

Varangu kihistu savi kasutamine graptoliitargilliidi utiliseerimiseks

Magistritöö

Üliõpilane: Oliver Vilu (191969LARM)

Juhendaja: Rutt Hints, teadur, PhD

Õppekava: Maapõueressursid (LARM18/18)

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Oliver Vilu

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Rutt Hints, PhD

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Abstract	5
Jooniste loetelu	6
Tabelite loetelu.....	7
1. Sissejuhatus	8
2. Mustad kildad kaevandusjäätmetena	10
2.1. Graptoliitargilliit ja selle käitlemine	10
2.2. Mustade kiltade isesüttimine	11
2.3. Isesüttimisel eralduvad gaasid	12
2.4. Metallide ja orgaanika leostumine	13
2.5. Radoon ja radioaktiivsus	14
2.6. Maardu fosforiidikaevanduse näitel probleemid graptoliitargilliidi valesti käitlemisel	15
3. Mustade kiltade utiliseerimislahendused	17
3.1. Musta kilda käitlemine BHP Mt Whaleback'i kaevanduses	17
3.1.1. Musta kilda segamine aherainega	18
3.1.2. Musta kilda utiliseerimine isoleeritud puistangutes.....	18
3.1.3. Kilda kriitilise massi leidmine	19
3.1.4. Hetkel kasutatav utiliseerimistehnoloogia Mt Whaleback kaevanduses	21
3.2. Musta kilda käitlemine Rio Tinto Iron Ore Pilbara piirkonna kaevandused	22
3.2.1. Aheraine haldamise plaan.....	22
3.2.2. Mustade kildade käitlemine kaevandamisel ja peale kaevandamist.....	24
3.3. <i>Store and release cover</i> süsteem	25
3.4. Savid inertse materjalina jäätmete ladustamisel.....	25
4. Toolse fosforiidimaardla geoloogia ja Varangu kihistu savid	27
4.1. Varangu kihistu	28
4.1.1. Granulomeetriline koostis.....	29
4.1.2. Mineraalne ja keemiline koostis	29
4.1.3. Plastsus.....	30
5. Materjalid ja analüüsimeetodid	31
5.1. Atterbergi piirid.....	32
5.2. Röntgenfluorestsents ja röntgenstruktuuranalüüs.....	36
5.3. Geotehniliste ja veeliste omaduste katsed (Eesti Keskkonnauuringute Keskuses)	36

6. Tulemused	38
6.1. Proovide keemiline ja mineraloogiline koostis	38
6.2 Proovide granulomeetriline koostis ja pinnase üldomadused	38
6.3. Kuivanud proovikeha survetugevus.....	40
6.4. Tihendatud setendi omadused	41
7. Arutelu.....	46
Kokkuvõte.....	50
Tänuavaldused	51
Kirjanduse loetelu.....	52
Lisa 1. Toolse PH014B puursüdamik.....	56
Lisa 2. Katsetatud proovide intervallid.....	57
Lisa 3. EKUK katsete seletuskiri	58
Lisa 4. Standard Proctorteimi tulemused.....	59
Lisa 5. Filtratsioonikatse tulemused	60
Lisa 6. Filtratsioonikatse graafik	61
Lisa 7. Lõimisköver.....	62
Lisa 8. Lõimise tulemused ja pinnase omadused	63
Lisa 9. Nihketeimi tulemused	64
Lisa 10. Nihketeimi graafikud	65
Lisa 11. Ühetelgse survetugevusteimi tulemused.....	66
Lisa 12. Ühetelgse survetugevusteimi graafik.....	67
Lisa 13. Kuivanud proovikeha survetugevusteimi tulemused.....	68
Lisa 14. Varangu kihistu keemiline koostis (1/2).....	69
Lisa 15. Varangu kihistu keemiline koostis (2/2).....	70
Lisa 16. Varangu kihistu Atterbergi piirid	71

Annotatsioon

Kaevandades Toolse fosforiidimaardlas avakaevandamise tehnoloogiaga, tuleb eemaldada kõik fosforiidi peal asuvad kivimid, nende hulgas ka Türisalu kihistu graptoliitargilliit ja Varangu kihistu savi. Graptoliitargilliit on tuntud kui ohtliku jäätmena, sest suurtesse puistangutesse ladustades tekib õhuhapniku ja vee ligipääsul isesüttimise oht. Looduslikke savisid on samas kasutatud edukalt ohtlike jäätmete utiliseerimiskohtade tehisbarjäärade ehitusel.

Antud töös uurisin Toolse fosforiidimaardlast pärineva puursüdamikuga Toolse PH014B Varangu kihistu savi geotehnilist sobivust graptoliitargilliidi utiliseerimiseks kasutatavate tehisbarjäärade rajamiseks. Laboris leidsin Varangu kihistu savi Atterbergi piirid. Lisaks määrati rida teisi geotehnilisi parameetreid nagu lõimis, veesisaldus, tihendatavus (Proctorteim), filtratsioonimoodul, ühetelgne survetugevus ja nihketugevuse parameetrid (tasapinnaline nihketeim). Proovide koostist uuriti täiendavalt röntgenstruktuuri ja röntgenfluoresents-spektromeetria meetoditel. Lisaks annan töös ülevaate juba maailmas kasutatavate edukate mustade kiltade utiliseerimistehnoloogiate osas mäetööstuses ja võrdlesin nende sobivust Eesti graptoliitargilliidi utiliseerimiseks.

Plastsusomaduste katsete alusel saab uuritud kesendatud Varangu kihistu proovi klassifitseerida väheplastseks saviks. Granulomeetriliselt koostiselt liigitub materjal ebaühtlase terastikulise koostisega savikaks aleuriidiks ning langeb suure külmatundlikkusega pinnaste gruppi. Katsete kohaselt on optimaalse veesisalduse juures (14.5%) tihendatud savi filtratsioonimoodul $0,77 \times 10^{-9}$ m/s. Nihketeimi käigus tuvastati tihendatud proovikeha purunemine madalate normaalpingete (30 kPa) juures. Uuritud savide mineraalses koostises valdavad savimineraalid, kaaliumpäevakivi ja kvarts, keskmine väävlisisaldus jääb alla 1%.

Tulemuste põhjal võib väita, et madalate filtratsioonikiiruste ja plastsusomaduste poolest sobib uuritud Varangu kihistu savi tehisbarjäärade ehitamiseks. Planeerides graptoliitargilliidi kihilist matmist Toolse maardlas, ei ole Varangu kihistu savide maht piisav selleks, et rajada puistangu põhi, graptoliitargilliidi kihtide vahelised isoleerivad kihid ja puistangu kattekiht.

Abstract

The utilization of graptolite argillite using clay from the Varangu Formation

Using open cast technology for phosphorite mining in the Toolse phosphorite deposit requires removal of a lot of overburden, including graptolite argillite of the Türisalu Formation and clays of the Varangu Formation. Graptolite argillite is known to be prone to spontaneous ignition when stored under atmospheric conditions. At the same time, clays from the mining wastes have been used as a low-cost material for build hydraulic barriers and covers for safe storage of black shales like graptolite argillite.

For this thesis, I tested the geotechnical properties of the clays from the Varangu Formation to assess their potential usage for graptolite argillite utilization. The material for the study was sampled from the Toolse PH014B drillcore. I conducted Atterberg limit tests of the material to study the plastic behaviour of the clays. The number of other geotechnical properties such as granulometric composition, the content of water, compaction properties (Proctor test), unconfined compressive strength, shear strength, and hydraulic conductivity were determined by laboratory testing. The geochemical and mineral composition of samples were analysed by X-ray fluorescence and X-ray diffraction methods. Additionally, the thesis gives a brief overview of existing technologies of black shale storage in mining to delineate potentially safe methods for handling graptolite argillite wastes.

According to the tests, deposits from the Varangu Formation could be classified as low plasticity clay (soils). Based on the granulometric analysis, a fine silty fraction dominates in their composition, and the material falls into the soil category known to be vulnerable to freeze/thaw damage. The measured hydraulic conductivity of the clay, compacted under optimum water content (14,5%), is rather low – $0,77 \times 10^{-9}$ m/s. During the direct shear strength test, the failure of the sample was recorded under low confining stress (30 kPa). In the mineral composition of studied samples, clay minerals, potassium feldspar, and quartz dominate, while sulphur content stays below 1%.

Based on the results, the studied material has mostly adequate geotechnical and hydraulic properties to construct effective compacted clay barriers. The volume of the clays from the overburden is insufficient for building a whole liner system if layered dumping of graptolite argillite is planned.

Jooniste loetelu

Joonis 1. KUMU ehitamiseks tehtud süvendist nähtav graptoliitargilliit (Soesoo & Hade, 2015).	10
Joonis 2. Püriidi oksüdeerumisel põhjustatud kilda isesüttimise tasakaaluskeem (B3 Mining Services, 2015).....	12
Joonis 3. Pinnase radooniriski ja graptoliitargilliidi lasumus (Eesti Geoloogiateenistus, 2020).....	14
Joonis 4. Katendi selektiivse ekskaveerimise tehnoloogia Maardu fosforiidikarjääris (Reinsalu, 2011).	15
Joonis 5. Enne 1995. a kasutuses olnud musta kilda utiliseerimise tehnoloogia Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).	18
Joonis 6. 1996. a kasutama hakatud musta kilda utiliseerimise tehnoloogia Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).	19
Joonis 7. 2 m, 5 m ja 10 m kõrgused musta kilda katsepuistangud ja mõõtejaamade asukohad Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).	20
Joonis 8. Katsepuistangute läbilõige B-B' (Waters & O'Keane, 2003).	20
Joonis 9. Musta kilda utiliseerimisel ladustatakse see enne matmist ajutiselt 2x2x2 m suurustesse kuhjadesse (Waters & O'Keane, 2003).	21
Joonis 10. Musta kilda kihiline utiliseerimise meetod Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).	21
Joonis 11. Musta kilda matmine põhjavee tasemest madalamale (Landers & Usher, 2015).	23
Joonis 12. Toolse fosforiidimaardla ruumikuju. Maa-ameti Geoportaal 2021.	27
Joonis 13. Puuraugu PH014B asukoht. Maa-ameti Geoportaal 2021.	31
Joonis 14. Rootsi koonuse aparaat voolavuspiiri leidmiseks. 1. Reguleeritava kõrgusega alus; 2. Lagemiga ekraan; 3. Koonus; 4. Saviproov; 5. Proovi hoidmise anum; 6. Koonuse kinnitamise metallvarras (European Committee for Standardization, 2004).	33
Joonis 15. Voolavuspiiri leidmiseks kasutatud penetromeeter Controls model 22-T0029/E.	34
Joonis 16. Külmakerke määramise alad sõelkõvera graafikul (Slunga & Saarelainen, 1989).	37
Joonis 17. Varangu kihistu saviproovi lõimiskõver koos külmaohtlikkuse tsoonidega. Külmaohtlikkuse piirid ISSMFE TC 8 alusel.....	39
Joonis 18. Varangu kihistu savi kuivanud katsekeha (OV005-2021) enne survetugevusteimi.	41
Joonis 19. Varangu kihistu savi kuivanud katsekeha (OV005-2021) peale survetugevusteimi.	41
Joonis 20. Ühetelgse survetugevuse deformatsioonigraafik. Noolega märgitud punktis tuvastati esimene nähtav pragu katsekehal.....	42
Joonis 21. Standard Proctorteimiga tihendatud proov, enne survetugevusteimi.	43
Joonis 22. Standard Proctorteimiga tihendatud proov, peale survetugevusteimi.	43
Joonis 23. Nihketeimi graafik.	44
Joonis 24. Nihketeimi katsekeha deformatsioonigraafik.	44

Tabelite loetelu

Tabel 1. Varangu kihistu granulomeetiline koostis (Kivimägi & Teedumäe, 1970).	29
Tabel 2. 1970. a tehtud Toolse maardla Varangu kihistu keemiline koostis (Kivimägi & Teedumäe, 1970).....	30
Tabel 3. Pinnase kategooriad voolavuspiiri järgi (Jaaniso, 2011).....	32
Tabel 4. Pinnase jaotus voolavusarvu (I_L) järgi (Jaaniso, 2011).....	33
Tabel 5. Koonuse penetratsiooni nõuded voolavuspiiri määramisel (European Committee for Standardization, 2004).	34
Tabel 6. Röntgenfluorestsentsi (XRF) analüüsi tulemused.....	38
Tabel 7. Granulomeetrilise analüüsi tulemused	39
Tabel 8. Lõimiskõvera parameetrid, lõimistegur ja peenosise (<0,06 mm) sisaldus.	39
Tabel 9. Minu tehtud ja EKUK labori poolt tehtud Atterbergi piirid: voolavus (w_L), plastsus (w_p) ja plastsusarv (I_p).	40
Tabel 10. Survetugevusteim kuivanud silindrikujulise proovikehaga.	40
Tabel 11. Standard Proctorteim 2,5 kg raskusega.....	41
Tabel 12. Ühetelgse survetugevuse katse optimaalse veesisaldusega katsekehaga.	42
Tabel 13. Varangu kihistu savi nihketeim optimaalse veesisalduse juures.....	43
Tabel 14. Survekambris tehtud filtratsioonimooduli tulemused.	45

1. Sissejuhatus

Kaevandades Eestis fosforiiti karjääris, tuleb eelnevalt ohutult eemaldada graptoliitargilliit. Graptoliitargilliit on viimastel aastatel tuntust kogunud saanud kui tuleviku maavara, mis sisaldab märkimisväärses koguses tehnoloogiliselt olulisi metalle (Hade & Soesoo, 2014). Vaatamata sellele, puuduvad selle potentsiaalse maagi jaoks hetkel majanduslikult kasumlikud rikastamismeetodid ja piisavalt keskkonnasõbralik kaevandamistehnoloogia. Sellepärast kvalifitseerub graptoliitargilliit ohtlikuks jäätmeiks.

Graptoliitargilliidi näol on tegemist orgaanika- ja püriidirikka peeneteralise settekivimiga (Petersell, 1997). Kui kaevandamise või ehitustegevuse tõttu pannakse graptoliitargilliit puistangutesse, võib õhuhapniku juurdepääsul toimuda aheraine isesüttimine ja ulatuslik leostumine (Puura, Neretnieks, & Kirsimäe, 1999). Negatiivsete keskkonnamõjude riski maandamiseks peab graptoliitargilliiti matma õhukindlalt. Õhu ligipääsul võib graptoliitargilliit iseeneselikult süttida, sest graptoliitargilliidis sisalduv püriit oksüdeerub. Püriidi oksüdeerumine on eksotermiline reaktsioon, mille käigus eraldub soojus, mis võib omakorda süüdata orgaanika graptoliitargilliidis (Pihlak, 1999).

