K_2SiF_6 (Boer jt. 1993), CaAlF_5 , $\text{CaMg}_2\text{Al}_2\text{F}_{12}$, MgF_2 ja ralstoniidi $[\text{Na}_{0,88}\text{Mg}_{0,88}\text{Al}_{1,12}(\text{F},\text{OH})_6\cdot\text{H}_2\text{O}]$ esinemine (Yokoyama jt. 1999). Varasemad katsed on näidanud, et materjali algne keemiline koostis (tema makrokomponentide Na, Mg, Ca, Fe ja Al sisaldus) mõjutab tugevalt seda, millised konkreetsete fluoriühendid sademena tekivad (Langmyhr ja Kringstad 1966; Croudace 1980; Yokoyama jt. 1999).

Miks on see oluline mikro- ja jälgelementide mõõtmisel? Aga just sellepärast, et sadestunud fluoriühendite struktuuri tõmmatakse sisse ka mikroelemendid: Sm, Nd, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, REE, Pb, Th, ja U (Yokoyama 1999). See tähendab, et kui mõõta ICP-MS'ga vaid ülemist vedelikukihti (jättes välja tekkinud sade), saame valed Rb-Sr, La-Ce, Sm-Nd, U-Th-Pb dateeringute või suhete ja REE-diagrammide tulemused. Seega tuleb leida moodus, kuidas sellest ümber minna või tagada, et mõõdetavas lahuses oleks olemas kõik algsed mikro- ja jälgeelementid ning vahepealne proovide ettevalmistusprotsess (antud juhul mikrolaineahjuga lahustamine) ei ole nende koostist mõjutanud.

Töenäoliselt mõjutab fluoriühendite teke kõikide mikro- ja jälgeelementide sisaldusi, olles sõltuvuses neile iseloomulikest joontest. Nende külgetõmme fluoriühenditega on tugevalt sõltuvuses ioonraadiustest ja valentsist (Yokoyama jt. 1999). **Ühevalentsed** elemendid (Cs ja Rb) seotakse F-ühenditesse Al, Mg (või Ca) juuresolekul, nagu nt. ralstoniidi ja $\text{CaMg}_2\text{Al}_2\text{F}_{12}$ tekkel. **Kahevalentsed** elemendid (U, Ba, Sr ja Pb) seotakse $\text{CaMg}_2\text{Al}_2\text{F}_{12}$, MgF_2 ja ralstoniidi kristallvõres kahevalentse katiooni (Ca^{2+} või Mg^{2+}) kohtadele. **Trivalentsete** REE'de puhul näib nende seostatus F-ühenditega olevat läbi ioonraadiuste ning asendavad kristallvõres Al^{3+} kohti ühendites CaAlF_5 ja $\text{CaMg}_2\text{Al}_2\text{F}_{12}$, vähesel määral ka ralstoniidis. REE'd (*Rare Earth Elements* ehk lantanoidid, Sc ja Y) võivad olla seostatud ka MgF_2 struktuuri. **Neljavalentne** element Th võib olla tervenisti seotud ühendina ThF_4 . Mingi osa tooriumi (Th) võib teoreetiliselt esineda ka MgThF_6 või CaThF_6 ühendites. Nagu näha, polegi võimalusi lõpmata palju ning kristallvõrede reeglid kehtivad ka siin.

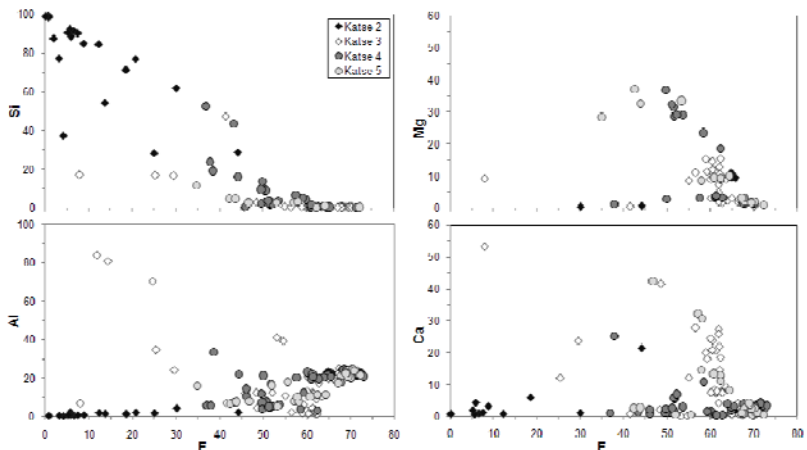
Potts (1992) väidab, et juhul kui peale happega lahustumise etappi tekib sade, on võimalik sellest kergelt vabaneda, lisades proovile boorhapet ning kuumutada veevannis (proov ise on suletud anum) 15–30 minutit. Seejärel proov jahutatakse ning lahjendatakse 100 ml koguseni. Meie poolt

tehtud katsed nr. 3–5 näitavad, et üksnes boorhappe lisamine peale lahustumisprotsessi ei hoiä ära sademe teket, vaid on vaja ka järgnevat töötlemist.

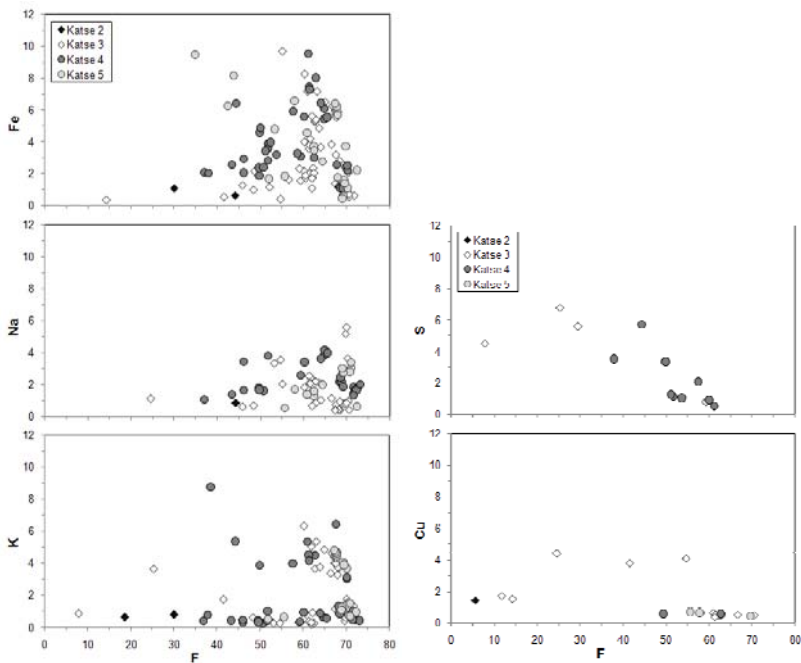
Tulemused katsete kaupa

Erinevate katsete sade ja/või lahustumatu jäägi (s.t. ahjus mitte-lahustunud mineraalide) keskmise keemilise koostise tulemused kaalu-protsentides on toodud tabelites 5–8, normaliseerituna 100%-le. Tulemustest võeti välja väävli ja hapniku mõõdetud kontsentratsioonid – neid käsitleti kui tõenäolisi lisandeid mõõtekeskkonnast. Kuna eesmärgiks ei olnud arvutada välja ühendite võimalike molaarkoostisi vaid kaardistada sademete makrokomponente ning nende omavahelisi suhteveahekordi, ei peetud proovi enda tegelikku hapniku koostise määramist oluliseks.

Tulemusi omavahel võrreldes (tabelid 5–8, joonised 1–5) võib ütelda, et kõige rohkem fluorühendite-vabasid lahuseid andis katse nr. 2, sõltumata seejuures otseselt proovimaterjali algsest SiO_2 -koostisest – mis on huvitav aspekt, kuna HF kogust määratakse sageli just algmaterjali räni-koostise põhjal (suhtega 0,5 ml HF 10% SiO_2 kohta). Katse 2 kümnest proovist neli sisaldas pärast masindamist lahustumatu kivimaterjali, mis koosneb täielikult (proovid JGb-2, JG-1a, JG-2) või osaliselt kvartsist jt. rasketilahustuvatest mineraalidest (proov JR-3) (tabel 5, joonised 1, 2, 3a).



Joonis 3. Harkerdiagramm (Si, Al, Mg, Ca versus F) katsete sademete keemilise koostise kohta.



Joonis 4 Harkerdiagramm (K, Na, Fe, Cu, S *versus* F) katsete sademete keemilise koostise kohta.

Täielikult õnnestus lahusesse viia ainult kolm proovi: JH-1 (algmaterjal sisaldas 48,18% SiO₂), AGV-2 (59,30% SiO₂) ja Jsy-1 (60,02% SiO₂). Kõik proovid, mille algne SiO₂ koostis oli >70%, sisaldasid mingi osa lahustumatut kvartsi. Proov JGb-2 (gabro) tuleb nende seast eriti esile (tabel 5), sisaldades lisaks ränile ka olulises koguses Al, Br, S ja Ti, mis tõenäoliselt ei ole seotud fluoriühendite tekkimisega vaid saastematerjaliga (joonis 2d).

Katsest 2 esindavad proovide Bir-1a ja BHVO-2 sademed oma koostiselt Mg_xCa_xAl_xF_x ühendit, mille korrapärasesse struktuuri on mikrokomponendina tõmmatud ka Ti (tabel 5, joonis 5a). Proovide JSI-1 ja JR-3 sademe keskmine keemiline koostis sisaldab nii lahustumata jäänud kvartsi ja tsirkooni kui tekkinud fluoriühendi X_xSi_xF_x koostisosi (joonis 1b-c). Proovi JR-3 Th sisaldus peegeldab suurema tõenäosusega tsirkooni keemilist koostist, kui tooriumit sisaldava ThF_x-ühendi esinemist.

Katse 3 sademed on väga heterogeense koostisega (tabel 6). Domineerivaimaks fluoriühendiks tundub olevat Ca_xMg_xAl_xF_x. Viimaste seas on

esindatud nii kaltsiumi- kui magneesiumirikkad versioonid. Esineb ka $\text{Ca}_x\text{Al}_x\text{F}_x$ ühendit (proovid JR-3 ja JG-2). Päris kõrgete Na, K ja Si sisalduste põhjal võib eeldada ka ralstoniidi ja $\text{K}_x\text{Si}_x\text{F}_x$ esinemist.

Võrreldes katsete 2 ja 3 tulemusi omavahel, on erinevus silmaga näha (tabelid 5–6). Neid katseid eristas omavahel boorhappe lisamise aeg – kas enne või peale masindamist. Vaadates tekkinud sademete koguseid ning sademesse tõmmatud elementide rikkust võib väita, et antud tingimustel (kasutades lahustamiseks 2 ml HF koos 1 ml HNO_3 ja HCl ning ilma termalse töötlemiseta) soodustab boorhappe lisamine peale masindamist erinevate fluoriühendite väljasadestumist.

Katse 4 tingimused tunduvad esmapilgul olevat ühed sobilikumad valitud silikaatsete kivimite lahustamiseks, eriti just USGS proovide (basaldi ja andesiidi) jaoks, kuna siin oli kõige rohkem proove, millel ei tekkinud silmaga makroskoopiliselt eristuvat sademekihti. Jaapani proovide sademed tunduvad olevat katsest 3 palju homogeensema koostisega, ent tekkinud fluoriühendite kõrval tulevad esile ka mittelahustunud mineraalid (nt. proovis JR-3). Võrreldes **katseid** 4 ja 5 omavahel tundub katse 4 ehk 5 ml HF kõrval HNO_3 kasutamine kuningvee asemel andvat rohkem fluoriühenditevabasid lahustumistulemusi.

Katsete tulemused kivimtüübiti

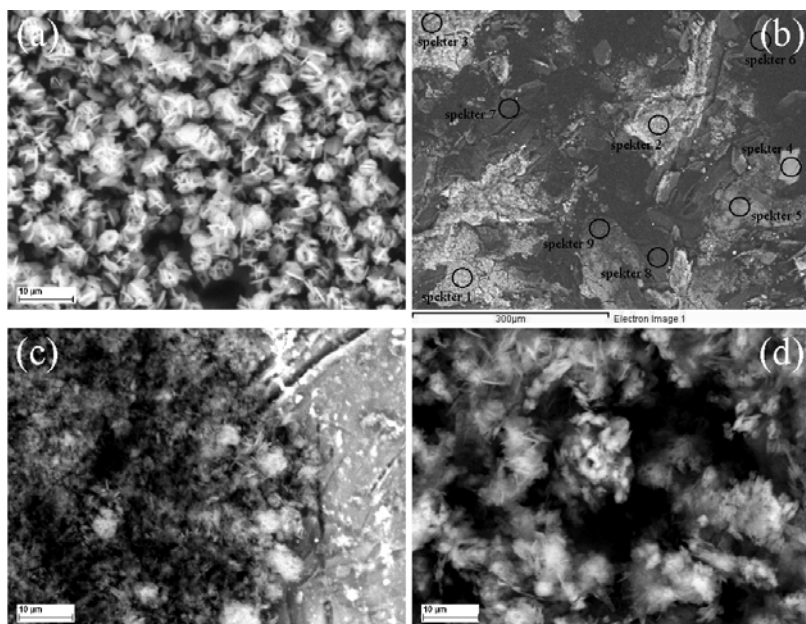
Kui püüda mõista, mida need erinevad katsetulemused tähendavad kivimitüüpe arvestades, võib öelda järgmist. Kõige paremini allusid erinevatele lahustamiskatsetele andesiit (AGV-2), tekitades sadet ainult katse 3 tingimustes ning gabro (JGb-2), mille puhul oli vaid katses 3 märgata väga vähest fluoriühendite teket. Neist viimane osutas vastupanu kvartsi lahustamisele katse 2 tingimustes ning raskestilahustuvatele mineraalidele katses nr 3. Kõige raskemaks osutus rüüliidi (JR-3) lahustamine, mille puhul ei õnnestunud olulisi mikro- ja jälgelemente 100%-liselt lahusesse viia – nt. Th ja REE' dest La, Ce ja Nd.

Aluselistest kivimitest esines katseti erinevusi. Gabrole (JGb-2) tundus silmnähtavalt sobivat paremini 5 ml HF kasutamine 2 ml asemel. Tähelepanuväärne on see, et boorhappe lisamine alles peale mikrolaineahjust tulekut (katse 3), tagas boorhappega sidumata 2 ml HF-i võime lahustada proovis leiduva kogu kvartsi, mis näiteks katsel 2 aga lõpuni lahustamata jäi. Amfibool (hornblendiid JH-1) seevastu lahustus kõige paremini siis, kui boorhappe lisati enne masindamist. Basaldid (Bir-1a ja BHVO-2) allusid kõige paremini „retseptile“, kus 5 ml HF-i kasutati koos 1 ml HNO_3 .

Keskmistest kivimitest ei andnud savikilt ühelgi katsel 100% puhast lahust. Katsete 3 ja 5 sade olid nii visuaalselt kui ka keemiliselt väga sarnane ja homogeense koostisega $\text{Fe}_x\text{K}_x\text{Mg}_x(\text{Ca},\text{Na})\text{Al}_x\text{F}_x$; seega ei omanud

tähtsust, kas HNO_3 ja HCl hape olid kokku segatud juba enne kivimpulbrile lisamist või mitte. Katses 2 on tuvastatav lahustumata jäänud kvartsi kristalle läbimõõduga $<50 \mu\text{m}$, sh. mõni üksik suurusjärgus kuni $150 \mu\text{m}$. Katses 4 eristub nii kristalliliselt kui keemiliselt koostiselt kaks erinevat koostisosa (joonis 5b): (1) hele pulberjas $\text{Fe}_x\text{K}_x\text{Mg}_x(\text{Ca},\text{Si})\text{Al}_x\text{F}_x$ ühend; ja (2) tumehallid plaatjad/prismalised kristallid koostisega $\text{K}_x\text{Si}_x\text{Al}_x\text{F}_x$, mis sisaldavad märgatavas koguses rauda, magneesiumi ja väävlit.

Nefeliin süeniit (JSy-1) andis puhta lahuse vaid katsel 2 ning katsel 3 olid sademes esindatud nii fluoriühendid $\text{Na}_x\text{Cu}_x(\text{Fe},\text{Ca},\text{K})\text{Al}_x\text{F}_x$ kui lahustumata kvarts (joonis 5c). Viimane ei tundu aga nende katsete võrdlusel olevat seoses boorhappe lisamise aja ehk vaba HF -i olemasoluga algses lahustumisprotsessis, mis just katse 3 puhul oleks pidanud tagama kvartsi parema lahustumise. Ometi tulemused näitavad mingil põhjusel justkui vastupidist tulemust. Süeniidi teiste katsete (4 ja 5) sademed on visuaalselt väga sarnased (joonis 5d) ning keemiliselt koostiselt homogeensed – katses 4 on $\text{Ca}_x\text{Na}_x(\text{K},\text{Si})\text{Al}_x\text{F}_x$ ühend, katses 5 $\text{Na}_x\text{Ca}_x(\text{K})\text{Al}_x\text{F}_x$ ühend. Andesiidil



Joonis 5. Kristallilised sademed: (a) proovi BHVO-2 katse nr 2 sade; (b) proovi JSI-1 katse nr 4 sade; (c) proovi JSy-1 katse nr 3 sade, kus sees on pildi paremas servas näha kvartsi kristalli serva; (d) proovi JSy-1 katse nr 4 sade.

(AGV-2) esines katse 3 tingimustes helehall $\text{Ca}_x\text{Fe}_x\text{K}_x\text{Mg}_x(\text{Na},\text{Si})\text{Al}_x\text{F}_x$ -koostisega sade.

Happelised kivimid dioriit (JG-1a), rüoliit (JR-3) ja graniit (JG-2) ei tundnud ennast hästi üheski katsetingimuses, ent andsid siiski kõige vähem sadet katsel nr 2. Viimane koosnes 100% ulatuses lahustumata jäänud kvartsist (joonis 1) ning JR-3 puhul ka teistest mineraalidest, nagu nt. tsirkoon (joonis 1d). Dioriidi ja graniidi puhul paistis katse 3 sade silma kaaliumi- ja räni-rikkuse poolest: dioriidi puhul oli esindatud ühend $\text{Si}_x\text{K}_x(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe},\text{Na})\text{Al}_x\text{F}_x$, graniidi puhul ühend $\text{Ca}_x\text{K}_x(\text{Fe},\text{Cu},\text{Na},\text{Si})\text{Al}_x\text{F}_x$. Mõlema kivimi katsete 4 ja 5 sademed olid väga sarnase koostisega, mõlemal oli valdavaks elemendiks Al ja F kõrval kaalium või kaltsium: dioriidil ühendina $\text{K}_x\text{Ca}_x(\text{Fe},\text{Mg})\text{Al}_x\text{F}_x$, graniidil $\text{Ca}_x\text{Na}_x(\text{K},\text{Fe})\text{Al}_x\text{F}_x$.

Mõõdad seda, mida sisse paned e. kuidas lahendada saaste küsimus?

HF on oma agressiivsuse tõttu võimeline juba madalate kontsentratsioonide juures lahustama laboris kasutatavaid klaasanumaid. See toob kaasa uuritava proovi saastumise anumate koostises olevate elementidega (Potts 1992). Et sellist proovide saastamist vältida, kasutati plastikust laborimaterjale (PTFE-TFM materjalist tehtud mikrolaineahju proovianumad), mis kannatavad kuumutamistemperatuure kuni 280°C. Viimase ületamine on tagatud ahju anumate sisese maksimumtemperatuuri piiriga 240°C (tabel 1). Kõrgema kui 280°C juures polümeerimaterjal laguneb ning tulemusena eralduvad väga toksilised aaurud.

Erinevaid happeid proovile lisades, tuleb meeles pidada elementaarset asjaolu – ei saa mõõta neid elemente, mida hapetega juurde paned. Siinkohal tuleb silmas pidada kahte põhipunkti: (1) hapete põhikoostisesse kuuluvad elemendid (H, Cl, N, O, F jne.) ning (2) hapetes sisalduvad mikrokomponendid. Ükski asi ei ole 100% puhas aines. Ikka leidub selles mingi kogus lisandeid, mis tulevad ümbritsevast keskkonnast. Seega mängib mikroelementide mõõtmisel väga olulist osa lisatavate ainete puhtus. Tavaline, laborites kasutatav (analüütiliselt puhas) hape ei ole mikroelementide mõõtmiseks sobilik. Siit tuleneb vajadus kasutada just ultrapuhtaid happeid, et minimaliseerida mõõdetavate mikroelementide sisalduste saastamine laboratoorsel teel. Seetõttu valiti happed, mis kuulusid mikroelementide analüüsi puhtusastme TraceSELECT (*for trace analyses*) klassi: HNO_3 puhtusastmega >99,999968% ehk <0,42 ppm lisandeid (anioone 0,36 ppm, katioone 0,0615 ppm); HCl puhtusega >99,9998% ehk <12,17 ppm lisandeid (anioone 12 ppm, katioone 0,62 ppm); HF puhtusega >99,999998% ehk <0,12 ppm lisandeid (katioone); boorhappe pulber puhtusega 99,895%.

Järeldused

Uuringu käigus tehti viis katset, mille vältel prooviti erinevaid hapete kogumeid 10 erinevat tüüpi silikaatse kivimi (rahvusvahelise tugimaterjali) lahustamisel mikrolaineahju meetodil. Vaadates tekkinud sade koguseid ning neisse tõmmatud elementide rikkust, võib väita, et kasutades 2 ml HF koos 1 ml HNO₃ ja HCl soodustab boorhappe lisamine peale masindamist erinevate fluoriühendite väljasadestumist proovide seismise käigus. Tõstes HF kogust 5 ml peale on võimalik täielikult vabaneda algsest kvartsist, ent mitte kõigist raskestilahustuvatest mineraalidest. Kasutades silikaatsete kivimite lahustamisel 5 ml HF kõrval HNO₃ kuningvee asemel, on võimalik saada rohkem makroskoopiliselt sadevabasid tulemusi. Ühest järeldust silikaatsetele kivimitele nende katsete põhjal siiski tõmmata ei saa, kuna iga kivimitüüp käitus viies erinevas katsetingimuses erinevalt, sõltumata sealjuures näiteks oma algsest SiO₂-koostisest.

Tänuavaldused

Käesolev uurimistöö viidi läbi Eesti Teadusfondi (ETF) grandide nr. 7315 raames. Autorid on tänulikud Kristjan Urtsonile ja Olle Hintsile (TTÜ GI) abi eest SEM-uuringute läbiviimisel. Katsete ettevõtmisel, tingimuste määramisel ja tulemuste diskuteerimisel olid vajalikuks abiks diskussioonid Margus Voolma ja Kristjan Urtsoniga (TTÜ GI) ning Toivo Kallaste ja Tarmo Kiipliga (TTÜ GI) ning nõuanded Kalle Kirsimäelt (TÜ ÖMI geologia osakond). Katsetel kasutatud tugiproovimaterjal pärines TTÜ GI röntgenfluorestsents (Jaapani materjal) ja ICP-MS (USGS materjal) laborite varasalvest. Autorid on väga tänulikud ka toimetajatele tehtud paranduste ja kommentaaride eest.

Kasutatud kirjandus

- Anton Paar. 2006. *Reference Manual. Multiwave 3000 Microwave Reaction System*. Austria: Anton Paar GmbH, 536 lk.
- Anton Paar. 2007. *Library: Sample Method*. In: AP-SoftPrint v2.02 for Multiwave 3000 / Synthos 3000. Austria: Anton Paar GmbH.
- Bernas B. 1968. A new method for decomposition and comprehensive analysis of silicates by atomic absorption spectrometry. *Analytical Chemistry* 42: 1682–1686.
- Boer R.H., Beukes G.J., Meyer F.M. ja Smith C.B. 1993. Fluoride precipitates in silicate wet-chemistry: implications on REE fractionation. *Chemical Geology* 104: 93–98.

- Bowen H.J.M. 1966. Trace Elements in Biochemistry. Academic Press.
- Croudace I.W. 1980. A possible error source in silicate wetchemistry caused by insoluble fluorides. *Chemical Geology* 31: 153–155.
- EPA. 1996. *EPA Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices*. U.S. Environmental Protection Agency, 20 lk.
- French W.J. ja Adams S.J. 1973. Polypropylene bottles in the decomposition of silicate materials. *Analytica Chimica Acta* 62: 324–328.
- Kingston H.M. ja Haswell S.J. 1997. *Microwave-Enhanced Chemistry. Fundamentals, Sample Preparation and Applications*. American Chemical Society, 772 lk.
- Langmyhr F.J. ja Kringstad K. 1966. An investigation of the composition of the precipitates formed by the decomposition of silicate rocks in 38–40% hydrofluoric acid. *Analytica Chimica Acta* 35: 131–135.
- Langmyhr F.J. ja Paus P.E. 1968. The analysis of inorganic siliceous materials by atomic absorption spectrophotometry and the hydrofluoric acid decomposition technique. Part I: The analysis of silicate rocks. *Analytica Chimica Acta* 43: 397–408.
- Meisel T., Schöner N., Paliulionyte V. ja Kahr E. 2002. Determination of Rare Earth Elements, Y, Th, Zr, Hf, Nb and Ta in Geological Reference Materials G-2, G-3, SCo-1 and WGB-1 by Sodium Peroxide Sintering and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards Newsletter* 26: 53–61.
- Potts P.J. 1992. *A Handbook of Silicate Rock Analysis*. Glasgow and London: Blackie & Son Limited, 622 lk.
- Riley J.P. 1958. The rapid analysis of silicate rocks and minerals. *Analytica Chimica Acta* 19: 413–428.
- van Eenbergen A. ja Bruninx E. 1978. Losses of elements during sample decomposition in an acid-digestion bomb. *Analytica Chimica Acta* 98: 405–406.
- Yokoyama T., Makishima A. ja Nakamura E. 1999. Evaluation of the coprecipitation of incompatible trace elements with fluoride during silicate rock dissolution by acid digestion. *Chemical Geology* 157: 175–187.

Tabel 5. Katse 2 sademe ja/või lahustumatu jäägi keskmine koostis (kaalu%-des).

Proov	JGb-2 ¹	Bir-1a	BHVO-2	JSl-1	JG-1a	JR-3 ³	JG-2
Na				0.84			
K				0.72			
Ag						2.75	
Ca		1.06	1.93	4.03			
Mg		10.90	9.69	0.50			
Fe				0.83			
Cu						1.41	
Al	1.07	29.57	23.22	22.86	1.64	1.70	
Si	98.93	56.83		81.80	100.00	72.30	100.00
Ti		13.62	0.38	0.87			
Zr						30.75	
Th						6.06	
F			64.81	65.40	12.12	9.39	
Br		32.25					
Cl				0.99			
S		24.52					
nr*	3	3	3	12	7	9	5

* mõõtmiste arv

¹ – tulemuses sisaldub 1,07% alumiiniumi esindab valdavalt alumiiniumist koosneva ümbritseva proovialuse lisandumist mõõtmistulemusesse, kuna mõeldav kvartsi tera oli oma mõõtmelt väiksem, kui mõõtmise mõjuala (joonis 2c). ² – loogika ütleb, et tegemist on saastega ning tulemus etesinda ei sademe ega lahustumata jäägi koostist (joonis 2d). ³ – üheksast mõõtmisest üks koosnes 100.00% ränist, s.o. esindas puhast kvartsi (joonis 1b).

Tabel 7. Katse 4 sademe keskmine koostis (kaalu%-des).

Proov	JH-1	JSl-1	JSy-1	JG-1a	JR-3	JG-2
Na			1.65		2.69	2.15
K	0.99	4.59	0.55	4.19	0.48	1.06
Ca	6.47	5.52	3.74	3.40	2.04	2.71
Mg	28.64	3.06		1.49		
Fe	3.46	6.44		2.40	3.72	1.09
Cu		0.61			0.63	
Mn					0.30	
Al	4.87	20.61	22.07	19.26	14.61	24.42
La					11.29	
Ce					14.18	
Nd					3.56	
Si	2.86	9.13	0.20		11.55	
Zr					22.64	
Th					2.85	
F	53.86	52.74	71.97	69.26	53.71	68.59
S	1.14	3.06			0.93	
nr*	8	9	7	3	14	4

* mõõtmiste arv

Table 6. Katse 3 sademe keskmine keemiline koostis (kaalu%-des)¹.

Proov	JCb-2	Bi-r-1a	JH-1	BHVO-2	AGV-2	JSI-1	JSy-1	JG-1a	JR-3	JG-2
Na	2.17		2.05	0.91	0.37	3.71	0.41	0.79	0.81	1.40
K	2.24	0.41	0.23	3.95	4.77	0.63	3.29	0.81	1.47	
Ag										
Ca	32.69	7.78	22.10	9.20	5.03	0.79	0.40	1.87	1.81	3.00
Mg	9.22	11.28	11.24	9.38	1.98	2.97	0.66	1.35		
Fe	2.15	3.87	1.85	6.45	4.62	6.39	0.38	1.09	2.11	0.68
Cu		0.56	0.46	0.55		3.10				0.47
Al	18.95	12.39	3.48	11.23	19.53	19.46	48.45	19.59	20.77	23.72
La									8.22	
Ce									17.16	
Nd									7.52	
Si	20.24	1.14	0.63	0.48	0.45			9.83	0.55	0.34
Zr	74.33									
F	27.85	61.15	60.62	60.94	63.76	65.59	46.01	62.65	63.05	70.70
S	8.14	0.48	0.78							
m [*]	6	5	12	5	4	8	8	5	10	4

* mõõtmiste arv

¹ – jooned elementide vahel tähistavad piire valentsiumbrite ja katioonide/anioonide vahel.
Kehtib tabelite 5–8 kohta.

Tabel 8. Katse 5 sademe keskmine keemiline koostis (kaalu%-des).

Proov	Bir-1a	JH-1	BHVO-2 ¹	BHVO-2 ²	BHVO-2 ³	JSl-1	JSy-1	JG-1a	JR-3	JG-2
Na	1.59	0.63					3.07		0.55	2.84
K	0.95				4.63	0.97	4.10	4.10	0.83	1.15
Ca	12.08	2.01	35.09	8.46	12.88	0.95	1.11	2.55	0.60	3.86
Mg	9.24	26.55			3.17		1.87			
Fe	4.21	6.18	3.68		6.00		1.46	2.41	0.53	
Cu	0.66								0.59	
Mn	0.27									
Al	10.94	11.45	7.84		36.49	17.68	23.99	20.83	19.50	22.64
La									7.08	
Ce									14.45	
Nd									3.99	
Si	0.75	4.94	3.07		37.30					
F	61.50	49.32	54.00	73.52	58.88	67.56	70.85	69.21	59.07	69.00
Br				8.87						
S				5.47	19.99					
nr*	5	5	3	1	3	5	3	4	3	3

* mõõtmiste arv

¹ – põhimass ehk kärjeline maatriks; ² – heledam tomp; ³ – libelede kogum (joonis 2a-b)

*Evelin Verš (evelin.versh@gi.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut, Ehitajate tee 5, Tallinn 19086.
Gretter Leppik (gretter.leppik@gmail.com) – Tallinna Tehnikaülikool, Matemaatika-loodusteaduskond.*

Fluoriidid ja boor Siluri–Ordoviitsiumi põhjaveekompleksis

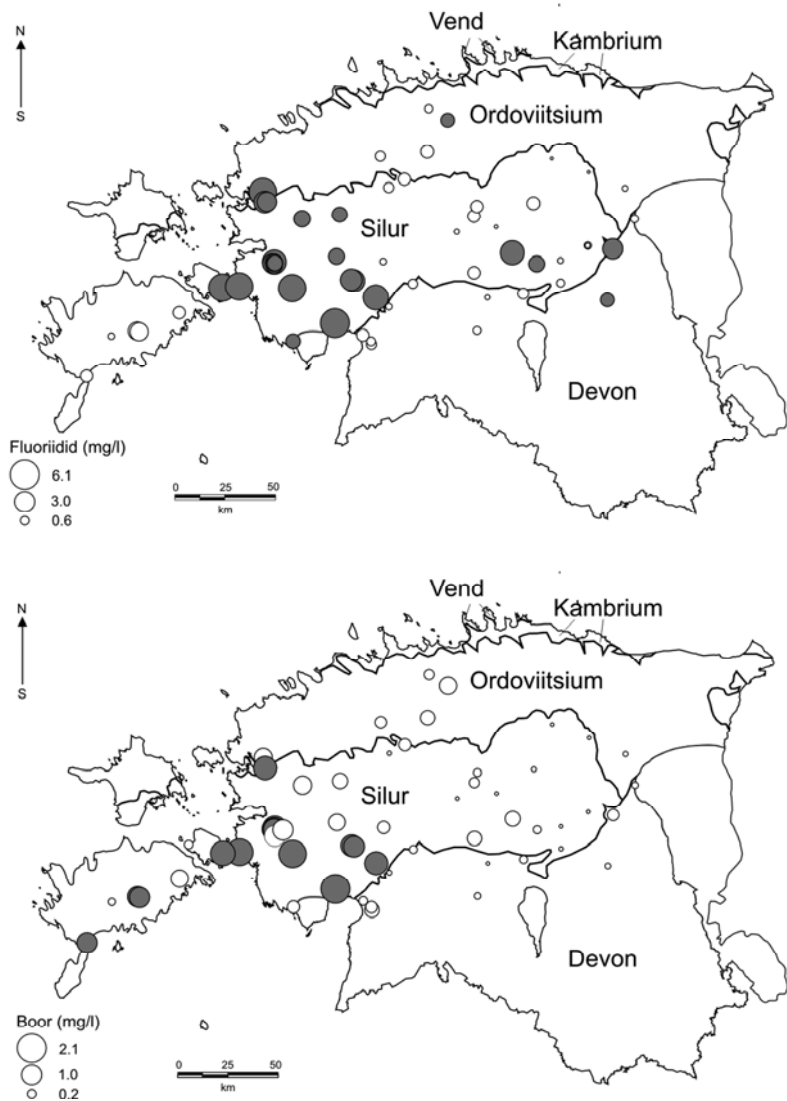
Marge Uppin ja Enn Karro

Meditsiiniline geoloogia on viimastel kümnenditel kiiresti arenev teadusharu, mille eesmärgiks on uurida geoloogiliste protsesside mõju elusorganismidele, ühendades mitmete erinevate valdkondade teadlasi – geolooge, geograafe, arste, keemikuid, biolooge jt. Peamisteks uurimisvaldkondadeks siinkohal on põhjavees, pinnavees ning pinnases esinevate keemiliste elementide ja mineraalide, geoloogiliste protsesside (näiteks vulkanism, maavärinad, maalihked, erosioon, tsunaamid) ning loodusliku tolmu (kaevandustest, kõrbetest, maavärinatest, vulkaanipursetest pärinev tolm) mõju nii inimeste kui ka loomade tervisele (Bunnell jt. 2007; Centeno 2008).