Hiljuti kaitstud P. Kolli magistritöö „Väikekarjääri projekteerimine fosforiidi tehniliseks proovimiseks“ raames pakuti välja tehnoloogiat, kus kasutatakse eelnevalt väljatud Varangu kihistu savi graptoliitargilliidi matmiseks (Koll, 2017). Looduslikest savidest tehisarjäärid on maailmas laialdaselt kasutuselt erinevate jäätmete ladustamisel, kuid uuringud näitavad, et hästitoimivate ning kestlike geotehnoloogiliste lahenduste projekteerimine ja ehitamine nõuab kasutatavate savide omaduste mitmekülgset testimist nii laboris kui ka katsepolügoonil (Daniel, 1993).

Varangu kihistu savide geotehniliste omaduste kohta pole tänase seisuga piisavalt andmeid hindamiseks nende sobivust ohtlike jäätmete katematerjalina. 1969. a-1971. a toimusid Toolse fosforiidimaardlas geoloogilised uuringud, mille raames testiti ka fosforiidi kattekivimite, sealhulgas Varangu kihistu savide, mõningaid ehitusgeoloogilisi parameetreid ja koostist (Kivimägi & Teedumäe, 1970; Raudsep & Sinisalu, 1972). Samas ei võimalda kasutatud uuringumetoodika ning standardid nende andmete otsest võrdlemist täna purdsetete geotehnilistes uuringutes standardsete meetodikatega. Samuti ei käsitle varasemad uuringud Varangu kihistu savide omadusi, mis iseloomustaksid rikutud struktuuriga setendit. Tihendatud looduslikust savist koosnevate tehisarjääride rikutud struktuuriga savid aga võivad omadustel märgatavalt erineda rikkumata struktuuriga setenditest (Daniel, 1993).

Minu töö eesmärk on selgitada kas Varangu kihistu savid oma keemilistelt- ja tugevusomadustelt sobiks graptoliitargilliidi ohutustamiseks vajalike tehisarjääride geotehnoloogiliste lahenduste jaoks. Kuna looduslike savide sobivust, tõhusate tehisarjääride ehitamiseks, võivad mõjutada väga mitmed erinevad lähtematerjali omadustest ja käitlemistehnoloogiast sõltuvad näitajad (Daniel, 1993), keskendus laborikatsetes Varangu kihistu savide valitud pinnasemehaanika põhiparameetrite plastsus- ning voolavuspiiride määramisele. Ühtlasi on töös käsitletud uuritud saviproovide survetugevuse, tihendatavuse, drenimata nihketugevuse, filtratsioonimooduli, granulomeetrilise, keemilise ning mineraalne koostise analüüside tulemusi.

Töö tugineb Toolse fosforiidimaardlas puuritud puursüdamiku PH014B Varangu kihistu savide proovimisel ning uuringu jaoks tehtud stendi koostise analüüsidel ja geotehnilistel laboriuuringutel. Puurauk PH014B on puuritud Eesti Geoloogiateenistus poolt RESTA maavarade väärimise projekti

raames ning on osa laiemast puurimis- ning uuringuprogrammist fosforiidi ja graptoliitargilliidi kasutuselevõtu uudsete võimaluste selgitamiseks.

2. Mustad kildad kaevandusjätmetena

2.1. Graptoliitargilliit ja selle käitlemine

Rootsis, Lõuna-Norras, Bornholmis, Eestis, Loode-Venemaal ja Poolas on teada mitmete mustade orgaanikarikaste kiltade esinemine Kesk-Kambriumi kuni Hilis-Ordoviitsiumi vanusega settekihtides. Eestis on taolised musta kilda kompleksid tuntud kui graptoliitargilliit (Tremadoci lade, Tüvisalu kihistu), varasemalt ka kui diktüoneemaargilliit (Soesoo & Hade, 2015).

Kivim sisaldab ligi 15-20% orgaanilist ainet ja keskmiselt 2,4-6% püriiti (Petersell, 1997). Graptoliitargilliidi kompleks mille paksus varieerub Eesti paarikümnest sentimeetrist kuni enam kui 6 meetrini, võib lisaks kildale piirkonniti sisaldada tugevalt sulfidistunud aleuroliidi vahekihte (Kivimägi & Loog, 1972). Graptoliitargilliiti iseloomustab mitmete metallide (Mo, U, V, Zn, Pb) ja poolmetallide (As, Sb) kõrgendatud sisaldus.

Hetkel puudub keskkonnasõbralik ja majanduslikult kasumlik tehnoloogia graptoliitargilliidi väljamiseks. Lisaks puudub väärimistehnoloogia, mis lubaks graptoliitargilliidis esinevaid väärtuslikke raskemetalle efektiivselt rikastada.

Täna tekib Eestis enamus graptoliitargilliidi jäätmetest ehitustegevuse tagajärjel (Joonis 1).



Joonis 1. KUMU ehitamiseks tehtud süvendist nähtav graptoliitargilliit (Soesoo & Hade, 2015).

Kõik ehitusobjektid on erinevad ja sisaldavad kohaliku geoloogia, ehitusviisi ja asukoha tõttu elemente, mis vajavad üldjuhul unikaalseid viise graptoliitargilliidi käitlemiseks (Eesti Geoloogiateenistus, 2020). Väikestele kogustele, mis tekivad ehitusel saab mõelda paindlikke utiliseerimisvõimalusi aga probleem tekib, kui tegemist on kaevandusega ja graptoliitargilliidi kogused on tuhandetes tonnides.

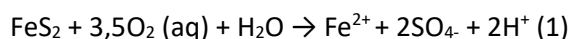
Graptoliitargilliidi käitlemisega seotud vahetud ja pikaajalised keskkonnaohud (isesüttimine, väävligaaside emissioon, raskemetallide leostumine) ilmnedid fosforiidi avakaevandamisel Maardu fosforiidimaardlas aastatel 1965-1991 (Pihlak, 1984; Puura, Neretnieks, & Kirsimäe, 1999).

2.2. Mustade kiltade isesüttimine

Iseenesliku süttimise riskiga mustasid kiltasid leidub lisaks Eestile mitmetes paikades maailmas. Iseenesliku süttimist võib sageli kohata ka söekaevandustes ja teistes maardlates, kus leidub piisavas koguses püriiti ja orgaanikarikkaid kivimeid. Kõige sagedasem on iseenesliku süttimise probleem kaevanduste aheraine puistangutes (Restuccia, Ptak, & Rein, 2017).

Iseüttimine on protsess, kus väljatud must kilt, mis sisaldab püriiti või mõnda muud sulfiidset materjali, reageerib hapnikuga. Sulfiidide oksüdeerumine on eksotermiline protsess, mis võib piisavalt suure temperatuuri saavutamisel põhjustada kilda orgaanilise osa süttimise.

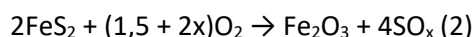
Reaktsioon saab alguse, kui vees sisalduva (nii atmosfääris oleva õhuniiskuse kui ka pinnaseveena) vaba hapniku toimel püriit oksüdeerub.



Püriidi lagunemise kaasproduktina tekivad väävelhape, erinevad lenduvad väävliühendid (põhiliselt SO_2) ning Fe(II) (Landers & Usher, 2015).

Juhul kui soojuskaod ümbritsevasse keskkonda on väiksemad kui püriidi oksüdatsioonireaktsioonil vabanev soojushulk tõstab püriidi lagunemine järk-järgult ümbritseva materjali temperatuuri (Restuccia, Ptak, & Rein, 2017). Orgaanikarikas kivimis süttib teatud temperatuuridel orgaaniline aines, millega võib kaasneda ulatusliku põlengu teke.

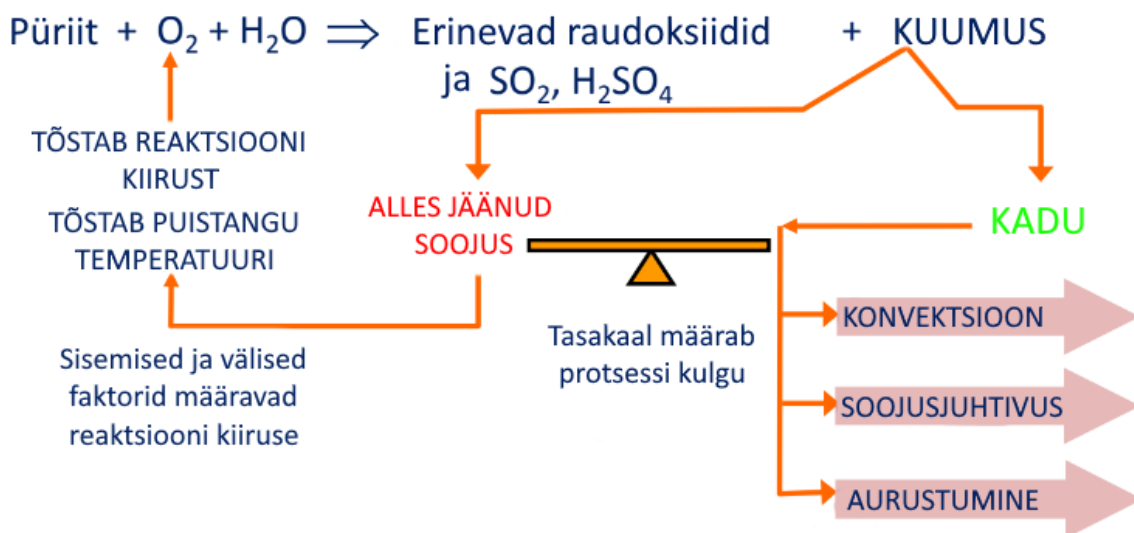
Eesti graptoliitargilliidi puistangute uurimistel on leitud, et kildas leiduv püriit muutub isesüttimisega enamasti hematiidiks ja vääveloksiidiks (Puura, Neretnieks, & Kirsimäe, 1999):



Peamine põhjus, miks toimub kilda isesüttimine on peened püriidiosakesed. Kaevandamistegevuse tulemusena muutuvad püriidiosakesed väiksemaks ja kaevise kobestamisega pääseb püriidile ligi õhk või vihmavesi koos hapnikuga. Väiksemate püriidiosakeste eripind on suurem kui suurtel osakestel ja see põhjustab ka intensiivsema oksüdeerumise. Temperatuur tõuseb oksüdeeruva püriidi ümber ja isesüttimise katalüsaatoriks on suured kaevise kuhjad. Vastavalt Frank-Kamenetskii teooriale on materjaliproovi sisemise reaktsioonide soojuse kogutoodang proportsionaalne selle mahuga, kuid soojuskadu on proportsionaalne proovi pindalaga. Teoriast lähtudes on ennustatav, et suuremate

materjalikoguste puhul on iseeneslikku süttimist põhjustavad temperatuurid madalamad kui väiksemate koguste puhul (Restuccia, Ptak, & Rein, 2017). Ümbritsevad kivimid isoleerivad oksüdeerimistsentri, mis tõstab omakorda püriidi oksüdeerumiskiirust (Joonis 2) (Landers & Usher, 2015). Kui püriidi oksüdeerumisel tõuseb temperatuur *ca* 90° C, siis see omakorda süütab kildas oleva orgaanilise materjali.

Kuumenemise ja isesüttimise protsess ei ole iseenesest kiire. Vaja võib minna mitu kuud, et temperatuur kilda kuhjas tõuseks orgaanika süttimise temperatuurile. Küll aga on varasemalt võimalik täheldada kildade puistangutes vaatlusel või neist erituva lõhna (H₂S) järgi vihjed oksüdeerumisest. Kiire tegutsemisega on võimalik piirata oksüdeerumise levikut. Intensiivsema oksüdeerumise või juba kilda süttimise korral on keeruline võtta ette leevendusmeetmeid, sest puistangute laialivedamisel ja kobestamisel lubatakse suuremal hulgal atmosfääriõhul reageerida püriidiga ning kogu protsess saab hoogu juurde (Landers & Usher, 2015).



Joonis 2. Püriidi oksüdeerumisel põhjustatud kilda isesüttimise tasakaaluskeem (B3 Mining Services, 2015).

Peamised sisemised faktorid, mis mõjutavad oksüdeerumise reaktsiooni kiirust on erinevate keemiliste elementide sisaldus kildas. Välised faktorid, mis mõjutavad reaktsiooni kiirust on vee ja hapniku ligipääsetavus ning kilda puistangu geomeetria (B3 Mining Services, 2015).

Isesüttimist soodustavad kõrged tihendamata kilda puistangud. Puistangutes tekib korstna efekt, kus puistangu alt liigub õhk puistangu sisse ja oksüdeerumise intensiivsus tõuseb. Järskude nõlvade puhul on rõhu suurema gradiendi tõttu ka korstna efekt suurem. Sellepärast on soovitatav hoida mustade kiltade puistangute nõlvad lauged (B3 Mining Services, 2015).

2.3. Isesüttimisel eralduvad gaasid

Juba süttinud kildast eralduvad erinevad väävlirikkad gaasid. Tihti võivad olla puistangu süttimise välised tunnused ainult suitsuvine ja väävli lõhn. Põlevate puistangute juures tuleb olla ettevaatlik, sest eralduvad gaasid võivad ka väikeste koguste juures olla ohtlikud.

Puistangutes toimuvad erinevate temperatuuride ja hapniku kogustega põlengud. Kuigi peamine gaas, mis tekib kilda põlemisel on lõhnatu SO₂ ja CO₂, võib tekkida ka spetsiifilise lõhnaga lenduvaid väevliühendeid nagu H₂S (Eesti Geoloogiateenistus, 2020; Landers & Usher, 2015).

1990. a arvutati endise Maardu fosforiidikarjääri alal tekkinud gaaside maht (Jüriado, Raukas, & Petersell, 2012). Kuna graptoliitargilliidi põlemise reaktsioonid on väga keerulised ja võivad erineda olenevalt graptoliitargilliidi keemilisest koostisest ning muudest puistangu sisestest ja välistest faktoritest, arvutati gaaside maht keskmise graptoliitargilliidi puistangu põlemistemperatuuri järgi 1990. a Maardu endises fosforiidikarjääris. Leiti, et aastas kulus u 520,3×10³ tonni hapniku Maardus ladustatud graptoliitargilliidi oksüdeerumiseks, mis oli arvestuslikult 6,6% kogu Eesti metsade ühe aastases hapniku tootmise mahust. Lisaks eraldus oksüdeeruvast graptoliitargilliidist 10⁴ t SO₂ ja 73,3×10³ t CO₂ (Jüriado, Raukas, & Petersell, 2012).

2.4. Metallide ja orgaanika leostumine

Metallid leostuvad graptoliitargilliidist ja teistest kildadest esmajoones tänu püriidi ja teiste sulfiidsete mineraalide oksüdeerumisele (Puura E. , 1994). Kõrge poorsusega suured puistangud on soodne koht, kus kaevises olev püriit saab oksüdeeruda. Püriit reageerib hapniku ja veega ning tulemuseks on SO₄²⁻ vabanemine veekeskonda ning pH alanemine. Maardu fosforiidikaevanduse graptoliitargilliiti sisaldavate aherainekuhjade puhul takistas happeliste sulfaadirikaste vete kujunemist asjaolu, et aheraine kuhjadesse ladustati samaaegselt ka lubjakivi jäätmeid, mistõttu neis oli tagatud piisav puhverduisvõime happe neutraliseerimiseks (Puura E. , 1994).

Puistangutes toimuvate leostumis- ja isesüttimisprotsesside tulemusena satub poorivette erinevaid metalle ning orgaanilisi ühendeid, mis kantakse puistangus infiltreeruvate meteoorsete vetega puistangust välja. Selle tulemusena võivad reostuda graptoliitargilliidi puistangu alune, ümbritsevate alade põhjavesi ja lähedalasuvad veekogud (Pärn, et al., 2017). Leostumine ei toimu koheselt. Atmosfääritingimustele avatud graptoliitargilliit ja teised mustad kildad vajavad reeglina mitu kuud, enne kui toimub märkimisväärset hulgal raskemetallide leostumist (Eesti Geoloogiateenistus, 2020; Puura E. , 1994).

Eesti graptoliitargilliiti iseloomustab kõrge uraani (U), kaadmiumi (Cd), plii (Pb), arseeni (As), tsingi (Zn), vanaadiumi (V) ja molübdeenini (Mo) sisaldus. Nimetatud metallid ja poolmetallid on põhilised, mis graptoliitargilliidist potentsiaalselt välja leostuvad (Eesti Geoloogiateenistus, 2020). Uuringud on näidanud, et veel põlemata kildast, mille temperatuur on juba tõusnud 70 – 80° C püriidi oksüdeerumise tagajärjel leostub kõige intensiivsemalt raskemetalle. Kõige suurem leostumise põhjustajaid on sellepärast puistangutes püriidi oksüdeerumisel tekkivad „kuumad täpid“. Nendes kohtades ei ole veel graptoliitargilliit põlema läinud aga temperatuur on kõrge, mille tulemusena toimub lühiajaline intensiivne raskemetallide leostumine (Puura E. , 1994).

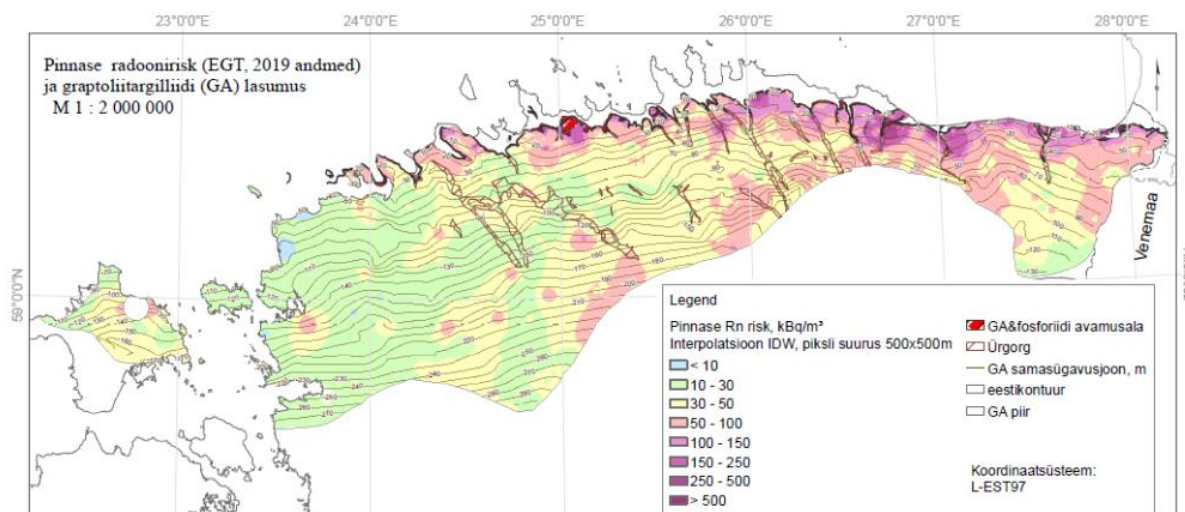
Kõrge temperatuuri tulemusena laguneb kilda orgaaniline osa ning anaeroobses keskkonnas eralduvad kildast vedelad ja gaasilised orgaanilised ühendid. Tihtipeale ei ole ka teada leostumise pikkus, leostumise protsess ei ole kiire ja lähedal asuvasse hüdrofääri võib lekkida raskemetalle ja orgaanilisi ühendeid aastakümneid või aastasadu (Eesti Geoloogiateenistus, 2020).

2.5. Radoon ja radioaktiivsus

Graptoliitargilliidiga on seotud veel täiendavad keskkonnariskid, mis on tingitud radioaktiivsete elementide, nagu uraani kõrgendatud sisaldusest (Jüriado, Raukas, & Petersell, 2012).

Eestis on peamiseks loodusliku radiatsioonifooni tekitajaks radoon. Radoon-222 on uraan-238 tekkiva raadium-226 tütarisotoop, ehk uraani tütarisotoobi raadiumi lagunemisel tekib radoon. Tegemist on radioaktiivse väärisgaasiga, mille poolestusaeg on 3,82 päeva. Selle lagunemisel tekib seitse erinevat radioaktiivset isotoopi: poloonium-218, plii-214, vismut-214, poloonium-214, plii-210, vismut-210 ja poloonium-210. Peale neid seitset radioaktiivset isotoopi, tekib esimene stabiilne tütarisotoop, plii-206. Radoon ja selle tütarisotoobid satuvad elusolendite organismi sissehingatava õhu kaudu. Radoon on ohtlik inimestel kontsentreeritud kogustes. Radoon on kantserogeenne ja põhjustab kopsuvähki, luukoe hõrenemist, valgeveresust ja muid terviseprobleeme (Petersell, et al., 2017).

Põhja-Eestis tekib palju radooni graptoliitargilliidist, kuna see on maapinnale lähedal ja tihti eraldab graptoliitargilliiti maapinnast poorne paekivi.



Joonis 3. Pinnase radooniriski ja graptoliitargilliidi lasumus (Eesti Geoloogiateenistus, 2020).

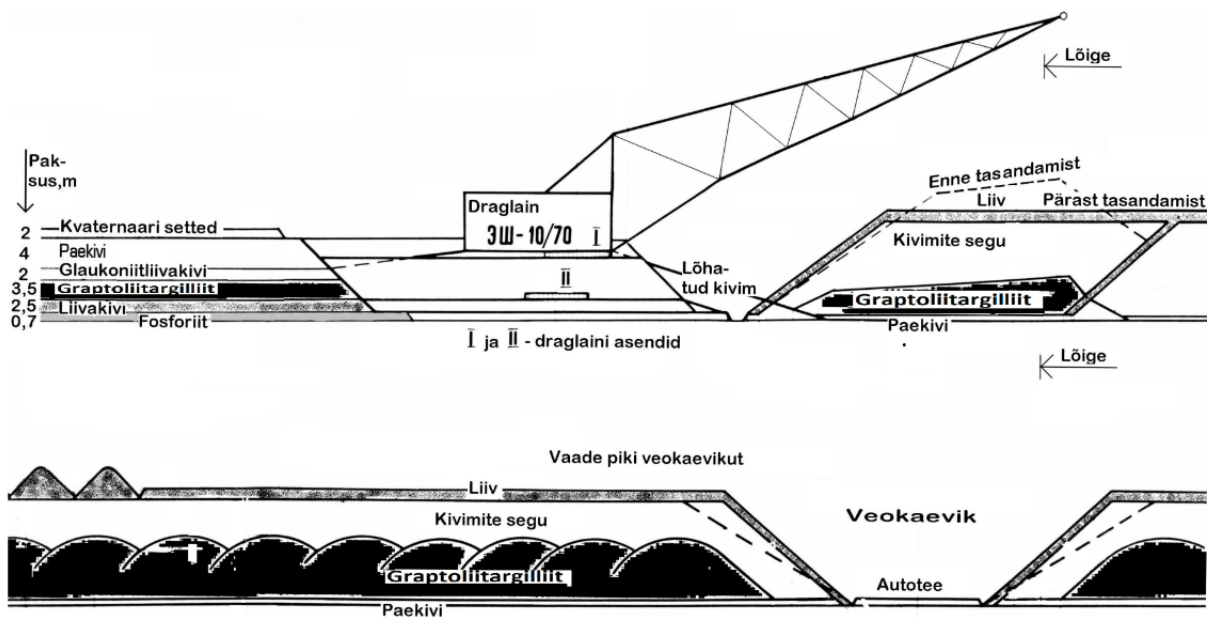
Kõrgendatud radooniriskiga ala Eestis on Ida-Virumaa (Joonis 3). Just Ida-Virumaal asub kõige uraanirikam graptoliitargilliit Eestis. Kõige suuremad keskmised uraani sisaldused piirkonna graptoliitargilliidis ulatuvad 300 g/t ning kõige suurema radooniriskiga alad on tekkinud graptoliitargilliidi, glaukonitliivakivi ning karstialade koosmõju tulemina (Pahapill, Rulkov, Rajamäe, & Åkerblom, 2003).

2.6. Maardu fosforiidikaevanduse näitel probleemid graptoliitargilliidi valesti käitlemisel

1954. a alustati Maardu fosforiidimaardlas pealmaa kaevandamist. Fosforiiti kaevandati kokku kahel alal, Tallinn-Narva maanteest lõuna- ja põhjapool. Vaalkaevandamisega tõsteti kobestatud katend suurtesse vaaludesse. Keskmine fosforiidikihi paksus oli 0,5 m (Soesoo & Hade, 2015; Valgma, et al., 2013).

Kui eelnevalt töötanud allmaakaevandustes ei võetud graptoliitargilliiti maa seest välja, siis nüüd kaevandati kõik fosforiiti katvad kivimid ära draglainidega. Graptoliitargilliit puistati aheraine mägedesse kuna sellel puudus majanduslikult otstarbekat kasutust. See aga tõi ootamatuid probleeme isesüttimise näol. Suurtesse puistangutesse panemine, graptoliitargilliidi purustamine väiksemateks osadeks ja hapniku ning vee juurdepääs tõstis märkimisväärselt isesüttimise ohtu. Ka oli puistangutesse visatud kattekivimite ja setete segu väga kõrge filtratsioonivõimega. Maardu fosforiidikarjääris hakkasid aherainemägedes pidevalt toimuma põlengud. Kõige intensiivsed põlengud toimusid puistangutes, mis olid 3-5 aastat vanad, kuid mõnikord kulus üle 20 aasta, enne kui puistang süttis. Temperatuurid puistangute sees võisid küündida kuni 500 °C (Jüriado, Raukas, & Petersell, 2012).

Puistangute ja tulekollete jahutamiseks, üritati neid laiali vedada. See aga lubas veel suurema hapniku ligipääsu põlengule ja oksüdeerumisele ning põlengud intensiivistusid. Probleemi lahendamiseks töötati 1983. a Maardu fosforiidikarjääris välja tehnoloogia (Joonis 4), kus draglain peab fosforiidi pealset katendit väljama selektiivselt.



Joonis 4. Katendi selektiivse ekskaveerimise tehnoloogia Maardu fosforiidikarjääris (Reinsalu, 2011).

Skeemi kohaselt rajati puistangu alla lubjakivi padi, sellele kuhjati graptoliitargilliit ning puistang maeti lubjakivi, glaukoniitliivakivi ja pinnase segu alla. Puistangu viimaseks katteks pidi tulema fosforiidi kaevandamisega kaasneva liivakivi. Loodeti, et graptoliitargilliidi matmisel ülejäänud materjali alla peatatakse hapniku juurdepääs ning tulevikus saaks kilta veel vajadusel puistangust välja kaevandada, kui peaks tekkima uraani, vanaadiumi ja molübdeeni rikastamise huvi. Tulenevalt draglainide tööpõhimõttest ja nende statsionaarsest tööalast, ei olnud selline tehnoloogia efektiivne. Ka oli kattematerjalina kasutatud liiv liiga suure osakeste suurusega (poorsus oli 32,35%). Lisaks tekkis olukord, kus graptoliitargilliidi alla maetud lubjakivi kihti oli nii poorne, et soodustades korstna efekt kujunemist puistangutes. Uus utiliseerimise meetod vähendas natuke isesüttimise koldeid Maardu fosforiidikarjäärist aga mitte piisavalt (Pihlak, 2011). Katendi selektiivse ekskaveerimise tehnoloogiat kasutati lühikest aega ainult Maardu fosforiidikarjääri lõunaosas. Kasutatud tehnoloogia ja kattematerjalide tõttu ei suudetud vee ja hapniku infiltratsiooni peatada (Reinsalu, 2011).

Aheraine puistangutest leostuvate ainete maht ei olene otseselt veekogusest, mis voolab läbi puistangu vaid püriidi oksüdeerumise intensiivsusest. Ühe graptoliitargilliiti sisaldava puistangu ruutkilomeetri kohta leostus Maardus ca 1646,4 t lahustuvaid mineraale. 72,9% nendest sisaldas SO_4^{-2} ioone, 12,8% Ca^{+2} ioone, 11,3% Mg^{+2} ioone ja 1,1% $\text{K}^{+}+\text{Na}^{+}$ ioone. Ülejäänud mahust moodustasid erinevad mikrokomponendid. Reostunud vesi voolab seejärel lähedal olevasse Maardu järve, mis on üks kõige reostunuim järv Eestis. Suurte keskkonnamõjude ja rahva vastuseisu tõttu lõpetati kaevandamine 1991. a ära (Jüriado, Raukas, & Petersell, 2012).

3. Mustade kiltade utiliseerimislahendused

Sulfiidseid mineraale sisaldavate mustade kildade poolt põhjustatud kaevandamis- ja utiliseerimisriskide maandamiseks on sobivaid lahendusi otsitud erinevates maailma paikades (B3 Mining Services, 2015; Eesti Geoloogiateenistus, 2020; Landers & Usher, 2015). Rakendatavad praktikad isesüttimise vältimiseks näevad ette, et mustade kiltade jälgimine peab toimuma kogu kaevandamise ajal alates kivimi väljamisest kuni selle utiliseerimiseni. Peale utiliseerimist on vajalik, et kilda utiliseerimise asukohas toimuks pidev temperatuuri ja eralduvate gaaside (O_2 , CO_2 ja SO_2) mõõtmine (Waters & O'Keane, 2003).

Järgnevalt on käsitletud näiteid mustade kiltade käitlemisest kaevandamisel ja aherainena ladustamisel.

3.1. Musta kilda käitlemine BHP Mt Whaleback'i kaevanduses

BHP Group Limited tegeleb setteliste rauamaakide kaevandamisega. Ettevõtte omab Lääne-Austraalias Western Australia Iron Ore (WAIO) integreeritud süsteemiga kompleksi kuhu kuuluvad neli töötusjaama ja viis kaevandust. BHP Mt Whaleback kaevanduse kasuliku kihi, Brockman Iron kihistu, lamamis ja lasumis esinevad musta kilda kihid. Kokku tekib kaevanduses umbes 3,3 miljardit tonni kaevandusjääke, millest 15% on isesüttimise riskiga kildad (Waters & O'Keane, 2003).