Fluoriidide ja boori mõju inimorganismile

Fluor on üks keemiliselt aktiivsemaid elemente, reageerides enamike teiste elementidega. Vees esineb fluor peamiselt ioonina (F^-) ning orgaaniliste ja anorgaaniliste kompleksühendite koostises (Hem 1985; Lahermo ja Backman 2000). Inimorganismis on fluor vajalik hammaste ja luude arenguks. Elemendi optimaalne toimeala on suhteliselt kitsas. Defitsiidi korral tarbitavas joogivees (alla 0,5 mg/l) on soodustatud hambakaariese teke ja areng, mistõttu väike kogus fluori on organismile vajalik kaariese profülaktikaks. Liigse sisalduse korral joogivees avaldub fluori toksiline toime hambaflooroosi ($F^- >1,5$ mg/l) ja skeletifluoroosina ($F^- >4$ mg/l) (Saava 2003; WHO 2004; Saava ja Indermitte 2005).

Boor on vees lahustuv keemiline element, mis vesilahustes esineb $B(OH)^{4-}$ anioonina või lahustumatu boorhappena $B(OH)_3$. Neutraalses keskkonnas (pH=7) esineb 95% boorist $B(OH)_3$ kujul (Mather ja Porteous 2000). Boraationide osakaal vesilahuses kasvab järk-järgult pH väärtuste tõusmisel (Gonfiantini ja Pennisi 2005). Kuigi hetkel on boori piirväärtuseks joogivees 1,0 mg/l, on soovituslikuks piirsisalduseks Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) poolt määratud 0,5 mg/l. Pikaajalised loomkatsed on näidanud, et liigne boorisaldus joogivees põhjustab reproduktioonisüsteemi häireid ja loote kehakaalu mahajäämust, aga ka ainevahetushäireid ja soolepõletikke (Saava 2003; WHO 2004; Saava ja Indermitte 2005).



Joonis 1. F⁻ ja B sisaldused ja levik S-O veekompleksis. Ülenormatiivsete fluoriidide ja boori sisaldustega (F⁻ > 1,5 mg/l; B > 1 mg/l) puurkaevud on tähistatud halli värviga.

F⁻ ja B sisaldused S–O veekompleksi põhjavees

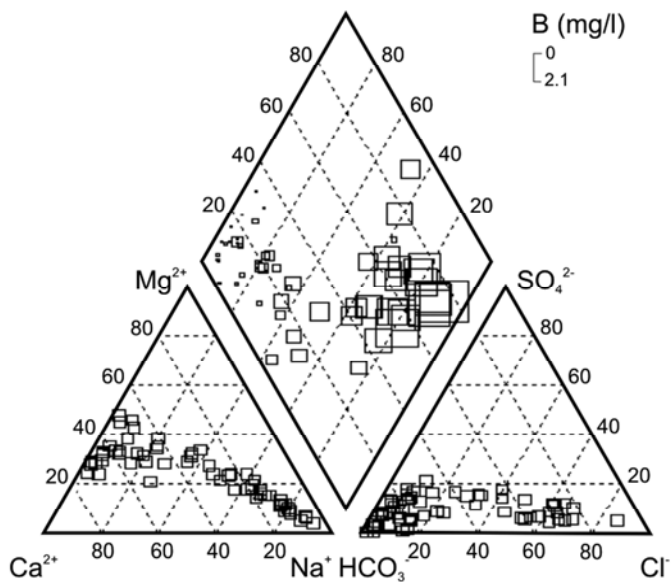
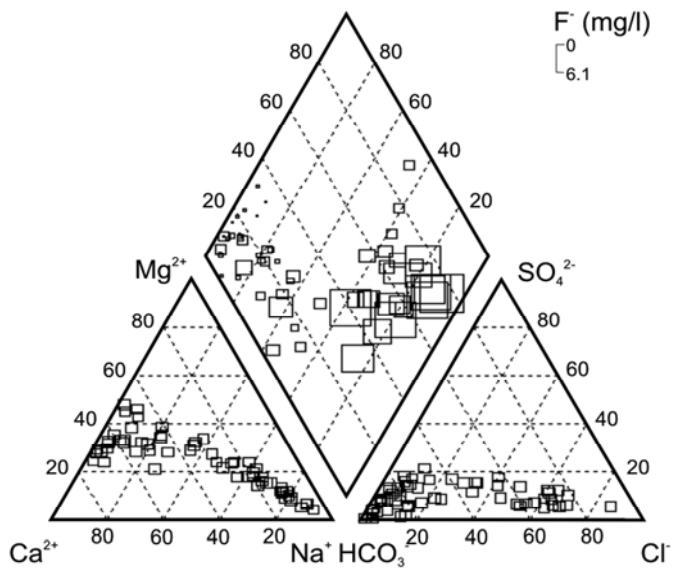
Joogivesi on üks tähtsamaid keskkonnategureid, mis oluliselt mõjutab elanike tervist. Vees leiduvad keemilised elemendid ja ühendid osalevad ainevahetuses ja avaldavad mõju organismi arengule, kasvule ning paljunemisele. Seepärast on väga oluline tarbitava vee ohutus ja keemiline koostis (Saava 2003). Siluri–Ordoviitsiumi (S–O) veekompleksis, mis on oluliseks veevarustuse allikaks Pärnu–Põlva joonest põhja pool ja Lääne-Eesti saartel, esineb paljude puurkaevude vees liigsetes kogustes fluoriide ja boori (Karro jt. 2006). Teaduslikud uuringud on näidanud, et nimetatud elemendid omavad olulist füsioloogilist mõju elanikkonna tervisele, olles ühtedeks enam tervist kahjustavateks elementideks Eesti joogiveses.

S–O veekompleks koosneb peamiselt lubjakividest ja dolomiitidest, milles esinevad savikad vahekihid. Veekompleksi ülemine 30 m paksune osa on tugevasti karstunud ja lõhestunud. Karbonaatkivimite lõhelisus ja karstumus kahaneb kiiresti koos sügavuse suurenemisega. Seega väheneb sügavuse suurenedes oluliselt ka veekompleksi veeandvus ning veekompleks muutub Siluri–Ordoviitsiumi veepidemeks (Perens ja Vallner 1997).

Euroopa Liidu joogivee direktiivi (98/83/EC) ja sellega kooskõlastatud Eesti joogivee kvaliteedinõuete (Joogivee ... 2001) kohaselt on kehtestatud fluoriidi lubatud sisalduseks kuni 1,5 mg/l ning boori puhul kuni 1,0 mg/l. Analüüsitud 60 põhjavee proovist ületasid F⁻ sisaldused normi 28 puurkaevu veed ning B väärtused 17 puurkaevu veed, moodustades vastavalt 46,7% ja 28,3% proovidest. Nii fluoriidide kui ka boori puhul on ülenormatiivsed väärtused seotud eelkõige Lääne-Eestiga (joonis 1).

F⁻ ja B hüdrokeemia S–O veekompleksis

Põhjavee keemiline koostis kujuneb mitmete keskkonnategurite koosmõjul. Karbonaatse kivimikompleksi lõhelisus ja sellest tulenev veevahetuse kiirus vähenevad sügavuse suurenedes (Perens ja Vallner 1997). Settekivimite koostis ja tüüp on ruumis muutuvad. Põhjavesi, mis on pikemat aega kontaktis ümbriskivimiga, peegeldab kivimi keemilist koostist, veekompleksi geokeemilist ja hüdrodünaamilist iseloomu. Sellest tingituna on vees lahustunud keemiliste elementide ja nende vahekorrad tulenev vee keemiline tüüp samuti piirkonniti erinev. Põhjavee üldisest keemilisest koostisest sõltub omakorda teiste keemiliste elementide ja ühendite sisaldus vees. F⁻ ja B sõltuvust vee keemilisest tüübist S–O veekompleksis väljendavad Piperi diagrammid, mille konstrueerimisel on arvestatud peamiste katioonide (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) ja anioonide (Cl⁻,



Joonis 2. F^- ja B sisaldus S-O veekompleksi vees sõltuvalt vee keemilisest tüübist.

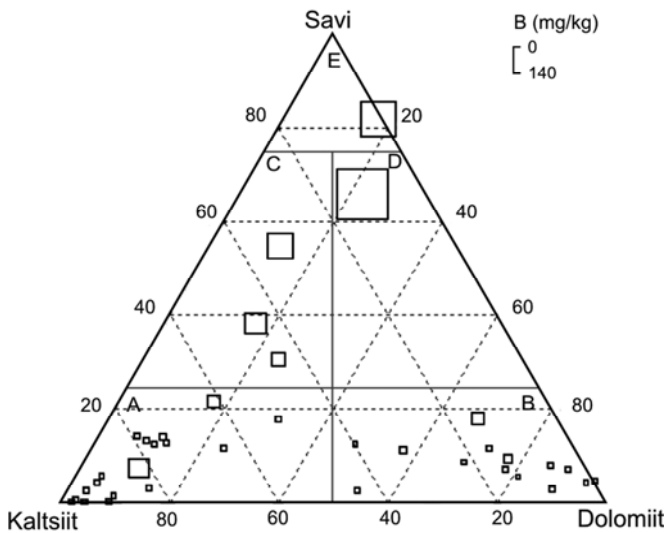
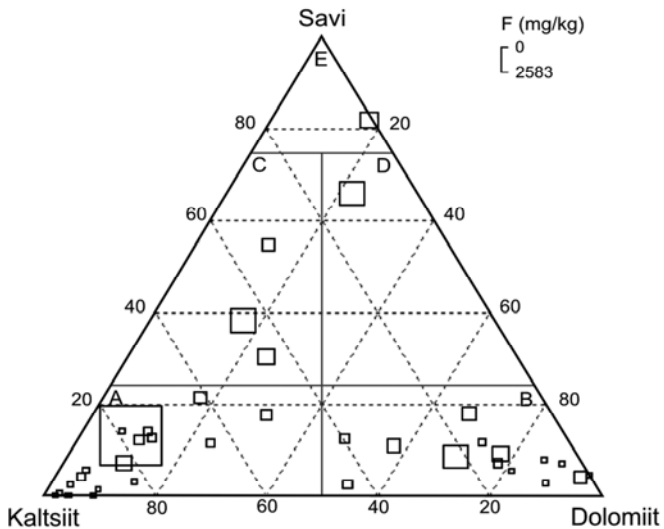
SO_4^{2-} , HCO_3^-) sisaldust vees. S–O veekompleksis on kõige enam levinud HCO_3^- –Ca–Mg- ja HCO_3^- –Mg–Ca-tüüpi veed, milles on kõrge Ca^{2+} ja Mg^{2+} sisaldus. F^- ja B sisaldus on sellises vees üldiselt madal. Kõrgenenud F^- ja B sisaldused on iseloomulikud peamiselt Na^+ ja Cl^- rikkale Cl^- – HCO_3^- – Na^+ tüüpi veele, mis on valdavaks veetübiks Lääne-Eestis (joonis 2).

Vastavalt erinevatele uuringutele on fluoriidi ja boori sisaldus põhjavees sõltuvuses keskkonna pH-st (Lahermo ja Backman 2000; Saxena ja Ahmed 2003; Karro jt. 2006; Pennisi jt. 2006). Fluori ja boori adsorbeerumisel saviosakese pinnale toimub ioonvahetus vesilahuses oleva F^- ja B-ioonide ning savimineraalide struktuuris olevate OH-ioonide vahel. Adsorptsioon sõltub keskkonna pH-st, olles fluori puhul intensiivsem kergelt happelises keskkonnas (Saxena ja Ahmed 2003). Boori adsorptsioon toimub mõnevõrra kõrgemate pH väärtuste juures, kuna $\text{B}(\text{OH})^+$ osakaal suureneb aluselises keskkonnas (Gonfiantini ja Pennisi 2005; Pennisi jt. 2006). Desorptsioon on intensiivsem kergelt aluselises keskkonnas, seega suuremad F^- ja B sisaldused esinevad põhjavees, kus pH väärtused ulatuvad üle 7. Uuritud puurkaevude vee pH jääb vahemikku 6,76–8,48. Ülenormatiivsed F^- (1,5–3,0 mg/l) ja B (1,0–1,5 mg/l) väärtused esinevad põhjavees, kus keskkonna pH väärtus on veidi üle 7. Veelgi suuremate F^- ja B kontsentratsioonide korral tõusevad keskkonna pH väärtused üle 8.

Fluoriidide ja boori võimalikud loodulikud allikad põhjavees

Hem (1985), Lahermo ja Backman (2000), Mather ja Porteous (2001) ning Pennisi jt. (2006) tööde põhjal võib järeldada, et fluoriidide ja boori looduslikud allikad on üsna sarnased. Mõlemaid seostatakse eelkõige savikate setetega, vulkaanilise materjaliga ning hüdrotermaalsete protsessidega. Kivimitüüpidest esinevad F ja B peamiselt graniitides, karbonaatsetes kivimites ja evaporiitides. Valdav osa fluori ja boori on sedimentatsiooni käigus setetesse kuhjunud ning alluvad hilisematele geokeemilistele protsessidele, sattudes sel viisil põhjavette. Fluoriidide ja boori võimalikuks looduslikuks allikaks Eesti põhjavees võib pidada karbonaatsed kivimeid ning savikaid vulkaanilise tuha kihte (K-bentoniite), mis esinevad Eesti Siluri ja Ordoviitsiumi ladestu läbilõigetel vahekihtidena karbonaatkivimite vahel.

2008. aasta sügisel kogutud kivimiproovidest tehtud analüüsid näitasid, et karbonaatkivimid sisaldavad fluori ligikaudu 100–500 mg/kg ja boori 5–20 mg/kg, kusjuures nende elementide kontsentratsioonid on mõnevõrra kõrgemad dolomiitides. Lisaks eelnevale tõusevad F ja B kontsentratsioonid kivimis vastavalt savisisalduse suurenemisele (joonis 3), ulatudes merglites vastavalt 500–1000 mg/kg ja 30–140 mg/kg. K-bentoniidi



Joonis 3. F ja B sisaldus kivimiproovides sõltuvalt kivimitüübist. Karbonaatkivimite klassifikatsioon ainelise koostise järgi (Vingissaar jt. 1965 põhjal): A – lubjakivid, B – dolomiidid, C – merglid, D – domeriidid, E – savid.

kihtides esineb fluori 400–4500 mg/kg ning boori 50–350 mg/kg.

Varasemad leostuskatsed on näidanud, et fluori satub vette tuhost mitu korda rohkem kui karbonaatsete kivimite puhul. Lubjakivist ja dolomiidist leostus katsete käigus vette fluori 4–10 mg/kg, savikast dolomiidist 26,8 mg/kg ning K-bentoniidist 25–51 mg/kg. Katse teises astmes 0,5 M Tironiga leostus K-bentoniidist fluori 55–126 mg/kg (Haamer ja Karro 2006). Seega, K-bentoniidi kihid võivad olla üheks tõenäolisemaks fluoriidi allikaks põhjavees. Boori osas ei ole analoogseid leostuskatseid veel läbi viidud.

Detailsed uuringud F⁻ ja B sisalduste, hüdrogeokeemiliste seoste ja võimalike allikate kohta põhjavees on vajalikud, kuna tegemist on suurtes kogustes organismidele toksiliste elementidega. Uuringute tulemused on abiks uute tarbekaevude rajamisel, et vältida hilisemaid liigseid kulutusi veepuhastusele.

Tänuavaldused

Autorid tänavad abi eest PhD Andres Marandit ja MSc Kadri Haamerit, kes andsid oma panuse veeproovide võtmisel. Uurimus on valminud ETF grandit 7403 toel.

Kasutatud kirjandus

- Bunnell J.E., Finkelman R.B., Centeno J.A., Selinus O. 2007. Medical Geology: a globally emerging discipline. *Geologica Acta* 5 (3): 273–281.
- Centeno J.A. 2008. Editorial – Introducing a special theme issue on medical geology. *Journal of Environmental Monitoring* 10: 1391–1393.
- Council directive 98/83/EC – On the quality of water intended for human consumption. *Official Journal L 330*, 05/12/1998 P. 0032–0054.
- Gonfiantini R. ja Pennisi M. 2006. The behaviour of boron isotopes in natural waters and in water–rock interactions. *Journal of Geochemical Exploration* 88: 114–117.
- Haamer K. ja Karro E. 2006. High fluoride content of K-bentonite beds in Estonian Paleozoic carbonate rocks. *Fluoride* 39 (2): 132–137.
- Hem J. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper* 2254: 263.
- Joogivee kvaliteedi-ja kontrollinõuded ning analüüsimeetodid. 2001. SOMm RTL 100, 1369.
- Karro E., Indermitte E., Saava A., Haamer K., Marandi A. 2006. Fluoride occurrence in publicly supplied drinking water in Estonia. *Environmental Geology* 50: 389–396.

- Lahermo P. ja Backman B. 2000. *The occurrence and geochemistry of fluorides with special reference to natural waters in Finland. Report of Investigation 149*. Geological Survey of Finland, Espoo, 40 lk.
- Mather J.D. ja Porteous N.C. 2001. The Geochemistry and its isotopes in groundwaters from marine and non-marine sandstone aquifers. *Applied Geochemistry* 16: 821–834.
- Pennisi M., Bianchini G., Muti A., Kloppmann W., Gonfiantini R. 2006. Behaviour of boron and strontium isotopes in groundwater-aquifer interactions in Cornia Plain (Tuscany, Italy). *Applied Geochemistry* 21: 1169–1183.
- Perens R. ja Vallner L. 1997. Water-bearing formation. Rmt: Raukas, A., Teedumäe, A. (eds.). *Geology and mineral resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 137–145.
- Raukas A. ja Teedumäe A. 1997. *Geology and mineral resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 436 p.
- Saava A. 2003. *Joogivesi ja tervis*. Eesti Veeühing, 39 lk.
- Saava A. ja Indermitte E. 2005. Kas meie joogivesi võib tervist ohustada. *Eesti Loodus* 4: 16–19.
- Saxena V.K. ja Ahmed S. 2003. Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater. *Environmental Geology* 43: 731–736.
- Vingisaar P., Oraspõld A., Einasto E., Jürgenson E. 1965. *Karbonaat-kivimite ühtne klassifikatsioon ja legend*. Tallinn, 49 lk.
- WHO 2004. *Guidelines for drinking-water quality*. 3rd edn. World Health Organisation, Geneva, 515.

Marge Uppin (marge13@ut.ee) – Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu.

Enn Karro (enn.karro@ut.ee) – Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu.

Veekõrvalduse uuringud komplekssetes maardlates

Karin Robam

Sissejuhatus

Eestis tuleb maavarade kaevandamisel nii karjäärist kui kaevandusest kogu protsessi jooksul kogunev vesi kõrvaldada. Kunda Nordic Tsement AS põlevkivi- ja lubjakivikarjäärides reguleeritakse veetaset karjääri voolava vee juhtimisega settebasseini või veekogurisse, kust see suunatakse edasi jõgede kaudu merre. Antud piirkonnas suunatakse väljapumbatav vesi karjääride läheduses asuvasse Toolse jõkke, mis mõjutab teatud määral jõevee keemilist koostist ning veerežiimi. Toolse jõgi on kantud Eesti lõheliste elupaikade nimistusse. See nõuab aga veekogu pidevat jälgimist.

TTÜ Mäeinstituut on kahe viimase aasta jooksul uurinud Kunda Nordic Tsement AS põlevkivi- ja lubjakivikarjääridest väljapumbatava vee mõju Toolse jõevee keemilise koostise ja veehulga muutustele.

Veekõrvaldus Ubja ja Aru-Lõuna karjääridest

Ubja põlevkivikarjääris toodetakse põlevkivi üheks kütusekomponendiks tsemendi tootmisprotsessi tarvis. Põlevkivi kättesaamiseks maapõuest tuleb kaevandamisel tekkiv vesi karjäärist kõrvaldada. Põhiliseks väljapumbatava kaevandusvee allikaks on Ordoviitsiumi veekompleks. Ordoviitsiumi veekompleksi iseloomustab surveta Keila-Kukruse veekiht ja surveline Lasnamäe-Kunda veekiht. Lasnamäe-Kunda veekiht on keskmise paksusega 20 meetrit ja kaetud suhteliselt vettpidavate, ligikaudu 15 meetri paksuse Uhaku lademe savikate lubjakividega ning mergli vahekihtidega (Iskül jt. 2009).

Valdaval osal karjääri territooriumist on Kvaternaari setted ilma põhjaveeta ja moodustavad aeratsioonivöö (Lep8057). Karjääri kogunev vesi juhitakse karjääri madalaimasse osasse rajatud pumbajaama juures asuvasse veekogurisse (LISA joonis 1, kaardipunkt 1; LISA joonis 2), kust see pumbatakse edasi settebasseini (LISA joonis 1, kaardipunkt 1; LISA joonis 3).

Suurem osa kaevandusvees olevast heljumist settib ligikaudu 600-meetri pikkuses settebasseinis enne Toolse jõkke juhtimist. Suurvee ajal uhutakse aga osa heljumist siiski jõkke, sest heljumi mineraalosakesed on niivõrd väikesed, et suure voolukiiruse juures ei jõua kõik osakesed settebasseinis settida (LISA joonis 3).

Ordoviitsiumi veekompleks toitub Pandivere kõrgustiku toitealalt ja sademeist. Veealanduse mõjuraadius on Ubja põlevkivikarjääris jälgitav

ligikaudu 2–2,5 kilomeetri kaugusele (Kunda Nordic Tsement AS 2008; LISA joonis 4).

Aru-Lõuna lubjakivikarjääris kaevandatakse ehituslubjakivi ja tsemendi tootmiseks kasutatavat lubjakivi. Peamine väljapumbatava kaevandusvee allikas on samuti Ordoviitsiumi veekompleks.

Lõuna-Aru karjäärivesi kogutakse karjääri põhja rajatud kraavide kaudu veekogurisse (LISA joonis 6). Settetiik on paigutatud karjääri madalaima koha vahetusse lähedusse. Vesi suubub pärast settebasseini läbimist ja vee väljapumpamist mööda 200 m pikka ning 0,6 m laia kanalit Toolse jõkke (LISA joonis 1, kaardipunkt 1; LISA joonis 7). Veealanduse mõju-raadius on Aru-Lõuna lubjakivikarjääris jälgitav ligikaudu 2,5-kilomeetri kaugusele (Kunda Nordic Tsement AS 2008; LISA joonis 5).

Metoodika

Veeseadus määratleb heitvett kasutusel olnud ning loodusesse tagasi juhitava veena. Seega, kaevealalt loodusesse ärajuhitav vesi on heitvesi (Veeseadus 2009). Kunda Nordic Tsement AS karjääridest väljapumbatava vee mõju hindamiseks Toolse jõe veerežiimile ja vee kvaliteedile on viimase kahe aasta jooksul kord kvartalis teostatud regulaarselt välitöid.

Vooluhulga määramine jões ning saadud tulemuste võrdlemine karjääridest väljapumbatud veekogustega annab ettekujutuse karjäärivee osalusest Toolse jõevees. Vooluhulga määramisel on kasutatud kaasaegset



Joonis 8. Vooluhulga määramine Toolse jões kaasaegse tiivikuga Universal Current Meter F1.

tiivikut Universal Current Meter F1 (joonis 8). Vooluhulga määramiseks voolusäangi lävendites tuleb mõõdistada voolusäangi ristlõige ja tiiviku pöörded erinevatel kiirusvertikaalidel – ühel vertikaalil mõõdetakse voolukiirus mitmel sügavusel teatud kindla vahekaugusega. Mõõtepunktide arv sõltub jõe sügavusest ja vertikaalide arv jõe laisusest (Lep7079).

Tulemused

Toolse jõe vaatlusvõrku kuulunud lävendid annavad hea ettekujutuse jõevee režiimi muutustest ja kaevandusvee osalusest. Kuival ajal on Toolse jõgi ülevalpool Ubja karjääri veeta ning saab alguse karjäärist välja-pumbatavast veest (LISA joonis 9).

Viimase nelja aasta andmetel on Ubja põlevkivikarjäärist välja pumbatud keskmiselt 180 liitrit vett sekundis. Vooluhulga määramine allavoolu karjääri väljavoolu Toolse jões näitab, et vooluhulk jões on väiksem kui karjäärist väljapumbatud maht – keskmiselt 160 l/s. See on tingitud kaevandusvee imbumisest läbi settebasseini seinte karjääri tagasi (LISA joonis 4). Selles olukorras tasuvad kaevandajad suuremaid keskkonnatasusid, makstes pumpade töösüklite järgi. Olukorra lahendamiseks on Ubja põlevkivikarjääri väljavoolule paigaldatud uus mõõtesüsteem (LISA joonis 1, kaardipunkt 2), mis lihtsustab ärastatud veehulga määramist ning vähendab tulevikus kaevandajapoolseid kulusid.

Viimase nelja aasta andmete põhjal pumbatakse Aru-Lõuna lubjakivikarjäärist vett välja keskmiselt 310 l/s, mis juhitakse Toolse jõkke. Mõni kilomeeter Aru-Lõuna lubjakivikarjääri väljavoolust allavoolu väheneb vooluhulk jões. Vooluhulga vähenemine on tingitud sealsetest lõhelistest aluskorra kivimitest ning soisest alast. Mõõda lõhelisi kivimeid imbub osa veest lubakivikarjääri tagasi ning osa valgub soisesse lammi.

Lisaks Ubja põlevkivi- ja Aru-Lõuna lubjakivikarjäärile toitub Toolse jõgi ka lisajõgedest ning Ubja suletud põlevkivikaevandusest iseeneslikult Toolse jõkke suubuva vee arvelt.

Toolse jõgi on kantud Eesti lõheliste elu- ja kudemispaikade nimistusse, mis nõuab jõevee pidevat jälgimist. Olulisemateks komponentideks karjäärivees, mis muudavad Toolse vee kvaliteeti, on aeg-ajalt sademeterikkal perioodil esinev vee hägusus (heljumi lubatust kõrgem sisaldus; LISA joonis 11) ning mõnevõrra suurem sulfaatide (SO_4^{2-}) kontsentratsioon (LISA joonis 10).

Veekõrvaldusega kaasnev alanduslehtri kujunemine karjäärade ümber on vee keemilise koostise kujunemisel oluliseks teguriks. Suurenenud aeratsioonivõos intensiivistuvad keemilised protsessid, mis leiavad aset õhu kokkupuutel kivimitega. Üheks selliseks protsessiks on püriidi lagunemine,

mille tulemusena suureneb sulfaatide sisaldus põhjavees ja selle tulemusena ka karjäärdest väljapumbatavas vees (LISA joonis 10).

Aeg-ajalt ületavad Toolse jõevees kalakasvatusele soovituslikke piire heljumi ja sulfaatide sisaldus, kuid valdavalt vastab jõevesi pinnavee I „väga hea” ja harvem II klassi „hea” nõuetele. Jõe alamjooksul muudab vee seisundit kõrgem fosforiühendite (PO_4^{2-}) sisaldus, kuid see ei ole seotud maavarade kaevandamisega (LISA joonis 12).

Kokkuvõte

Pidev jõevee seire ning karjäärdest väljapumbatava vee mõju hindamine ümbritsevale keskkonnale annab hea ettekujutuse kaevandamise mõjust ümbritsevale loodusele. Andmestik on vajalik, et garanteerida piirkonnas elavate inimeste ohutus, arendada säästlikku ja keskkonnale sõbralikku kaevandamist ning vähendada maavarade kaevandamisega seotud mõjusid.

Karjäärivee pidev väljapumpamine AS Kunda Nordic Tsemendile kuuluvatest Ubja põlevkivi- ja Aru-Lõuna lubjakivikarjäärist parandab Toolse jõevee režiimi ja hoiab vee nivoo vee-elustikule vajalikul tasemel. Kuival ajal saab Toolse jõgi alguse Ubja põlevkivikarjäärist väljapumbatavast veest. Lisaks Ubja ja Aru-Lõuna karjäärile toitub Toolse jõgi lisajõgedest ning Ubja suletud põlevkivikaevandusest isevooluna Toolse jõkke suubuva vee arvelt.

AS Kunda Nordic Tsemendi karjäärdest väljapumbatav vesi ei muuda oluliselt Toolse jõevee keemilist koostist. Mõningane vee hägusus on suurveeperioodil põhjustatud ülemäärasest heljumi sisaldusest, sest kiire voolu ja kõrgema vooluhulga juures kantakse osa karjääriveest settebasseini settinud ainet jõkke. Üldiselt vastab Toolse jõe vesi veeklasside I „väga hea” ja II „hea” nõuetele.

Tänuavaldused

Artikkel on seotud TTÜ Mäeinstituudi teadus- ja arendustööga ning ETF grantidega 7499 „Säästliku kaevandamise tingimused” ja 6558 “Mäendusriskide haldamise kontseptsioon ja meetodid”.

Kasutatud kirjandus

Iskül R., Kaeval E., Robam K., Sõstra Ü., Valgma I. 2009. Ubja põlevkivikarjääri ärastusvee päritolu ja koguse määramine. *Keskkonnatehnika* 3: 34–36.

- Kunda Nordic Tsement AS. Heidelberg Cement Group. 2008. *Keskkonnaülevaade nr 18*. Kunda.
- Lep7079. 2008. *Kunda piirkonna ja Toolse jõevee ning põhjasetete seire 2007*. TTÜ Mäeinstituut, lk 63.
- Lep8057. 2009. *Kunda piirkonna ja Toolse jõevee 2008*. TTÜ Mäeinstituut, lk 72.
- Veeseadus. 2009. <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=13198942>
[15.09.2009]

Karin Robam (karin.robam@ttu.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

Veesooned Eesti paeses aluspõhjas

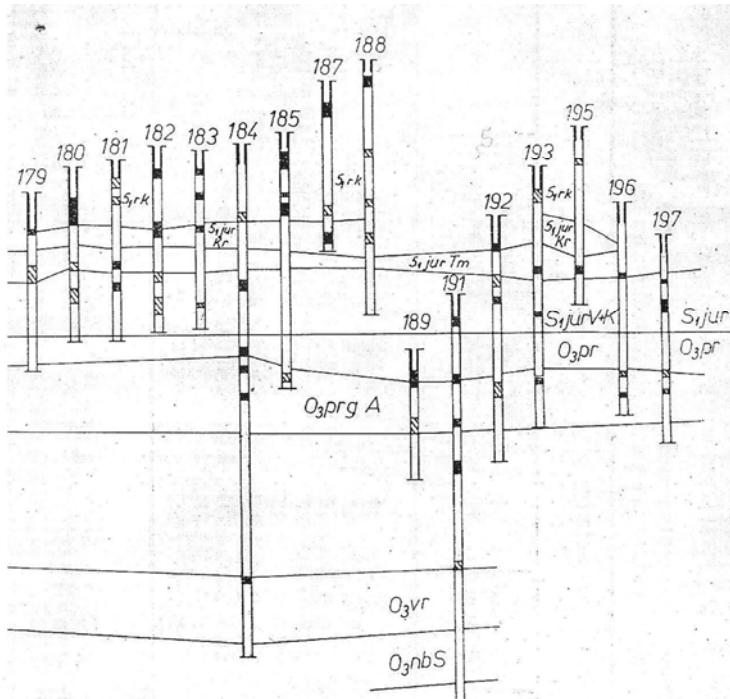
Rein Perens

Eesti paekivikihtide (lubjakivid, dolomiidid) veerikkus sõltub peamiselt lõhede (tektoonilised, murenemis- ja kihilislõhed) ja karstiõõnsuste rohkusest. Sademetevee infiltratsiooni aluspõhja kivimitesse soodustavad rohked enamvähem vertikaalsed lõhed murenemisvöös. Olenevalt kivimite litoloogilisest iseloomust ja ala geomorfoloogilisest asendist ulatub see vöönd enamasti 1–3 m sügavuseni, harvem 5–10 m sügavuseni. Mõnikord on murenemisvöö lõhed tugevasti karstunud, moodustades karstitühemeid ja -kanaleid. Tinglikult võikski neid nimetada maa-alusteks jõgedeks.

Viimastel aastatel on ajakirjanduses palju poleemikat tekitanud nn. “maa-aluste jõgede” esinemine Nabala piirkonnas. Hüdrogeoloogid ei eita pendli- või vitsameeste võimeid leida veesoonte asukohti, kuid meetodika, kuidas need pendlimõõtmispunktid on omavahel salajõgedeks ühendatud, on ülimalt spekulatiivne. Keerulise konfiguratsiooniga salajõgede looked ei sobi kuidagi kokku põhjavee liikumise üldiste seaduspärasustega mööda aluspõhjakivimite lõhedesüsteeme. Maapinnalähedased, valdavalt vertikaalsed lõhed, võivad tänu nende suuremale veesisaldusele mõjutada küll inimese biovälja ja selle kaudu kas vitsa või pendli liikumist, kuid paraku kehtib see ainult maapinnalähedaste veesoonte kohta.

Valdav osa Põhja- ja Kesk-Eesti suurkaevudest saab oma vee sügavamatest kihtidest, mille esinemise üle vitsameetodiga otsustada ei saa. Lõheliste karbonaatkivimite veerikkuse uurimiseks on põhiliselt kasutatud puuraugusisest vooluhulga-karotaaži meetodit. Kivimite veeandvus ei ole seotud mitte niivõrd kivimi enda koostisega, kuivõrd paekivikihtide vahel esinevate lõhedega. Just horisontaalseid kihtidevahelisi lõhesid, kust vesi kaevu tuli, hakkasid vanad puurmeistrid ja nende järel ka kohalikud elanikud nimetama **veesoonteks**. Vooluhulga-karotaaž on geofüüsikaline meetod, mis puuraugu vertikaalse veevoolu mõõtmise kaudu võimaldab täpselt määrata veesoone sügavust maapinnast, selle veerikkust ja teisi parameetreid. See meetod võimaldab vaadelda veesoonte esinemist Eesti paese aluspõhja kõikides stratigraafilistes ühikutes ja litoloogilistes erimites (joonis 1).

Tavaliselt kivimite välisilmes veesoonte esinemine ei kajastu. Mõnikord on aga puuraugu vettandva intervalli (veesoone) ümbruse kivimitel puursüdamikus näha selgeid karstumise tunnuseid. Puuraukude vaatlemisel televiisorisondiga on selgunud, et enamasti on veesooned päris kitsad (2–3 mm, harvem 10–30 mm), kihipindadega paralleelsed lõhed.

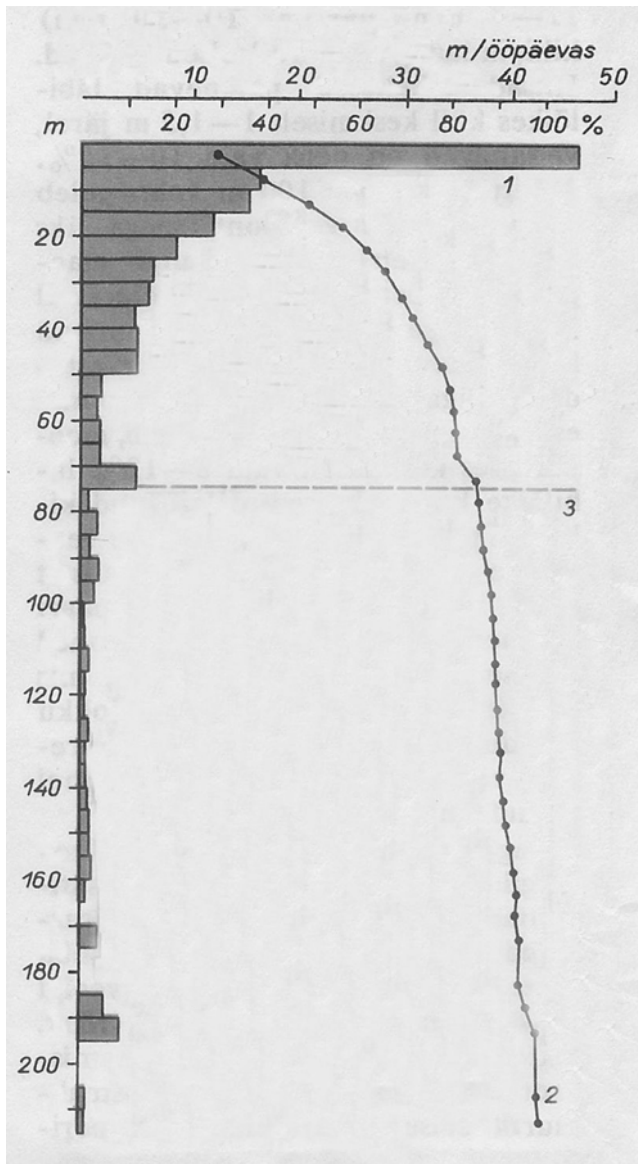


Veesoonte paiknemine hüdrokeoloogilises läbilõikes (tingmärgid puuraukudes: must ala - vee juurdevool, viirutatud ala - vee neeldumine).

Joonis 1. Veesoonte paiknemine Pandivere kõrgustiku puuraukudes.

Kitsad lõhed paiknevad puuraugu läbilõikes küll keskmiselt 1–1,5 m järel, kuid vettandvaid on neist vaid 10–15%. Keskmiselt tuleb 100 m kohta viis veesoont, seega üks iga 20 meetri kohta. Kuigi maapinnalähedastes kihtides hõlmavad veesoontega kihid kohati 25% uuritud kihtide kogupaksusest, tuleb arvestada, et sügavuse suurenedes veesoonte esinemissagedus järsult väheneb, moodustades keskmiselt vaid 8–12% läbilõike kogupaksusest. Ülejäänud kihid on peaaegu veetud. Üksikute veesoonte levik ei ole pindalaliselt kuigi hästi määratletav – juba paari kilomeetri kaugusel võivad veesooned paikneda sellises läbilõike osas, mis naaberpuuraukudes on veeta. Kokku moodustavad mingi piirkonna veesooned suuremal või vähemal määral omavahel seotud ühtse veekompleksi.

Sageli esinevad veesooned erisuguse stratigraafilise kuuluvuse ja litoloogilise koostisega kihtide kontaktikohtades. Ilmselt on kihilisuslõhede



Joonis 2. Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleksi veejuhtivuse sõltuvus kivimite lasumussügavusest.

kujunemisele oma mõju avaldanud juba kunagised paleogeograafilised tingimused, veelgi rohkem aga hilisemad välisjõud (rõhk, tektoonilised liikumised, murenemisprotsessid). Koostiselt ja struktuurilt erisugused kivimid reageerisid neile erinevalt, mistõttu tekkisidki avatud lõhed kihipindadele.

Vastavalt veesoonte esinemissagedusele ja kihtide filtratsiooniomadustele on hüdrogeoloogilises läbilõikes tinglikult võimalik eristada vettandvaid, lokaalselt vettandvaid ja nõrgalt vettandvaid (suhteliselt vettpidavaid) kihte. Märgatavalt erinevad on kihtide vertikaalne ja horisontaalne veejuhtivus. Kui horisontaalne veejuhtivus (filtratsioonikoefitsient) on maapinnalähedastes kihtides keskmiselt 20–50 m/ööpäevas, ulatudes üksikutes kihtides 100–200 m/ööpäevas, siis risti kihipindadega on filtratsioonikoefitsiendi suuruseks arvatatud 10^{-5} – 10^{-2} m/ööpäevas.

Veelgi rohkem kui kivimite litoloogiline koostis ja tekstuuriilised iseärasused mõjutab veejuhtivust kihtide lasumussügavus. Rohkem kui 300 hüdrogeoloogilises uuringu- ja kaardistamispuuraugus tehtud vooluhulgarootaž on näidanud, et karbonaatse kompleksi ülemise 20 meetri filtratsioonikoefitsient kõigub enamasti 10–50 m/ööpäevas. 20–50 meetri sügavusel väheneb see 5–8 m/ööpäevas ja 50–100 meetri sügavusel 1–2 m/ööpäevas. Sellest sügavamal lasuvate kihtide filtratsioonikoefitsient ei ületa tavaliselt üht meetrit ööpäevas ja neid võib üldjuhul vaadelda kui nõrgalt vettandvaid kihte. Kuna 75 meetrist sügavamal lisandub väga vähe veesooni, siis võib seda sügavust pidada ka kogu paese aluspõhja kõige veerikkama osa tinglikuks piiriks (joonis 2).

Veesoonte otsimine on hüdrogeoloogiliste uuringute üks tähtsamaid tööliike. Veesoonte esinemisest ja veerikkusest sõltub linnade ja asulate veehaarete asukohtade valik ning puurkaevude optimaalsed sügavused. Veesoonte levik määrab oluliselt ära ka põlevkivikaevanduste ja pae-karjäärade kaevandamistingimused.

Rein Perens (perens@egk.ee) – Eesti Geoloogiakeskus OÜ, Hüdrogeoloogia osakond, Kadaka tee 82, 12618 Tallinn.

Kivimite mõju elusloodusele *ehk* kuidas geoloogia, geokeemia, keemia ja bioloogia põimuvad meid ümbristesvas looduskeskkonnas

Ülo Sõstra

Keemilisi elemente ei ole eriti palju, pisut üle 110, kuid enam-vähem püsivateks on neist 92. Üle 1% sisaldab maakoost vaid üheksat elementi. Tuntud Peterburi mineraloogi A.G. Bulah'i (2002) andmetel on nende sisaldus aatomprotsentides järgmine: hapnik (O) – 53,39%, vesinik (H) – 17,25%, räni (Si) – 16,11%, alumiinium (Al) – 4,8%, naatrium (Na) – 1,82%, magneesium (Mg) – 1,72%, kaltsium (Ca) – 1,42%, raud (Fe) – 1,31% ja kaalium (K) – 1,05%. Kui neile lisada veel kolm elementi, mille sisaldus ületab 0,1%: süsinik (C) – 0,51%, titaan (Ti) – 0,22% ja kloor (Cl) – 0,10%, siis need 12 elementi moodustavad 99,69% maakoorest. Kõigile ülejäänutele, neid on 80, jääb vaid 0,31%. See näitab, kui eba-võrdne on keemiliste elementide jaotus maakoostes ja millistest elementidest võiks planeedil Maa olla üles ehitatud elusloodus. Ette rutates tuleb siiski öelda, et osa enamlevinud elementidest ei kuulu eluks kõige vajalikumate keemiliste elementide hulka.

Lühidalt uuringute ajaloo

Kivimite mõju taimestikule on teada kaugest minevikust, sest põldude jaoks hakati alati valima maalappe, kus taimed kõige paremini kasvasid. Karjalas on püüasustuse ja põllumajanduse algaastatest, umbes 2000 a. tagasi, elukohaks valitud ainult selliseid alasid, kus aluspõhja kivimiteks on 2,0 miljardi aasta vanused Proterosoikum vulkaanilised ja settelised kivimid, viimaste seas ka dolomiitsed marmorid. Ilmselt oli juba siis põliselanikele teada, et sellistel aladel kasvasid põllukultuurid paremini ja heinamaad olid lopsakamad. Karbonaatsete kivimite mõju taimede liigirikkusele Soomes märkis ära 80 aastat tagasi botaanik V.A. Pesola (1928). Venemaa Teaduste Akadeemia Karjala Teaduskeskuses möödunud sajandi lõpul läbiviidud kompleksed uuringud näitasid, et neil aladel on vajalike elementide kontsentratsioon muldades kõige soodsam ja alade elustik on kõige mitmekesisem (Gromtsev jt. 2003).

Varasematest tulemustest on eriti olulised sõjajärgsetel aastatel Suurbritannias tehtud uuringutes välja selgitatud erinevate keemiliste elementide osa elusorganismides ja teatud elementide kõrgete kontsentratsioonide ohtlikkus loomadele ja taimedele. Töid alustati pärast seda, kui kogu riigi territooriumil otsustati läbi viia raskete haiguste leviku statistiline analüüs. Tulemused olid ootamatud.

Selgus, et Edela-Inglismaa elanikud põdesid vähkhaigusi keskmiselt kuus korda sagedamini, kui teistes piirkondades elavad inimesed. Kuna looduslikud tingimused olid naaberrajoonidega sarnased, aga geoloogiline ehitus mõnevõrra erinev, siis arvati, et põhjus võib peituda aluspõhja kivimite ja muldade erilises koostises. Ajalooliselt on see ala olnud oluline veise- ja lambakasvatuse piirkond ning varemgi oli täheldatud arusaamatuid noorloomade tervisehäireid ja surmajuhtumeid. Asi oli nii tõsine, et loodi spetsiaalne multidistsiplinaarne Briti riiklik uurimisrühm, kuhu kaasati geokeemikud, mullateadlased, keemikud, hüdroteoloogid, veterinaarid ja kohalikud arstid. Töid rahastasid riiklikud loodusliku keskkonna ja põllumajandusuuringute nõukogud (Webb 1983).

Töö tulemusena valmisid detailsed geokeemilised kaardid kogu Suurbritannia ja eraldi üksikute provintside kohta, mis võimaldasid välja selgitada haigestumiste põhjuseid. Vähihaiguste sagedane levik oli Edela-Inglismaal seotud Paleosoikumi mustade kiltadega, mis, nagu meie Ordoviitsiumi ladestu Türisalu kihistu kerogeensed argilliidid (tabel 1), sisaldavad ohtlike raskmetallide jt. elementide kõrgeid kontsentratsioone. Kivimite murenemisel satuvad need muldadesse, sealt edasi taimedesse, loomatoitudesse ja loomade organismi. Inimorganismi satuvad ohtlikud elemendid toiduahela mullad–taimed–loomad–loomne ja taimne toit või joogivee kaudu. Hilisemad uuringud näitasid, et isegi kuivatatud heinas oli rea elementide sisaldus 3–5 korda piirnormidest suurem. Väljapääs leiti selles, et osa kuivatatud heina vahetati välja heina vastu aladelt, kus nende elementide sisaldus oli allpool optimaalset piiri.

Uuringute käigus tehti kindlaks need keemilised elemendid, mis on vajalikud taimede ja loomade kasvuks ning normaalseks arenguks (Thornton 1983).

Ohtlike elementide kontsentratsioonide piiramine seadustega

Geokeemilisi uuringuid alustati möödunud sajandi 50–60-ndatel aastatel USA-s, Kanadas, Austraalias, Nõukogude Liidus, Uus-Meremaal ja teistes riikides. Nende tööde tulemusel on välja selgitatud, milline peab olema mulla ja põhjavee keemiliste elementide kontsentratsioon, mis tagaks taime- ja loomariigi normaalse eksisteerimise ja arengu ning võimaldaks inimestel elada tervislikus keskkonnas. Vaatluse alla võeti ka tööstuslikud protsessid, nagu maakide rikastamine, galvanimine, olmeprügi ja tehnoloogiliste jäätmete ladustamine jt., mille juures võib toimuda keskkonna saastamine raskmetallide või teiste ohtlike elementidega. Nüüdseks on enamus riike seadustega kinnitanud ohtlike elementide kontsentratsioonid elamute piirkonnas, põllumaadel ja tööstuspiirkondades.

Tabel 1. Karjala (1–7) ja Eesti (8–11) enamlevinud kivimite makroelementide oksiidide (kaalu-%) ja mikroelementide (mg/kg) sisaldus.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	76,50	46,00	1,04	41,63	51,14	57,20	64,26	52,14	59,24	95,10	4,84
TiO ₂	0,21	0,38	0,04	0,79	1,64	0,98	0,21	0,76	0,88	0,23	0,08
Al ₂ O ₃	11,80	7,30	0,25	5,33	12,08	14,07	3,20	13,15	17,38	1,81	1,10
Fe ₂ O ₃	1,99	12,30	1,59	4,35	5,49	1,21	0,28	0,85	4,29	0,11	0,06
FeO	e.m.	e.m.	–	7,40	9,63	8,62	0,98	3,02	2,60	1,33	0,44
MnO	0,02	0,19	0,24	0,23	0,24	0,15	0,03	0,03	0,04	0,01	0,06
MgO	0,14	26,10	21,38	27,06	4,87	4,09	0,35	1,11	2,58	0,05	0,85
CaO	0,62	5,88	28,72	3,87	7,87	5,98	0,21	0,22	0,84	0,05	50,51
Na ₂ O	3,05	1,62	0,05	0,07	1,73	4,92	0,13	0,10	0,13	0,07	0,08
K ₂ O	5,24	0,22	0,01	0,02	1,12	0,63	1,09	7,95	5,84	1,03	0,51
P ₂ O ₅	0,02	0,06	0,15	0,15	0,22	0,19	0,07	0,15	0,31	0,02	0,42
Cl	150	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.	200	500	100	300
Cr	170	3507	7	1680	27	34	128	200	78	31	9
Cu	7	e.m.	24	32	800	32	24	105	25	10	3
Ni	4	1138	16	1493	55	63	63	98	40	9	4
V	10	137	67	168	319	117	217	507	109	11	9
Zn	20	e.m.	72	803	128	80	16	47	176	4	4
Mo	1	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.	56	<2	<2	<2
Co	e.m.	107	16	95	55	47	–	12	20	2,6	1,8
As/B	As-	e.m.	e.m.	e.m.	/ B-	190	e.m.	37	1,3	23	21
S	e.m.	e.m.	100	–	–	–	900	21900	1300	100	1200

Kivimid: 1 – graniit, Nuorunen; 2 – komatiitbasalt, Vodlozero rahvuspark; 3 – dolomiitne marmor, Pjalozero; 4 – pürokseniit, Kontšozero; 5 – gabrodiabaas, Hirvas; 6 – andesiitbasalt, Kumsa; 7 – shungiitkilt, Tolvuja; 8 – kerogeenne argilliit, Tallinn; 9 – sinisavi, Kunda; 10 – liivakivi, Taevaskoja, Ahja; 11 – lubjakivi, Tallinn.

Eestis on keskkonnaministri määrusega nr. 12, 2. aprillist 2004. aastal määratud ohtlike elementide siht- ja piirarvud. **Sihtarv** on ohtliku aine sisaldus pinnases või põhjavees, millega võrdse või väiksema väärtuse puhul on pinnase või põhjavee seisund hea ehk inimesele ja keskkonnale ohutu. **Piirarv** on ohtliku aine sisaldus pinnases või põhjavees, millest suurema väärtuse puhul on pinnas või põhjavesi reostunud ning inimeste tervisele ja keskkonnale ohtlik. Need arvud võimaldavad hinnata keskkonna ohutust ning elukõlblikkust reostunud või looduslikel aladel, kus ohtlike elementide kontsentratsioon nõuab kontrollimist, nagu nt. Eestis kerogeense argilliidi esinemisala.

Makro- ja mikrobiogeensed elemendid

Keeruliste ja pikaajaliste uuringute käigus on kindlaks tehtud, et taimede ja loomade normaalseks eluks ning arenguks on vaja tervet rida keemilisi elemente, mida hakati nimetama biogeenseteks. Taimed saavad neid toiteelemente õhust, mullast ja põhjaveest, loomad aga põhjaveest, taimsest ja loomsest toidust. Ka inimene, kui loomariigi esindaja, allub kõikidele üldistele looduse seadustele. Keemilisi elemente, mida vajatakse suurel hulgal, sest neist ehitatakse üles rakud ja koed, on hakatud nimetama **makrobiogeenseteks**. Taimede jaoks on sellisteks elementideks O, H, C, P, S, N, Na, K, Ca ja Mg; elusorganismid vajavad lisaks veel rohkelt kloori (Cl) (Thornton 1983). Cl⁻ anioon mängib kesket osa loomade ja, nagu selgub, ka taimede osmootses süsteemis (Merian jt. 2004). See ongi põhjuseks, mis meile ei maitse mage toit ja loomad on nii maiad soola peale. Vähe sellest, Eesti jahimehed teevad soolakuid, kus Taanist toodud sool sisaldab lisaks veel kõiki vajalikke mikroelemente. Neid metsloomi võib kadestada, sellist soola poest inimestele osta veel ei saa, kuigi mõningate lisanditega on see müügil olemas.

Elementide sisaldus muldades sõltub aluspõhja kivimitest ja erineb piirkonniti oluliselt. Näiteks Eestis kõigub mulla kaltsiumisisaldus humus-horisondis 0,2 kuni 8 protsendini (Petersell jt. 1997). Selle põhjuseks on aluspõhja kivimite erinev koostis: Pärnu–Narva joonest loodesse jääva ala aluspõhi koosneb Ordoviitsiumi ja Siluri ajastu lubjakividest, mis on kaltsiumirikkad. Nende seas on ka dolokive, mis sisaldavad kuni 21% MgO. Kagupoolse osa aluspõhi koosneb peamiselt Devoni liivakividest, nende SiO₂ sisaldus ületab sageli 95% ja teistele elementidele pole kivimites kuigi palju kohta (tabel 1). Siin on mullad kaltsiumivaesed ja on probleeme elanikkonna hammastega.

Mikrobiogeenseid elemente on vaja vähem, tavaliselt mikrogrammidest kuni milligrammideni ööpäevas, kuid nad on olulised vere-loome, sisenäärmete ja elutegevuse üldise reguleerimise seisukohalt. Sellisteks elementideks on As, Al, B, Ba, Br, Cd, Cr, Cl, Co, Cu, F, Fe, I, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Se, Si, Sn, Sr, V, W, Zn. Suurem osa neist on tavaelus kasutatavad metallid või elemendid: Fe, Mn, Cu, Ni, V, Sn, Zn, Co, Mo, B, I, teised on haruldasemad: As, Se, Si, F jt. Viimasel ajal on katsetega rottidel ja kitsedel välja selgitatud haruldasi elemente, mis mõjutavad loomade arengut (Merian jt. 2004). Enamus mikroelemente on potentsiaalselt mürgised, seetõttu on neile paljudes riikides kindlaks määratud sihtarvud ja piirarvud. Eestis on Keskkonnaministri 02.04. 2004. aasta määrusega nr. 12 antud piirväärtused järgmiste elementide kohta: Hg, Cd, Pb, Zn, Ni, Cr, Cu, Co, Mo, Sn, Ba, Se, V, Sb, Tl, Be, U, F, As ja B.

Biogeensete elementide vähesus

Üldiselt on teada, et joodi (I) puudumisel toidus ja joogiveses haigestub kilpnääre, eriti sageli kõrgmägedes, kus juuakse lume sulavett. Juba vanad roomlased kasutasid selle raviks merevetikaid, aga Eestis on müügil joodiga rikastatud soola. Fluori vähesus ei võimalda näiteks moodustada kvaliteetset hammaste emaili.

Siiani on küll kindlaks määratud maksimaalsed ohutud mikroelementide sisaldused, kuid praktiliselt puuduvad andmed biogeensete elementide minimaalsete kontsentratsioonide kohta muldades ja põhjavees. Neist kontsentratsioonidest allpool ei saa organism või taim elementi küllaldaselt ning vastavates piirkondades levivad rasked endeemilised haigused. Näiteks vase defitsiit põhjustab kesknärvisüsteemi kahjustusi, tsingi puudumine kaasasündinud arenguhäireid, mangaani vähesus suhkruhaigust jne.

Vaid üksikute elementide kohta on kindlaks tehtud nende minimaalsed vajalikud kontsentratsioonid muldades. Koobalti jaoks on sellisteks sisaldusteks, sõltuvalt elemendi esinemisvormidest, 2–7 milligrammi ühes kilogrammis kuivas materjalis (mg/kg), vasel 6–15 mg/kg, tsingil 30 mg/kg, molübdeenil 1,5 mg/kg, joodil 2–5 mg/kg ja booril 3–6 mg/kg. Strontsiumil ei ole teada alumist piirnormi, kuid ülemiseks loetakse 10 mg/kg. Mangaani minimaalseks sisalduseks, mille juures ei ilmu haiguslikud nähtused inimestel ja loomadel, loetakse 400 mg/kg (Trofimov 2000). Eestis on sellise või kõrgema Mn-sisaldusega ainult üks kolmandik territooriumist. Eriti madal on mangaani kontsentratsioon Hiiumaal, suurel osal Saaremaast, Läänemaal, Pärnumaal, Peipsi järve kallastel ja Kagu-Eestis (Petersell jt. 1997). Suhteliselt kõrge Mn-sisaldus on Kesk-Eesti muldades, kuid kusagil ei ületa see piirväärtust – 3000 mg/kg (Trofimov 2000). Eestis mangaanile sihtarvu ja piirarvu ei ole määratud, kuid madal Mn-kontsentratsioon muldades võib olla üheks suhkruhaigete suure arvukuse põhjuseks, sest Mn on vajalik suhkru lagundamiseks organismis (Orru ja Orru 2003).

Patoloogilisi kõrvalekaldumisi arengus võivad põhjustada mitte ainult teatud elementide üleküllus või puudus, vaid ka teatud elementide, nagu Sr ja Ca, Ca ja P, Mo ja Cu, ning paljude teiste elementide omavaheliste tasakaalude rikutus. Eriti ohtlik on strontsiumi kõrge kontsentratsioon kaltsiumi vähesuse korral.

Taimestiku liigirikkuse sõltuvus geograafilistest laiuskraadidest ja päikeselt saadavast soojushulgast

Bioloogilist mitmekesisust parasvöötmes ja põhjapoolsetel aladel seostatakse päikesest saadava soojusenergiaga, lõunapoolsetel aladel aga niiskuse ja sademete hulgaga. Sellises üldises seaduspärasuses on erandid, mis eriti selgelt tulevad välja Põhja-Euroopa polaaraladel, kus põllumajandusega ei tegeldud ja seepärast säilisid looduslikud territooriumid.

Ida-Euroopas on liigirikkuse seos ala geograafilisest laiuusest ilmne – põhja poole liikudes väheneb päikese soojushulk ja väheneb kiiresti taimeliikide arv. Belovežje rahvusparkis Poolas (54° N) on teada 2000 soontaime, Lahemaa rahvusparkis umbes 1200 (59° N), Laadoga loodekaldal (61–62° N) 800 liiki, Kostamukša looduskaitsealal (64° N) 420 liiki ja Teravmägede saartel (77–81° N) ainult 150 liiki.

Analoogselt väheneb ka sammalde ja samblike liigirikkus ning taimestiku muutustega väheneb loomariigi mitmekesisus. Kuid see seaduspärasus ei pea alati paika. Näiteks Paanajärve ja Oulanka kaitsealasel territooriumil (66°30' N) on teada 600 liiki soontaime, aga 250 km lõunapoolse jääval Kostamukša kaitsealal on ainult 420 liiki. Vodlozero rahvusparkis (62–63° N) on ka teada 420 liiki, aga selle kõrval asuvas Kenozero rahvusparkis Arhangelski oblastis Venemaal, kus aluspõhi koosneb settelistest karbonaatsetest kivimitest, on liikide arv umbes 700. Erakordselt suur liigirikkus iseloomustab Malla loodusparki (LISA joonis 1) Kilpisjärve lähedal Lapimaal (69° N), mis moodustati 1916. aastal ja oli esimene Soome kaitseala. Siin on teada 477 soontaime liiki. Kõik haruldased liigid on väga nõudlikud muldade suhtes ja esinevad vaid seal, kus on olemas kõik vajalikud toiteained.

Taimestiku liigirikkuse sõltuvus aluspõhja kivimitest ja muldade koostisest

Geoloogilise ehituse ja kivimite koostise uuringud Karjalas ja Põhja-Soomes näitasid, et suure bioloogilise mitmekesisusega on alad, kus aluspõhja kivimite koostis on varieeruv (tabel 1) ja esinevad nii sette-kivimid, intrusiivsed kui vulkaanilised magmakivimid ning karbonaatsed kivimid. Seejuures pole tähtis, kas karbonaatne materjal on magmalise (karbonaatiidid) või settelise päritoluga (lubjakivid, dolokivid, merglid, domeriidid, marmorid) (Läänelaid ja Sõstra 2003; Systra 2004). Karjalas on eriti liigirikkad Paanajärve rahvuspark, Kivatši looduskaitseala, Zaohežje poolsaar Äänisjärves ja Laadoga loodepoolne kallas; Põhja-Soomes Malla looduspark, Saana ja Annjalonnja looduskaitseala ning Oulanka rahvus-

park. Kui suured alad on kaetud nõ. sobivate aluspõhja kivimitega, siis Kvaternaari setetes nende kivimite mõju moreenis ulatub väljapoole vastavate geoloogiliste struktuuride piire jää liikumise veel kuni 5 km edasi.

Eesti territooriumi geokeemiline omapära seisneb raskemetallide väga väikestes ja eriti väikestes kontsentratsioonides (Petersell jt. 1997). Ühelt poolt puudub neist tulenev oht, aga teiselt poolt on kontsentratsioonid (eriti Sn, Cu, Mn) liiga väikesed, et rahuldada nõudeid taimede ja loomade normaalseks kasvuks ja arenguks. Põhjuseks on aluspõhjas magmaliste kivimite puudumine, välja arvatud õhukesed vulkaanilise tuha vahekihid Ordoviitsiumi ja Siluri settekivimites. Need küll tõstavad kohati fluori taseme põhjavees üle joogiveele lubatud piiri (1,5 mg/l), kuid ei rikasta muldasid vajalike raskemetallide jt. elementidega.

Taimestiku ja loomastiku seosed

Kompleksne taimestiku ja loomastiku inventuur Karjala Vabariigis Venemaal (Gromtsev jt. 2003) näitas, et geoloogiline ja reljeefi mitmekesisus on aluseks taimestiku mitmekesisusele. Rikkalik floora soodustab putukate liigirikkust, millega omakorda kaasneb linnuliikide rohkus. Rikkaliku taimestikuga aladel on rohkem taimetoitu söövaid loomi ja närilisi ning nendele järgnevad kiskjad.

On veel mitmed geoloogilised faktorid, mis loovad mikrokliimaatilisi ja teisi tingimusi. Sügavad lääne-ida suunalised murrangujärved kaljujärsakutega põhjakaldal loovad kasvuhuoneefekti Paanajärvel ja Kukasozero Põhja-Karjalas. Metsata kaljutundrad (Nuoruneni 576 m ü.m.p., Mäntütunturi 550 m, Kivakka 499 m jt. kõrgemad mäetipud Paanajärve rahvuspargis) on tõenäoliselt Euroopa kõige lõunapoolsemad mägitundra alad; koos omapäraste tundrataimestiku liikidega, nagu sinine kivikanarbik (*Pyllodoce caerulea* L.), kaljupalukas (*Loiseleuria procumbens* L.) (LISA joonis 2), alpi kold (*Diphasiastrum alpinum* L.) jt.

Omamoodi migratsioonikoridori moodustab Soome ja Karjala vahel veesüsteem Oulankajoki–Paanajärv–Olanga jõgi, mis saab alguse Soomest, voolab läbi Maanselkä mäeaheliku sügavalt sisseuuristatud orus (koos 128 metri sügavuse järvega üle 500 m) ja viib oma vee Valgesse merre. Madala mäeaheliku kliima ja taimestik erinevad oluliselt: idapoolsel küljel on kliima arktiline ja külm, läänepoolsel niiske ja soojem atlantiline. Oru kaudu on Soome siirdunud mitmed linnuliigid, mis pärinevad algselt Siberist ja Karjalasse levivad Oulankajõe veega mitmed taimed. See protsess algas pärast mandrijää sulamist ja jätkub siiani.