Austraalia on olnud mustade kiltade isesüttimisprobleemidega sunnitud tegelema pika kaevandamisajaloo vältel. Näiteks Mt Whaleback rauamaagi kaevandus mainis ametlikult iseeneslikult süttivat kilda esmakordselt 1975. a., kuid esimestes uuringutes leiti, et iseeneslikult süttiv must kilda ei ole ohtlik. Järgnevat aastat täheldati kaevurite poolt mitmel korral musta kilda süttimist iseeneslikult, aga süttimises süüdistati kilda reaktsiooni kasutatava lõhkeaine ANFO-ga (ammooniumnitraadi ja kütteõli segu). 1983. a rutiinse kaevandamise käigus plahvatas iseeneslikult kaks musta kilda sees olevat lõhkeauku. Puuraugud oli täidetud lõhkenööri, detonaatori ja lõhkeaine ANFO. Õnnetus sundis kaevandajat täpsemalt uurima, mis põhjustab musta kilda iseeneslikku süttimist ning kuidas tulevikus vastavaid riske maandada (Waters & O'Keane, 2003).

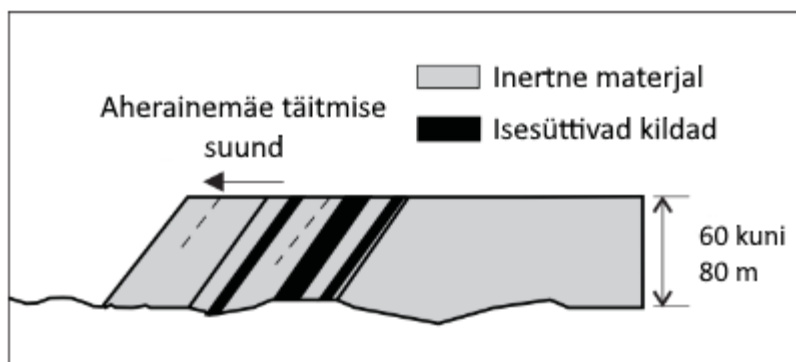
1990. aastate keskelt alates on kaevanduses tehtud mitmeid uuringuid, kuidas musta kilda utiliseerida. Kuna isesüttivat kilda tekib väga suurtes kogustes, siis on uuringute tulemusena fikseeritud kindlad tööetapid, nii enne kui ka pärast utiliseerimist (Waters & O'Keane, 2003):

- Enne puuraukude puurimist tuleb veenduda, kas plaanitavad puuraugud läbivad musta kilda kihte, mis on potentsiaalselt isesüttivad;
- Peale puuraukude puurimist kontrollida väljatud puurpuru seest iseeneslikult süttivate kiltade puru ning kilda sisaldavates puuraukudes kasutada modifitseeritud ANFO-t;
- Peale lõhkamist koristada musta kilda kaevis kolme nädala jooksul, vältida kaevis pikaajalist seismist;
- Must kilda ladustada eraldi kogumiskohtadesse, mis vähendab iseeneslikult süttimise riski;
- Juba liigselt (üle $50^{\circ}C$) kuumenenud kilt laotada võimalikult laiali (väiksemad kui $2 \times 2 \times 2$ m puistangutesse), et seda jahutada.

Nii keskkonnale kui ka inimestele ohutu isesüttiva kilda käitlemine nõuab kaevanduses erinevate osakondade vahelist kommunikatsiooni. Lisaks on Mt Whaleback kaevanduses loodud ka eraldi osakond Sulfur Dioxide Task Group, kelle ülesandeks oli leida kõige majanduslikumalt otstarbekas kilda utiliseerimisviis, mis oleks samal ajal ohutu nii teenindavale personalile kui ka keskkonnale (Waters & O'Keane, 2003).

3.1.1. Musta kilda segamine aherainega

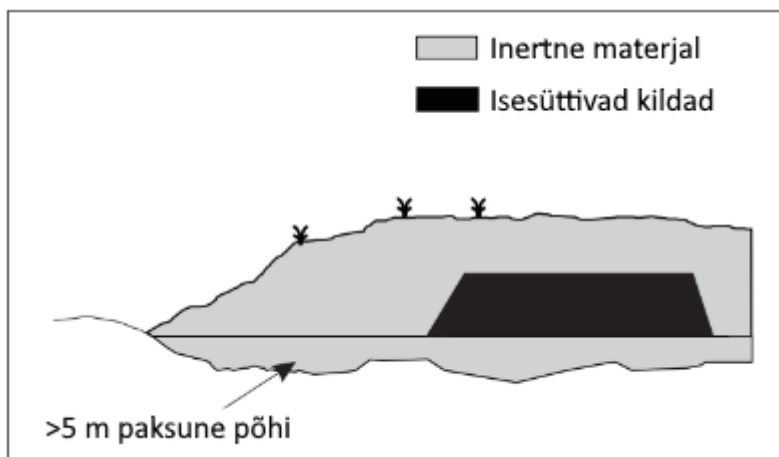
Enne 1995. aastat, oli Sulfur Dioxide Task Group'i soovitus Mt Whalebacki kaevanduses viia kõik potentsiaalselt isesüttiv kilt kõige kaugemasse kaevanduse aheraine mäkke ning segada seda inertse kaevandamisest üle jääva materjaliga (Joonis 5). Taolise kilda utiliseerimise tagajärjel tekkis aga väga suur raskemetallide leostumise oht ja aherainemäest alla imbuva happelise vee põhjavette lekkimise oht. Utiliseeritud kildale pääses ligi vihmavesi ning kildad ei olnud täielikult isoleeritud atmosfääritingimuste eest (Waters & O'Keane, 2003).



Joonis 5. Enne 1995. a kasutuses olnud musta kilda utiliseerimise tehnoloogia Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).

3.1.2. Musta kilda utiliseerimine isoleeritud puistangutes

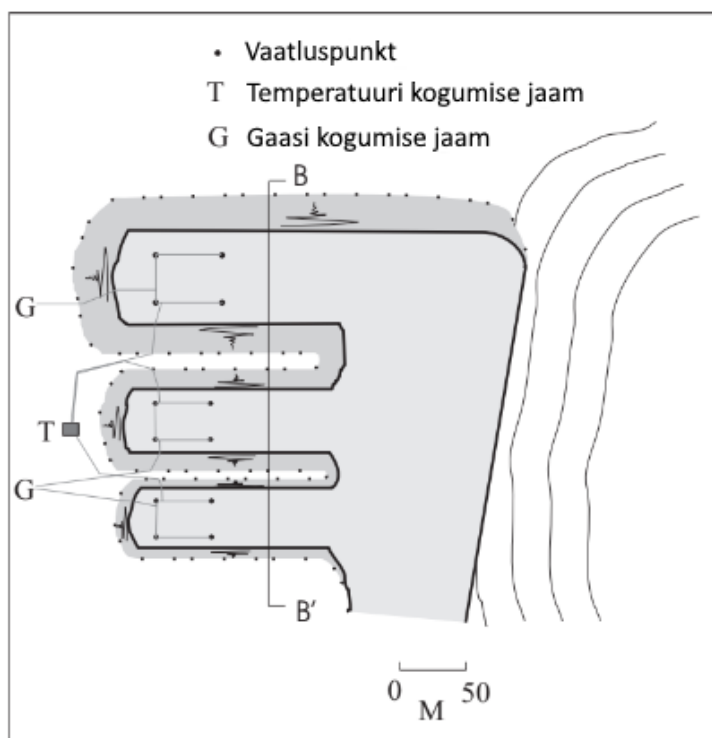
1996. aastal hakati kasutama kilda utiliseerimiseks selle matmist aheraine alla. Enne kilda toomist utiliseerimisalale loodi loodusliku pinna ja kilda vahele vähemalt 5 m paksune puhvertsoon (Joonis 6). Selle utiliseerimisviisi juures oli probleemiks suur kilda hulk ühes kohas. Teoreetilised arvutused näitasid, et antud asukoha kilda kriitiline piir vältimaks isesüttimist, oli kilda ladustamine kahe meetri paksuste puistangutena. Üle selle piiri minnes võib hakata toimuma temperatuuri järsk tõus puistangus. Hiljem on suures puistangus peaaegu võimatu langetada temperatuuri või kustutada põlengut (Waters & O'Keane, 2003).



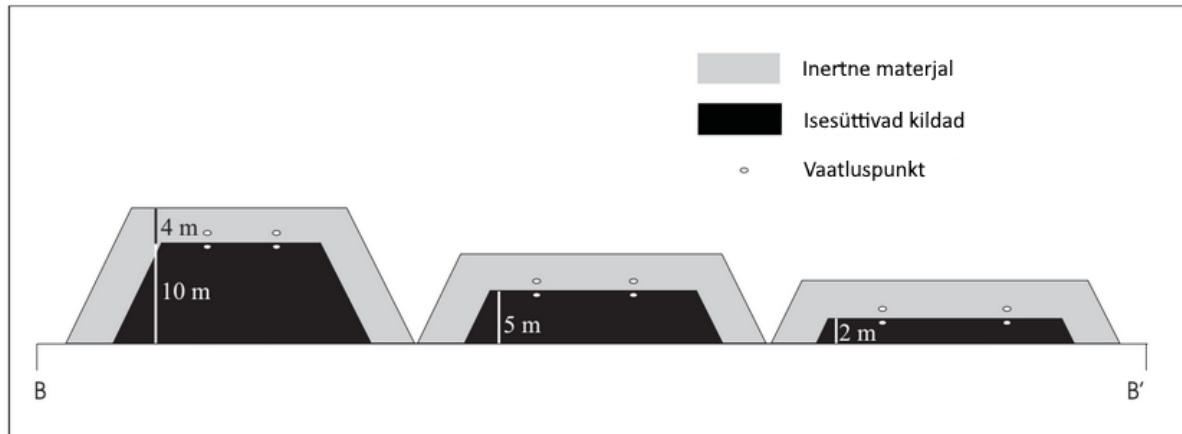
Joonis 6. 1996. a kasutama hakatud musta kilda utiliseerimise tehnoloogia Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).

3.1.3. Kilda kriitilise massi leidmine

2001. a alustati Mt Whalebacki kaevanduses kohaliku kilda utiliseerimistehnoloogia leidmiseks kolme katsepuistangu ehitamisega. Uuringu eesmärk oli teada saada, kas 4 m paksusest kattest piisab kilda temperatuuri kontrollimiseks ning leida maksimaalne ohutu kilda ladustamise paksus. Igasse puistangusse tehti 8 mõõtmispunkti – 4 kattepinnase sisse ja 4 kilda sisse (Joonis 7). Mõõtepunktidesse pandi gaasitorud, mis viisid igast puistangust eraldunud gaasid ühte tsentraalsesse gaasimõõturit ja termomeetrid, mis mõõtsid erinevate kihtide temperatuuri. Terve süsteem oli automatiseeritud koguma kord kuus andmeid temperatuuri, hapniku, süsihappegaasi ja vääveloksiidi koguste kohta puistangutes (Waters & O'Keane, 2003).



Joonis 7. 2 m, 5 m ja 10 m kõrgused musta kilda katsepuistangud ja mõõtejaamade asukohad Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).

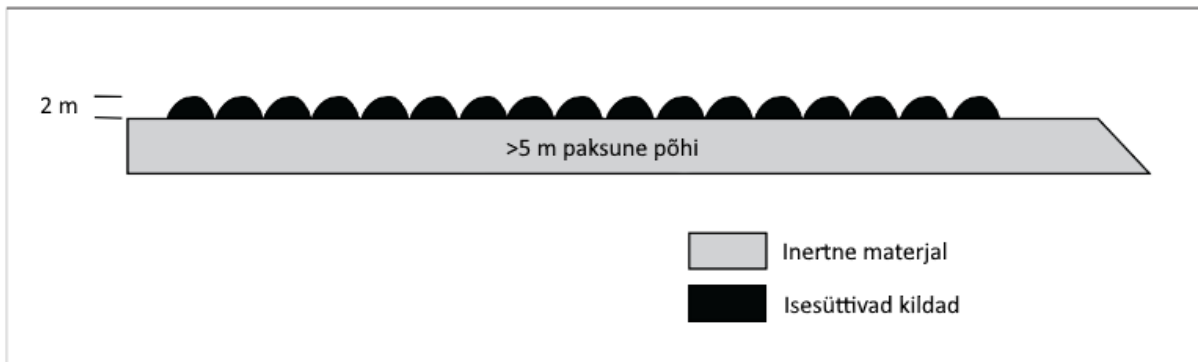


Joonis 8. Katsepuistangute läbilõige B-B' (Waters & O'Keane, 2003).

Katsetulemused näitasid juba varem püstitatud hüpoteesi, et Mt Whaleback'is olev kilt, ei suuda isesüttida kui kilda puistangu kõrgus ei ületa 2 m (Joonis 8). Ülejäänud kaks puistangut, 10 m ja 5 m paksuse kilda kihiga näitasid isesüttimise potentsiaali. Juba 6 nädala jooksul, peale puistangute valmimist hakkasid mõlemad puistangud silmnähtavalt suitsema ja mõõtepunktides tuvastati suurenenud temperatuur ja gaaside liikumine. Puistangute suitsemine hakkas pihta samal ajal, kui esimest korda peale puistangute valmimist sadas vihma (Waters & O'Keane, 2003).

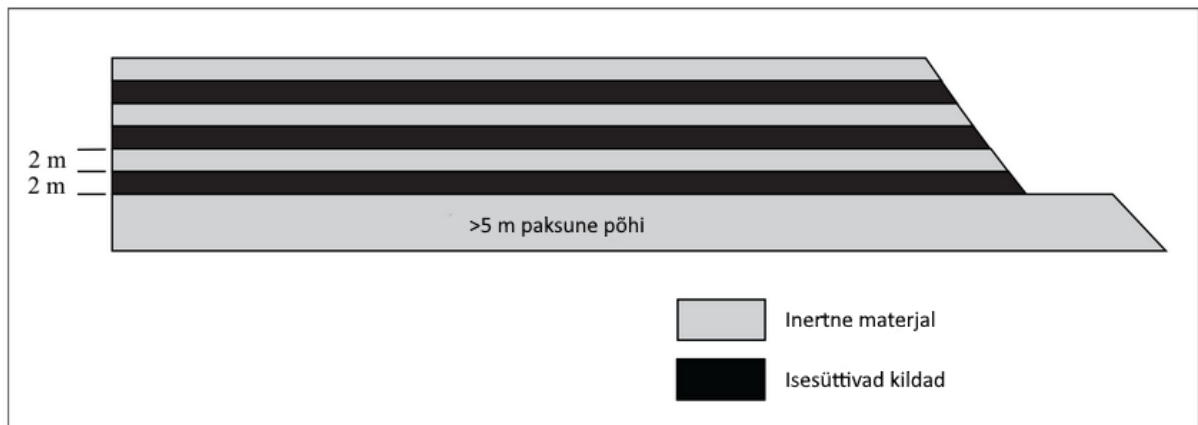
3.1.4. Hetkel kasutatav utiliseerimistehnoloogia Mt Whaleback kaevanduses

Peale pikaajalisi katsetusi määrati Mt Whaleback'is oleva isesüttiva musta kilda kriitiliseks mahuks kilda puistangud mõõtmega 2x2x2 m (Joonis 9). Kui kaevandamisega satutakse musta kilda kihtideni siis kategoriseeritakse need vaatluste põhjal „külma“ või „kuuma“ musta kildana. Viimane kujutab endast püriidirikast kilda millel on kõrgendatud potentsiaal isesüttimiseks. „Kuum“ kilda puhul teisaldatakse see väiksematesse kui 2x2x2 m kuhjadesse ja lastakse jahtuda. Olles kindlad, et kuhjad on jahtunud ja edasine temperatuuri tõus ei toimu, tasandatakse need ja kaetakse pealt ca 2 m paksuse inertse aheraine kihiga. „Külm“ kilt on mustast kildast koosnev aheraine, millel puudub potentsiaal kuumeneda.