Oluline on ka nõlvade paigutus ilmakaarte suhtes. Kostomukša looduskaitsealal ja Laadoga äärsetes sügavates orgudes on põhjapoole suunatud nõlvadelt leitud külmalembelisi taimi, mille leviku areaal jääb

sadu kilomeetreid põhjapoole. Kivakka mäe lõunapoolsel nõlval (LISA joonis 3) pesitsevad sageli aga linnud, kelle tavalised pesitsusalad jäävad kaugele lõunasse.

Suurt mõju liigirikkusele ja muldade koostisele avaldavad ka allikad, eriti need, mille deebit on väike ja mis voolavad nõlval. Ka selliste allikate juures tekkivates allikasoodes on soodne kasvupaik külmalabelistele taimedele, aga kuna allikavesi kannab aluspõhja kivimitest välja palju mitmesuguseid toiteaineid, siis mullad on siin rikkalikumad ja võib leida mitmeid haruldasi liike.

Kokkuvõtteks

Eluslooduses on põimunud paljude teadusharude poolt avastatud seadused ja mitmed geoloogia allharud. Tegelikult on keemiliste elementide osa bioloogilises elus palju keerulisem ja ilma põhjalike regionaalsete keskkonna geokeemiliste uuringuteta midagi otsustada ega soovitada ei saa.

Võib julgelt öelda, et inimesed näiteks ei tohiks lahenduse otsimiseks hakata tarvitama populaarseks muutunud mitmesuguseid suvalisi elementide kombinatsioone, mida apteegid välja pakuvad – see võib tervisele rohkem kahju kui kasu tuua. Olulisem kõigest on siiski elukeskkonna, joogivee ja toidu keemiliste elementide sisaldus ning kodukoha või suvila muldade geokeemia. Enam tuleks uurida Eesti piirkondade geokeemilisi iseärasusi, et praegused ja tulevased põlvkonnad teaksid, mida nad joovad ja söövad ning kust võib tulla ühe või teise elemendi defitsiit või üleküllus. Praegused ja tulevased põlvkonnad oleksid tänulikud sellise vajaliku uuringu läbiviijatele oma tervise ja kauem elatud aastate eest.

Kasutatud kirjandus

- Gromtsev A.N. jt. (toim.). 2003. *Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 244 lk.
- Läänelaid A. ja Sõstra Ü. 2003. Geoloogilise fooni mõju bioloogilisele mitmekesisusele. Kaasaegse ökoloogia probleemid, Eesti ökoloogia globaliseeruvus maailmas. Rmt: *Eesti IX Ökoloogiakonverentsi lühiartiklid*, Tartu 11. –12.04.2003.a. Tartu, 127–134.
- Merian E., Anke M., Ihnat M., Stoeppler M. (toim.). 2004. *Elements and their compounds in the environment V*. 1–3. Wiley-VCH, 1773 lk.
- Orru M. ja Orru H. 2003. *Kahjulikud elemendid Eesti turbas*. Tallinn, Eesti Geoloogiakeskus, 144 lk.
- Petersell V., Ressar H., Carlsson M., Möttus V., Enel M., Mardla A., Täht K. 1997. *Eesti mulla huumushorisoni geokeemiline atlas*. Tallinn-

- Uppsala, Eesti Geoloogiakeskus ja Rootsi Geoloogiateenistus. Kaardid 37 lehte ja seletuskiri, 75 lk.
- Pesola V.A. 1928. Kaltsiumkarbonaatti kasvimaantieteellisenä tekijänä Suomessa (Summary: Calcium Carbonate as a Factor in the Distribution of Plants in Finland). *Ann. Soc. "Vanamo"* 1: 1–246.
- Systra Y.J. 2004. Geological Background for Biodiversity in the Eastern Fennoscandia, Estonia and Latvia. Rmt: Parkes, M.A. (toim.) *Natural and Cultural Landscapes – The Geological Foundation*. Royal Irish Academy, Dublin, 73–76.
- Thornton I. (toim.). 1983. *Applied environmental geochemistry*. Academic Press Geology Series, 501 lk.
- Trofimov V.T. (toim.). 2000. *Ekologičeskije funktsii litosferõ*. Moscow University Press, 432 lk (vene keeles).
- Webb J.S. 1983. Foreword. Rmt: I.Thornton (toim.). *Applied Environmental Geochemistry*. Acad. Geol. Ser. London, vii–viii.
-

Ülo Sõstra (ylo.systra@ttu.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

Arheoloogilise objekti geoloogilisi aspekte: muinaslaev Salme muinasrannal

Marge Konsa, Atko Heinsalu, Jüri Vassiljev

Arheoloogid saavad suurepäraselt hakkama esemete, ehitiste, konstruktsioonide jt. artefaktide maapinnast väljakaevamisega. See on kutseoskus, mida ülikooliaastatest peale treenitakse täiuseni. Väljakaevatu mõtestamine on teine asi. Tuginedes ainult oma oskustele ja teadmistele, võib arheoloog siin hätta jääda. Öeldakse, et kogu arheoloogilise välitöö võib sisuliselt taandada vastuse otsimisele küsimustele: Mis see on? ja Mis siin juhtus? (Barker 1993, lk 78). Mõnikord suudavad küsimustele arheoloogiliste objektide olemuse ja nendega toimunud sündmuste kohta paremini vastata aga hoopis teised teadused. Ja kui muistisega seotud sündmuste ahelas on põimunud inimõju ja looduslikud protsessid, siis võib olla just geoloogia see, mis suudab toimunule selgitavat valgust heita.

Muinaslaev

Aasta tagasi, 2008. aasta oktoobris leiti Saaremaalt Salme asulapiiri lähedalt (joonis 1) muinasaegne 7. sajandist p.Kr. pärinev laev– ainulaadne Eestis ja vanim kogu Baltikumis (vt. salmepaat.blogspot.com). Laeva leidmisau kuulub meteoriitikaurija Ülo Kestlasele, kes esimesena pani liivases pinnases tähele korrapäraselt üksteisele järgnevatest laevaneetidest moodustunud rida. Laev oli säilinud fragmentaarselt. Selle puitkere oli peaaegu täielikult kõdunenud. Valdav osa andmetest laeva kuju ja ehituse kohta saadi laevaneetide paiknemise dokumenteerimise abil (LISA joonis 2). Selle põhjal võib öelda, et algselt 11,5 m pikkune ja kaheteist-aeruline sõudelaev oli muinasaegsele sõjalaevale iseloomulike omadustega: see oli kiire, kerge ja hästi juhitud alus (Mäss 2008; Konsa jt. 2009).

Väljakaevamiste ajal paiknesid laevajäänused meresetelises liivas kirde-edela suunaliselt asimuudiga 43,5°. Kraavi kaevamisega oli lõhutud osa laeva ahtriosast. Laeva keskosa oli säilinud umbes 50 cm kõrguses, sellest ülemine osa laevast oli hävinud. Laeva põhjas olnud 10–14 cm paksuses kruusakihis puudusid esemelised leiud ja luud. Selle kihi peal oli tumepruuni värvi õhuke orgaanikaviirg, mis võis pärineda laudadest moodustatud platvormist. Leiud ja loomaluud tulid sellele tasapinnale ladestunud kruusakihist. Enamik inimluudest tuli laeva ahtriosast või keskelt. Luustike juures oli meremeeste varustus. Lisaks relvadele, nugadele ja luiskudele näiteks ka luust kamm ning mängunuppude ja täringute komplekt.

Laevamatustest

Laeva- või paadimatuseid esineb veeäärsetel rahvastel sporaadiliselt alates kiviajast. Lääne-Siberis Obi jõe ääres võib tänapäevalgi märgata tundras maapinnal lagunevaid paate, kuhu handid on matnud oma esivanemad, saates nad niiviisi traditsioonide kohaselt teele teispoolsusse. Põhja-Euroopas muutusid laevamatused eriti uhketeks ja kuninglikeks alates 6. sajandist p.Kr. Upplandi maakonna Vendeli küla kirikaia laiendamisel 1881. aastal leitud paadimatused olid nii eripärased ja luksuslike panustega, et nende järgi hakati Rootsi ajaloos aastaid 550–800 hõlmavat perioodi nimetama vendelajaks. Sajanditega laevamatuse vääriliseks peetute ring tõenäoliselt laienes, kuid jäi teiste matmisviisidega võrreldes siiski elitaarseks. Praeguseks on rauaaegseid laevamatuseid Põhja-Euroopast teada veidi alla poole tuhande. Kõige arvukamalt on neid leitud Norrast (Müller-Wille 1974; Larsson 2007).

Kuigi tervikuna on laevamatuse kombestik periooditi ja kultuuriti mitmekesine, siis Skandinaavia vendeli- ja viikingiaegsed laevamatused on omavahel üsna sarnased (Schönbäck 1984). Surnu maeti laeva keskele, mõnikord ka selleks spetsiaalselt sinna ehitatud kambrisse koos rikkalike hauapanustega – relvastuse, majapidamisriistade, hobuste, koerte jt. loomade ning lindudega. Põletamata laevad pandi tavaliselt selleks kaevatud süvendisse või jäeti toestatuna maapinnale. Pealt kaeti laev laudadega, moodustamaks siledat pinda või kuhjati sellele kääbas (Müller-Wille 1974).

Salme laevaleiu eripära

Salme laeva kohal puudus kääpakuhjatis. Väljaspool laeva olid looduslikult ladestunud horisontaalsed liiva- ja kruusakihid. Skandinaavia laevamatustel ulatub matmisala enamasti ka laevast väljapoole, kus võib esineda leide ja suuremate ohvriloomade, näiteks hobuste või koerte luid. Salme laevas koeri ja hobuseid ei olnud; leidude hulgas puudusid ka ehted, majapidamisriistad, keraamika, hobusevarustus jms., mis on tavalised teistes laevamatustes. Kõik Salme laevas olnud loomaluud tundusid pärinevat inimestele mõeldud söögipoolisest ja kogu laevas olnud napp inventar oli selline, mida võiks vaja minna ühes muistses sõjalaevas (Konsa jt. 2009). Kõige tähelepanuväärsem Salme laeva puhul on aga maetute suur arv. Tavaliselt on laevamatustes vaid üks väga rikkalike panustega kõrgklassi kuulunud inimene ning mitmikmatused on väga haruldased. Salme laevast leitud inimluud kuulusid seitsmele mehele vanuses

18–45 aastat. See on teadaolevalt seni kõige suurema inimeste arvuga laevamatus.

Kõik need asjaolud viitavad sellele, et Salme laevaleidu ei saa käsitleda tüüpilise kohaliku üliku laevamatusena. Mis sündmusega Salme leiu puhul tegu on? Kas laevamatus või laevahukuga? Kas laev maeti ja täideti pinnasega inimeste poolt või mattus setetega looduslikult? Milline oli mereveetase 7. sajandil? Kas laeva leiukoht jäi vette või kuivale maale? Kas geoloogia suudab neile küsimustele vastata?

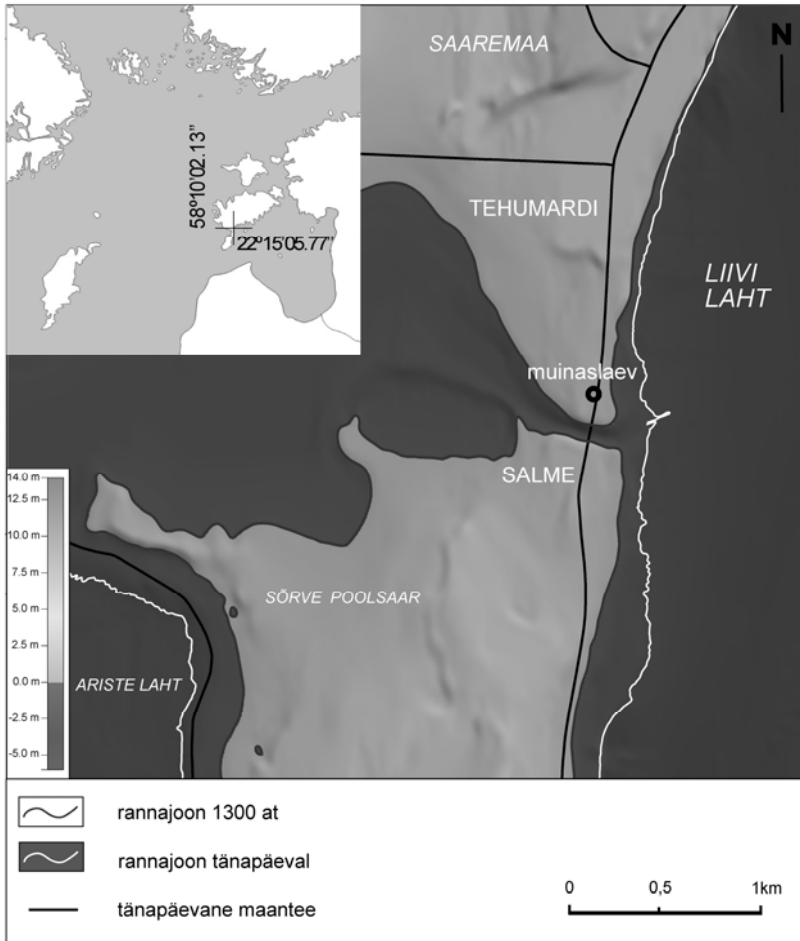
Ränivetikate analüüs

Ränivetikate analüüsi eesmärk oli kindlaks teha laeva sees olnud sette päritolu. Selleks võeti laevast kaks setteproovi inimluid sisaldanud kihi alt, tumeda värvusega hajusat orgaanilist ainet sisaldanud peenliivast, kõrgustelt 4,08 m ja 4,12 m ü.m.p (laeva põhjast vastavalt 15,6 cm ja 21,6 cm kõrguselt). Proovid andsid veidi erineva analüüsitulemuse. Esimeses setteproovis oli esindatud valdavalt (66,7%) merelised/riimveelised aerofiilsed ränivetikad, kes on kohandunud elama perioodiliselt üleujutataval mererannal ja/või vahetult rannajoonel. Vähem oli merelisi/riimveelisi epifüütseid ränivetikaid (23%). Mereveesetete purd-osakeste pinnale kinnitunud või setete pinnal elutsevate bentiliste taksonite osakaal kooslusest oli 10,3%. Teises proovis domineerisid seevastu merelised/riimveelised epifüütseid ränivetikad (54,5%) ning mereliste/riimveeliste aerofiilsete ränivetikate arvukus oli vähenenud (29,9%). Bentiliste taksonite osakaal kooslusest oli 15,6%.

Ränivetikate kooslus näitas, et prooviks võetud peenliiv oli algselt moodustunud soolaseveelises keskkonnas. Kui eeldada, et liiv laeva sees oli settinud *in situ*, siis mikroorganismide koostise põhjal järelduks, et laeva osa, kust võeti proov 1, asus liiva settimise hetkel vahetult rannajoonel või rannal ning proovipunktis 2 olnud liiv oli settinud merevees. Selline tõlgendus oleks mõeldav juhul, kui peenliiv oleks settimise järgselt koheselt kattunud neil lasunud jämedapurdse settega, s.t. oleks toimunud laeva kiire mattumine rannaliiva. Ränivetikate analüüsi tulemused ei võimalda eristada, kas laev oli setetega mattunud looduslike protsesside tulemusel või oli laeva sisemus täidetud inimese poolt, kes võis selleks kasutada kohapealseid rannaseteid.

Meretaseme rekonstruktsioon

Salme laeva mattumisaegse meretaseme rekonstruktsiooni loomisel kasutati alusmaterjalina Saaremaa 1:10 000 reljefimudelit, andmebaasi



Joonis 1. Salme laeva asukoht Saaremaal ning meretaseme rekonstruktsioon 7. sajandil p.Kr.

rannamoodustistest ja merega seotud mattunud orgaanilistest setetest ning andmeid maakerke ja ookeanitaseme muutuste kohta.

Salme laeva leiukoht jääb Sõrve poolsaart Saaremaa edelaosast lahutava Salme jõe äärde, sellest 200 m põhja poole (joonis 1). Tänapäevasest mererannast on leiukoht umbes 230 m kaugusel, kõrgusega 4,58 m üle merepinna. Rannajoone ja mattunud orgaaniliste setete andmetele tuginevad Saaremaa veetaseme rekonstruktsioonid (Saarse jt.

2003, 2006) osutavad, et 1300 aastat tagasi võis maksimaalne veetase Salmel olla praegusest umbes 2,7 m kõrgem ja Salme laeva põhi (3,89 m ü.m.p.) jäi seega umbes 1,2 m üle mere veepinna taseme. Sellel ajal oli Sõrve saar, mida eraldas Saaremaast kitsas, umbes 70–100 m laiune väin. Salme laev paiknes Saaremaa edelatipust väljaulatuva neeme kõrgemal harjal. Maanina idaküljele jäi Liivi laht ja lääneküljele Ariste laht, mis ulatus välja kuni tänapäevase Salme koolimaja taguse heinamaani, laevast 200 m idas.

Seega paiknes Salme laev oma mattumise hetkel kuival maal. Samas oli laev siiski piisavalt lähedal omaaegsele rannajoonele, et jääda tormilainete mõjualasse. Lainetuse vööndisse jääv perioodiliselt üleujutatav mererannik on väga kiiresti muutuva reljeefiga. Seetõttu on looduslike ja inimõjuliste protsesside täpset vahekorda Salme muinaslaevast tänapäevani säilinud situatsiooni kujunemisel raske määratleda. Kindel võib olla vaid selles, et oma rolli on siin mänginud nii loodus kui ka inimene.

Suure tõenäosusega on laevaleiu puhul tegemist matusega, mis vähemalt osaliselt võis olla matjate poolt ka pinnasega täidetud. Hiljem on merevesi laeva üleujutanud ja laevas olnud pinnas on läbiuhutud, võimalik, et kohati ka ümbersettinud. Uuesti sekkus inimene objektiga toimunud muutuste käiku sellesse kraave kaevates, pinnast koorides, teed ehitades ning siis juba fataalselt – muinaslaeva arheoloogiliselt väljakaevates.

Tänuavaldused

Artikli valmimist toetas Euroopa Liit Euroopa Regionaalarengu Fondi kaudu.

Kasutatud kirjandus

- Barker P. 1993. *Techniques of Archaeological Excavation*. Third Edition. Routledge, London, New York, 285 lk.
- Konsa M., Allmäe R., Maldre L., Vassiljev J. 2009. Rescue excavations of a Vendel Era boat-grave in Salme, Saaremaa. *Archaeological Fieldworks in Estonia 2008*, Tallinn, in print.
- Mäss V. 2008. *Salme laevaleiu ehitustehnoloogiline interpretatsioon*. Eesti Meremuuseum. <http://lepo.it.da.ut.ee/%7Emargek/Vello021208.pdf>. [10.06.2009]
- Müller-Wille M. 1974. Boat-graves in northern Europe. *The International Journal of Nautical Archeology and Underwater Exploration* 3(2): 187–204.
- Larsson G. 2007. *Ship and society. Maritime ideology in Late Iron Age Sweden*. (Aun, 27). Uppsala.

- Saarse L., Vassiljev J., Miidel A., Niinemets E. 2006. Holocene buried organic sediments in Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology* 55(4): 296–320.
- Saarse L., Vassiljev J., Miidel A. 2003. Simulation of the Baltic Sea shorelines in Estonia and neighbouring areas. *Journal of Coastal Research* 19(2): 261–268.
- Schönbäck B. 1983. The custom of burial in boats. *Vendel Period Studies. Transactions of the Boat-grave symposium in Stockholm, February 2-3, 1981*. Stockholm, 123–132.

Marge Konsa (marge.konsa@ut.ee) – Tartu Ülikooli ajaloo ja arheoloogia instituut, Lossi 3, 51003 Tartu.

Atko Heinsalu (heinsalu@gi.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

Jüri Vassiljev (vassilje@gi.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

Kõnekad paeseinad ehituses

Helle Perens

Ehituslike paeseinte või -müüride kõnekus oleneb suuresti sellest, millist eelteavet ning kogemusi seinte vaatleja endaga kaasas kannab. Tuginedes vaid oma geoloogilisele pagasile, võib saadav informatsioon jääda paraku kesiseks. Muidugi on müürides kasutatud paeliikide äratundmisrõõm suur, aga enamasti tärkab siis soov seintest rohkem teada saada – millal on ehitus püstitatud, millist stiili see järgib jne. Sageli on tuntumad paehitised, eriti kirikud, ehitatud mitmes järgus. Vahel on kestnud ehitusprotsess koguni mitu sajandit. Selleks, et jälgida meie esinduspaeliikide kasutuslugu ja -areaali, tuleb need ehitusetapid lahti harutada. See polegi nii lihtne ülesanne, sest eeldab pidevat enesetäiendamist arhitektuuri ja kunstiajaloo valdkonnas, mis on huvitav ja põnevust pakkuv maailm.

Ehituspaekivi uurivale geoloogile on oluline teada saada millised paeliigid on kasutusel olnud läbi aegade ja kuidas on need ajale vastu pannud. Seda teadmist on vaja, et vältida varasematel aegadel tehtud paekivi kasutusvigu: vale murdmiskihi kasutamist, eksponeerimist vales ilmakaares, objektile mittesobivat kivikihtide orienteeritust (risti- või pikilõige), sobimatut töötlusviisi jpm.

Lähtudes paeseinte kõnekusest, on Eestis võimalik rääkida kümnest enamtuntud paeliigist, mille kasutusaeg on alguse saanud põhiliselt keskajal ja viit neist (rasvase kirjaga) kasutatakse tänapäevalgi. Need ehituspaed on: **Lasnamäe ehituslubjakivi**, **Kaarma dolomiit**, **Orgita dolomiit**, **Ungru lubjakivi**, **Vasalemma “marmor”**, Narva dolomiit, Rõa dolomiit, rõngaspaas, Mündi dolomiit, Paide dolomiit.

Tänapäeval, lisaks viiele nimetatud paeliigile, on suhteliselt hiljuti kasutusele võetud ka Selgase dolomiit. Paehitisi vaadeldes ilmneb, et varasemal ajal kasutati ehituseks sadu pae-erimeid. Paeseinad aitavad välja selgitada, kas neis kasutatud pae-erimid sobivad oma vastupidavuselt ka tänapäeva paetööstusele. Mõnede ehitiste seinad tekitavad ka vastuseta jäävaid küsimusi. Näiteks on Türi lähedal üks kabel, mille dolomiidist seinaplokid on kuni 80 cm paksused. Selle ilusa ja tugeva kivi murdmispaik on siiani jäänud saladuseks.

Paeseinte materjali tundmine on abiks ka asenduskivi otsivatele restauraatoritele. Paljud tänapäeva arhitektid ei tunne kahjuks Eesti tähtsaimaid ehituspaeliike ning nende kaevandamisvõimalusi.

Kui minna ajas tagasi, siis **keskajal** jäi paeliikide kasutusareaal enamasti nende valduste piirsesse, kus murtav paeliik asus. Saare-Lääne piiskopkonna aladel domineerisid ehituses Kaarma dolomiit (joonis 1) ja

Ungru lubjakivi, vähesel määral ka Orgita dolomiit. Viimatinimetatu, kui Eesti parim raidpaas, erineb teistest oma põhikasutuspiirkonnalt. Peale Märjamaa kiriku ehitust sai ka Tallinna ehitusmeistritele selgeks selle paeliigi ühtlus, tihedus, hea tahutavus ja vastupidavus ilmastikule (headus). Peamiseks Orgita dolomiidi kasutuskohaks saigi keskajal Tallinn, kus on sellest kivist lugematul hulgal raidtöid. Tuntumad neist on Tallinna linnavapp Rannaväraval, gooti roosiga akna põsekiivid Oleviste tänav 12 hoovis, Oleviste kiriku Maarja kabeli sisemised raietööd ning Pawelsi kenotaaf kabeli idaseinas. Seinakivina nii heade raidomadustega kivi ei kasutatud, sest seinu ladumiseks kõlbab peaegu iga tugevam paeliik. Raidtöödeks sobiv kivi peab olema parajalt pehme, peenekristalliline või -teraline, hästi ühtlase koostisega ning võimalikult massiivne.

Põhja-Eesti ordualadel olid sealsetest ehituspaeliikidest olulisemad Lasnamäe ehituslubjakivi, Vasalemma “marmor”, Rõa dolomiit, rõngaspaas, Narva dolomiit, Mündi dolomiit, Paide dolomiit. Paevaesetel Tartu piiskopkonna aladel, kus oma kivi polnud võtta, kasutati peaaegu kõiki naaberlade häid paeliike: Paide, Mündi, Orgita, Narva ja Läti dolomiiti ning Lasnamäe ehituslubjakivi.

Peale keskaega polnud paekasutus enam nii kohalike paeliikide keskne ning jätkus episoodiliselt, lähtuvalt arhitektuuriilidest ja tööstushoonete kiirest juurdekasvust (kus paas asendati sageli tellistega) ning uute elamutüüpide tekkest. Barokseteks vormideks sobisid hästi paksukihilised Kaarma ja Orgita dolomiit. Klassitsismiaegsetes ehitistes sai valdavaks stukk, mis on kipsist, lubjast ja liivast segatud kiiresti kivistuv pastataoline mass, millest vormitakse või valatakse seinu- ja laekaunistusi. Historitsistlikuks, mõõdnud ajastute kunstistiile matkivaks ja rahvusromantilise suunaga juugendlikuks paekasutuseks sobis hästi Lasnamäe lubjakivi, mida oli hea plaatideks lõigata ja klompida.

Eesti Vabariigi esimesel perioodil olid eelistatud paeliikideks Lasnamäe lubjakivi, Kaarma dolomiiti ja Vasalemma “marmor”. Sellest ajast on pärit ka ilusaimad nimetatud paeliikide kooskasutamise näited. Pilku köitvamad neist on arhitekt H. Johanson projekteeritud Metskalmistu ja Liiva kalmistu kabel ning Lasnamäe gümnaasium. Neis kõigis on kasutatud Lasnamäe lubjakivi ja Kaarma dolomiiti. Vasalemma “marmor” ja Kaarma dolomiidi kooskasutuse ilus näide on Westholmi gümnaasium (Kevade tänav 8), kus oli samuti tegev arhitekt H. Johanson koos A. Jürvetsoniga. Lasnamäe lubjakivi ja Vasalemma “marmoriga” on vooderdatud Ravi tänava 18/20 haigla, projekteerituna H. Johanson poolt. Samu paeliike kasutasid koos Kaarma dolomiidiga praeguse Tallinna Ülikooli hoone (Narva mnt 25) viimistlemiseks arhitektid A.Kotli ja E. Nõva. Tänaseks on



Joonis 1. Keskaegses Pärnus, nagu mujalgi Saare-Lääne piiskopkonna valdustes, oli Kaarma dolomiit üks eelistatumaid raidtöödeks kasutatavaid paeliike. Kaarma dolomiidist kesksammas Audru mõisa aidahooneel kuulub Pärnumaa vanimate (16. sajandi algus) säilinud raietööde hulka. Kunstiajaloolase Ants Heina sõnul olevat mõisnik A. Pilar von Pilchau lasknud selle tuua Pärnu vana ehitusmaterjali laoplatsilt.

“marmorist” plaatkate asendatud Kaarma dolomiidist katteplaatidega. Nõukogudeaegses arhitektuuris jätkus samade paelliikide kasutamine. Lisandus veel Tagavere dolomiit, mida kasutati arhitekt Raine Karbi projekteeritud suurehitistes Linnahallis, Rahvusraamatukogus ja Sakala kultuurikeskuses.

Kaasajal on uuesti au sees Lasnamäe lubjakivi, Orgita dolomiit, Kaarma dolomiit, Vasalemma “marmor” ja Ungru lubjakivi. Kõik need paelliigid leiavad kasutamist põhiliselt individuaalehituses, kus on näiteid tondilossisarnastest kolemajadest kuni imekenade ehitisteni. Üleni klomppaega kaetud suured tornide ja vitraažidega majad mõjuvad raskelt ning viitavad eelkõige tellija suurele rahakotile.

Tänapäevane harmooniliselt mõjuv paekasutus individuaalehituses on mõõdukas – paega kaetakse valikuliselt kas osa seina, akendealused, soklid ja veel mõned huvitavad detailid tehakse paest. Hästi mõjuvad ka majaga ühtses stiilis paest aiad ja värvapostid. Kasutatakse kas ühe paelliigi erinevaid töötusi või mitut erinevat paeliiki koos. Kerkinud on ka paekasutusega esindushooneid, nagu KUMU, Eesti Metodisti kirik, hotell Euroopa ja Taani saatkonna hoone. Eriti paeluvad on aga uuskasutusse võetud vanad paehooned, kus oskuslikult on põimitud vana ja väärikas paekivi ning moodsad arhitektuurilahendused. Neid võib näha Lasnamäel Ülemiste Citys, Rottermanni kvartalis, Tartu maanteel jm.

Paeseinad ei paku mitte ainult geoloogilist huvi, vaid on tõsiseltvõetav uurimisobjekt ka muinsuskaitsetajatele, arhitektidele, restauraatoritele, kunstiajaloolastele ja mitmete teiste valdkondade uurijatele ja huvilistele. Need juhused, mil arhitekt küsib geoloogilt nõu mõne paelliigi sobivuse ja omaduste kohta, või geoloog haarab telefoni pärimaks arhitektilt mõne ehitise vanust ja stiililist kuuluvust, polegi nii harvad.

Helle Perens (helle.perens@gmail.com) – Eesti Geoloogiakeskus OÜ, Hüdrogeoloogia osakond, Kadaka tee 82, 12618 Tallinn.

Kuidas valiti Eesti esinduslikumad 25 geotoopi

Krista Täht-Kok

Eelmise sajandi lõpul tekkis ProGEO (*The European Association for the Conservation of the Geological Heritage*) Põhja-Euroopa töögrupil idee koostada igas liikmesriigis nimistu geoloogilistest mälestusmärkidest ehk geotoopidest, mis oleksid efektsed ja iseloomustaksid Põhja-Euroopa geoloogilist arengut. Idee algatajad ei andnud ette selgeid valikukriteeriume nimistu koostamiseks. Eesmärgiks oli lasta igal riigil välja pakkuda just neile kõige hinnatumad objektid.

Geotoopidena käsitleti maastikke, mitmesuguste geoloogiliste (ka maa-väliste) protsesside tagajärjel tekkinud pinnavorme ja muid geoloogilisi haruldusi (nt. mineraalide või fossiilide leiukohti). Sellest valikust jäeti iseseisvate geotoopidena välja kaasaegsete geoloogiliste protsesside vormid: sood, jõed, järved ja ka allikad. Need leidsid kajastamist maastikuelementidena. Geotoop on tänapäeval ehk juba juurdunud mõiste, kuid termini paremaks mõistmiseks on toodud järgnevalt mõned seletused.

Geotoobid on geoloogilisest ja geomorfoloogilisest seisukohast lähtudes väärtuslikud ja tundlikud maastiku osad (Stürm 1994). Selleks on geoloogiline või geomorfoloogiline maastik või selle osa, millel on silmapaistev ja asendamatu väärtus maa, regiooni või kontinendi geoloogilise ajaloo mõistmisel (Wimbledon jt. 1997). Geotoobina vaadeldakse Maa ajaloo seisukohalt väärtuslikku maastiku osa oma iseloomulike elementide, struktuuride ja vormidega, mida kaitstakse kahjustava mõju eest (Kask ja Grube 1993).

Eestis alustati esinduslikumate ja silmapaistvamate geotoopide välja selgitamist 2000. aastal. Valiku tegemisse kaasati Eesti Geoloogia Seltsi vahendusel väga paljud, kui mitte öelda enamik, Eesti tegevgeoloogidest. Internetis said hääletada ning omalt poolt uusi geotoope välja pakkuda kõik asjahuvilised eestimaalased. Eesti Päevalehes kutsuti inimesi Interneti teel arvamust avaldama. Lõpliku valiku tegi komisjon, kuhu kuulusid tuntud ja tunnustatud geoloogid eesotsas akadeemik Dimitri Kaljoga: Tõnu Meidla, Avo Miidel, Guido Paalme, Enn Pirrus, Rein Raudsep ja artikli autor Krista Täht-Kok. Rõõmustav oli töö läbiviijal kogeda, et huvilisi oli palju ja avalikkuse aramus langes meie kõige silmapaistvamate geotoopide osas täielikult kokku teadlaste arvamusega. Võib öelda, et eesti loodusainete õpetajad on teinud head tööd läbi aastakümnete.

Geotoopide väljaselgitamisel lähtuti põhimõttest, et esindatud peaksid olema kõik meie geoloogilises läbilõikes esindatud ajastud: Kambrium, Oroviitsium, Silur, Devon ja Kvaternaar. Viimasest, Kvaternaari ajastust

just mandrijäätumise pinnavormid, mis suuremalt osalt Eestimaad katavad. Eesti on geoloogilisest vaatepunktist väga õnnelik paik – kõik loetletud geoloogilised ajastud paljanduvad kas klindiangutel või jõeorgudes.

Kambriumi ja Ordoviitsiumi ajastu kivimid paljanduvad **Põhja-Eesti klindil**, mis on Eesti kõige pikem pinnavorm (350 km) ja moodustab keske ning kõige efektsema osa maailma ühest pikemast, 1200 km pikkusest klindiangust, Balti klindist. Balti klint saab alguse Ölandi saare läänerrannikult, kulgeb mööda Läänemere põhja Eesti rannikuni, moodustab Eesti põhjarannikul kuni 56 meetri kõrguse rannaastangu ja lõpeb Venemaal Laadoga järve lõunarannikul. Eestis nimetatakse Balti klinti Põhja-Eesti klindiks. Põhja-Eesti klindil on võimalik jälgida settekivimite teket ajavahemikus 560 milj. kuni 440 milj. aastat tagasi, seega 80 miljoni aasta jooksul. See on väga pikk ajalõik, millega võrdväärtset enamikul palju kõrgematel ja uhkematel astangutel vastu ei ole panna.

Eestis kerkib klindiang merest maapinnale Osmussaare rannikul, kus Ordoviitsiumi ajastu lubjakivid moodustavad kuni 6 meetri kõrguse kaldajärsaku. Osmussaare klint on mere kulutada, paljand on seal alati värsked. Astangu ees on madalaveeline 200–300 m laiune lubjakiviplateo, kus madalas rannikuvees on jälgitavad kaarjad bretšalaadse kivimi settesooned. Geoloogid, eesotsas vaheda sõnaseadmise poolest tuntud Kalle Suurojaga, on hakanud neid vorme krokodillideks kutsuma (LISA joonis 1). Need "krokodillid" tähistavad 475 milj. aastat tagasi toimunud maavärinat. Seega saab Osmussaarel näha jälgi maakoore liikumistest minevikus. Loodetavasti ei kordu nii tõsiseid jälgi jätvat maavärinat geoloogilises lähitulevikus, kuigi 1976. aastal toimunud 4,7 magnituudilise maavärina epihtenter oli just Osmussaare lähistel.

Kambriumi ladestust saab kõige paremini jälgida Pakri poolsaare (LISA joonis 2), Türisalu ja Utria pankadel. Eesti kõrgeimatel, Ontika ja Päite pangal, on Kambriumi ajastu kivimid rusukalde alla mattunud. Põhja-Eesti klindile jäävad ka Eesti kõrgeimad joad. Eesti ja kogu Baltikumi kõige kõrgemal, Valaste joal, on üks ilusamaid ja tänu vaatesillale ka kõige paremini jälgitavaid Põhja-Eesti klindi paljandeid. Vähene veehulk Valaste joal avab suurepärase võimaluse heita pilk sadade miljonite aastate tagusesse arengulooraamatusse (LISA joonis 3).

Põhja-Eesti klindil jälgitava 80 miljoni aasta sisse mahuvad Maa ajaloos väga tähtsad sündmused: „Kambriumi plahvatus” ja Ordoviitsiumi bioloogilise mitmekesisuse äkiline kasv. „Kambriumi plahvatus” all mõistetakse suure hulga erineva skeletiga hulkraksete peaaegu üheaegset ilmumist. Eelkambriumist on teada hulgaliselt pehmekehalisi organisme, kuid skeletiga organismid ilmusid arvukalt alles Kambriumis. Ordoviitsiumis suurenes plahvatuslikult organismide mitmekesisus. Kõiki neid Maa ajaloos nii tähtsaid sündmusi on Põhja-Eesti klindi paljandites võimalik

näha ja ka käega katsuda. Allolev geotoopide numeratsioon on pärit nimistu koostamise aruandest (Täht 2001):

1. Põhja-Eesti klint

Pangad:

- 1) *Osmussaare pank*
- 2) *Suur-ja Väike-Pakri saarte pank*
- 3) *Pakri poolsaare pank*
- 4) *Türisalu pank*
- 5) *Toompea pank*
- 6) *Muuksi pank*
- 7) *Saka – Toila – Ontika pank*
- 8) *Päite pank*
- 9) *Utria pank*

Joad:

- 1) *Keila juga*
- 2) *Jägala juga*
- 3) *Turjekeldri juga*
- 4) *Kivisilla juga*
- 5) *Karjaoru juga*
- 6) *Valaste juga*
- 7) *Ukuoru juga*
- 8) *Narva juga*

Siluri ladestu avaneb vaatajale kogu oma ilus Saaremaa põhjaranniku pankadel. Kõrgeim neist on Panga ehk Mustjala pank. Kuid just nii nagu Põhja-Eesti pangal, ei ole ka **Siluri pankade** muljetavaldavaks väärtuseks mitte kõrgus, vaid fossiilide rohkus ja nende mitmekesisus. Siluri ajastul asus Eesti ala ekvaatori lähedal, meri oli soe ja madal ning eluks eriti soodne (LISA joonis 5). Saaremaa põhjapoolsed pangad avavad meile geoloogilist ajalugu paarikümne miljoni aasta jagu, kuid paleontoloogid leiavad üle Saaremaa eluvorme peaaegu kogu Siluri ajastu ulatuses.

20. Siluri klint

- 1) *Undva pank*
- 2) *Panga pank*
- 3) *Pulli pank*
- 4) *Üügu pank*
- 5) *Kesse pank*

Devoni ajastut esindavad nimistus paljandid Kagu-Eesti jõgede orgudes ja Kallaste pank Peipsi ääres (LISA joonis 4). **Devoni paljandid**

on kaunid oma värvikirevuses ja kuulsad rüükalaleidude poolest. Eesti rüükalade uurijad on olnud maailmas tuntud juba XIX sajandist. Tartu Ülikooli loodusmuuseumis on esinduslik kogu Devonist leitud rüükalade jäänustest. Eesti Devonist leitud rüükalade fossiile leidub loodusmuuseumides nii Moskvas, Berliinis, Oslos kui mitmel pool mujal.

16. Piusa karjääri tehispaljand ja Piusa koopad
17. Suur ja Väike Taevaskoda
21. Kallaste pank
23. Härma müürid Piusa orus

Koobastest valiti nimistusse vaid Devonist liivakividesse kaevatud Piusa koopad ja needki pandi küsimärgi all, sest koobaste puhul kerkib alati ülesse ohutuse küsimus. Piusa koobaste külastamist on viimase kümnendi jooksul pidevalt muudetud. 2007. aastal suleti koopad kindlustustööde tegemiseks, ent nüüdseks on need taas avatud.

Pinnavorme valiti nimistusse üheksa, kuid komisjoni liikmete üksmeelse arvamuse kohaselt oli nende osakaal liiga suur. Siiski ei jõutud ühtsele seisukohale, millised neist välja arvata. Osa Kvaternaari ajastu pinnavormidest avavad ka varasemaid geoloogilisi ajastuid nagu näiteks Hinni kanjon Rõuge ürgorus, Vaivara Sinimäed või Salevere Salumägi.

2. Aegviidu-Paukjärve ooside, mõhnade ja järvede ala
7. Kõpu poolsaare rannamoodustised
10. Kurtna mõhnastik ja järved
11. Vaivara Sinimäed
12. Vooremaa (LISA joonis 6)
13. Salevere Salumägi
22. Karula kõrgustik
24. Rõuge ürgoru järved, Tindioru ja Ööbikuoru allikad, Hinni kanjon
25. Suur Munamägi ja Vällamägi

Eesti on tuntud **rändrahnude** maa ning nimistusse valiti neist kolm:

4. Muuga Kabelikivi
6. Helmerseni kivid
14. Letipea Ehalkivi (LISA joonis 7)

Karstiasid valiti nimistusse samuti kolm. Õhukese pinnakatte tõttu on karst Eestis laialt levinud loodusnähtus. Oma mõõtmetelt pole karstivormid just eriti silmapaistvad, kuid Nõiaaev Tuhala karstialal on unikaalne loodusnähtus.

3. Kostivere karstiaala
5. Tuhala karstiaala
19. Karrid Vilsandi ja Vaika saartel (LISA joonis 8)

Meteoriidikraatreid valiti nimistusse kolm. Kõik nad on hästi tuntud Eestis, meie naabermaades, kogu Euroopas ja geoloogilise kirjanduse kaudu meteoriidiuurijatele üle maailma:

8. Kärddla meteoriidikraater
15. Ilumetsa meteoriidikraatrid
18. Kaali meteoriidikraatrid (LISA joonis 9)

Nimekirja valiti ka Kohtla kaevanduse **põlevkivipaljand**. See on ainuke Eesti maavarasid esindav geotoop (LISA joonis 10). Aastaid Eesti Kambriumi ladestu läbilõike uhkuseks olnud Lontova kihistu sinisavi paljand Kunda tsemenditehase Lontova savikarjääris oli täiesti ootamatult prügimäeks/auguks kvalifitseeritud ja prügi täis veetud!

9. Põlevkivipaljand Kohtla kaevanduses

Eesti esinduslikumate geotoopide nimekirja tutvustati esmakordselt 2001. aastal Riias toimunud ProGEO aastakonverentsil (LISA joonis 11; Täht 2001). Oma Põhja-Euroopa tähtsusega silmapaistvaid geotoope valisid veel Läti, Leedu ja Loode-Venemaa. 2002. aastal tutvustasid Eesti, Läti ja Leedu esindajad oma geotoope ja selle põhjal Balti riikide geoloogilist arengulugu ning mitmekesisust Dublinis toimunud ProGEO konverentsil (Satkunas jt. 2002). 2004. aastaks oli oma tähelepanuväärseimad geotoobid välja valinud ka Loode-Venemaa.

XXXII rahvusvahelisel geoloogiakongressil Firenzes võisid Balti riigid ja Loode-Venemaa esineda juba ühise ettekandega (LISA joonis 12), mis iseloomustas üsna suurt osa Euroopa kirdenurga geoloogiast ja pikka perioodi Maa ajaloost – Alam-Proterozoikumist kuni Juura ajastuni. Nimistud Baltikumi ja Loode-Venemaa on üleval ProGEO kodulehel: <http://www.sgu.se/hotell/progeo/WG/nordeuropa/grundsida.html>.

Eesti silmapaistvamate geotoopide nimekirja leiab nii Eesti Geoloogia Seltsi kuid ka Eesti Geoloogiakeskuse kodulehtedelt:

<http://www.egeos.ee/index.php?pg=geotoobid&lang=est>;
http://www.egk.ee/egk/?r=r3&ra=r3_2_2.

Teised ProGEO Põhja-Euroopa töögrupi liikmesmaad (Iirimaa, Island, Holland, Norra, Rootsi, Soome, Suurbritannia ja Taani) tegid revisjoni oma geotoopide osas selle kümnendi algul, kuid esinduslikumate geotoopide nimistute koostamiseni ei jõutudki.

ProGEO Põhja-Euroopa riikide esinduslikemate geotoopide nimistute koostamise idee on heaks näiteks sellest, et iga töö tegemiseks on vaja nii entusiasmi kui raha. XXI sajandi algusaastail ei kuulunud Balti riigid ja Loode-Venemaa Euroopa rikkaimate hulka, kuid oli olemas suur soov ennast Euroopas tutvustada ja nii leiti vajalik raha töö läbiviimiseks.

Kasutatud kirjandus

- Kask J. ja Grube A. 1993. Uus mõiste geotoop ja maastike kaitse. *Eesti Loodus* 7: 236–237.
- Satkunas J., Mikulenav V., Lazauskiene J., Raudsep R., Täht K., Markots A., Lacis A. 2002. Towards a Geosites Framework in Northern Europe – a First Attempt in the Baltic States. Rmt: *Natural and Cultural Landscapes – the Geological Foundation*. Proceedings of a Conference 9–11 September 2002 Dublin Castle, Ireland. Royal Irish Academy. Leinster Leader, Naas, Co, Ireland, 117–120.
- Satkunas J., Mkarikhin V., Mikulenav V., Raudsep R., Täht K., Vdovets M. 2004. „Geosites listings for Northern Europe – a status report”. Rmt: *The 32rd International Geological Congress, Florence, Italy*. August 20–28, 2004.
- Täht K. 2001. About selection of most representative geotopes in Estonia. ProGEO – Rmt: *The European Association for the Conservation of Geological Heritage*. ProGEO Working Group Nr. 3 Meeting Guidebook&Abstracts, Latvia, 2001, 27–28.
- Täht K. 2001. Kaitstavate geotoopide andmebaasi koostamine. Eesti esinduslikemate geotoopide valimine Põhja-Euroopalise tähtsusega geoloogiliste loodismälestiste nimistusse. Rmt: *Eesti Geoloogiakeskuse aastaraamat 2001*. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, 121–124.
- Wimbledon W.A.P., Andersen S., Cleal C.J., Cowie J.W., Erikstad L., Gonggrijp G.P., Johansson C.E., Karis L.O., Suominen V. 1997. Geological World Heritage: GEOSITES – a global site inventory to enable prioritisation for conservation. Rmt: *Proceedings of the II Symposium of the European Association for the Conservatoin of the Geological Heritage*. Memorie del Servizio Geologico d'Italia.
- <http://www.egeos.ee/index.php?pg=geotoobid&lang=est>
<http://www.sgu.se/hotell/progeo/WG/nordeuropa/grundsida.html>

Krista Täht-Kok (krista@egk.ee) – Eesti Geoloogiakeskus OÜ, Geofüüsika, mere- ja keskkonnageoloogia osakond, Kadaka tee 82, 12618 Tallinn.

Stratigraafia ülesanne *ehk* kuidas teha stratigraafiat

Madis Rubel

Numbriliste meetodite (*elik* matemaatika) kasutamine on tekitanud vajaduse muuta arusaami stratigraafias. Teatavasti tegeleb stratigraafia otseste vaatluste korrastamisega talle omaste, verbaalselt (kõnekeeleliselt) antud mõistete ja lõpuni avamata protseduuridega. Ja seda vastupidiselt matemaatikale, kus on tegu asjade küll abstraktse, kuid ühemõttelise käsitlusega. Rakendades aga matemaatilisi meetodeid stratigraafiliste ülesannete lahendamisel, ei saa läbi muutusteta ei stratigraafia mõistelise baasi ega sellele toetuvate protseduuride osas. Siiski, pole välistatud võimalus just tavapärase stratigraafiaga jaoks luua, paraku küll leida, vastav matemaatiline mudel (vt. Griffiths 1989).

Stratigraafiale on ainuomane kahe omavahel teatud määral kattuva ülesande lahendamine. Nendeks on: (1) maakoore liigestamine ja (2) saadud kivimkehade (ehk stratoonide) vanuseline järjestamine ehk dateerimine. Just neid kahte ülesannet lahendab stratigraafia, kui geoloogia haru, ükskõik milliste maakoort iseloomustavate tunnuste järgi seda siis ka ei tehtaks. Nii räägitakse küll lito-, bio-, magneto-, tsüklo- ja krono-stratigraafiast või paljudest teistest maakoore liigestamistest, mis aga kõik on nii või teisiti suunatud kahe eeltoodud ülesande lahendamisele.

Mõlema stratigraafia ülesande matemaatilise lahendamise käiku on paljudel juhtudel kirjeldatud rea algoritmide ja arvutiprogrammidega. Nii tehes tuli ainult muuta rangemaks stratigraafias kasutatavad mõisted ja nendevahelised suhted ning anda toimiv (lõpuni operatsiooniline) kirjeldus eesmärgistatud protseduuridele. Veelgi enam, stratigraafia ülesannetele anti nüüd aksiomaatiline ülesehitus. Sellisena näevad stratigraafia tegemist W.W. Hay (1972), W. Schwarzacher (1975), F.A. Usmanov (1982) ja paljud teised. Kirjeldatud käsitlus on ka järgneva teksti sisuks.

Stratigraafiliste mõistete määratlemine

Postuleerime esmalt superpositsiooni, mõistes selle all kivimite ruumilistest suhetest ajaliste vahekordade tuletamist, tehes seda piki sedimentatsiooni juhtinud raskusjõu vektori suunda ühes kohas (Schwarzacher 1975). Defiineerime ideaalläbilõike, kui erinevate kihtide lasuvusega risti asuva superpositsiooni kehtestava joone. Iga reaalne läbilõige peab piisavalt rahuldama ideaalläbilõike nõudeid, et olla ühemõtteline alus selle liigestamiseks ja dateerimiseks vastavate protseduuridega.

Kolmedimensiooniliste stratoonide, kui ruumilise levikuga kivimkehade väljaeraldamine ühedimensioonilistes läbilõigetes jälgitu põhjal on

tuntud stratigraafilise korrelatsioonina. Määratleme stratigraafilise korrelatsiooni kui kahe või enama läbilõike kõrvutamist neis leiduvate mis tahes kihtide enese ja nende stratigraafilise positsiooni (st. järgnevuse) järgi (Hedberg 1976).

Ühtede ja samade läbilõigete stratigraafiline korreleerimine erinevate tunnuste põhjal ei pruugi anda ruumiliselt kokkulangevaid kihte (ehk kivimkehi). Kui selliselt saadud kihid lõikuvad üksteisega, oleme saanud nende ajalise (vanuselise) järgnevuse suhtes vastuolulise tulemuse. Siit järeldub omakorda, et stratigraafiline korrelatsioon iseenesest ei taga ühegi otseselt või instrumentaalselt vaadeldava tunnuse põhjal väljaeraldatud kivimkeha (kihi) üheaegsust kõigis teda sisaldavais läbilõigetes. Läbilõigetes kirjeldatud kihtide vanussuhted saame eraldi protseduuri, dateerimist kasutades.

Vanussuhete määramine ja erinevad (aja)skaalad

Iga kolmemõõtmelise kivimkeha enda, nagu ka nendevaheliste vanussuhete (ajalise järgnevuse) määramiseks läbilõigetes ehk suhteliseks dateerimiseks, on vaja veel neljandat dimensiooni – kõikidele läbilõigetele ühist ajatelge. Seda tuleks gradueerida sellise skaalaga, mida vastandades (korreleerides) igas läbilõikes antuga, saame dateerida kivimid selle ajaskaala termineis. Sellisel moel saadud vanused on läbilõigetes sealsete kivimite järjekordne tunnus. See pole neis küll otseselt vaadeldav, kuid läbilõigete omavaheline stratigraafiline korrelatsioon lõpeb nüüd samavanuseliste stratoonide eraldamisega neile omases järgnevuses.

Mis tahes neljandat mõõdet (aega) kirjeldav skaala kui dateerimisvahend peab vastama järgmistele nõuetele: (a) see peab olema konstrueeritud stratigraafilisest korrelatsioonist sõltumatult, (b) selles ei tohi olla ei lünki ega kattumisi ning (c) see peab olema läbilõigetes kasutatav. Korrektse ajaskaala koostamise eeldusi pakub vähemalt kaks looduslikku protsessi: elementide radioaktiivne lagunemine ja bioloogiline evolutsioon. Neist esimest loetakse toimuvaks läbi aegade püsiva kiirusega ning füüsikalist aega mõõtev skaala on regulaarne – mõõtühikuga aasta või selle kordsed. Evolutsiooni kiirus pole aga selliselt mõõdetav, et oleks võimalik seda näidata ajas järjepidevalt toimiva ühikuna. Evolutsiooni kirjeldame kordumatute, mittevõrdseid pikkusi omavate üksuste järgi. Selle tulemusena saame ordinaalse ajaskaala.

Evolutsioonilistel muutustel põhineva paleontoloogilise skaala konstrueerimisel lähtutakse Smithi seadusest ehk faunade järgnevuse reeglist: taksonite või nende koosluste üksteisele järgnevus eripaiksetes läbilõigetes on paljus ühtmoodi jälgitav. Järelikult, eriti numbriliste lahenduste jaoks invariantset ehk muutumatut stratigraafilist järgnevust

omavad paleontoloogilised sündmused erinevates läbilõigetes on aega (vanust) kirjeldava ordinaalse ajaskaala üksused. Üksused, mis annavad läbilõigetes esinemise korral neid sisaldavatele kivimitele nendejärgse üheaegsuse (Scott 1985) ja kogu skaalat järgivald tõenäosusliku (Hay 1972) või oletusliku vanuse (Rubel ja Pak 1984).

Ordinaalne ajaskaala geokronoloogilises tabelis

Geoloogilist aega kirjeldab ja mõõdab eelnevatele lisaks ka geokronoloogiline tabel (nn. standard), mis oli algselt küll suuresti stratigraafilisel korrelatsioonil põhinev ja mitte just alati ühemõtteliste üksustega. Standardi kaasaegne versioon (*Standard Global Stratigraphic Scale*) on aga oma olemuselt puhtalt ajaline konstruktsioon, eriti just Paleosoikumist vanemas osas. Kuid ka Paleosoikumi enda (nagu kogu Faneroosikumi) üksuste fikseeritud alguspunktid (GSSP) võidakse varustada vanusehinnangutega ning anda nende pikkused füüsikalise aja meetrikas (Gradstein 2004). Selliselt käitudes näitame geokronoloogilise standardi (geoloogilist sisu omavaid) üksusi kindlaid pikkusi omavate ajavahemikena, läbi neile omistatud hierarhiliste klassinimedega nagu ajastu, ajastik või iga. Tulemuseks on põhimõtteliselt regulaarne ajaskaala, aga ordinaalsete üksustega. Ka vastupidine ajaskaala esitamine on kasutamist leidnud, läbi ordinaalsete üksuste alguskohtadele füüsikalise vanuse määramise.

Kõigest eelöeldust lähtudes peaks kivimite (s.t. maakoore) stratigraafiline klassifikatsioon tunnistama järgmisi stratoonide klasse:

(a) kivimkehad (ingl. k. *rock units*). Need on saadud stratigraafilise korrelatsiooni teel, näitamaks makroskoopiliselt või instrumentaalselt jälgitud tunnuse ruumilist pidevust. Nad on lõpliku geograafilise levikuga ja suuremõdulisel kaardistamisel kasutatavad. Siia alla kuuluvad näiteks ametlikud litostratigraafilised üksused, nagu kihtkond, kihistu, kihistik ja kihid.

(b) markerid (ingl. k. *intermediate units*). Need on saadud samuti stratigraafilise korrelatsiooni teel, kindla eesmärgiga näidata üht või teist tunnust sisaldavate kivimkehade (kihtide) üheaegsust. Nad on lõpliku kuni globaalse geograafilise levikuga, kaardistamisel kaudselt kasutatavad. Siia alla kuuluvad mitmesugused tsoonid, nagu bio-, polaarsus-, kemo- ja paljud teised tsoonid ning samuti lihtsalt oma tekkemehhanismiga üheaegsust näitavad tasemed või kihid, nagu näiteks bentoniidid.

(c) kronostratoonid (ingl. k. *time-rock units*). Need on saadud ainuüksi erinevates läbilõigetes mingi ajaskaala järgi ühte ja samasse vanusevahemikku (ajaintervalli) kuuluvate kivimite ühendamise teel.

Esseisvad ülesanded – kronostratoonide tulevik?

Mis tahes, eriti füüsikalise ajaga antud ajaintervallide kivimilised (stratigraafilised) vasted igas läbilõikes, ei kata seal reeglina kogu antud ajaintervalli. Tegu on alati suuremate või väiksemate sedimentatsiooniliste lünkade või erosiooniga. Sellest on tõstatatud küsimus kaotada nomenklatuurne dualism ajaliste (geokronoloogiliste) üksuste ja neile mitteadekvaatsete stratigraafiliste vastete (seega kronostratoonide) vahel. Olgu niisugusteks siis ajastik ja ladestik või mis tahes teised analoogid. Diskussioon selle üle pole lõppenud ja teadaolevalt on uus rahvusvaheline stratigraafia juhis selles lõigus sõnastamata.

Siiski, kui paleontoloogilisi tavatsoone saab ja tuleb käsitleda eelkõige ajamarkeritena, siis paljude läbilõigete taksonite levikupiltidest ajalise komponendi (samase järjestuse) väljatoomine numbriliste meetoditega nn. komposiidi näol (vt. Gradstein jt. 1985) kujutab endast täiesti puhast ajaskaalat. Viimase kasutamine seisneb komposiidi ja kindla läbilõike tavaliselt graafilises vastandamises, kus joonistub välja komposiidijärgset vanust näitav korrelatsioonijoon (LOC) näitamaks vanust ennast ja sedimentatsiooni kulg (suhteline kiirus kuni lünkadeni). See annab võimaluse kanda ühest läbilõikest teise üle mis tahes ajahetke, olgu selleks näiteks kronostratoon defineeriv alguspunkt (GSSP). Sealjuures komposiidil saab jällegi näidata olemasolevaid kronostratoonid ainult neid defineeriva ajaüksusena.

Ülaltoodud sisuga kronostratoonid võivad olla defineeritud geograafiliselt piiratud alal sealkehitava ajaskaalaga. Ka need nn. regionaalsed kronostratoonid (tavaliselt seda ala stratigraafiat kirjeldava tabeli vasakul servas) on eelkõige ajaintervallid neile iseloomulike probleemidega (vt. ülal), sealjuures olles sõltumatud globaalsetest kronostratoonidest.

Kasutatud kirjandus

- Gradstein F. jt. 2004. *Geological Time Scale*. Cambridge University Press, 500 p.
- Gradstein F., Agterberg F., Brower J.C., Schwarzacher W. 1985. *Quantitative Stratigraphy*. UNESCO, Paris. D. Riedel Publishing Co, Dordrecht, Netherlands, 598 p.
- Griffiths C.H. 1989. An example of the use of fuzzy-set based pattern recognition approach to the problem of strata recognition from drilling response. Rmt: *Quantitative stratigraphy – retrospective evaluation and future development*. Eds. A. Oleynikov and M. Rubel. Tallinn, 83–100.

- Hay W.W. 1972. Probabilistic stratigraphy. *Eclog. Geol. Helv.* 65(2): 255–266.
- Hedberg H.D. (toim.) 1976. *International Stratigraphic Guide*. J. Wiley & Sons. New York. London. Sydney. Toronto, 200 p.
- Rubel M. ja Pak D.N. 1984. Theory of stratigraphic correlation by means of ordinal scales. *Computers and Geosciences* 10(1): 97–105.
- Schwarzacher W. 1975. *Sedimentation Models and Quantitative Stratigraphy*. Elsevier Publication Co., Amsterdam, 382 p.
- Scott G.H. 1985. Homotaxy and biostratigraphical theory. *Palaeontology* 28(4): 777–782.
- Usmanov F.A. 1982. Axiomatic approach in geochronology. Rmt: *Development of time concept in geology*. Kiew, Naukova Dumka, 318–360 (vene keeles).

Madis Rubel (madis.rubel@ut.ee) – Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu.

Lütkadest ja pidevusest kivimkehade piiridel

Rein Einasto

Piiride puudumist väljendab eesti keeles mitmetähenduslik mõiste – piiritus. Nähtusi ja protsesse Suures Looduses süsteemselt käsitleda ja mõista püüdes on nende piiritlemine nii ruumis kui ajas elementaarne protseduur mistahes uuringutes, mis planeet Maa kivimkehade suhtes rakendatuna sünnitas ühe geoloogia baasteaduse – stratigraafia. Viimane on kogu maakoore keerulist tekkelugu lahti mõtestada püüdes kasvamas stratoloogiks, nagu geograafiast sündis geoloogia.

Piiri mõiste on Eesti Entsüklopeedias (1994) antud vaid haldus-, majandus- ja riigipiirina; seega inimtekkelistena, ühiskondliku elu käigus kujunenud piiridena, minnes mööda looduslikest, sealhulgas geoloogilistest piiridest. Glossary of Geology (1977) määratleb piiri (ingl. k. *boundary*) pinnana, millest väljaspool ei levi (ei esine) antud objekti kõik (mõned) omadused (tunnused); näiteks pind, mis eraldab eri koostise või vanusega kivimkehi; joon, mis eraldab (geoloogilisel) kaardil eri kartograafilisi ühikuid.

Sageli kerkib küsimus – kuivõrd inimese väljaeraldatud looduslike objektide piire saab lugeda loomulikeks? Kriteeriumide valik on valdava osa „looduslike“ piire muutnud samuti inimtekkelisteks so kunstlikeks, kuivõrd järkjärgulised siirdelised muutused minetavad selge piiri, millest praktikas laialt tuntud mõiste „piirikihid“ loovad vajaduse ühe piiri asemel fikseerida kaks. Looduslikkuse ehk loomulikkuse põhimõtte järjekindel rakendamine loodusedustes on aastasadade arutlusteema, millest lähituleviku geoloogilises tunnetusmaailmas ei saa üle ega ümber.

Looduse süsteemsus ja astmelisus geoloogias

Püüdes avada looduses süsteemsust, ei ole pääsu hierarhia ehk astmelisuse mõistest. Pea kõik süsteemne Suures Looduses on ka perioodiliselt, rütmiliselt või tsükliliselt hierarhiline (Einaste jt. 1991). Kuipalju me sellest sügavuti teame? Kuidas nähtusi, protsesse klassifitseerides, süstematiseerides seletame? Kuipalju on inimese loodud (avastatud) süsteemis loomulikkust, kui palju kunstlikkust või tehiskust? See on paljuski veel subjekti empiirilise „tunnetusvõime“ küsimus objektiivset tajuda. Viimane on geoloogias, täppisteadustele küll jõudsalt lähenedes, sellest veel üsna kaugel faktorite paljususe, tundmatute rohkuse tõttu. Näited:

- a) aine ehituse rida mikromaailma elementaarosakestest makrokosmose galaktikaparvedeni;

- b) eluslooduse taksonoomiline süsteem liigist hõimkonnani;
- c) kivimkehade (stratoonide) hierarhilised read:
 - kiht: kihind – kihistik – kihistu – kihtkond – kihim;
 - lade: ladend – ladejark – ladestik – ladestu – ladekond – ladem;
 - tsükliit: tsükliidind – tsükliidistik – tsükliidistu – tsükliitkond*;
 - lasu: lasund – lasustik – lasustu – lasukond – lasum (vabakasutuses olevad üksused).

*uusi kunstlikke termineid: tsükliitkond, tsükliidistu, tsükliidistik; lasu, lasustik, lasustu jne. soovitan kasutada ettepanekuna suurema emakeelse süsteemi loomise huvides, kuigi nende loomulik geoloogiline maht on määratlemata.

Loomulikust süsteemsusest ajalooliselt kujunenud kivimkehade stratigraafilises hierarhilises süsteemis oleme veel üsna kaugel. Siin on Balti Oordoviitsiumi–Siluri (O–S) paelasund hea säilimisastme, suure loodusliku liigenduse ja kõrge uurituse tasemega väga heade eeldustega mudelalaks, kus luua kõrge looduslikkuse-astmega stratoonide hierarhiline süsteem, eeskujuks maailmale. Meie ökostratigraafia koolkonnal on lisaks headele eeldustele ka vajalik maine ja rahvusvaheline kohustus luua üks stratigraafiline hierarhiline süsteem.

Kõikide esitatud ridade mõlemad otsad jäävad lahtiseks (vähemalt teoreetiliselt), kuni jõuame lõpmatusse ehk piiritusse mõlemas suunas, teisiti öeldes olematusest kõiksusse. Aga ka olematus on ju olemas, kui meist targematele toetuda. Siit esimene tõsine tunnetuslik järelus: piirideta geoloogias jõuame nii alla kui üles liikudes iseeneslikult piiritusse, mis loodusteadlastele peaks olema hästi läbitunnetatud probleemiring. Niipalju siis sissejuhatuseks. Alljärgnevalt mõningaid mõttearendusi geoloogias üldtuntud piiritlemise ja loomulikkuse teemadel.