Joonis 9. Musta kilda utiliseerimisel ladustatakse see enne matmist ajutiselt 2x2x2 m suurustesse kuhjadesse (Waters & O'Keane, 2003).

Eelkirjeldatud kilda utiliseerimise skeem rakendati kuni tekkis probleeme puistangute mahtumisega kaevanduse territooriumile. Probleemi lahenduseks hakati kasutama utiliseerimismeetodit, kus juba varasemalt korrektselt utiliseeritud kilda peale pannakse veel kihte (Joonis 10).



Joonis 10. Musta kilda kihiline utiliseerimise meetod Mt Whalebacki kaevanduses (Waters & O'Keane, 2003).

Määrares korrektsed piirid reaktiivse „kuuma“ ja „külma“ kilda vahel saab sellist tehnoloogiat kasutades ohutult utiliseerida Mt Whaleback kaevanduses tekkivat isesüttiva musta kilda aherainet (Waters & O'Keane, 2003).

3.2. Musta kilda käitlemine Rio Tinto Iron Ore Pilbara piirkonna kaevandused

Rio Tinto Iron Ore omab Lääne-Austraalias 11 erinevat kaevandust. Rauamaaki kaevandatakse antud piirkonnas karjääriivisiliselt puur-lõhketöödega. Ettevõtte kolmes kaevanduses väljatakse aherainena musta kilda, mis sisaldab erinevates kogustes püriiti ja omab seetõttu potentsiaali isesüttimiseks. Põhilised probleemid, mis tekivad musta kilda kaevandamisel on musta kilda isesüttimine, lõhkeaine ANFO enneaegne plahvatamine puuraukudes ja happeliste kaevandusvete teke musta kilda leostumisel (Green, 2009).

Rio Tinto Iron Ore rakendab kahte riskide maandamise plaani – 1) aheraine haldamise plaan (Mineral Waste Management Plan) ning 2) isesüttimise ja happelise vee leostumise haldamise plaan (Spontaneous Combustion and Acid Rock Drainage management plan). Kõikides Rio Tinto Iron Ore Pilbara piirkonna kaevandustes, kus on tegemist suure püriidi sisaldusega mustade kiltadega rakendatakse vastavaid riskide haldamise tegevuskava (Green, 2009).

3.2.1. Aheraine haldamise plaan

Aheraine haldamise plaani eesmärk on määratleda risk nii uutes kaevandustes ja maardlates kui ka juba töös olevates. Plaan koosneb kuuest erinevast osast (Green, 2009):

- Aheraine geokeemilisest uuringust;
- Kaevandamise ala riskide hindamine;
- Kaevandamisest mõjutatud ümberkaudse põhja- ja pinnasevee iseloomustus;
- Erinevate sulfide sisaldavate kivimite piiride määratlemine geoloogilistes mudelites;
- Sulfiidsete materjalide koguse määramine kaevandamise eluaja jooksul;
- Musta kilda utiliseerimisviisi välja töötamine.

Aheraine geokeemilise hindamise staadiumis puuritakse puuraugud ning märgitakse maha oksüdeerunud kilda, musta kilda, ligniidi, püriidi ja veepiiri kõrgused. Puuraukudest võetakse proovid iga 2 m tagant ning määratakse keemiliste elementide sisaldused: Ag, Al, As, B, Be, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, F, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, K, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Na, Th, Ti, U, V, Zn ja Zr. Kui mõne kivimi keskmine elementide sisaldus ületab 8,5x keskmist maakoost leiduva elemendi hulka, hakatakse uurima litoloogilise üksuse leostumise ohtlikust. Põhiline geokeemilise analüüsi eesmärk on teada saada, kas kivim on inertne või mitte (Green, 2009).

Kaevandamise ala riskide hindamisega soovitakse teada saada, kas kivimist tulenevalt võib tekkida happeline leostumine. Igale uuele kivimile antakse hinnang happelise kaevandusvee tekkeks (ARD – acid rock drainage), mis näitab happelise leostumise riski. Kui kivimist tulenevalt on piirkonnas keskmine või kõrge happelise leostumise oht tuleb teha detailne riskianalüüs ja võtta kasutusele lisameetmeid, et vähendada ohtu. ARD detailne riskianalüüsiga uuritakse ümbritsevat keskkonda, litoloogiat, keemilist koostist, leostumise võimalikust ja karjääri seinast paljanduvate sulfiidide hulka. Lõpptulemusena koostatakse juhised, et vähendada riski (Green & Borden, 2011).

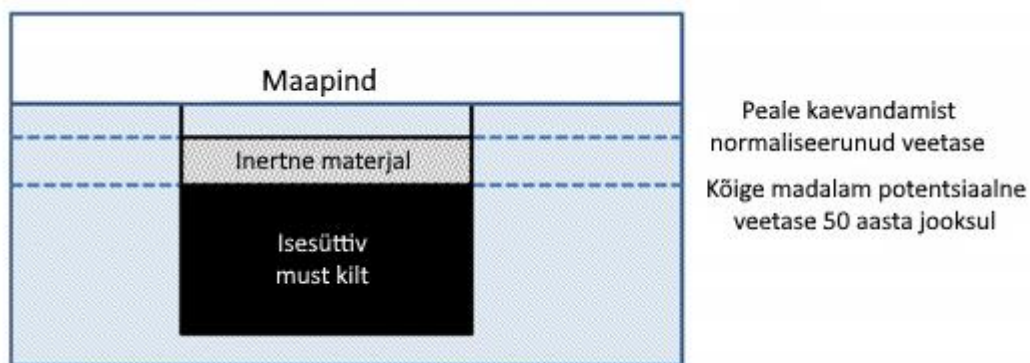
Aheraine haldamise plaan näeb ette, et enne kaevandamist uuritakse ümberkaudsete järvede, jõgede, kraavide, pinnasevee ja põhjavee kvaliteeti. Karjäärist välja pumbatav vesi peab vastavalt Austraalia seadusandlusele olema väga hea kvaliteediga või vastama enne kaevandamist ümbruskonna veekvaliteedile + 10% (Green, 2009).

Sulfiidsete kivimite piirid määratakse karjääri läbilõikes ja need jaotatakse „külmaks“ ja „kuumaks“ kildaks. Kui külmade kiltade puhul jälgitakse ainult happelise leostumise võimalust siis kuumade kiltade puhul tuleb veenduda, et kivim ei saaks iseeneslikult süttida. Kõik geoloogilised mudelid jaotavad aheraineplokid sulfiidi sisalduse järgi gruppidesse:

- 0 – inertne, ei sisalda musta kilt;
- 1 – madala riskiga, sisaldab oksüdeerunud musta kilt;
- 2 – keskmise riskiga, „külmad“ kildad;
- 3 – kõrge riskiga, „kuumad“ kildad.

Kõrge riskiga ja keskmise riskiga kiltade kogused arvutatakse geoloogilise mudeliga välja. Vastavalt kiltade kogustele saadakse teada, kui palju läheb vaja kiltade utiliseerimiseks inertset materjali ja millist utiliseerimistehnoloogiat tuleb kasutada.

Musta kilda aheraine ladustamise kohtade projekteerimisel on prioriteediks kõige väiksem võimalik keskkonnale tehtav kahju ja vähimad majanduslikud kulud (ladustamise kulud + potentsiaalsed hiljem makstavad keskkonnatrahvid). Kõige parem asukoht musta kilda ladustamiseks on ammendunud karjääri põhi. Sellega vähendatakse puistangute erosiooniriski, must kilt on kolmest suunast looduslikult kaetud ja sellega väheneb ka vajaliku inertse materjali hulk kilda ladustamisel. Võimalik on ka lahendus, kus põhjavee stabiliseerumisel kaevandamise eelsele veetasemele uputatakse must kilda aheraine lasund hapnikuvaesesse põhjavette (Joonis 11). Selline meetod välistab kallite geotehniliste kattesüsteemide ehitamise (Green, 2009).



Joonis 11. Musta kilda matmine põhjavee tasemest madalamale (Landers & Usher, 2015).

Muude ladustamiskohtade ja viiside puhul jälgitakse Rio Tinto Iron Ore Pilbara piirkonna kaevandustes mitmeid ettevaatusabinõusid. Musta kilda sisaldavaid kivimeid ei tohi kasutada karjäärisiseste teede ehitusel ja hooldusel, rampide ehitusel ning kaitsevallide ehitamisel. Ladustamiskoht ei tohi asuda piirkonnas mida läbib liikuv vesi, võimalike geotehniliste ebastabiilsuste vältimiseks. Pinnasevee, kraavide ja allikate olemasolul võib ladustamise piirkonnas leostuda pinnasevette või lähimasse põhjavee horisonti raskemetallid ning happeline vesi. Enne kilda ladustamist tuleb veenduda, et ladustamise ala on veekindel ning piirkonda tuleb paigutada põhjavee jälgimise andurid. Põhjavee

kvaliteedi kontroll toimub ladustamise ajal kui ka peale ladustamist. Vältida tuleb üleliigselt kiltade ladustamiskohtade ehitamist eelistades juba varem kasutatud ohtlike jäätmete ladustamise kohti kaevandusalal. Kindlasti tuleb vältida ladustamist veel kaevandamata maagi peale (Green, 2009).

3.2.2. Mustade kildade käitlemine kaevandamisel ja peale kaevandamist

Rio Tinto Iron Ore (RTIO) kasutab kivimite puhul, millel on leostumise oht või mis võivad muuta ümbruskonda happeliseks, SCARD (Spontaneous Combustion and Acid Rock Drainage) tööjuhust. SCARD on tüüpiline tööjuhise dokument selliste kaevandamiste juures, kus tekib happelise leostumise oht, ohtlike gaaside teke ja isesüttimise oht. Iga stsenaariumi jaoks on erinevad juhised, et leevendada keskkonna reostumist ja tervisekahjustusi (Green, 2009).

Lõhkeainete käitlemisel on oluline teada, millised puuraugud sisaldavad musta kiltta ja millised mitte. Kilda isesüttimisega võib tekkida olukord, kus puurauku laetud lõhkeaine plahvatab enneaegselt. Geoloogid on juba varasemalt välja selgitanud kõrge ohutasemega puuraukude asukohad ja puuraukude puurimise järgselt tähistatakse musta kiltta sisaldavad puuraugud sinise lipu ning musta kiltta mitte läbivad puuraugud valge lipuga. Kõikidele lõhkamise, puurimise ja lõhkeaine laadimisega seotud personalile peab olema selge, millised on tavalised puuraugud ANFO jaoks ja millistesse puuraukudesse tuleb panna modifitseeritud ANFO-t (Green, 2009).

Kaevandamistöõde jõudmisel sügavamale, täiendatakse pidevalt geokeemilisi andmeid kaevandavate kihtide kohta. Kulude vähendamiseks on vaja teada kui palju tekib aherainet, mis on ohtlik. Erinevate aheraine koguste arvutusel saadakse ka teada, kui palju on vaja musta kiltta happelise pH neutraliseerimiseks materjali ning kas neutraliseerivat materjali on aheraines piisavalt.

Karjääridest välja pumbatava põhjavee kvaliteeti mõõdetakse iga kuu. Sulfiidsete aherainete ümbruses mõõdetakse puuraukudes põhjavee kvaliteeti iga kvartal. Andmed kogutakse igal aastal kokku ja võrreldakse varasemate aastatega. Kõrge sulfaadi sisaldus proovides võib anda märku leostumisest, kuid võib olla tingitud ka kaevandusest sõltumatutest muutujatest. Tähtis on enne kaevandamist teada antud ala põhjavee kvaliteeti, mitmed põhjaveekihid võivad juba olla looduslikult kõrge sulfaadi sisaldusega.

Vältimaks kõikvõimalikke õnnetusi, erosiooni, isesüttimist ja vee infiltratsiooni, on lõplik musta kiltta utiliseerimisskeem Rio Tinto Iron Ore kaevandustes järgmine (Green, 2009):

- Tavalise musta kiltta puistangu nõlvad ei tohi olla suurema kallakusega kui 20°. Kui tekib olukord, et nõlvad on liiga pikad või must kilt on väga peeneteraline, tuleb vähendada puistangu nõlvust;
- Juhul kui juba olemasoleva puistangu nõlva kallet tuleb vähendada alla 20°, tuleb veenduda, et musta kiltta katma jääv kate ei jääks õhem kui 5 m;
- Vihmavee äravool tuleb juhtida nii, et see ei puutuks kokku maetud sulfiidsete materjalidega;
- Puistangu peale tuleb rajada 2 meetrit kõrge ja 5 meetrit lai kaitsevall, et takistada pinnase erosiooni sademetevee alla voolamisel mööda puistangu nõlvu;
- Katta sulfiidsed materjalid „hoia ja vabasta“ kattega (store and release cover) (Schneider, Baumgartl, Doley, & Mulligan, 2010).

Tõhusa ohtlike jäätmete utiliseerimisprogrammi jaoks on vaja erinevate osakondade vahelist koostööd ja kindlaid tööjuhendeid. RTIO kaevanduste erinevad osakonnad kohtuvad omavahel vähemalt kord kuus, et arutada olukorda kaevanduses, tuleviku väljavaateid ning probleeme. Kõik töötajad saavad vastavatel teemadel regulaarset väljaõpet. Iga kahe aasta tagant tehakse musta kiltla käitlevatele osakondadele sõltumatu auditeerimine. Kõik problemaatilised kohad tuuakse välja ja astutakse vajalikud sammud nende likvideerimiseks (Green, 2009).