Piiride määratlemine stratigraafias

Stratigraafias on põhjust piirduda vaid kivimkeha alumise ajalise piiri käsitlemisega, sest ülemise piiri määrab juba lasuva stratooni alumine piir. Piirikriteeriumite mitmekesisus on kiiresti klassikalisest biostratigraafiast väljapoole kasvanud. Seda *esiteks*, esmaste litofatsiaalsete tunnuste olulise mitmekesisustumise ja komplekseerumise teel, võimalusega hierarhiliselt erineva astme kihte vertikaalselt ja lateraalselt ruumis jälgida samm-sammult, puuraugust puurauku, fikseerides ühtede ajalise väärtusega tunnuste püsimist ja teiste samaaegset muutumist. Fatsiaalne analüüs ja süntees on stratigraafia ja sedimentoloogia (litoloogia) piiriteadusena edukalt arendatav vaid ajaliste piiride vahel, mis on põhjustanud paelitoloogide elukestva huvi stratigraafia vastu.

Teiseks, on väljakasvamine toimunud tsükloloogia ja isotoopgeoloogia edusammude kaudu, mis perioodiliste ookeanipinna eustaatiliste muutuste selgumisel võimaldavad madalveeliste setete lünklikke läbilõikeid tsükliitide alusel ja biostratigraafilise üldise karkassi olemasolul korreleerida kaugusest sõltumata oluliselt detailsemalt kui biomuutused seni võimaldasid. Siin on meie basseini-geoloogiline kõrgtase, puursüdamike esinduslik arsenal eriti soodne lähtepinnas sellesuunalisteks süvauringuteks.

Lüngad on kogu inimtunnetuses, nii kunstis kui teaduses, üks kesksemaid püsiprobleeme. Lüngad teadmiste mistahes valdkonnas seavad alatasa piire tunnetusprotsessi pidevusse; sunnivad katkenud pidevust fantaasia abil hüpoteeside püstimisega ületama, stimuleerides uusi teadmisi otsima ja väiteid tõestama. Lüngad geoloogilistes läbilõigetes settimisprotsessi ajalise pidevuse katkemise tähenduses on ala geoloogilise arenguloo selgitamisel nii tõsiselt takistavad kui ka oluliselt abistavad nähtused. Viimast on oma hilisloomingus meisterlikult käsitlenud akad. D. Nalivkin (Наливкин 1974), rõhutades järgmist: „Teadmatust (vene k. неизвестность) saadab pea kõiki lünki, seades meie ette üha uusi, sageli ootamatuid küsimusi. Nende lahendamine on kaasaja stratigraafia üheks põhiülesandeks.“

Ajalised lüngad geoloogilises läbilõikes väljenduvad kas selgelt markeeritud katkestuspindadena või varjatud lünkadena. Neist viimased on siirdelises üleminekus koostiselt või vanuselisel erinevate stratoonide vahel, kus on tõestatud mingi ajalise intervalli (mujal teadaoleva läbilõikeosa) puudumine.

Objektidevahelised piirid sedimentoloogias

Sedimentoloogias on meil piisava andmebaasi olemasolul loogiline lähtuda basseini looduslikust tervikkusest. Kogu meie Balti paelasum on kujunenud ääremere tüüpi platvormse (perikontinentaalse) basseini šelfilises settimisruumis – Balti paleobasseinis (Nestor ja Einasto 1997) – kus selgelt eristuvad kolm oluliselt erineva settimisrežiimiga geostruktuurset piirkonda: (1) kaldalähedane platoo, (2) šelfisisene lauge nõlv ja (3) sügavamaveeline šelfiplatoo.

Kaldalähedane platoo on laudtasane, väga nõrgalt avamere suunas kaldu oleva põhjaga mereosa, kus lühiajaline settimine vaheldus perioodiliselt kestvama settimise katkestuse ja vaevumärgatava kulutusega nii veealuses kui õhualuses ruumis. Settimine oli katkestusajaga võrreldes lühiaegne, sest settimisruum sünnib vaid transgressiivse eustaatilise tõusuga või maakoore vajumisega ja on piiratud õhukese platoopealse veekihiga püsiva lainetuse alumisest piirist madalamal. Seda ulatuslikku ala on

settelünga ajal nimetatud null-sedimentatsioonivööndiks. Settimisruumi täitumine parasvöötmelises kliimavööndis (BI–DII) oli horisontaaltasapinnaline – õhukesed kihid on selgepiirilised ja suure horisontaalse ulatusega. Suurema paksusega (1–20 m) läätselised lausteralised kaaneliiva madalikulised kuhjed ja kaasnevad riffimoodustised kujunesid alates Baltika triivist troopikasse Oandu east alates. Nii moodustus Vasalemma tsüstiidlubjakivi, Tamsalu rõngaspaas, Jaani, Jaagarahu ja Paadla ea biohermid koos krinoidlubjakiviga. Kõvastunud kuni kivistunud merepõhi fikseerus mitmekesiste, nii morfoloogiliselt kui geokeemiliselt erineva (püriitse, limoniitse, fosfaitse jm.) koostisega ühenditest impregneerunud sagedaste katkestuspindadena. Viimased tähistavad settimises lünki. Suur enamus katkestuspindu on samas ju tegelikult väikesemahulised kulutus-pinnad. Mere kestvam taganemine kaldalähedaselt platoolt ulatuslikumate regressioonide ajal vallandas kuivale jäänud paesel pinnal karstumisprotsessid ja karrilise pinnareljeefi kujunemise, mida tunneme paljudel katkestuspindadel nagu läbilõikes.

Šelfisisene lauge nõlv on murdlainetuse alumisest piirist sügavamal paiknev valdavalt vaigseveeline mudaline settimisruum. Seni pole vajalikul määral esile toodud külgtäitumise tähendust settekehade kujunemisprotsessis, mis põhjustas platoolise settimisruumi mõningase laienemise avamere suunas. Kihtide paksus kasvab märgatavalt ja korrapäraselt avamere suunas. Valdavat lubimuda settimist katkestasid tormilainetuse põhjustatud teralise kaaneliiva tempestiitsed vahekihid lamami mõningase kulutuse jälgedega pinnal. Valdavad on järk-järgulised pidevad üleminekud kihtide vahel vertikaalses ja kihtide sees lateraalses suunas.

Regionaalselt paiknes see üleminekuvöönd kogu paetekkeperioodi vältel püsivalt Mustvee–Kolka joonel, migreerudes aeglaselt külgtäitumise tulemusel basseini sügavama osa suunas. Märkimisväärne on tõsiasi, et üleminekuvööndi kaldapoolsem piir nihkus Siluris avamere suunas paarisaja kilomeetri ulatuses, samal ajal kui selle vööndi merepoolne piir püsis kestvalt samal kohal. Kõige ulatuslikumate eustaatilise languse aegadel (DII\DIII, O3\S1, G3+H), kui püsiva murdlainetuse vöönd taganes üleminekuvööndisse, toimus sellel nõlval mastaapne kulutus.

Sügavamaveeline šelfiplatoo on pideva katkematu vaigseveelise savise lubimuda settimisrežiimiga ulatuslik ala Liivi keele piirides (Einasto 1995). Settimise katkestused selles piirkonnas on seotud ühelt poolt süvahoojustega, teiselt poolt ulatuslike eustaatiliste langustega mandri-jäätumiste maksimumide ajal ja ilmselt veel mõnede regionaal-tektooniliste liikumiste globaalse tagasimõju tagajärjel. Kõige intensiivsem mergli settimine toimus nõlva jalamil, lubimuda settimine aga nõlva ülaosas (E'R, FiaS, F1cM, G3S, J2S).

Siinkohal oleks paslik loetleda üles kestvamate lünkadega seotud sedimentoloogilisi suursündmusi Balti paleobasseini elus:

1. Arenigi globaaltransgressioon ja maailma suurima glaukoniitliivallasundi kuhjumine paetekke-eelse basaalse lasundina üle kogu basseini (BI);
2. Avaloonia põrkumine Baltikaga, tagajärjeks suur paksuste inversioon CII\CIII piiril;
3. Troopikasse triiv ja globaalregressioon DII\DIII piiril;
4. Globaalregressioonid FIc\FII, G3\H ja J2\K1 piiril;
5. Kaledoniidide kerke kasvav mõju alates H'V tasemest.

Katkestuspinnad ja settelüngad

Katkestuspindade stratigraafiline ja sedimentoloogiline tähendus on Balti paelasumi üksikutel stratigraafilistel tasemetel tänuväärselt detailset käsitlemist leidnud (Orviku 1961; Эйнасто 1964; Nõlvak 1972; Bauert 1989; Saadre 1992, 1993; Saadre ja Suuroja 1993; Einasto ja Kalam 2001; Einasto ja Rähni 2005, 2006a, 2006b, 2008; Einasto jt. 2006 jt.). Paraku materjalivääriline monograafiline uuring kogu O–S paelasumi ulatuses seni aga puudub.

Katkestuspinna mõiste ja termini tõi eesti geoloogilistesse käsitlustesse Karl Orviku (1940) Tallinna Ehituslubjakivi monograafilises käsitluses, millele järgnes selle mõiste hoogne kasutamine O2 lademete piiride täpsustamisel V. Jaanussoni, R. Männili ja A. Rõõmusoksa üliõpilaspõlve uuringutes ja pärastõja-aegsetes trükistes (Jaanusson 1945; Геккер 1960; Орвику 1960 jt.). Katkestuspindade tähenduse läbilõike litostratigraafilisel liigestamisel esitas akad. K. Orviku alumiste paekalda-lademete monograafilises käsitluses (Орвику 1960). Üks varasemaid katkestuspindade stratigraafilise tähtsuse käsitlusi rahvusvahelisel tasandil on kahtlemata V. Jaanussoni (1961) ulatuslik artikkel, kus kirjeldatakse nende tekke-tingimusi. Kõige süsteemsema käsitluse katkestuspindadest kogu Balti Ordoviitsiumi ulatuses leiame L. Põlma monograafiast (Пылма 1982). Siluri läbilõikes esinevate lünkade leviku ülevaade on toodud D. Nalivkini mälestuskogumikus (Эйнасто 1989).

Katkestuspindade käsitluste vähesus tolle aja kirjanduses teiste alade materjali alusel kujundas väärseisukoha Balti läbilõike unikaalsusest nende tekke- ja mattumistingimuste osas, mis meie hilisemate vaatlusandmete alusel Podoolias ja Siberis (Мягкова jt. 1977) ei leidnud kinnitust. Selgus, et katkestuspindu ei ole kohalikud uurijad lihtsalt ära tundnud, millele varem juhtis tähelepanu R. Hecker (Геккер 1960).

Balti paleobasseini arenguetapid

Geotektooniliselt jaguneb Balti paleobassein ehk O–S paetekke epohh kolmeks globaaltektooniliseks makrofaasiks, mis alates vanimast on järgnevad:

1. Baltika triiv lõunapooluse jahedast parasvöötmeest subtroopikasse enne pörkumist Avalooniaga;
2. Baltika triiv lõunapooluse subtroopikast troopikasse pärast pörkumist Avalooniaga;
3. Baltika triiv troopikas pärast pörkumist Laurentiaga ja Kaledoniidide kerkimine.

Piiri esimese ja teise makrofaasi vahel tähistab ulatuslik lünk CII\CIII lademe piiril, millega kaasneb paksuste inversioon: esimese makrofaasi piires Põhja-Eestis paksused kasvavad läänest itta, kihtide väljakiildumine ja lünkade kestuse suurenemine toimub loode suunas. See on jämedalt sünkroonis Whiterocki ülemise piiriga Põhja-Ameerikas – seega on tegemist üleilmse regressiooni tulemiga. See piir on J. Nõlvakul (1972) üllatava põhjalikkusega süsteemselt käsitletud. Piiri teise ja kolmanda makrofaasi vahel markeerib kestev lünk G3\H lademe piiril, mille tõestus sündis samuti kitiinikute uurimisel (Hecrop 1976).

Arengulooliselt oleme Heldur Nestoriga (1997) kogu Balti O–S paleobasseini paetekke epohhi jaganud viieks makroetapiks, lähtudes Bubnovist, alustades vanimast:

1. Transgresseerumine BI–BII
2. Unifitseerumine BIII–DII
3. Diferentseerumine DIII–G3
4. Stabiliseerumine H–K1
5. Täitumine K2–K4

Katkestuspindade geoloogia ja lünkade süsteemne uurimine on meie prioriteetne valdkond, mille tulemused on mõjuv jälg rahvusvahelisse Maa-tunnetusse. Geoloogiliste protsesside uurimisvaldkonnas on lünkade probleemistik alles üleskündmata uudismaa, kus Balti O–S paelasumisse peidetud teave avamine sügavuti ja laiuti peaks kujunema meie geoteadlaste suureks võimaluseks ja tõsiseks kohustuseks.

Kasutatud kirjandus

- Bauert H. 1989. Discontinuity surfaces of possible microkarst origin in the Viivikonna Form. (Kukuruse Stage, Mid. Ordovician), Estonia. *Eesti TA Toim. Geoloogia* 38: 77–82.
- Glossary of Geology*. 1977. Kirjastus MIR, Moskva, lk 196.

- Eesti Entsüklopeedia* 7. 1994. Eesti Entsükolopeediakirjastus, Tallinn, lk 302.
- Einasto R. 1995. Liivi keele omapärast Baltika arenguloos. Rmt: *Liivimaa geoloogia: Tartu Ülikooli Geoloogia Instituudi 175. aastapäev*. Eesti geoloogide teine ülemaailmne kokkutulek. Tartu 3-6. oktoober 1995. Tartu Ülikool, Eesti Geoloogia Selts, Tartu. 23–32.
- Einasto R. 2002. Lasnamäe ehituslubjakivi ajaloolised murdmiskihid Tallinna ümbruses. *Tallinna Tehnikakõrgkooli Toimetised* 1: 56–69.
- Einasto R. ja Kalam E. 2001. Microcycles, discontinuities and trace fossils in the Lasnamägi building stone. Rmt: Harper, D.A.T., Stouge, S. (toim.), *WOGOGO-2001, Abstracts*. Geological Museum of Copenhagen and Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen. 34–35.
- Einasto R. ja Rähni A. 2005. Lasnamäe ehituspaestu puursüdamik skaneeritud ja digitaalselt töödeldud läbilõige Pakri poolsaarelt. *Keskkonnatehnika* 7/05: 66–71.
- Einasto R. ja Rähni A. 2006a. Vao kihistu digitaalselt töödeldud kiht-kihiline tüüpläbilõige. *Keskkonnatehnika* 3/06: 51–55.
- Einasto R. ja Rähni A. 2006b. Kõrgekalda kihistu digiläbilõige Ülemiste puursüdamikus. *Keskkonnatehnika* 4/06: lk 51–53
- Einasto R. ja Rähni A. 2008. Kukruse lademe liigestus Ülemiste puursüdamikus. *Keskkonnatehnika* 3/08: 56–59.
- Einasto R., Rähni A., Piht H. 2006. Katkestuspinnad Vao ja Kõrgekalda kihistu piirikihtides (Ülemiste puursüdamik). *Keskkonnatehnika* 2/06: 52–53.
- Einsele G., Ricken W., Seilacher A. 1991. Basic Concepts and Terms. Rmt: Einsele, G et al. (Toim.) *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 1–19.
- Jaanusson V. 1945. *Über die Stratigraphie der Viru- resp. Chasmops-Serie in Estland*. Geol. Fören i Stockholm förhandl., Bd. 67 H. 2, S. 212–224.
- Jaanusson V. 1961. Discontinuity surfaces in limestones. *Bull. Geol. Inst. Uppsala* XL: 221–241.
- Nestor H. ja Einasto R. 1997. Ordovician and Silurian carbonate sedimentation basin. Rmt: Raukas, A., Teedumäe, A. (Toim.) *Geology and mineral resources of Estonia*. Tallinn, 192–204.
- Nõlvak J. 1972. Kukruse ja Idavere lademe piirikihtide iseloomustus Lipu puurprofiilis. *ELUS Aastaraamat* 61: 39–59.
- Orviku K. 1940. Lithologie der Tallinna. Serie (Ordovizium, Estland) I. *Tartu Ülik. Geol. Inst. Toim.* 58: 216 S.
- Orviku K. 1961. Diskontinuiteedipinnad Volhovi ja Kunda lademes. Rmt.: Orviku, K. (toim.) *Geoloogiline kogumik*. Tartu, 16–25.

- Saadre T. 1992. Distribution pattern of the Ordovician discontinuity surfaces, East Baltic Region. *Bull. Geol. Surv. Estonia* N 2/1: 16–26.
- Saadre T. 1993. Middle and Upper Ordovician discontinuity surfaces in Northern Estonia (zonality based on their impregnation type). *Bull. Geol. Surv. Estonia* N 3/1: 33–39.
- Saadre T. ja Suuroja K. 1993. Stratigraphy of the Kukruse Stage in Estonia. *Bull. Geol. Surv. Estonia* 3/1: 25–32.
- Геккер Р. Ф. 1960. Ископаемая фация гладкого каменного морского дна. Труды Института геологии АН ЭССР т У, 199–227.
- Мягкова Е. И., Нестор Х. Э., Эйнасто Р. Э. 1977. Разрез ордовика и силура реки Мойеро. Новосибирск, Наука, 176 с.
- Наливкин Д. В. 1974. Проблемы перерывов. Этюды по стратиграфии М Наука, 10–21.
- Нестор В. 1976. Сопоставление некоторых разрезов райккюлаского горизонта Эстонии по микропланктону. *Изв. АН ЭССР Хим. Геол.* 25(4): 319–324.
- Орвику К. К. 1960. О литостратиграфии волховского и кундаского горизонтов в Эстонии. Труды Института геологии АН ЭССР т. V, 45–88.
- Пиррус Э., Эйнасто Р. 1987. Классификация стратиграфических пробелов и седиментационных перерывов в палеозое Прибалтики // *Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised. Geoloogia* 36(1): 36–44.
- Пылма Л. 1982. Сравнительная литология карбонатных пород ордовика северной и средней Прибалтики. Таллинн, Валгус, 164 с.
- Эйнасто Р. 1964. К вопросу о классификации и формировании поверхностей перерыва // *Литология палеозойских отложений Эстонии*. Институт геологии Академии наук Эстонской ССР, Tallinn, 123–130.
- Эйнасто Р. 1989. Система перерывов в силуре северной Прибалтики // *Геология и палеонтология: к 100-летию со дня рождения академика Д. В. Наливкина*, Leningrad: Nauka, 142–153.

Rein Einasto (rein.einasto@hot.ee) – Tallinna Tehnikakõrkkool, Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn.

Ühest unustusehõlma vajunud evolutsiooniteooriast ning sellest, kuidas Eestist tõendusmaterjali otsiti

Oive Tinn

„Teadus ei ole sirgjooneline marss tõe poole, vaid piinarikas, pimedate põiktänavate ja iga paari miili järel tehtavate uudistamispeatustega teekond.“

Stephen Jay Gould

Shields of expectation – and actuality

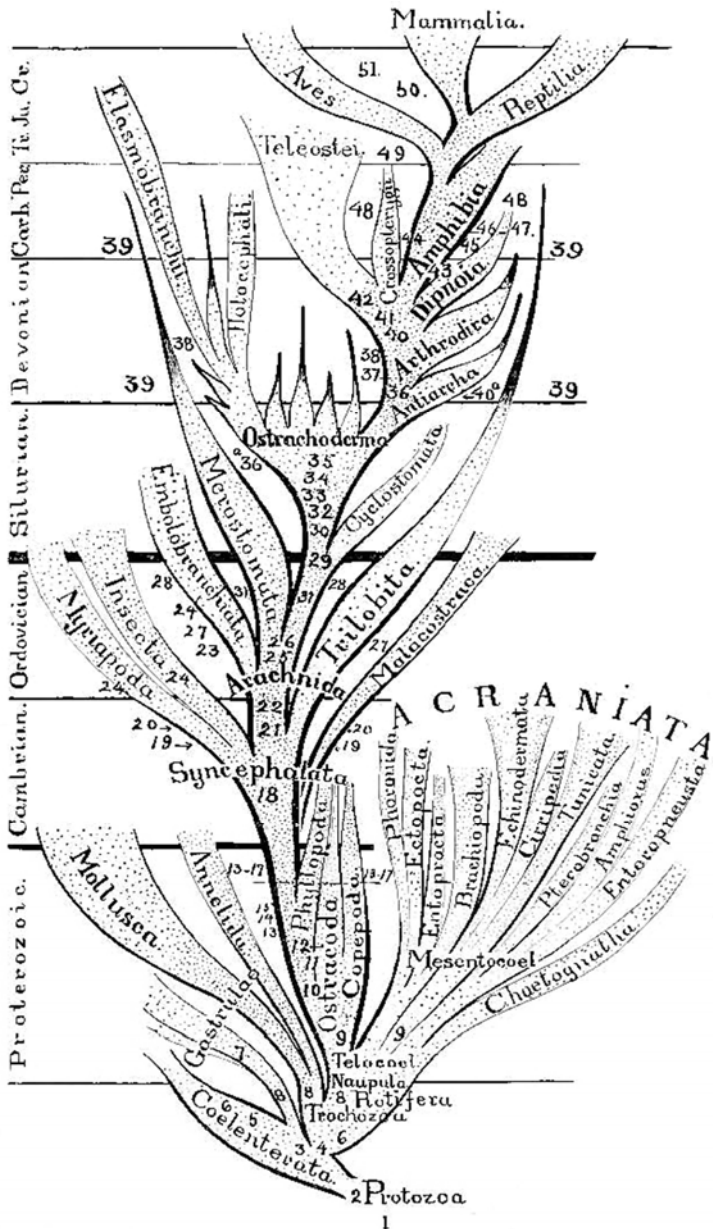
Harva tuletatakse õpikutes meelde ajaproovil läbi kukkunud ning minevikku vajunud teooriaid. Nii võib mitte ainult tudengil, vaid igal inimesel, kel pole olnud aega tuhnida teaduskirjanduse lõpututel riiulitel, jääda mulje, et teadus ongi „sirgjooneline marss tõe poole” (Gould 1993), kuhu iga uurija lisab oma sammu jagu terve igaviku püsivat uut teadmist.

Evolutsiooniteooria lapsepõlveperioodil, ajal, mil muuseumidesse kogutud kivististe hulk ning sellele vastav teadmiste suurus oli oluliselt väiksem kui praegu, ning geen oli vaid abstraktne ühik, mille olemasolu ainsaks tõestuseks oli väliste tunnuste pärandumine ühelt põlvkonnalt teisele (Gerstein jt. 2007), võeti evolutsiooni „puudevate lülide” otsimist tõsiselt. Veel 20. sajandi algul haigutas üks suuremaid lünki kahe suure rühma – selgrootute ja selgroogsete – „alamate” ja „ülemate” loomade vahel, kuid probleemi olemust ja sügavust arvestades pidas nii mõnigi teadlane tõenäosust, et sellele küsimusele üldse ial vastus leitakse, nulliks (Ritter 1912).

Teooriad, kus selgroogsete eellastena on käsitletud kärssusse (Bateson 1886), rõngusse (Dohrn 1875), ämblikulaadseid (Patten 1912) või okasnahkseid (Garstang 1928) võivad tänapäeval tunduda kummalised, kuid seda vaid seetõttu, et me oleme tuttavad tänapäevaste üldaktsepteeritavate teooriatega.

William Patten

USA Dartmouthi kolledži bioloogiaprofessor William Patten (1861–1932) tuli ämblikke, odasabasid ja skorpione vaadates mõttele, et ehk oli selgroogsete kauaotsitud esivanemaks mõni skorpionitaoline loom. Loomulikult ei saanud selgroogsete eellasteks olla tänapäeval kõrbetes elutsevad skorpionid – need pidid olema loomad, kes elasid sadu miljoneid aastaid tagasi, enne selgroogsete ilmumist. Patten leidis, et seda rolli võivad väga hästi täita meriskorpionid ehk eurüteriidid, „kuna nad olid miljonite



Joonis 1. Loomariigi põlvnemispuu Patteni (1912) järgi.

aastate jooksul olnud kõrgeimad eksisteerinud loomad” ning „kehaehituselt sarnanesid nad juba üsna palju selgroogsetega” (Patten 1912).

Patteni teooria teiseks lüliks olid tol ajal vähe tuntud fossiilid, praegu lõuataute (*Agnatha*) hulka klassifitseeritud ostrakodermid ehk kilpkalad. Väliselt tundusid need ühelt poolt sarnanevat meriskorpionidega, teiselt poolt aga tõeliste kaladega, mistõttu paistsid sobivat meriskorpionide evolutsioonilisteks järglasteks ning selgroogsete eellasteks ning võisid sel moel ühendada loomariigi „alumist” ja „ülemist” osa (joonis 1).

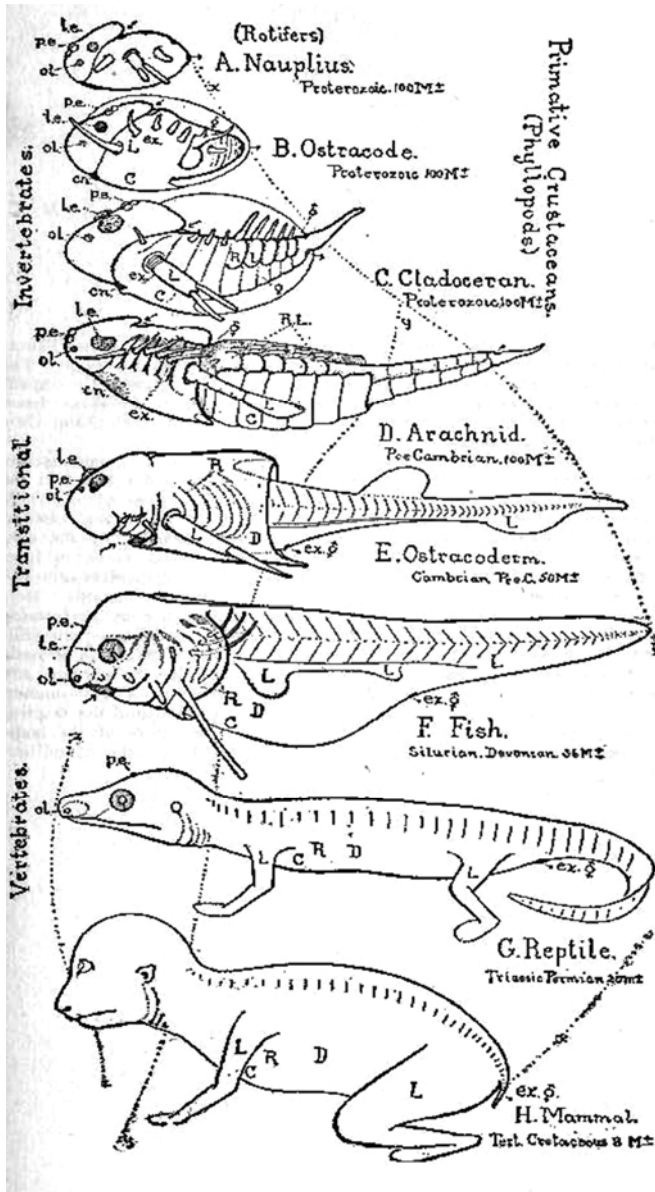
Õnnetuseks oli aga 1890-ndatel aastatel kilpkaladest veel väga vähe teada ning maailma muuseumides olid säilinud vaid mõned üksikud, enamasti juhuslikult päevavalgele tulnud kehvapoolsed fossiilid. Kuna olemasolevaid eksemplare peeti liiga hinnalisteks, et lubada neid instrumentidega lähemalt uurida, mis võinuks nende pinda kahjustada, ei jäänud Pattenil pärast tulutuid järelepärimisi Inglismaa, Šotimaa, Saksamaa, Venemaa ja Ameerika muuseumides muud üle, kui hakata ise paremaid fossiile otsima.

William Patteni Saaremaa-ekspeditsioonid

Patten korraldas Dartmuthi kolledži rahastamisel Saaremaale kokku neli ekspeditsiooni, et hankida paremat materjali, kui ta oli näinud Moskva ja Peterburi muuseumides. Sel ajal oli Saaremaa juba kuulus kivististe rohkuse ning nende suurepärase säilivuse poolest. Eriti rõõmustasid Pattenit seal leiduvad meriskorpionite ja erinevate selgroogsete, sealhulgas väikeste kilpkalade fossiilid, ning asjaolu, et neid kõiki võib leida ühes kohas.

Patteni kirjelduse (1931) järgi oli Saaremaa „üsna mõnus, kuid väga primitiivne paik siin-seal paiknevate väikeste külade ja üksildaste taludega, kuid loomulikult puuduvad seal pangad ja hotellid”. Seega tulid olulisemad toiduained, sealhulgas ka tee ja kohv hankida mandrilt. Telk, mille ta oli ühel korral unustanud Ameerikast kaasa võtta, laenati talle Tallinna Punase Risti organisatsiooni poolt.

Patteni välitöödel Saaremaal, Kihelkonna küla lähedal, tegid suurema osa tööst – ligi 1,5 meetri paksuse pinnase- ja kivimikihi eemaldamise ligikaudu 300 m² suuruselt alalt – 27 kohalikku talumeest (Patten 1931). Alumised, 60–90 cm paksused fossiilirikkad kihid lõhestati õhukesteks paladeks, vaadati hoolikalt läbi ning kõige paremini säilinud fossiilileiud pandi hoolikalt kõrvale. Patten töötas Kihelkonna külje all asuvas karjääris ning lisaks ka ühes Atla küla lähistel paiknenud talumurrus, kus juba varem oli uuringuid teinud Tartu Ülikooli geoloogiaprofessor Artur Luha ning kust samuti leiti suurel hulgal huvipakkuvat materjali.



Joonis 2. Imetaja kujunemine selgrootu vastsest Patteni (1920) järgi. Peamised sündmused sellel „evolutsiooni kiirteel” olid: 1. vana suu sulgumine ning uue avanemine pea vastasküljel. 2. algsete hingamisorganite sissesopistumine ning muun-

dumine ämblikulaadse lõpusteks; nende liitumine kala seedesüsteemiga, järgnev taandareng ning muundumine kopsudeks. 3. primitiivse südame muundumine neljakambriliseks. 4. lüljalgse kolme paari jäsemete muundumine selgroogse üla- ja alalõugadeks. 5. seljakeeliku ja kolju tekkimine ämblikulaadsetel ning selle muundumine selgroogse selgrooks ning koljuks. 6. algse aju muundumine kõrgemate selgroogsete iseloomulikuks ajuks.

Kuigi Patten külastas Saaremaad neljal korral, koguti suurem osa materjalist 1930. ja 1932. aasta ekspeditsioonidel (Denison 1952). Tema poolt kogutud materjali, kokku üle 3500 eksemplari, peetakse üheks suurimaks ja esinduslikumaks kilpkalade kollektsiooniks kogu maailmas. Kokku on sellest Saaremaalt kogutud materjalist kirjeldatud 16 liiki kaheksast lõuatute perekonnast (Denison 1952).

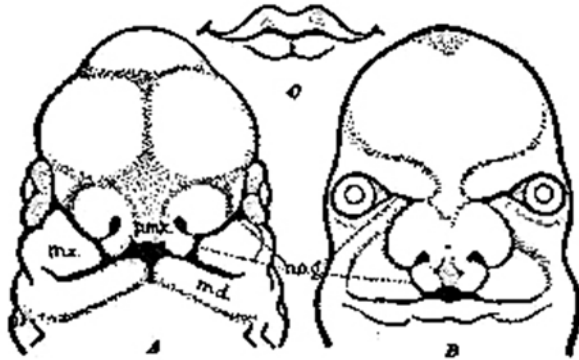
Patteni evolutsiooniteooria

Patten oli leidnud terve rea ühisjooni selgroogsete (kilpkalade) ja ämblikulaadsete (eriti meriskorpionide ja odasabade) peakilpide ning kesk-närvisüsteemi vahel. 19. sajandi lõpus oli populaarsust võitmas teooria, mille järgi arenesis selgroogsed rõngussidest. Selle teooria suhtes oli Patten väga kriitiline, väites, et kuigi nii rõngussidel kui ämblikulaadsetel on närvikeelik kõhtmine (selgroogsetel selgmine), on anneliididel selgesti märgatav keha eesotsani ulatuv segmenteerunud närvikeelik, kuid see ei ole nii selge ämblikulaadsetel, sh. meriskorpionidel, kelle hästiarenenud pea ja rindmik moodustavad kokku pearindmiku.

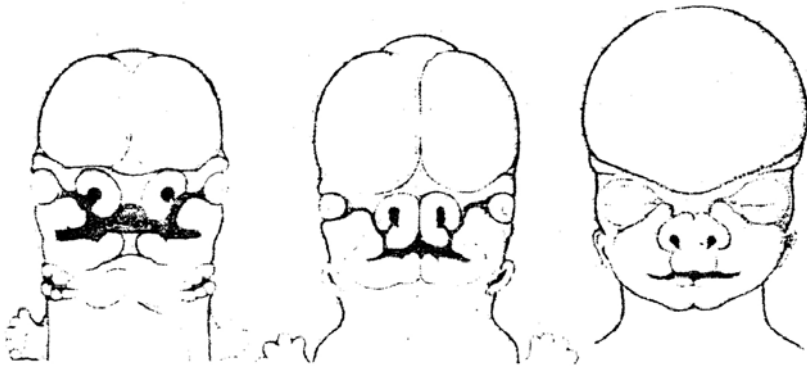
Siseehituselt, eriti aju ja sellega seotud närvide poolest sarnaneb selgrootu pea tõepoolest pisut selgroogse koljuga. Patten kirjeldas selgroogse seljakeelikule vastava selgrootu närvikeeliku struktuuri; skorpioni peaga seotud jäsmeid, mis võiksid peegeldada selgroogse lõpuskaarte ehitust, samuti erinevate närvide ja meeleeelundite histoloogiat ja asendit.

Küsimuse, kuidas moondus selgrootu anatoomiaga loom selgroogseks, lahendas Patten lihtsalt – vana selgrootu looma suu sulgus ning uus avanes pea vastasküljel (joonised 2–4). Samal ajal nihkusid ka silmad pea ühelt küljelt teisele. Patten võrdles seda „revolutsioonilist” protsessi „üle pea kasvanud majapidamise korrastamisega”, mille lõpus ilmus mitmeid „kompromissloomi – kes küll said elamisega hakkama, kuid olid uute tingimustega halvasti kohastunud”. Patteni väitel oli aga „evolutsiooni pealiin otsesem ja kurss suundus kilpkalade ja selgroogsete loomade suunas” (Patten 1912).

Patteni enda teooria nõrgad küljed olid tegelikult põhiliselt samad, mis anneliidi- ja kärssussiteooria puhul – tõenäoliselt on liikumisaparaat nii selgroogsetel kui lüljalgsetel arenenud teineteisest sõltumatult. Ilmselt on



Joonis 3. Inimese näo kujunemine Patteni (1920) järgi. **A.** Umbes 1 kuu vanune inimloode, kellel on näha selgrootu mandibulid (m.d.), maksillid (m.x.) ja premaksillid (p.m.x.). **B.** Umbes kahe kuu vanune loode, kellel on eelneval joonisel näidatud osad peaaegu ühinenud. **C.** täiskasvanu suu, mille praegune kuju on kinnituseks tema algsest ehitusest.



Joonis 4. Inimese pea kujunemisstaadiumid Patteni (1931) järgi. Silmad ja ninasõõrmed nihkusid pea tagaküljelt praegusesse asendisse; lõpused taandaresid ning muutusid kõrvade ja kõri osadeks; mitme paari „suukaarte” ühinemisel tekkis inimesele iseloomuliku kujuga suu. *Tremataspise* „lõugu” pidas Patten selle protsessi vahestaadiumiks.

ka eurüpteriidi pearindmiku üldine sarnasus selgroogse kolju ja kerega ning kohatine närvisüsteemi sarnasus seotud pigem tsefalisaatsiooniga – nähtusega, mis seisneb selles, et liikuvatel loomadel koonduvad meeleeelundid keha eesmisse ossa, kus moodustub pea (Gee 1996), mitte ühisest eelasest

põlvnemisega. Suurima vea tegi Patten aga sellega, et ei püüdnud oma teooriasse ära mahutada kogu olemasolevat eelinformatsiooni, eelkõige ignoreeris ta oma selgroogseid lüljalgsete siduva hüpoteesi juures embrüoloogilisi andmeid, mis seovad selgroogseid ülejäänud teissuussete – okasnahksete ja tunikaatidega (Gould 1993).

Kasutatud kirjandus

- Bateson W. 1886. The ancestry of the Chordata. *Quarterly Journal of Microscopical sciences* 26: 535–571.
- Denison R. H. 1952. Types and Figured Specimens of Fossil Fishes in the Patten Collection, Dartmouth College Museum, Hanover, New Hampshire. *The American Midland Naturalist* 48: 161–164.
- Dohrn A. 1875. *Der Ursprung der Wirbelthiere und das Princip des Functionswechsels*. W. Engelmann, Leipzig.
- Garstang W. 1928. The morphology of Tunicata and its bearing on the phylogeny of the Chordata. *Quarterly Journal of Microscopical Society* 72: 51–187.
- Gee H. 1996. *Before the backbone: views on the origin of the vertebrates*. Chapman & Hall, London, 535 pp.
- Gerstein M. B., Brusce C., Rozowsky J. S., Zheng D., Du J., Korbel J. O., Emanuelsson O., Zhang Z. D., Weissman S., Snyder M. 2007. What is a gene, post-ENCODE? History and updated definition. *Genome Research* 17: 669–681.
- Gould S. J. 1993. Shields of expectation – and actuality. Rmt: *Eight little piggies. Reflections in natural history*. W.W. Norton & Company, 409–426.
- Patten W. 1912. *The evolution of the vertebrates and their kin*. P. Blakiston's Son & Co, Philadelphia, 520 lk.
- Patten W. 1920 *The grand strategy of evolution*. Gorham Press, Boston, 442 lk.
- Patten W. 1931. The Dartmouth Expedition to the Island of Oesel. *The Dartmouth Alumni Magazine* 1–3.
- Ritter W. E. 1912. Patten on the origin of vertebrates, and the general question of the value of speculations on the phylogeny of organic beings. *The American Naturalist* 46: 623–632.

Oive Tinn (oive.tinn@ut.ee) – Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu.

Varinguohht Kukruse–Jõhvi maanteelõigul

Veiko Karu

Maavarade kaevandamine muudab keskkonda, maapõue ja maastikku. Lisaks nähtavatele muudatustele mõjutavad kaevandused inimtegevust ka kaudselt. Käesoleva artikli kontekstis on neist oluline ära märkida lokaalset maapinna vajumist, mis ulatub ka väljapoole kaevanduste piirkondi ning millele on iseloomulik mittelineaarne (ebäühtlane) kulgumine. Samuti on tarvilik täpsustada maapinna vajumisi mõjutavaid parameetreid, kuna see aitaks ennetada kahjusid taolistes piirkondades asuvatele hoonetele, rajatistele ja tehnovõrkudele.

Metoodika

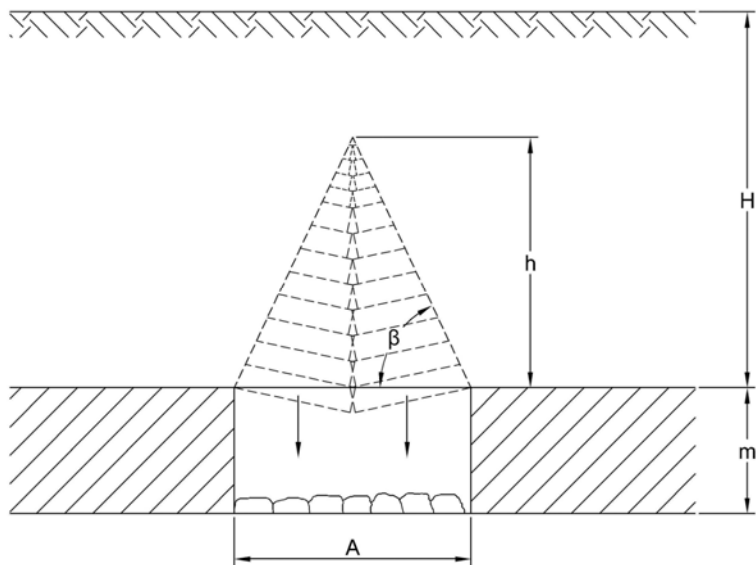
Parimate lahenduste saamiseks tuleb olukorda mudeldada. Kaevanduskeskkonna modelleerimisele eelneb mõõdistamine, proovimine ja laboratoorsed katsed, mis annavad meile algandmestiku. Modelleerimisele järgneb mudelite testimine ja tööstuslikud katsed, mis töösturite soovil ja loal toimuvad tegutsevates mäeettevõtetes.

Põlevkivimaardla altkaevandatud ala hindamiseks ja mäetööde mõjuala kirjeldamiseks on välja töötatud erinevad meetodid ja arvutiprogrammid, mis võimaldavad hinnata maa olukorda ning riske arvestades kavandada maakasutust ja ehitustegevust (Karu 2005). Geoloogilist andmestikku, mäetööde plaani ja mäetöödest mõjutatud ala hoidetsoonide modelleerimise juhendit kasutades, saab välja arvutada mäetööde mõjuala liikide (kvaasistabiilse maa ja vajunud maa-ala) erinevad parameetrid. Andmestiku sidumine võimaldab saada senisest täpsemat informatsiooni vaadeldava territooriumi iga konkreetse kinnistu kohta (Karu 2008).

Üheks ohtlikumaks situatsiooniks kaevandatud alal on käiguvaringu tekkimine. See võib aset leida siis, kui põlevkivilasum asub kuni 15 m sügavusel. Varingud tekivad üldjuhul pikem aja jooksul tänu reoloogilistele protsessidele. Pikemaks ajaks loeme üle 50-ne aasta. Peale kaevandamise lõpetamist puittoestik mädaneb ning ei hoia enam laekivimeid üleval. Käigu lagi hakkab vaikselt varisema kuni on saavutanud piirkoormuse ja vajub sisse. Taoliste varingute tekkeskeem on toodud joonisel 1.

Kukruse–Jõhvi teelõigu ehitus

Vastavalt lepingule ehitatakse Tallinn–Narva maantee 156,0...163,2 kilomeetril Kukruse ja Jõhvi vaheline teelõik neljarajaliseks maanteeks.



Joonis 1. Murenenud laekivimite varingu skeem käikude kohal. Legend: m – kihi väljamispaksus, h – varingu kõrgus, H – kaevandamissügavus, β – laekivimite rebenemisenurk, A – streki laius (Reinsalu jt. 2002). Kui varing avaneb maa peale ja seda kohe ei täideta, tekib inimestel võimalus siseneda kaevanduskäikudesse (vt. LISA joonis 2), mis on väga ohtlik.

Rajatakse uus muldkeha kasutades geovõrku, et vältida kaevanduskäikudest tuleneda võivaid vajumisi. Ehitatakse kolm eritasandilist ristmikku, üks ristee, kaks jalakäijate silda ning rajatakse kergliiklusteed ja kogujateed kogu lõigu ulatuses. Samuti ehitatakse müratõkkeseinad ning tehakse maastikukujundustöid teekeskonna seisundi parandamiseks. Kukuruse–Jõhvi teelõik valmib plaanide kohaselt 2010. aasta oktoobri lõpuks (Maanteeamet 2009).

Kukuruse–Jõhvi teelõik ületab kahte suletud kaevandust: Kukuruse kaevandust ja Kaevandust nr. 2 (LISA joonis 2). Nimetatud kaevandustes on kasutatud kaevandamisviisidena käsilaavasid ja kamberkaevandamist (LISA joonis 3). Tammiku viadukti ehituse käigus sattusid teedeehitajad juhuslikult maapinnale mitteavanevale horisontaalsele kaevandusõõnsusele ehk strekile. Esialgsete tööjooniste järgi ei oleks sellist olukorda tohtinud tekkida. Situatsiooni tõsidust saab näha joonistel 4 ja 5.



Joonis 4. Strekk asub valmiva maantee vahetus läheduses. Foto: Margit Kolats.



Joonis 5. Ehitajate poolt avatud strekk. Foto: Margit Kolats.

Varisemisohu tõkestamiseks pidanuks teelõigu rajama kanalisse

TTÜ Mäeinstituut andis konsultatsioone teelõigu projekteerimise staadiumis. Üheks pakutud alternatiiviks teelõigu rajamisel oli kanali idee.

Tuginedes kaevandamiskogemustele teetrassil lasuvates kivimites, vaadeldi trassi rajamiseks kanalisse nelja lõhketöödeta ja ühte puur-lõhketöödega kaevandamise tehnoloogilist võimalust. Iga variant oleks nõudnud teatud masinate komplekti. Süvendamistöõde käigus tekkivat materjali oleks kasutatud kohapeal, teetrassi rajamisel, selleks nähti ette vajalik kaevise purustamise ja fraktsioneerimise tehnoloogia ning vajalikud seadmed (purustid ja sõelurid). Konkreetsed seadmed saaks valida sõltuvalt tee-ehitusprojektis ettenähtud täitematerjalide kvaliteedile esitatud nõuetest, et tagada materjali maksimaalne kasutamine kogu Kukruse–Jõhvi teelõigu erinevate maantee-elementide ehitusel. Selleks on vaja kaevandatud kivim purustada ja fraktsioneerida suure selektiivsuseastmega purustites ja sõelurites, et eraldada tugevam lubjakivi kivimi pehmemast, terrigeensast osast. Seda põhjusel, et oleks kaevandatavat kivimit võimalik kasutada täitematerjalina vastavalt erinevate tee elementide nõuetele.

Kukruse–Jõhvi teelõigu ehitamisel otsustati kasutada geovõrku, mis jaotab horisontaalsed pinged võrdselt laiali suuremale alale ning väldib altkaevandatud maa-ala järsku sisse varisemist.

Soovitused tulevikuks

Oskuslikult planeeritud maavarade kaevandamisega ja kaevandatud alade hoolika korrastamisega võib muudetud alade maapind, mets, veekogud ja viljelusmaa olla kvaliteetsem kui enne kaevandamist. Kõik see on aluseks keskkonnasõbraliku kaevandamismetoodika arendamiseks. Talutava kaevandamise loomine eeldab uuringuid looduskeskkonnas, kuid katsetööd looduses on keerulised ja piiratud, seega on otstarbekas jälgida teiste näiteid ning enne teostust modelleerida võimalikke erinevaid lahenduskäike.

Tänuavaldused

Käesolev artikkel on osa autori doktoritöö raames läbiviidavatest uuringutest ning seotud TTÜ Mäeinstituudi teadus- ja arendustööga ning tellitud uurimustööga. Artikkel on seotud uurimustööga “Säästliku kaevandamise tingimused”, ETF grant 7499.

Kasutatud kirjandus

- Karu V. 2005. Altkaevandatud alade püsivusarvutused üld- ja detailplaneeringu staadiumis. *Keskkonnatehnika* 4: 34–35.
- Karu V. 2008. Insenerilahendused kaevandusalade planeeringueelsete uuringute staadiumis. Rmt: P. Ilves (Toim.). *XIII Eesti geotehnika konverents: artiklid*. TTÜ, Eesti Geotehnika Ühing, Tallinn, 13–18.
- Reinsalu E., Toomik A., Valgma I. 2002. *Kaevandatud maa*. TTÜ Mäeinstituut, 97 lk.
- Maanteeamet. 2009. *Kukruse – Jõhvi teelõigu ehitus*.
<http://www.mnt.ee/atp/?id=2688> [13.09.2009]

Veiko Karu (veiko.karu@ttu.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

Altkaevandatud alale ehitamisel tuleb arvestada võimalike stabiilsusprobleemidega

Veiko Karu

Käesoleval aastal on mitmes kohas altkaevandatud maa-alal toimunud maapinna varinguid. Maikuu lõpus varises pinnas Ida-Virumaal, Varinurme külas, endise Kiviõli kaevanduse kohal. Umbes kuu aega hiljem toimus järjekordne varing, sedapuhku Edisel asuval karjamaal, kus auku kukkunud mullikas hukkus. Eesti seaduste järgi pole paraku võimalik maalihete vastu loomi ega ehitisi kindlustada, seepärast tuleb hoolikalt planeerida altkaevandatud aladele ehitamist.

Altkaevandatud maa püsivuse probleemid

Altkaevandatud alade püsivuse probleemid on keerulised ja raskesti prognoositavad, olles aktuaalsed nii kogu maailmas kui ka Eestis. Altkaevandatud alade püsivus sõltub paljudest faktoritest (kaevandamise aeg, tehnoloogia, väljatud paksus jpt.), millest osa on teada, osa väga raskesti määratavad või isegi teadmata. Arvutus- ja hindamismeetodid põhinevad lihtsustatud mudelitel, mis siiski annavad küllaltki adekvaatseid tulemusi praktiliste ülesannete lahendamiseks.

Altkaevandatud alade püsivuse määramine Eesti tingimustes teede ehituse või muu ala hilisema eksploatatsiooni tarvis on küllaltki komplitseeritud, sest maavarad on väljatud erinevatel aegadel ja erinevate kaevandamisviisidega. Püsivuse määramise raskus on seotud kaevanduste modifitseerituse ja parimate kaevandamisviiside kasutuselevõtmise erinevate parameetritega (nt. väljatava kihi paksus, laekäitlus, toetusviis jne.).

Tabelis 1 on esitatud altkaevandatud alade vajumite põhiparameetrid, lähtudes erinevatest kaevandamisviisidest.

Tabel 1. Altkaevandatud maa seisund (Reinsalu jt. 2002).

Kaevandamisviis	Väljamispaksus, m	Maa vajumise sügavus, m	Nõlva kaldenurk, deg
Paarisaavad, käsilaavad, lagi toetub täiteribadele.	2,5	0,9	2...4
Kombainkaevandamine, lagi varistatakse.	1,5	1,0	4...7
Kamberkaevandamine, lagi toetub tervikutele:			
a) püsiv	2,8	0,025	~0,1
b) varisev	2,8	1,5	4...6

Kõrvalmaantee 13134 Kukruse–Tammiku

Ida Teedekeskuse teatel on algatatud Kukruse–Tammiku kõrvalmaantee nr. 13134 Kukruse–Pajualuse lõigu eelprojekti keskkonnamõjude hindamine. Kõrvalmaantee kogupikkus on 8,07 km ja see ühendab kahte põhimaanteed: maanteelõik algab põhimaantee nr. 1 (E 20) Tallinn–Narva 160,04 kilomeetril (Kukruse mõisa ristmik) ja lõppeb põhimaantee nr. 3 (E 264) Jõhvi–Tartu–Valga 4,55 kilomeetril (Tammiku ristmik). Maanteelõigu esimesed 1,5 kilomeetrit asuvad Kohtla vallas, sealt edasi liitumiseni põhimaanteega nr. 3, asub Jõhvi vallas.

TTÜ Mäeinstituudi poolt teostatava eelprojekti eesmärgiks on kõrvalmaantee Kukruse–Pajualuse lõigule jääva Pauliku raudteeviadukti tehniliselt optimaalse ning majanduslikult tasuva lahenduse väljatöötamine ning uue trassikoridori asukoha valik koos keskkonnamõjude hindamisega (Maanteeamet 2009). Uuritava maanteelõigu piirkonnas on kasutatud järgmisi kaevandamisviise:

- a) Paarislaavadega kaevandamine, nn. käsilaavad (joonis 1). Lagi toetub täiteribadele. Tekib maapinna märgatav vajumine ja sulg-lohud (vajumitel puudub vee äravool).



Joonis 1. Käsilaavadega altkaevandatud maa-ala.

- b) Kombainkaevandamine. Kaevandamise käigus lagi varistatakse. Esinevad vajumine ja sulglohud.
- c) Kambritega kaevandamine. Lagi toetub tervikutele, maa püsib stabiilsena. Varingu korral võivad tekkida sulglohud.

Kasutades arvutusmetoodikat (Karu 2005) saab väita, et altkaevandatud maa teetrassi piirkonnas on kvaasistabiilne – s.t. lae ja maapinna hoidmiseks ettenähtud tervikud, täiteriidad ja toestiku elemendid ei ole purunenud kaevandamise ajal, kuid see võib toimuda hiljem (Reinsalu jt. 2002). Ebatäpne on tugistruktuuride prognoositav purunemise aeg. Kuna kaevandused on täitunud veega, siis on teadmata allmaakonstruktsioonide olukord ja tugevus. Uuringutulemused viimati nimetute kohta Eesti põlevkivikaevanduste tingimustes puuduvad.

Põhiliseks küsimuseks altkaevandatud maa-ala korral on maapinna deformatsioonid ning nende kvalitatiivsed ja kvantitatiivsed näitajad. Enamlevinud on kaks stsenaariumi:

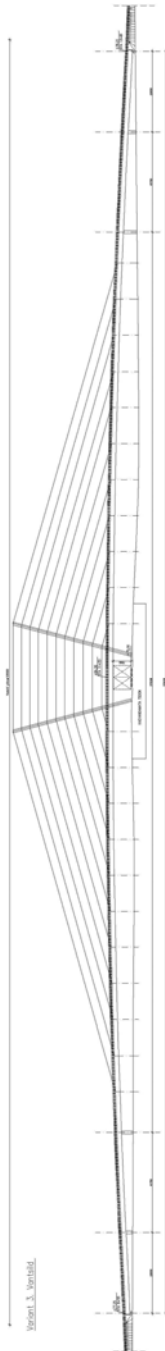
- a) Maapind vajub ühtlaselt. Vertikaalsed vajumised ei tekita teele märgatavaid kahjustusi.
- b) Maapind vajub ebahülaselt. Tekib vajumi nõlva kalle, kus peale vertikaalsete esineb ka horisontaalseid deformatsioone. Deformatsiooni horisontaalne komponent tekitab tõmbepingeid, mis põhjustab teekatte ja -aluse purunemise.

Kokkuvõttes võib öelda, et teadlaste käsutuses on kogum meetodeid, mis võimaldavad prognoosida vajumite parameetreid, kuid mitte täpset toimumise aega. Samuti on olemas meetmed vajumite vältimiseks ja leevendamiseks. Adekvaatne, majanduslikult ja ohutusnõuetele vastav põhjendatud otsus tuleb võtta vastu koos teedehituse spetsialistidega, arvestades nende spetsiifika ja võimalustega.

Pauliku raudteeviadukt – viadukt altkaevandatud maal

Viadukti (LISA joonis 2) vundamentide stabiilsuse hinnang on keeruline geotehniline probleem, kuna maa on alt kaevandatud. Ka siin on kaevandamisel kasutatud erinevaid kaevandamisviise, mis varingute korral kutsuvad esile erinevate parameetritega maapinna vajumise (tabel 1).

Viadukti mulde ehitamisel suureneb koormus altkaevandatud ala tugikonstruktsioonidele, mis vähendab nende püsivust, sest kaevandamis-sügavus oli antud kohas väike. Seega mulle suurendab märgatavalt määrdõhku ja selle tulemusena saavutab ta uue tasakaaluoleku, mis võib kaasa tuua erinevaid probleeme. Esmajoones võivad tekkida varingud, mille parameetrid on esitatud tabelis 1. Maapinna vajumine põhjustab ka mulde



Joonis 3. Silla variant nr 3: vantsild.

vajumise, mis peaks olema väiksem, kui tabelis esitatud. Paratamatult rikub lohkus maapind mulde ja seega ka seal asuva tee.

Alternatiivseks variandiks on rajada mulle ja viadukt vaiadele toetuvatele sammastele (joonis 3). Põhiprobleemiks on siin sammaste asukoht. Soovitav on nad paigutada tervikute kohale maapinnal, kuid ka siis pole välistatud maa-aluste tugiehitiste deformatsioonid. Maapind on kvaasistabiilne ja tervikud võivad igal ajahetkel puruneda, mis ei ole taas tänapäeval ajaliselt täpselt prognoositav. Siin on ainuõigeks lahendiks kõrvaldada vajumi tekkimise võimalus.

Ülaltoodud variandi korral toetuvad neli tuge tervikule, mis on jäetud raudtee püsivuse säilitamiseks. Vaiad toetuvad lubjakivikihile, mis asub allpool väljatud põlevkivikihidit. Sellega on tugede püsivus garanteeritud (lubjakivi üheteljeline survetugevus on 50...80 MPa). Ülejäänud silla osad hoitakse üleval trossidega. Mulde kõrgus on 3 m, mis moodustab kattekivimite paksusest 15%, seega lisakoormus tervikutele on väiksem. Tugevusarvutused näitavad tervikute ja maapinna püsivuse tegelikku olukorda.

Edasine tegevus

Tehnikaülikooli teadlased on andnud soovitus, mida tuleb arvestada maanteelõigu projekteerimisel. Samuti on põhjendatud, milline silla variant oleks sobilikum. Millal ükskord ehituseni jõutakse, sellele on veel vara vastust anda. Kõik sõltub juba projekteerimise mahust ning erinevate struktuurifondide toetuste võimalustest.

Tänuavaldused

Käesolev artikkel on osa autori doktoritöö raames läbiviidavatest uuringutest ning seotud TTÜ Mäeinstituudi teadus- ja arendustööga ning tellitud uurimustööga. Artikkel on seotud uuri-

mustöoga “Mäendusriskide haldamise kontseptsioon ja meetodid”, ETF grant 6558.

Kasutatud kirjandus

- Karu V. 2005. Altkaevandatud alade püsivusarvutused üld- ja detailplaneeringu staadiumis. *Keskkonnatehnika* 4: 34–35.
- Reinsalu E., Toomik A., Valgma I. 2002. *Kaevandatud maa*. TTÜ Mäeinstituut, 97 lk.
- Maanteeamet. 2009. *Kõrvalmaantee 13134 Kukruse – Tammiku KMH algatamise ja programmi avalikustamise teade*. <http://www.mnt.ee/atp/?id=510> [08.01.2009]

Veiko Karu (veiko.karu@ttu.ee) – Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

Hüdratiseeritud põlevkivituhasette fosfori sidumisvõime aktiivse filtratsiooni tingimustes

Martin Liira

Sissejuhatus

Fosfor on tähtis toitaine looduslikus aineringses. Puhta (loodusliku) jõevee fosforisisaldus on tavaliselt alla 0,05 mg/l. Reostuse kriteeriumiks loetakse soovituslikult taset 0,10 mg/l, millest suurem kontsentratsioon põhjustab jõgede eutrofeerumist (Vymazal jt. 1998). Veekogudesse suunatavates heitvete väljavooludes sisalduvat fosforit (P) ei ärastata küllaldaselt hulgal ning puhastamata või puudulikult puhastatud (eriti olme- ja toiduainetööstuse) reovesi on üheks antropogeense reostuse põhjustajaks kõikides pinnaveekogudes.

Fosfori sidumine reoveest on probleem nii konventsionaalsetes kui ka märgalapuhastites. Ka üldiselt madalate kasutuskuludega tehismärgalapuhastites on fosfor üks kõige raskemini eemaldatav reoaine, sest selle sidumine toimub peamiselt reovee juhtimisel läbi filterpinnase, kus fosfaadid seotakse sorptsioonil pinnasesse või sadestatakse (Molle jt. 2005).

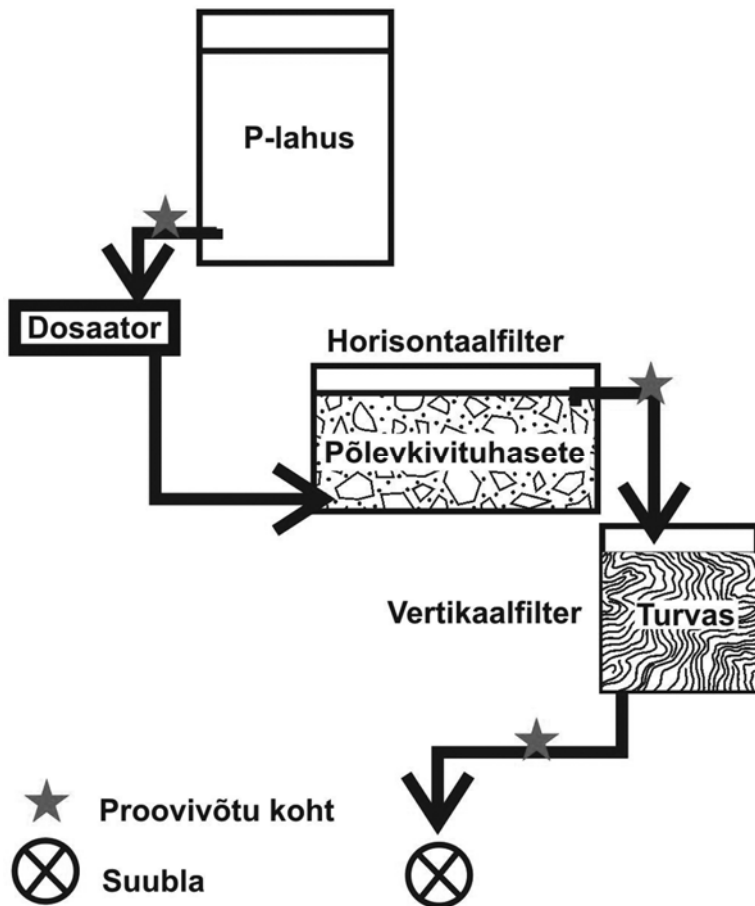
Viimastel aastatel on uuringud näidanud ka aktiivse filtratsiooni efektiivsust fosfori sidumisel reoveest (Vohla jt. 2005; Adam jt. 2007; Gustafsson jt. 2008; Kaasik jt. 2008). Aktiivse filtratsiooni korral kasutatakse otsest fosfaadi sadestamist raskestilahustuvatesse vormidesse ja seda peetakse paljulubavaks meetodiks fosfori sidumisel väiksemõõdulistes puhastusseadmetes. Fosforiga küllastatud materjale saab hiljem kasutada põllumajanduses väetistena (Gustafsson jt. 2008).

Põletusjäätmed (tuhad) on üldiselt head fosfaatide sadestajad. Eesti puhul pole probleemiks nende kättesaadavus ja tootmiskulud, vaid vastupidi nende üleküllus. Meie soojuselektrijaamad toodavad aastas põlevkivi põletamise käigus miljoneid tonne tuhka, mille taaskasutus on ebapiisav ja tekkiv materjal ladestatakse absoluutses enamuses lihtsalt jäätmehooldlates (Vohla jt. 2005; Kaasik jt. 2008). Eesti Energia aastaaruannetele tuginedes toodavad Eesti soojuselektrijaamad aastas keskmiselt viis miljonit tonni tuhka, mis ladestatakse tuhaplatoodele. Elektrijaamade tuhka oli 2000. aastaks ladustatud üle 230 miljoni tonni.

Materjal ja meetodika

Põlevkivituhasette fosfori sidumisvõime uurimiseks erinevate hüdrauliliste koormuste tingimustes rajati keskmisemõõduline laborikatse. Laborikatse tarvis projekteeriti kolm katseseadet, mis koosnesid veega

küllastatud horisontaalvoolulistest tuhafiltritest. Nende filtrite väljavool on ebasoovitavalt kõrge pH-ga (>9) ning seetõttu paigutati väljuva vee neutraliseerimiseks tuhasetega täidetud horisontaalfiltrite (filtrid H1, H2, H3) järel vertikaalvoolulised turbafiltrid (filtrid V1, V2, V3; joonis 1).



Joonis 1. Laborikatse skeem.

Laborikatsete läbiviimiseks ehitati kolmetasapinnaline puidust rakis katsesüsteemide kompaktselt paigutamiseks. Kolme katseseadet koormati dosaatorpumpade abil: esimest 12 l/d ehk 923 l/m³ ööpäevas (H1/V1), teist

18 l/d ehk 1385 l/m³ ööpäevas (H2/V2) ja kolmandat 24 l/d ehk 1846 l/m³ ööpäevas (H3/V3). Mahutitest pumpasid dosaatorpumbad lahust edasi keskmisel katsesüsteemi rakise tasemel paiknevatesse horisontaalfiltritesse, mille maht oli 13 l ning tuhasette mass ~11 kg. Kuna sooviti tagada horisontaalfiltrites maksimaalne vee liikumine, siis selleks suunati lahus horisontaalfiltrisse filtri alumisest osas ning vastasküljes olevast ülevooluavast liikus lahus isevooluliselt edasi rakise alumisel astmel olevasse vertikaalfiltrisse (joonis 1), mahuga 8 l ning turba mass selles ~5 kg. Nii horisontaal- kui ka vertikaalfiltrid kaeti pealt kilega vältimaks fosforilahuse aurumist. Vertikaalfiltritest väljuv lahus suunati kohalikku kanalisatsioonivõrku.