3.3. Store and release cover süsteem

Aheraine ja kaevandamisjäätmete isoleerimiseks atmosfäärist ning ümbritsevast keskkonnast kasutatakse erinevaid kattesüsteeme. Rio Tinto Iron Ore kaevandustes rakendatav *Store and release cover* (SRC) süsteem on välja töötatud poolkõrbe bioomiga aladele, et vähendada ohtlikest materjalidest leostumist. Taolistes piirkondades ületab aurustumine sademeid, kuid esineb perioode, kus lühiajaline sademete hulk on väga suur. Aheraine SRC süsteem töötab nii, et sademed imuvad poorsesse kattesüsteemi, talletuvad selles ning järgneva aurustumisega kuivab katend ära. Sademete imbumisega kattesüsteemi ja selle talletamisega, hoitakse ära vee voolamisel tekkiv erosioon ning leostumise oht. Katendi paksus oleneb kohalikest eripäradest, sademete hulgast ja kattesüsteemi osakeste suurusel. Vee tasakaalu võrrand mille põhjal töötatakse kattesüsteeme välja (Schneider, Baumgartl, Doley, & Mulligan, 2010):

$$L = P - Q - \Delta S - (EV + T); (3)$$

L – vee imbumine läbi kattesüsteemi;

P – sademete hulk;

Q – sademete maha voolamine mööda kattesüsteemi;

ΔS – kattesüsteemi niiskuse sisalduse muutus;

EV – sademete aurustumine;

T – transpiratsioon ehk taimaurumine.

Kattesüsteemide ehitamisel on väga hea, kui saadakse kasutada kaevandamisest järele jäänud inertset aherainet. See vähendab korrastamiseks kuluvat raha ja aega. SRC rajamine on siiski keerulisem, kui tavaline ohtlike jäätmete matmine. Kattematerjalid peavad olema kvaliteetsed ja kindlate omadustega. Liiga suurte aheraineosakeste korral on filtratsioon liiga suur ja vesi jõuab ohtlike jäätmeteni (O'Kane & Ayres, 2012).

SRC süsteemide miinuseks on keerukus ja seetõttu suured rajamiskulud. Ka ei ole antud katendisüsteem Eesti tingimustes otseselt kasutatav arvestades siinset kohalikku sademete ja aurustumise tasakaalu ning talviseid külmumis-sulamis tsükleid.

3.4. Savid inertse materjalina jäätmete ladustamisel

Savid ja kõrge savi sisaldusega setted on ühed kõige sagedamini kasutatavad inertsed materjalid ohtlike jäätmete ja kaevandusjäätmete ladustamisel. Savidele on iseloomulik suur vee sidumise ning

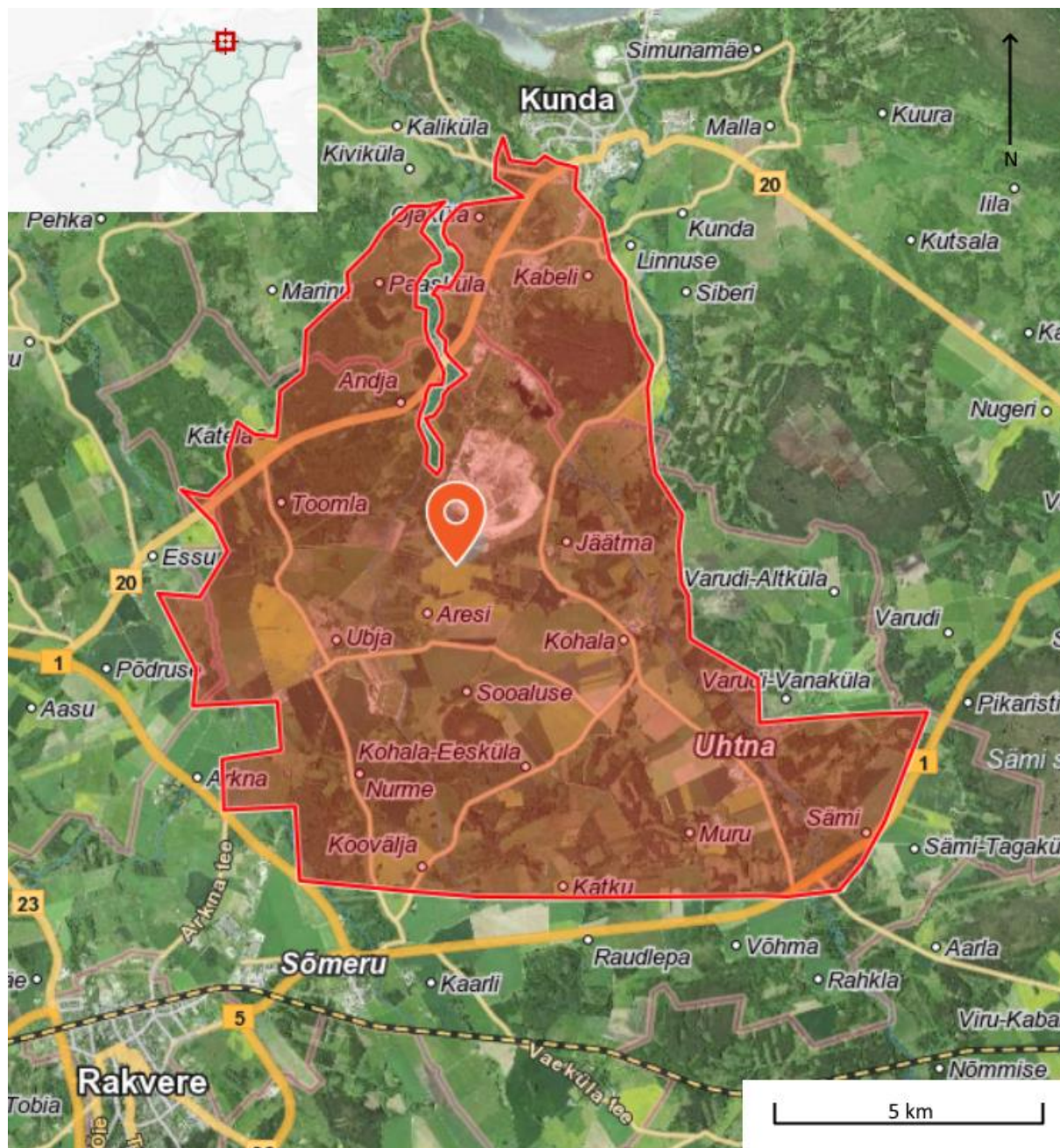
sorptsioonivõime, suletud poorsus, madalad filtratsioonikiirused ja plastsus, mistõttu nad on laialdast kasutust leidnud geotehnoloogias jäätme ladustamisel tehisbarjäärade ehitamisel (Daniel, 1993).

Saviks loetakse purdmaterjal, mis koosneb üliväikeste terasuurustega osakestest. Terasuuruse järgi nimetatakse kivimit saviks, kui sellel on valdavalt enamus terastikulisest koostisest saviosakesed (<0,002 mm suurused osakesed) (Sinisalu & Kleesment, 2002). Eesti Vabariigi Maapõueseaduse määrus nr. 52 „Üldgeoloogilise uurimistöo ning maavara geoloogilise uuringu kord ja nõuded ning nõuded fosforiidi, metallitoorme, põlevkivi, aluskorra ehituskivi, järvelubja, järvemuda, meremuda, kruusa, liiva, lubjakivi, dolokivi, savi ja turba omaduste kohta maavarana arvelevõtmiseks“ defineerib savi kui maavara. Vastavalt regulatsioonile on savi valdavalt savimineraalidest koosnev setend, mille plastsusarv on vähemalt 7 (Riigi Teataja, 2021).

Savide spetsiifilised omadused ei tulene ainult nende väikesest terasuurusest. Valdava osa savifraktsiooni jäävatest osakestest moodustavad erinevad savimineraalid ja hüdrovilgud. Taoliste mineraalide kristallvõres moodustavad struktuurielemendid lõputuid tasapindu, mille omavahelised seosed on tunduvalt nõrgemad kui tasapindades (Meunier, 2005). Tänu sellele ei ole saviosakesed isomeetrilise vaid lehelaadse kujuga ning neile on iseloomulik väga suur eripind. Savimineraalide teiseks eriomaduseks on asjaolu, et erinevalt tavalistest purdteradest ei ole mitmed savimineraalid elektroneutraalsed. Nende kihipakettide tasapinnalises osas võib esineda negatiivne ja servadel positiivne laeng, mistõttu saviosakesed seovad vee molekulide ja ioonide kristallide kihtidevahelisse ruumi ja saviosakeste pinnale. Savimineraalide spetsiifiline roll setendi geotehniliste omaduste kujunemisel on olulisel määral seotud elektrilise kaksikkihi esinemisega savimineraalide pinnal ja saviosakeste elektorstaatiliste vastasmõjudega (Meunier, 2005). Uuringute kohaselt domineerivad savimineraalid setendite geotehniliste omaduste määramisel ka juhul kui nende kogusisaldus kivimis on suhteliselt madal (Meunier, 2005).

4. Toolse fosforiidimaardla geoloogia ja Varangu kihistu savid

Toolse fosforiidimaardlat loetakse varasemate uuringute põhjal üheks kõige perspektiivikamaks fosforiidi kaevandamise alaks (Puura V. , 1987). Toolse fosforiidimaardlas on Maa-ameti koondbilansiga hetke seisuga arvele võetud 643899,0 tuh m³ fosforiiti s.h 386574,0 tuh m³ passiivset tarbevaru ja 257325,0 tuh m³ passiivset reservaru. Maardla kogupindala on 10109,52 ha ning see asub Lääne-Viru maakonnas, Viru-Nigula, Rakvere ja Haljala valla territooriumitel (Joonis 12).



Joonis 12. Toolse fosforiidimaardla ruumikuju. Maa-ameti Geoportaal 2021.

Fosforiiti sisaldavatel Kallavere kihistu liivakividel lasub piirkonnas graptoliitargilliit (Türisalu kihistu). Vahetult graptoliitargilliidil lasuvad Põhja- ja Lääne-Eesti alamordoviitsiumi läbilõigetel levivad

Varangu kihistu aleuriitsed savid. Varangu kihistu paksused kogu Eesti levila piires on väga ebaühtlased, kuid suurima paksusega ala jääb Toolse fosforiidimaardla piirkonda (keskmiselt 3 m) (Heinsalu & Viira, 1997). Toolse fosforiidimaardla piirkonnas olev graptoliitargilliidi paksus on 1,8-3,5 m (keskmiselt 2,4 m) (Kivimägi & Teedumäe, 1970). Fosforiidi avakaevandamisel Toolse maardlas tuleb selle katendist eemaldada nii graptoliitargilliit, Varangu kihistu savid, kui ka viimastel lasuvad glaukoniitliivakivid ning lubjakivid. 1970. aastate alguses tehtud geoloogiliste uuringute põhjal määrati Toolse fosforiidimaardla piires Varangu kihistu savide mahuks ca 242,4 miljonit tonni ja graptoliitargilliidi mahuks ca 141,4 miljonit tonni (Kivimägi & Loog, 1972).

Toolse fosforiidimaardla piiresse jääv graptoliitargilliidi lasund on suhteliselt kõrge sulfiidide sisaldusega (S 6,0%) (Kivimägi & Teedumäe, 1970), sisaldades ühtlasi arvukalt püriidistunud aleuroliidi ja liiva vahekihte, karbonaatseid konkretsioone ja biogeense ränidioksiidi läätsi (Kivimägi & Loog, 1972). Varasemad uuringu näitavad, et sealne graptoliitargilliit on keemiliselt märgatavalt reaktiivsem, kergemini leostuv ja kõrgema isesüttimisriskiga kui seda on Maardu fosforiidimaardla graptoliitargilliit (Pihlak, 1986; Pihlak, Maremäe, & Jalakas, 1985).

4.1. Varangu kihistu

Järgnevas geoloogilise kirjelduse juures on kasutatud andmeid 1970. a tehtud uuringust „*Tehnoloogiline iseloomustus ja geoloogilis-majanduslik hinnang Toolse maardla kattekivimites*“ (Kivimägi & Teedumäe, 1970) ning 1972. a valminud uuringust „*Aruanne Toolse fosforiidimaardla detailuuringust 1969.–1971. a*“ (Raudsep & Sinisalu, 1972).

Varangu kihistu moodustavad valdavalt aleuriitsetest ja saviosakestest koosnevad setendid. Toolse fosforiidimaardlas asuvad Varangu kihistu võib litoloogiliselt jagada kolmeks osaks (ülemine, keskmine ja alumine):

Varangu kihistu ülemine osa koosneb halli värvi, roheka tooniga, aleuroliidist ja aleuroliidirikast savist. Mitmel pool ülemistes kihtides leidub ebaregulaarse sagedusega glaukoniitliiva terasid. Lisaks glaukoniitliiva teradele leidub ka väikeseid taskuid moodustanud püriiti. Varangu kihistu ülemise osa paksus on 0,4 kuni 1,3 m.

Varangu kihistu keskmine osa on 0,4–1,0 m paks ja erineb kihistu ülemisest osast oma ülekaaluka aleuriidiosakeste sisalduse poolest. Keskmine osa sisaldab mitmeid ebaregulaarselt vahelduvaid savikaid aleuroliidikihte ja aleuriidirikkaid savikihte. Mida rohkem esineb aleuroliidikihte, seda suurem on ka glaukoniidi ja püriidi sisaldus kivimis. Lisaks sisaldab Varangu kihistu keskmine osa ka õhukesi (1–2 cm) orgaanikat sisaldava kilda vahekihte. Varangu kihistu sees olev orgaanikat sisaldava kilt erineb Türisalu kihistu graptoliitargilliidist heledama pruuni värvuse poolest.

Varangu kihistu alumist osa iseloomustab suurem orgaanikat sisaldavate kiltade osakaal ja sellest tulenevalt ka pruunikam kivimi värvus võrreldes ülejäänud kihistuga. Orgaanikat sisaldavate kiltade vahekihtide orgaanilise aine sisaldus on 1,1–2,7% ning ülejäänud kivimis leidub orgaanilist materjali minimaalsetes kogustes (0,2–0,6%). Glaukoniit ja püriit moodustavad eraldiseisvaid taskuid ja

vahekihte. Varangu kihistu alumine osa on 0,7–1,2 m paksune ning on glaukoniidi, püriidi ja orgaanikat sisaldava kilda vaheldumise tõttu välimuselt kihiline.

4.1.1. Granulomeetriline koostis

Raudsep ja Sinisalu (Raudsep & Sinisalu, 1972) kohaselt ilmneb põhiline erinevus Varangu kihistu setendite granulomeetrilises koostises väiksemate kui 0,01 mm osakeste sisalduses. Ülemine ja alumine Varangu kihistu osa sisaldab suuremal määral <0,01 mm osakesi, vastavalt 75,6% ja 67,1%, kui keskmine osa 45,0%. Suuremate kui 0,1 mm osakeste sisaldus Varangu kihistu läbilõikes ei ole marginaalne vaid kihistu keskmises osas, ulatudes selles kuni 5%.

	Varangu kihistu keskmine granulomeetriline koostis (%)		
	1–0,1 mm	0,1–0,01 mm	<0,01 mm
Ülemine osa	0,9	23,5	75,6
Keskmine osa	4,9	50,1	45,0
Alumine osa	2,0	30,9	67,1

Tabel 1. Varangu kihistu granulomeetriline koostis (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

1970. a uuringu (Kivimägi & Teedumäe, 1970) detailsemad katsed näitasid Toolse maardla Varangu kihistu alla 0,005 mm osakeste keskmiseks sisalduseks 41,17%. Fraktsiooni vahemikus 0,1–0,005 mm oli keskmiselt 56,71%. 1,0–0,1 mm fraktsiooni oli 2,67%. Üle 1 mm suurusega osakesi proovides ei leidunud (Tabel 1). Lähtudes purdsetete klassifikatsioonitabelist (Sinisalu & Kleesment, 2002), on granulomeetrilise koostise järgi tegemist savialeuriidiga.

4.1.2. Mineraalne ja keemiline koostis

Varangu kihistu setendite jämedam materjal 0,1–0,05 mm koosneb enamasti kvartsist ja glaukoniidist. Antud fraktsiooni mahust moodustavad nad ca 70–90%. Lisaks leidub suhteliselt palju ca 5–20% kaaliumpäevakivi ja 1–7% ulatuses apatiiti, mis tuleneb brahhiopoodide kodade tükkidest. Varangu kihistu setendid sisaldavad vähesel määral ka muskoviiti, biotiiti ja kloriiti (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

Kvartsi ja glaukoniidi sisaldused kihistu läbilõigetel on negatiivses korrelatsioonis – kvartsi sisaldus tõuseb läbilõikes ülevalt alla suunas aga glaukoniidi sisaldus tõuseb altpoolt ülesse. Kaaliumpäevakivi on kõige vähem Varangu kihistu keskmises osas ning selle sisaldus tõuseb nii kihistu ülemises kui ka alumises osas (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

Varangu kihistu savifraktsiooni (<0,005 mm) röntgendifraktsioonanalüüs kohaselt koosneb savifraktsioon enamasti 90–100%, illiidist ja väiksemal määral kloriidist (5–10%). Savifraktsioonis leidis lisaks vähestes kogustes kvartsi ja päevakive (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	S	SO ₃
1970. a maardla keskmine (%)	65,29	13,35	2,73	1,33	1,25	1,26	7,38	0,09	0,77	0,62	0,30

Tabel 2. 1970. a tehtud Toolse maardla Varangu kihistu keemiline koostis (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

1970. a tehtud geokeemiliste analüüside kesendatud tulemused on toodud tabelis 2 (Kivimägi & Teedumäe, 1970). Märkimisväärne on Varangu kihistu K₂O sisaldus, mis Toolse maardla lõikes on keskmiselt 7,38%, kohati kuni 9,5%. See ületab isegi Varangu kihistu peal asuva Leetse kihistu glaukoniitliivakivi K₂O keskmist sisaldust (5–8%) (Liira, et al., 2018). 1970. a uuringuga leiti ka, et Toolse maardlast pärit Varangu kihistu setendeid ei ole võimalik tulenevalt kõrgeastmeliste komponentide sisaldusest kasutada tsemenditootmise toormena.

Varangu kihistu SiO₂ sisaldused on suhteliselt ühtlased nii horisontaalses kui ka vertikaalses läbilõikes. Al₂O₃ sisaldus kõigub Varangu kihistus suurel määral ning oleneb suuresti savi ja aleuroliidi osakeste sisaldusest kivimis. Suur raua sisaldus on Varangu kihistu savide puhul iseloomulik kõrgendatud glaukoniidisisaldusega intervallidele (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

Pool-kvantitatiivse spektraalanalüüsiga tuvastati uuringutega veel 18 jälgelemendi sisaldused. Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Sn, Zn, Ga, Mo, Sr ja Br leiti sealhulgas peaaegu kõikidest proovidest (esinemissagedusega 95–100%) (Kivimägi & Teedumäe, 1970).

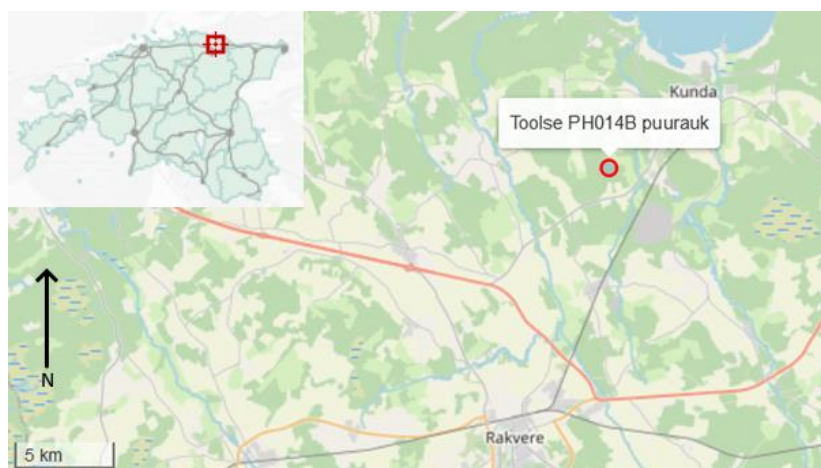
4.1.3. Plastsus

1970. a katsetati Varangu kihistu savi plastsust Läti SVL asuvas laboratooriumis GOST 9169-59 standardi järgi. Savi plastsuse tulemuseks saadi 15,4% kuni 17,2%, mis GOST 9169-59 järgi klassifitseerus keskmiselt plastseks saviks.

5. Materjalid ja analüüsimeetodid

Enne Toolse fosforiidimaardla Varangu kihistu savi puursüdamike katsetamist tuli teha teise materjaliga proovitestimine, sest puursüdamikest saadud Varangu kihistu materjali kogused olid piiratud. Kuna varasemad kogemused Atterbergi piiride leidmisel puuduvad, oli see hea viis harjutada katsete tegemist ISO/TS 17892-12:2004 standardi järgi. Proovitestimise jaoks kogusin ja proovisin Varangu kihistu savi Pakri poolsaare Leetse klindiasangu paljandis.

Toolse fosforiidimaardla Varangu kihistu savide proovimiseks kasutasin Eesti Geoloogiateenistuse tellimusel OÜ Inseneribüroo STEIGERi poolt 2020. aastal proovitud puuraugu Toolse PH014B (Joonis 13, Lisa 1) materjale (e-Maapõu, 2020). Toolse PH014B puursüdamik on antud üle TalTech Geoloogia instituudile teadusuuringute jaoks. Puuraugu geograafilised koordinaadid: laiuskraad 59,468374 ja pikkuskraad 26,444394. Puuraugu suudme kõrgus on abs kõrgusel 51,3 m ning puuraugu maksimaalne sügavus maapinnast on 30,4 m. Toolse PH014B puursüdamiku diameeter on 83 mm.



Joonis 13. Puuraugu PH014B asukoht. Maa-ameti Geoportaal 2021.

Uurimistööks kasutatud Varangu kihistu jäi antud puuraugus sügavuste vahemikku 17,2–19,67 m. Varangu kihistu läbilõige antud puursüdamikus vastas varasematele kirjeldustele. Selle alumise poole moodustavad kihilise pruunikate graptoliitargilliidi ja savi vahekihtidega osa. Keskmine osa sisaldab palju glaukoniiti ja seega eristub oma roheka tooniga ülejäänud kihistust. Varangu kihistu ülemine osa koosneb enamuses halli värvi, kohati roheka tooniga savist. Kõige ülemine Varangu kihistu osa sisaldab rohekaid glaukoniitliiva terasid.

Puursüdamiku proovimisel proovisin Varangu kihistut selle alumisest piirist Türisalu kihistuga kuni ülemise piirini Leetse kihistuga. Esmalt proovisin veerand südamikku 20–30 cm intervallide kaupa eesmärgiga analüüsida keemilise ja mineraalse koostise muutlikkust Varangu kihistu läbilõikes. Sügavuste vahemikes 18,12–18,20 m ning 18,32–18,52 m võtsin geotehniliste uuringute tarvis prooviks terve puursüdamiku. Teiseks proovisin täiendavalt veerand puursüdamikku kogu kihistu ulatuses plastsus- ja voolavuspiiride ning teiste geotehniliste analüüsides läbiviimiseks. Uuritud proovide nimekiri ja proovimissügavuste intervallid on antud lisa 2.

Kuna puursüdamikud ei olnud puurimise järgselt õhukindlalt pakitud, siis saadud proovid ei olnud enam loodusliku niiskuse juures, ning seda tuli arvestada ka järgnevate katsete läbiviimisel. Proovide andmed on lisatud e-maapõue andmebaasi.

Koostise uuringuteks võetud proovid purustasin ja peenestasin laboris analüüside tarbeks.

Atterbergi piiride määramise testid tegin TalTech Geoloogia Instituudi laboris, samuti tehti Geoloogia Instituudis proovide keemilise ja mineraalset koostise uuringud röntgenfluorestsents (XRF) ja kogukivimi röntgenstruktuuranalüüsi (XRD) meetodiga. Eesti Keskkonnauuringute keskuse laboris tehti täiendavad uuringud savide granulomeetrilise koostise, geotehniliste ja veeliste omaduste määramiseks.

5.1. Atterbergi piirid

ISO/TS 17892-12:2004 standardi järgi mõõdetud Atterbergi piirid aitavad leida savipinnase voolavus- ja plastsuspiire.

Pinnase voolavuspiir (w_L) on veesisaldus, mille juures pinnas muutub vedelast plastsesse olekusse (Tabel 3). ISO/TS 17892-12:2004 standardi kohaselt mõõdetakse voolavuspiiri koonuse kukkumise meetodil (Joonis 14 ja 15). Kasutada võib nii 60 g kaaluvat 60° koonust kui ka 80 g kaaluvat 30° koonust. Mõlemad koonused näitavad sarnast voolavuspiiri (European Committee for Standardization, 2004).

Pinnas	Voolavuspiir w_L , (%)
Väheplastne	< 35
Keskplastne	35–50
Väga plastne	50–70
Üliplastne	> 70

Tabel 3. Pinnase kategooriad voolavuspiiri järgi (Jaaniso, 2011).

Pinnase plastsuspiir (w_p) on kõige madalam pinnase veesisaldus, kus pinnas on veel voolitav 3 mm diameetriga toruks, ehk veesisaldus hetkel kui pinnas muutub liiga kuivaks, et olla plastne. Mitmete testide tulemusena on teada, et plastsuspiir võib olla samade pinnaste proovidel erinev, erinevus oleneb katsetaja kompetentsusest.

Plastsusarv (I_p) on voolavuspiiri ja plastsuspiiri vahe, kasutatakse pinnase „savikuse“ mõõtmiseks ja selle klassifitseerimiseks.

$$I_p = w_L - w_p \quad (4)$$

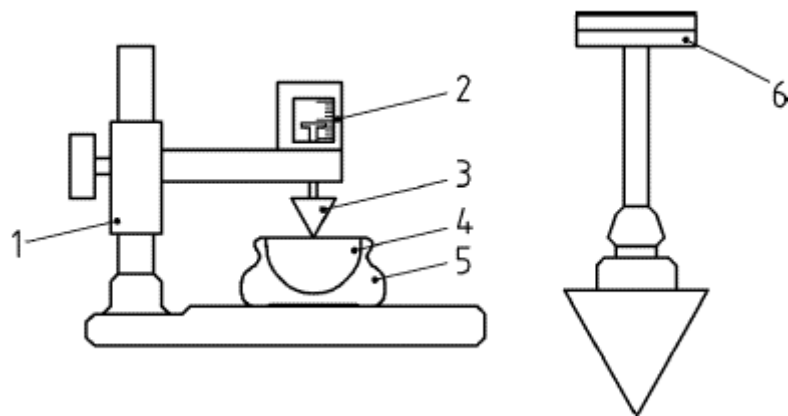
Mida suurem on I_p , seda rohkem on pinnasel savile iseloomulikke omadusi (European Committee for Standardization, 2004).

Voolavusarv (I_L) on veesisalduse ja plastsuspiiri suhe plastsusarvuga, kasutatakse pinnase oleku, konsistentsi määramiseks. Kui $I_L < 0$, on tegemist kõva pinnasega, $I_L > 1$ puhul on pinnas voolav. I_L vahemikus 0 – 1 on tegemist plastse pinnasega (Tabel 4) (Jaaniso, 2011).

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (5)$$

Pinnas	Voolavusarv (I_L)
Kõva	< 0
Poolkõva	0 – 0,25
Sitke	0,25 – 0,50
Poolpehme	0,50 – 0,75
Pehme	0,75 – 1,00
Voolav	> 1,00

Tabel 4. Pinnase jaotus voolavusarvu (I_L) järgi (Jaaniso, 2011).



Joonis 14. Rootsi koonuse aparaat voolavuspiiri leidmiseks. 1. Reguleeritava kõrgusega alus; 2. Lugemiga ekraan; 3. Koonus; 4. Saviproov; 5. Proovi hoidmise anum; 6. Koonuse kinnitamise metallvarras (European Committee for Standardization, 2004).



Joonis 15. Voolavuspiiri leidmiseks kasutatud penetromeeter Controls model 22-T0029/E.

Voolavuspiiri leidmiseks koonuse kukkumise meetodil tuleb homogeniseeritud savi viia sellisele veesisaldusele, et esimene koonuse kukkumine savi pinda oleks umbes 7 mm (Tabel 5). Savi veesisalduse tõstmiseks tohib kasutada ainult destilleeritud vett.

Koonuse penetratsiooni nõuded	
Esialgne penetratsioon	ca 7 mm
Penetratsiooni piirid	7–15 mm
Maksimaalne penetratsiooni erinevus kahe järjestikuse katse vahel	0,4 mm
Voolavuspiiri (w_L) määramise sügavus	10 mm

Tabel 5. Koonuse penetratsiooni nõuded voolavuspiiri määramisel (European Committee for Standardization, 2004).

Segatud savist võtta väiksem proov, mis tuleb panna silindrikujulisse anumasse. Savi peab anumast tihendama, et ei tekiks õhumullid, mis muudaksid penetratsiooni tulemust. Saviga anum pannakse koonuse alla ja koonus lastakse õrnalt vastu savi pinda. Koonus lukustatakse oma positsioonile ja nullitakse penetratsiooni lugem. Seejärel lastakse koonus lahti ning stopperiga kontrollpaneel laseb koonusel kukkuda 5 s savi sisse. Kui tekib olukord, et koonus vajub veel savi sisse peale 5 sekundi möödumist, tuleb see üles märkida katseprotokollis.