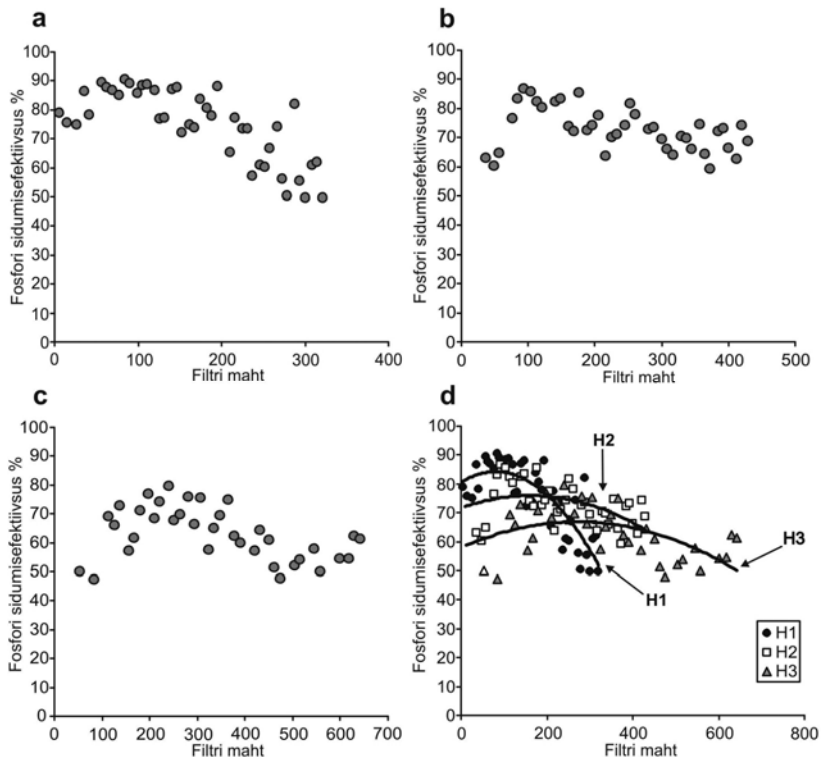
Proovivõtmine horisontaal- ja vertikaalfiltritest toimus kolm korda nädalas, mille käigus määrati filtritest väljuva vee pH ning üldfosfori sisaldus. Fosfori sisaldused määrati fotomeetriliselt Hach-Lange spektromeetriga. Sisendlahuseks kasutati pH 7–8 tasemele puhverdatud naatriumvesnikfosfaadi lahust, mille fosforisisaldust muudeti dünaamilise koormuse simuleerimiseks katse jooksul kontrollitult 8–15 mg/l piires.

Tulemused

Katsete tulemused näitasid sidumiseefektiivsuse olulist sõltuvust hüdraulilisest koormusest. Oodatult olid kõige suuremad sidumiseefektiivsused (91%) katsesüsteemis, millele rakendati kõige väiksemat hüdraulilist koormust ja kus oli pikim viibeaeg (vastavalt 12 l/d ja 12 h; joonis 2). Katsesüsteemides, mille hüdrauliline koormus oli 18 l/d ja 24 l/d olid maksimaalsed fosfori sidumiseefektiivsused vastavalt 85 ja 80%.

Kõigis kolmes katsesüsteemis esimeste nädalate jooksul fosfori sidumiseefektiivsus kasvas, kuni saavutati maksimaalne sidumisvõime ning seejärel kahanes sidumiseefektiivsus kogu eksperimendi jooksul esimeses katses (koormus 12 l/d) 45%-ni, teises katses (koormus 18 l/d) 65%-ni ja kolmandas katses (koormus 24 l/d) 55%-ni. Hoolimata esimese katsesüsteemi suuremast viibeajast ja paremast fosfori sidumisvõimest, oli selle filtri sidumiseefektiivsuse vähenemine kõige kiirem ning üldine sidumisvõime materjaliühiku kohta kõige väiksem (joonis 2).

Filtermaterjali mineraloogilised ja mikroskoopilised uuringud näitavad, et katsesüsteemide sidumiseefektiivsuse muutlikkust kontrollib pooriruumi üleküllastus kaltsiidi suhtes. Esimeses katsesüsteemis, mille viibeaeg oli pikim, saavutati kõrge üleküllastus. Selle tulemusena tekkis kiiresti suur hulk kristallisatsioonitsentreid ja tuha osakeste pinnale moodustus arvukalt väikseid (<10 µm) ja tihedalt pakitud nõeljaid kaltsiidi kristallite (joonis 3). Kiire kaltsiidi väljasettimise tulemusena kaeti tuhasette osakeste pind

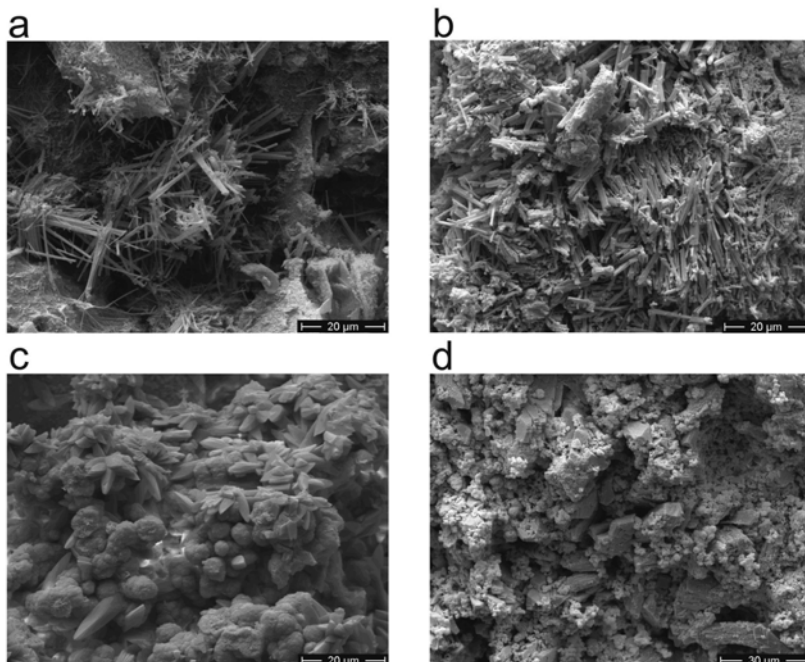


Joonis 2. Fosfori sidumiseefektiivsus laborikatses. a – H1 filter viibeajaga 12 h; b – H2 filter viibeajaga 8 h; c – H3 filter viibeajaga 6 h; d – kõigi kolme filtri sidumiseefektiivsuste koos esitamine. Joonistel näidatud trendid on ainult illustratiivsed kolmandat järku polünoomid vastavuses eksperimenti tulemustega.

autigeense kaltsiidi massiga. Seetõttu aeglustub põlevkivituhasete enda ebastabiilsete kaltsiumirikaste mineraalsete faaside lahustumine ning väheneb lahustunud Ca^{2+} ionide osakaal lahuses. Samal ajal ei saavutata lühemate viibeagade korral nii suurt kaltsiidi üleküllastust ning karbonaatide kristallisatsiooni kiirus on väiksem. See omakorda tagab moodustunud sademe poorsema struktuuri ning kaltsiumi lahustumine ja transport tuhasette osakeselt pooriruumi on võimalik pikema aja jooksul (joonis 3).

Käesoleva uurimuse tulemused näitavad, et vastupidiselt (pinna)sorptsioonile, kus pikem viibeaeg oluliselt parandab sidumiseefektiivsust, tuleb

aktiivse filtratsiooni (s.t. sadestamismehhanismide) korral arvestada kaltsiumi faaside sadestustasakaaluga. Seetõttu tuleb leida igale filtermaterjali tüübile ning reoveele optimaalseim voolu hulk/viibeag, et vältida filtermaterjali kiiret ummistumist karbonaatse sademega.



Joonis 3. Fosfori sidumisel aktiivsete etringiidi kristallide kadumine (peened nõeljad kristallid joonisel 3a) ja sekundaarsete mineraalide (kaltsiit ja kaltsiumfosfaat) teke põlevkivituhasete pinnale eksperimendi käigus. a – algne hüdratiseerunud põlevkivituhasete horisontaalfiltrist. b – tuhasete esimesest horisontaalfiltrist (H1) peale eksperimendi lõppu. c – tuhasete teisest horisontaalfiltrist (H2). d – tuhasete kolmandast horisontaalfiltrist (H3).

Katsete andmed näitavad samuti, et sõltumatult viibeajast (ehk üleküllastuse tasemest) settib lahusest tahke fosfaadi faas amorfse kaltsiumfosfaadi kujul, mis hiljem kristalliseerub ümber stabiilseks hüdroksüül-apatiidiks $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$.

Põlevkivituha kasutamine reovee puhastamisel tehismärgalades on perspektiivikas meetod kasutamaks nii Eestis kui ka väljaspool.

Kasutatud kirjandus

- Adam K., Krogstad T., Vrale L., Søvik A.K., Jenssen P.D. 2007. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite Ps-batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. *Ecological Engineering* 29: 200–208.
- Gustafsson J.P, Renman A, Renman G., Poll K. 2008. Phosphate removal by mineral-based sorbents used in filters for small-scale wastewater treatment. *Water Research* 42: 189–197.
- Kaasik A., Vohla C., Mõtsep R., Mander U., Kirsimäe K. 2008. Hydrated calcareous oil-shale ash as potential filter media for phosphorus removal in constructed wetlands. *Water Research* 42: 1315–1323.
- Molle, P., Liènard A., Grasmick A., Iwema A., Kabbabi A. 2005. Apatite as an interesting seed to remove phosphorous from wastewater in constructed wetlands. *Water Science and Technology* 51: 193–203.
- Vohla C., Pöldvere E., Noorvee A., Kuusemets V., Mander Ü. 2005. Alternative filter media for phosphorous removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *J. Environ. Sci. Health A40*: 1251–1264.
- Vymazal V., Brix H., Cooper P.F., Haberl R., Perfler R., Laber J. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. Rmt: Vymazal J, (Toim.) *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers, 17–66.

Martin Liira (martin.liira@ut.ee) – Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu.

Piiritu graniidimassiiv sügavustes

Vivika Väizene

Nõudlust killustiku järele esineb ehitustegevuses pidevalt. Graniitkillustik on suurema survetugevusega ning kõrgema ehituskvaliteediga kui lubjakivikillustik. Graniidist valmistatud killustikku kasutatakse ehitusbetooni valmistamiseks, teede ehituse kõikides etappides (alates aluskorrast kuni pindamismaterjalini) ning libedustõrjeks.

Seni on Eestis graniittooteid valmistatud põhiliselt imporditud toormest ning vähesel määral ka kohalikest rändrahnudest (Adamson ja Pirrus 1994). Hetkel imporditakse graniitkillustikku ligikaudu üks miljon tonni aastas (HeiVäl Consulting 2008; Adamson ja Pirrus 1994).

Kasutades ära võimaliku Maardu graniidikaevanduse lasumispaiga strateegilist asukohta peamise tarbimispiirkonna läheduses ning võttes arvesse sadama ja raudtee vahetut naabrust, saaks asendada imporditava graniitmaterjali kodumaiselega.

Graniidimassiiv

Aastatel 1979–1982 teostati Eesti NSV geoloogiavalitsuse poolt geoloogilised uuringud graniidivarude hindamiseks ning füüsikalismehaaniliste omaduste määramiseks. Aktiivse tarbevaru mahuks hinnati 1,3 mlrd m³ (Adamson ja Pirrus 1994). 1980-ndate lõpus jõuti järeldusele, et graniidi kaevandamine on piirkonna (Eesti, Läti ja Loode-Venemaa) tarbimist arvestades mõistlik ning koostati äriplaanid. Moodustati Eesti Graniidifond, väljastati maavara kasutusluba ja hangiti tarvilikud kooskõlastused. Paraku ei ole aga siiani Eestis graniidikaevandust rajatud; seda vajaliku oskusteabe vähesuse, poliitilise olukorra muutlikkuse ning ebaselge majandusolukorra tõttu.

Kaevandamiskõlblik graniidimassiiv paikneb ligikaudu 100 km² alal (LISA joonis 1), ulatudes 200–125 meetri sügavusele maapinnast. Massiivi paksust on hinnatud vähemalt ühe kilomeetrini – seega on varud praktiliselt piiramatud. Uuringuteks on puuritud 36 puurauku ning graniiti läbitud kokku 2130 meetri ulatuses (Adamson ja Pirrus 1994).

Geoloogiline ja hüdrogeoloogiline kirjeldus

Graniidimaardla piirkonda iseloomustab kahekorruseline jaotus. Sügavalt kulutatud kristallilisel aluskorral lasub monoklinaalne (kallakusega 2...4 m/km), settekivimitest koosnev aluspõhi. Aluskord kujutab endast Lõuna-Soome Svekofennia kurrutusvöötme otsest jätku. Aluskorras

võib välja eraldada geneesi, vanuse ja struktuuri põhjal kaks erinevat kompleksi:

1. Alam-Proterosoikumi vanusega Svekofennia kurrutusvöötme moonde- ja magmakivimid – Jägala kihistu;
2. Alam-Proterosoikumi ajastu lõpuaegsed, platvormse arengustaadiumi intrusiivsed kivimid – Neeme massiivi porfüüriilaadsed kaaliumgraniidid.

Aluspõhi on graniidimassiivi piirkonnas esindatud Ülem-Proterosoikumi, Alam-Kambriumi ja Alam-Ordoviitsiumi terrigeensete ja Kesknings Alam-Ordoviitsiumi karbonaatsete settekivimitega. Settekompleksi kogupaksus suureneb ühtlaselt põhjast lõuna suunas.

Hüdrogeoloogiliselt asub Maardu graniidimaardla ala Balti arteesia-basseini põhjapiiril. Maardla kattekivimite osas on eraldatavad järgmised veekihid (Adamson ja Pirrus 1994):

1. Kvaternaari veekompleks,
2. Ordoviitsiumi veekompleks,
3. Ordoviitsium–Kambriumi veekompleks,
4. Kambrium–Vendi veekompleks,
5. aluskorra murenemiskooriku ja lõhetsoonide veed.

Kattekivimite paksusmudeli koostamise meetodika

Geomeetiline geoloogiliste kihipindade mudel on otstarbekas luua geostatistiliste vahenditega. Võimalikke lahendusi on mitmeid, parima ning kiireima neist andis MapInfo VerticalMapperi tarkvara (LISA joonised 2–4). Mudeli edasiarendust saab teha Encom Discover, Gemcom Surpac ja Modflow tarkvaradega. Lisanduvaid deformatsiooniartvutusi saab teha tarkvarapaketi Flac paketi (Pastarus 1996).

Töö aluseks võeti 36 puuraugu andmed (Suuroja 1979) ning loodi graniidi peal lasuva katendi ruumiline mudel. Interpoleerimismetodiks valiti tasandamisega triangulatsiooni meetod. Läbilõigetel tähistavad jooned graniidikihi põhja absoluutkõrgust. Puuraugu läbilõige on jaotatud kuude klassi:

- | | |
|--------------------|--|
| 1. abs.grd | maapinna absoluutkõrgus |
| 2. Q | tehnogeense sette põhi |
| 3. Q2 (Ca1ts) | möll (aleuroliit), savikas aleuriitne põhi |
| 4. E1(Ca1lk+ln) | savi põhi |
| 5. PR2 | kesk-jämeteraline liivakivi põhi |
| 6. murenemiskoorik | |

Kaevandamisviisi valik ja kriteeriumid

Kaevandamisviisi valiku aluseks võeti graniidi massiivi mäendus-tingimused, kasutades Bieniawski klassifikatsiooni geomehaanikaliste parameetrite määramiseks (Hoek 2006) ning EduMine (2009) tarkvara kaevandamisviisi valiku tööriista UBC Mining Method Selection.

Esimesel variandil (joonis 5) on graniidi parameetrite valikul silmas peetud kuni 600 m sügavusel lasuvat graniiti, mille parimaks kaevandamisviisiks on alakorrusväljamine. Kuna sellele järgneb kohe karjääriviisiline kaevandamine, siis on teisel variandil valitud kivimi sügavus enam kui 600 m. Nende kahe variandi tulemusena (tabel 1) leiti, et kõige sobivamaks kaevandamisviisiks on alakorrusväljamine.

Tabel 1. Kaevandamisviisi sobivus kuni ja üle 600 m sügavuse.

Kaevandamisviis	Kuni 600 m	Üle 600 m	Punkte kokku
Alakorrusväljamine	39	37	76
Alakorrusvaristamine	23	23	46
Suurte kambrite täitmisega kaevandamine	22	23	45
Karjääriviisiline	36	–	36
Kihiti kaevandamine	17	17	34
Suurte kambrite alaastangutega kaevandamine	3	4	7

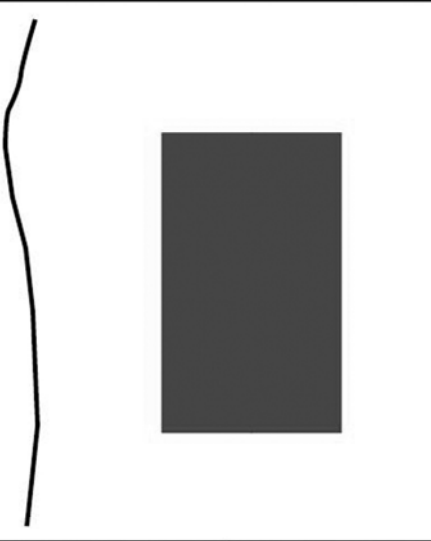
Tulemused

Kattekivimite paksusmudel annab täpse ettekujutuse kaevanduse avamiseks vajaminevatest töödest ning mahtudest. Kaevandamisviisiks on kõige otstarbekam valida alakorrusväljamine. Lisaks uurimustöö tulemusele saab öelda, et korruste moodustamisel kaevanduse sügavuse kasvamisel kasvab kaeviste tõstekulud maapinnale. Suur osa varust jääb tundlike objektide hoidetervikute alla ning lisaks kaevanduses asuvate tervikute alla. Sellise kaevandatava varu juures tuleb käsitleda kaeveõõnte teisest kasutamist peale graniidi väljamist kaeveõõnest. Seda kõike on vaja graniidikaevanduse rajamiseks, mille varud on hetkel hinnatud piiramatuks.

Tänuavaldused

Uurimistöö läbiviimist finantseeriti ETF grantidega 7499 „Säästliku kaevandamise tingimused“ ja 6558 „Mäendusriskide haldamise kontseptsioon ja meetodid“.

UBC Mining Method Selection (see Appendix II - Mining Method Preferences) is a modified version of the Nicholas approach for selection of mining method based on orebody characteristic (refer Nicholas 1981). Selection involves summation and ranking of numerical values associated with orebody characteristics that reflect the suitability of a particular method. This interactive presentation of the selection process allows you to investigate the influence of orebody characteristics on the selection of appropriate mining methods. **Keep this window open and apply it to the mining methods discussed in the following sessions.**

Orebody Characteristics	Orebody Cartoon	Mining Method Rankings
<p>Geometry and Grade Distribution</p> <p>General Shape: <input type="text" value="Massive"/></p> <p>Ore Thickness: <input type="text" value="Very Thick (more than 100m)"/></p> <p>Ore Plunge: <input type="text" value="Flat (less than 20deg)"/></p> <p>Grade Distribution: <input type="text" value="Uniform"/></p> <p>Depth: <input type="text" value="Intermediate (100-600m)"/></p>		<p>(best)</p> <p>Sublevel Stopping (39)</p> <p>Open Pit (36)</p> <p>Sublevel Caving (23)</p> <p>Cut and Fill Stopping (22)</p> <p>Top Slicing (17)</p> <p>Square Set Stopping (3)</p> <p>Room and Pillar (.14)</p> <p>Block Caving (.27)</p> <p>Shrinkage Stopping (.71)</p> <p>Longwall Mining (.80)</p> <p>(worst)</p>
<p>Rock Mass Rating (after Bieniawski 1973)</p> <p>Ore Zone: <input type="text" value="Very Strong (60-100)"/></p> <p>Hanging Wall: <input type="text" value="Very Strong (60-100)"/></p> <p>Footwall: <input type="text" value="Very Strong (60-100)"/></p>		
<p>Rock Substance Strength (unconfined compressive strength / principal stress)</p> <p>Ore Zone: <input type="text" value="Strong (more than 15)"/></p> <p>Hanging Wall: <input type="text" value="Strong (more than 15)"/></p> <p>Footwall: <input type="text" value="Strong (more than 15)"/></p>		

Joonis 5. Kaevandamisviisi valik EduMine tarkvaraga kuni 600 m stigavuseni.

Kasutatud kirjandus

- Adamson A. ja Pirrus E. 1994. Eesti oma graniit. *Eesti Loodus* 9: 280–282. EduMine <http://www.edumine.com/xedumine/selectatool.asp> [26.01.2009]
- Pastarus J.-R. 1996. *Large Gavern Stability in the Maardu Granite Deposit*. Theses of Tallinn Technical University, Tallinn.
- Seletuskiri Maardu graniidimaardla varude osaliseks ümberhindamiseks ja uuesti kinnitamiseks*. Eesti Graniidifond, Tallinn, 1994.
- Suuroja K. 1979. *Graniidi uuringud Maardu uuringuväljas. Osa I Aruande tekst ja tekstilisad*. Geoloogia Ministeerium, Keila.
- HeiVäl Consulting. 2008 *Maardu graniidikaevanduse sotsiaalmajanduslike mõjude eksperthinnang*.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. 2006. Support of Underground. *Excavations in Hard Rock* 9 23.

Vivika Väizene (vivika.vaizene@ttu.ee) Tallinna Tehnikülikooli Mäeinstituut, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn.

JÄRELSÕNA

Piirideta geoloogia ajas ja ruumis

Ivar Puura

Geoloogia sügiskool tähistab 2009. aastal oma viiendat juubelit, kuuludes ka tänavu Planeet Maa Aasta ürituste sarja. Tähelepanuta ei ole jäänud ka Charles Darwiniga seotud tähtpäevad – 200. sünniaastapäev 12. veebruaril ning "Liikide tekkimise" esmailmumise 150. aastapäev 24. novembril. Esimesega seoses toimus Tartus Darwini sünniaastapäevale pühendatud konverents ning Darwini peateose ilmumisega seoses on kavas Maa ajaloo ja Eesti elupaikade teemalise näituse avamine TÜ loodusmuuseumis. Darwiniga seotud juubelitele on pühendatud ka sügiskooli avasessioon. Lisaks on valminud ja valmimas Eesti Looduseuurijate Seltsi mitmed projektid, mille tulemusena valmivad veebipõhised info- ja õppematerjalid geoloogiast ja selle uurimisloost.

Erialateadmiste alusmüür laotakse ülikoolis saadud teadmistest. Teadmised ise saavad aga õpingute käigus paralleelselt mitmetest suundadest ning suurte infovoogude korral on nendevaheliste seoste loomine alati keerukas. Üksikdistsipliinide eesmärk on teemat käsitleda sügavuti ja võimalusel kvantitatiivselt. See aga, kuidas konkreetne õppeaine või kitsam uurimisvaldkond koos oma eelduste, paradigmade ja järeldustega mahub suuremasse pilti, tuleb enamasti igapäev ise leida. Sügiskoolide ja kõikvõimalike seminaride ja konverentsidega seotud eneseväljendus nii kõnes kui kirjas aitab sellele kindlasti kaasa.

Üks selliste ürituste eesmärgi on vaadata oma kitsama eriala piiride taha, nii ruumis kui ajas. Et mõista iga fakti kui konkreetse katse või vaatluse suhet kontekstiga ning, võib abiks olla mõtteline ajarännak.

Herbert Wellsi ajamasina-stipendium: Pariis 1854–1855

Selleks, et mõista, kuidas valitsev maailmapilt võib mõjutada tipp-teadlaste arutluskäiku, kujutlege, et olete saanud Herbert Wellsi stipendiumi ning teil avaneb võimalus stažeerida Pariisi Loodusmuuseumis aastal 1854–1855 ning osaleda 1853. a. muuseumi professoriks valitud Alcide d'Orbigny geoloogia ja paleontoloogia kursusel "Cours élémentaire", ajal, mil kellelgi ei ole aimu 4–5 aasta pärast ilmuvast Charles Darwini "Liikide tekkimisest". Te olete valinud parimatest parima, sest Alcide Charles Victor Marie Dessalines d'Orbigny (1802–1857) on Prantsuse loodusteadlane, kes avaldas töid zooloogiast, malakoloogiast, paleontoloogiast, geoloogiast ja arheoloogiast. Mere mikroorganisme uurides eraldas ta välja foraminiferide rühma. Aastail 1826–1833 viibis ta Pariisi loodusmuuseumi lähe-

tusel reisil Brasiiliasse, Argentiinasse, Paraguaisse, Tšiilisse ja Peruuusse, kogudes enam kui 10 000 eksemplari, kirjeldes neid aastail 1827–1847 ilmunud suurteoses "La Relation du Voyage dans l'Amérique Méridionale pendant les années 1826 à 1833". Edasi avaldas ta 8-köitelise teose Prantsusmaa paleontoloogiast (1849) ning püstitas mitmed geoloogilised lademed, millest tänaseni on kasutusel Toarci, Callovi, Oxfordi, Kimmeridge'i, Apti, Albi ja Cenomani lademed. Aastal 1853. sai temast Pariisi Loodusmuuseumi professor ning ta avaldas põhikursuse (Cours élémentaire), mis suhestas paleontoloogiat zooloogiaga, väljaspool konkreetseid praktilisi rakendusi stratigraafias.

Cuvier' õpilasena oli aga D'Orbigny eitaval seisukohal Lamarcki transmutsiooniteooria suhtes ning see maailmapildiline positsioon määras paljus ka vaikumisi tehtud eeldused, millega D'Orbigny kui tippteadlane probleemidele lähenes. Niisiis, alustagem suurte teemade analüüsiga D'Orbigny kursuse võtmes, nii nagu seda on vahendanud Jean Gaudant (2002). Allpool on toodud olulisemad arutluskäigud mitte sõna-sõnalisel tõlkes, vaid veidi mugandatud kujul.

Järjestikused loomissündmused teel loomade kujunemiseni

Pärast esialgseid muutusi võtsid mered tagasi oma asendi, kontinendid muutusid stabiilseks ning Maa oli valmis järgmiseks episoodiks: olles olnud steriilne, muutus see korraga elavaks. Esimesed organismid ja esialgne flora asustavad merd ja maad üheaegselt. D'Orbigny kirjutab: „Esimene suur küsimus on: kuidas Ta selle loomisakti läbi viis? Me ei suuda sellele vastata! Kui olendite väljasuremist saab selgitada füüsiliste põhjustega, siis elu esmane loomine ja kõik hilisemad jäävad läbitungimatuks müsteeriumiks, mida ei saa kuidagi seletada. See on fakt, mis on nii mõõtmatu, et me peame piirduma selle konstanteerimisega, ilma üritamata lahendada seda üleloomulikku müsteeriumi.”

Mõned usuvad, et esimesed loomad olid väga lihtsad, et organid on järk-järguliselt moodustunud nende järjestikuste muutuste käigus ning loomad on muutunud aja jooksul täiuslikumaks. Need hüpoteetilised ideed, mis on kahjuks laialt levinud, on täiesti vastuolus faktidega.

Olendid ei esine läbilõigetel järjestustena, mis kajastaksid organite muutusi, vaid üksteisest erinevate faunadena, mis on loodud üksteise järel ning mis on iseloomulikud kindlatele kihtidele.

Kumb loodi enne: muna või loom?

„Üks olulisemaid küsimusi paleontoloogias on: kes sündis Maal esimesena – muna või loom? Teadlased, kes tegelevad embrüoloogiaga

usuvad, et see on muna. Meie, paleontoloogid, usume, et see on loom.“ Nii järeldeb D’Orbigny, tuues tõestuseks järgneva loogilise arutluskäigu.

Üks loodud liik, kui selle kaks sugu ühinevad, suudab end lõpmatult paljundada ning levida kogu maailmas. Kuid mis saaks loodud munast? Võib veel uskuda, et alamate loomade munad suudavad nende jaoks soodsates tingimustes areneda.

Kuid näiteks elusalt sünnitavate kalade "munad" (marjaterad), millest väiksed kalad väljuvad ema sees? On selge, et nad vajavad arenguks seda, et ema enne olemas oleks. Ning mis saaks imetajate isoleeritud "munast" (munarakust). Kujutlege maapinnale jäetud elevandi munarakku. Me teame, et selleks, et terviklikult välja areneda, peab see jääma üheks aastaks ema sisse, et see oleks kaitstud ning suureneks ellujäämise tõenäosus. Need faktid tõestavad meile kindlalt, et esimesena loodi Maal loomad ning munad ei ole midagi rohkemat kui loomade poolt tekitatud vormid. Te näete, et seda küsimust ei ole võimalik teisiti lahendada ning loomad on loodud enne kui muna.

London, 1857: Darwini pärilik muutlikkus pähklikoores

Charles Darwin on oma päriliku muutlikkuse ideed (*descent with modification*) kõige kompaktsemalt kirjeldanud kirjas Harvardi ülikooli botaanikaprofessor Asa Grayle 5. septembrist 1857:

"...iga elusolendi kohta, kes paljuneb kiiresti, võib öelda, et ta püüab teha kõik mis võimalik, et oma arvukust suurendada. Nii on see iga liigi järelkasvu puhul, pärast seda kui see liik on harunenud teisenditeks, alamliikideks või tõelisteks liikideks. Ja ma arvan, et ülaltoodud faktidest järeldub, et iga liigi muutlik järglaskond püüab hõivata nii palju ja nii mitmekesiseid kohti looduse ökonoomikas, kui võimalik (see õnnestub ainult vähestel). Iga uus teisend või liik, kui see tekib, võtab üldiselt oma vähemkohastunud eellase koha ning seega hävitab selle. Ma usun, et selles seisneb kõigi aegade elusorganismide klassifikatsiooni ja sugulussuhete alus, kuna organismid tunduvad alati hargnevat nagu puuharud ühisest tüvest, kusjuures õitsvad ja harunevad oksad hävitavad nõrgemad. Surnud ja kadunud harud esindavad väljasurnud perekondi ja sugukondi."

Hargneva puu joonis leidub Darwini märkmikus aastast 1837 ning teema põhjalikum käsitus kahes käsikirjalises töös: „Mustand“ 1842. aastast ning „Essee“ 1844. aastast. 1858. aastal Russell Wallace’ilt Malaiisist saadud 12-leheküljeline kiri, mille lähenemisviis liikide muutumisele oli väga sarnane Darwini ideedega, kallutas Darwinit oma käsikirja kiiresti trükiks ette valmistama. See ilmus 12. novembril 1859. 30. juunil 1858 oli ilmunud Linné ühingu ajakirjas Wallace’i essee koos väljavõtetega Darwini käsikirjadest, kuid idee vastuvõtt oli leige.

Niipea, kui mõtestame eluslooduse ja selle mitmekesisuse ajalugu kui ühise algusega hargnevat puud või võrgustikku, muutuvad meie eeldused ning ka järeldused on teistsugused kui vaid mõne aasta eest Pariisis. Tõsi, enne kui Darwini nägemus õppekursustesse jõudis, kulus palju aega ja entusiastlike kolleegide selgitustööd.

Piirideta paradigmat – ideedevõrgustiku poole

Thomas Kuhn (2003) vormis 1962. aastal ettekujutuse teadusest, mille areng on vaadeldav valitsevate vaadetesüsteemide ehk paradigmat järjestusena. Paradigmat vahetus toimub selle mudeli järgi teadusrevolutsioonide käigus. Kui Kuhni mudel tundub sobivat eelkõige vanema teaduse jaoks (kuni 20. sajandi esimese pooleni), siis David Hull (1988) on püüdnud 20. sajandi teaduse arengut vaadelda evolutsioonilises võtmes, kasutades elemente Darwini ideedest ja kladistilisest lähenemisest fülogeneesile.

Vahepeal on aga evolutsiooniline mõte liikunud puu metafoorilt võrgu metafoori suunas, näidates, et paljusid fülogeneetilisi seoseid on täpsem näidata põlvnemisvõrgustike, mitte põlvnemispuudena. Selline mudel tundub olevat konstruktiivsem ka tänases teaduses toimuvate vastasmõjude kohta. Geoloogia, nagu iga teise teaduse suur võimalus on ammutada ideid naaberteadustest ning hoida silm peal meetoditel, mida kasutusele võetakse. Piire vabamaks lastes võib kunagi detailide taga kangastuda ka Suur Pilt:

"The average scientist will see facts as facts, and may make reasonable interpretations of collated data; the excellent scientist will see the same data as parts of a mosaic of an intricate design, which he or she will perceive early and with great clarity." (Sindermann, 1985).

Kasutatud kirjandus

- Gaudant J. 2002. Le manuscrit du cours de paléontologie professé par Alcide d'Orbigny en 1854 et 1855 au Muséum national d'histoire naturelle. *Comptes Rendus Palevol* 1: 362–382.
- Hull D. 1988. *Science as a Process: An Evolutionary Account of the Social and Conceptual Development of Science*. The Univ. of Chicago Press.
- Kuhn T. 2003. *Teadusrevolutsioonide struktuur*. Tartu, Ilmamaa, 312 lk.
- Sindermann C.J. 1985. *The Joy of Science. Excellence and its Rewards*. New York, Plenum Press, 259 lk.