Katsetulemus tuleb lugeda katsevahendil olevast digitaalsest lugerist 0,1 mm täpsusega. Katsetulemuseks on koonuse alg- ja koonuse lõpp-positsiooni vahe. Koonus tõstetakse savist välja ja seejärel puhastatakse koonuse pind. Saviga anumasse lisatakse uuesti savi, kuni savi pind on anuma piiriga paralleelne. Katse ja kõik eelnevad tegevused korratakse, kuni kahe järjestikuse penetratsiooni väärtus ei ole rohkem kui 0,4 mm. Kui saavutatakse kaks edukat katset, arvutatakse välja nende kahe katse penetratsiooni aritmeetiline keskmine. Katsetatud savist võetakse ca 10–20 g proov, millel tuleb määrata veesisaldus. Eelnevaid tegevusi tuleb korrata veel vähemalt kolm korda ning iga eduka katsetuse järel tuleb tõsta savi veesisaldust. Veesisaldust tuleb tõsta täpselt nii palju, et koonuse penetratsioon jääks ettenähtud piiridesse, 7–15 mm.

Lõpp-tulemusel peab tekkima vähemalt neljast enam-vähem võrdselt jaotatud andmepunktist graafik. Graafiku x-telg on logaritmilise skaalaga koonuse penetratsiooni sügavus millimeetrites ja graafiku y-telg on katsetatud savi veesisaldus protsentides. Graafikul olevatele andmepunktidele lisatakse trendijoon ning veesisaldus, mis vastab 10 mm koonuse penetratsioonile on voolavuspiir.

Savi plastsuspiiri leidmiseks tuleb võtta 20 g suurune katsetükk üldproovist ja panna see plaadi, peegli või mõne väga tasase aluse peale. Savi veesisaldus peab samal ajal olema piisavalt suur, et savist oleks võimalik voolida pall. Seda palli tuleb seejärel voolida oma pihkude vahel, kuni palli pinna peale tekivad praod. Käte soojus kuivatab voolitavat palli. Seejärel tuleb teha voolitud pall pooleks, et mõlemad katsetükid kaaluksid ca 10 g. Mõlemad katsetükid tuleb seejärel teha neljaks alamprooviks, millele tehakse eraldi katseid.

Alamproov voolitakse sõrmede vahel ca 6 mm diameetriga tükiks ja asetatakse voolimisalusele. Voolimisalusel tuleb pihuga, edasi-tagasi liigutustega, voolida katsekeha kuni sellest saab ca 3 mm diameetriga savitoru. Pihuga peab katsekehale avaldama piisavalt jõudu, et ca 3 mm diameeter saavutada 5–15 edasi-tagasi liigutusega. Katset tuleb korrata nii kaua, kuni savitoru puruneb piki- ja ristipidi, kui voolimisega saavutatakse ca 3 mm diameeter.

Katset tuleb korrata kõikide 8 alamprooviga. Iga purunenud katsetükk tuleb panna eraldi õhukindlasse anumasse ja see järel määrata katsekeha veesisaldus.

Savide plastsuspiiri leidmine on ebaharilik sellepärast, et puudub spetsiaalne katseseade. ISO/TS 17892-12:2004 standardi järgi tuleb teha plastsuse leidmise katse, kasutades ainult käsi. See aga tekitab olukorra, kus erinevad inimesed saavad erinevaid tulemusi. Katsetulemus sõltub katsetaja varasemast kogemusest plastsuspiiri katsete tegemisel või sellest kui osava tehnikaga katsetaja on.

Lõpp-tulemuseks saadakse kõikide proovide veesisaldus protsentides esimese komakohani. Kui kahe erineva 10 g palli omavaheline veesisalduse erinevus on suurem kui 0,5% siis tuleb katset korrata. Saavutades vajaliku veesisalduse täpsuse, tuleb võtta nendest aritmeetiline keskmine esimese täisarvuni (w_p).

Atterbergi piiride leidmiseks geoloogia instituudi laboris kasutasin Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits (ISO/TS 17892-12:2004) standardit. Enne katset purustasin puursüdamiku veerandi ja homogeniseerisin ühtlaseks massiks, mille veesisaldust ma järk-järgult tõstsin, et saavutada piisavalt suur esialgne penetratsioon koonuse kukkumisel. Voolauspiiri testideks kasutasin koonuspenetromeetrit Controls 22-T0029/D.

5.2. Röntgenfluorestsents ja röntgenstruktuuranalüüs

Selgitamaks proovide makrokomponentide ja mikroelementide sisaldusi tehti röntgenfluorestsents (XRF) analüüsid uuritud kogukivimi proovidest nii sulatumeetodil, kui ka pulbermeetodil ettevalmistatud preparaatidest. Sulatatud preparaadi valmistamiseks lahjendati 1 g proovi 1:10 suhtega liitium-metaboraadi ja -tetraboraadi 50/50 seguga ning sellest sulatati klaasdisk. Pulberpreparaadi valmistamiseks pressiti umbes 8 grammi jahvatatud proovi tabletiks kasutades sideainet Mowiol. Analüüsidele eelnevalt määrati proovidest kuumutuskadu 950°C juures (LOI_950°C). Preparaate analüüsiti Bruker S4 spektromeetriga kasutades Rh anoodiga röntgentoru. Sulatatud preparaati analüüsiti Rahvusvahelise Geoanalüütikute Assotsiatsiooni silikaatsete tugiproovide järgi kalibreeritud kalibreeringuga ja pulberpreparaate analüüsiti Brukeri eelkalibreeritud standardivaba MultiRes meetodiga. Analüüsi tulemused esitati põhikomponentide jaoks oksiidide massiprotsentides ning jälgelementide puhul ppm-des kuivaine kaalust.

Röntgenstruktuuranalüüsid teostati Rigaku ULTIMA IV difraktomeetriga (Cu-anoodiga röntgentoru 40kV/40mA, ribadetektor D/teX Ultra 512 kanaliga). Pulbristatud preparaatidest mõõdeti difraktogrammide nurkvahemikus 5–45 °2 θ kiirusega 2°/min. Mineraalide poolkvantitatiivse sisalduste leidmiseks analüüsiti mõõdetud difraktogramme Rietveldi meetodil TOPAS tarkvaraga.

5.3. Geotehniliste ja veeliste omaduste katsed (Eesti Keskkonnauuringute Keskuses)

Varangu kihistu veerand puursüdamikku kogu kihistu ulatuses ja 18,12–18,20 m ning 18,32–18,52 m intervalli terved puursüdamikud testiti täiendavalt Eesti Keskkonnauuringute Keskuse (EKUK) geotehnikalaboris 06.04.2021. a. Kuivanud täispuursüdamikuga tehti esmalt survetugevusteim ja seejärel segati kõik katsematerjal omavahel kokku, et saada piisav materjali hulk kõikide katsete tegemiseks.

Pinnas liigitati geotehnikas laialdaselt kasutuses oleva liigituse EVS 1997-1:2003 järgi. Laboris tehtud katsed ja määratud parameetrid:

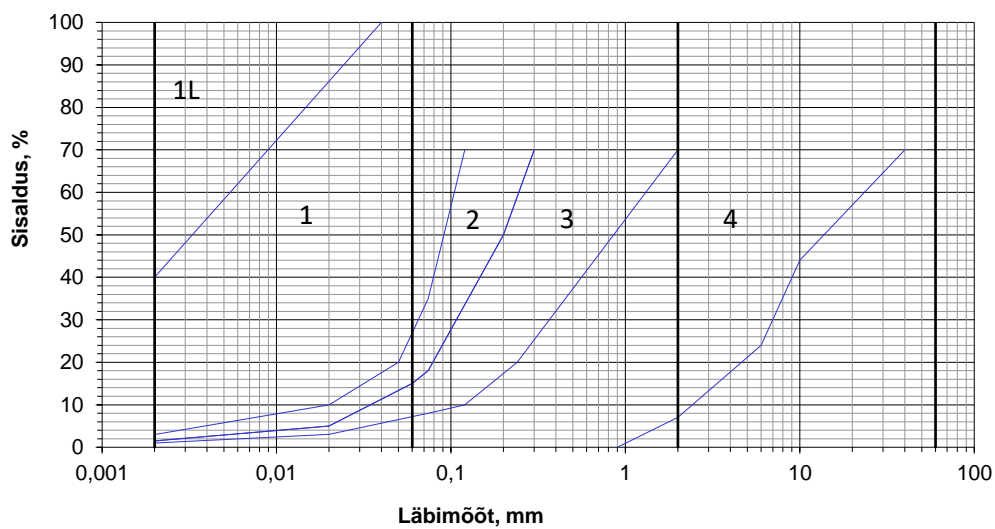
- Veesisaldus (CEN ISO/TS 17892-1);
- Mahumass (CEN ISO/TS 17892-2);
- Erimass (CEN ISO/TS 17892-3);
- Lõimimis (CEN ISO/TS 17892-4);
- Plastsuspiir (CEN ISO/TS 17892-12);
- Standard Proctorteim (DIN 18127);
- Filtratsioonimoodul (CEN ISO/TS 17892-11);
- Ühetelgne survetugevus (CEN ISO/TS 17892-7, EVS-EN 1926);
- Tasapinnaline nihketeim (CEN ISO/TS 17892-11).

Proovide ettevalmistamisel kuivatati materjal õhkuivaks ja vastavalt katse nõuetele lisati vett ning lasti seista ca 24 h enne katsete tegemist. Proovide loodusliku veesisalduse ja mahumassi kohta

puudusid andmed ning sellepärast määrati standard Proctorteimiga materjali optimaalne niiskus ja maksimaalne kuiv mahumass. Maksimaalset kuiva mahumassi läks vaja nihketeimi, filtratsiooni ja ühetelgse surve määramiseks.

Olulisemad tugevusnäitajad (ühetelgne survetugevus ja dreenimata nihketugevus) ja filtratsioon määrati optimaalse veesisalduse juures tihendatud proovidest.

Laboris määratud terastikulise koostise andmete alusel määrati ühtlasi materjali külmatundlikkus (külmakerkelised omadused) lähtudes (Slunga & Saarelainen, 1989) poolt välja töötatud klassifikatsioonist. Pinnase jaotamine külmatundlikkuse klassidesse toimub sõelkõvera graafiku alusel (Joonis 16).



Joonis 16. Külmakerke määramise alad sõelkõvera graafikul (Slunga & Saarelainen, 1989).

Külmakerke määrab ära materjali hulki, mis läbib 0,063 mm sõela. Kui katsetatava materjali sõelkõver jääb tsooni 1 ja 1L sisse on need külmakerkelised, kui tsooni 2, 3 või 4 siis on need külmakindlad kuni nende sõelkõvera alumine osa ei ületa vasakpoolset sõelkõverat (Slunga & Saarelainen, 1989).

6. Tulemused

Katsetel ja analüüsidel saadud põhitulemused on toodud tabelites 6–14 ning illustreeritud joonistel 17–24. Eesti Keskkonnauuringute Keskuse uuringuprotokollid ja tulemused on antud lisades 3–13.

6.1. Proovide keemiline ja mineraloogiline koostis

Makrokomponentide sisaldused Toolse PH014B puursüdamiku Varangu kihistu keskmisi väärtusi iseloomustavas proovis OV012-1 on toodud tabelis 6. Lisas 14 on lisaks leitavad makrokomponentide sisaldused proovitud puursüdamiku intervallide kaupa. Põhiliste makroelementide sisaldused varieerusid uuritud puuraugu profiilis sarnastes piirides, kui varasemate Toolse maardla uuringute põhjal tuvastatud muutlikkus SiO₂ 64–71%, Al₂O₃ 9–17%, K₂O 6–10%, Fe₂O₃ 7–3% ja S 0,3–1,4%. Kõrgendatud rauasisaldused ilmnevad samades intervallides keskmistest kõrgemate väävlisisaldustega ning langevad kokku mineraalkoostise analüüsil tuvastatud püriidirikaste intervallidega.

Makrokomponentide XRF analüüsi tulemused (sulatusmeetod+pulbermeetod)												
	LOI_950°C (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S
OV012-1 keskmine	3,96	64,44	0,77	13,57	6,04	0,02	1,27	0,85	0,09	8,16	0,35	0,80

Tabel 6. Röntgenfluorestsentsi (XRF) analüüsi tulemused.

Röntgenstruktuuranalüüsi tulemusel leitud poolkvantitatiivse kogukivimi mineraloogilise analüüsi tulemused on toodud lisas 15. Analüüside kohaselt domineerivad Varangu kihistu proovide mineraalkoostises kaaliumpäevakivi (13–35%) savimineraalid (18–35%) ja kvarts (18–35%). Püriidi sisaldus uuritud setendis varieerub umbes 0,5% kuni 2,5%.

6.2 Proovide granulomeetriline koostis ja pinnase üldomadused

Lõimis

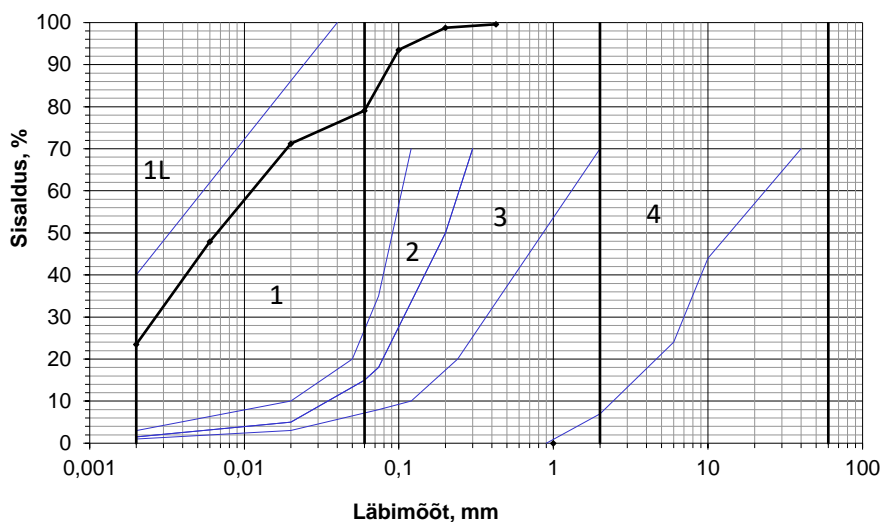
Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laboris uuritud Varangu kihistu proov sisaldas 20,9% liiva, 55,6% mölli ja 23,5% saue fraktsiooni (Tabel 7). Leitud lõimisetegur ($C_u = d_{60}/d_{10}$) on >6,0 (Tabel 8). Lõimiseteguri järgi klassifitseerub uuritud setend ebaühtlase koostisega pinnaseks (Jaaniso, 2011). ISSMFE TC 8 külmaohtlikkuse kategooriate alusel on Varangu kihistu savi külmakerke ohuga.

Fraktsiooni läbimõõt mm, fraktsiooni sisaldus%									
Liiv				Möll				Sau	C _u
Jäme	Kesk	Peen	Kokku	Jäme	Kesk	Peen	Kokku	<0.002	d ₆₀ / d ₁₀
2...0,6	0,6...0,2	0,2...0,06		0,06...0,02	0,02...0,006	0,006...0,002			
0	1,2	19,7	20,9	7,9	23,3	24,4	55,6	23,5	>6,0

Tabel 7. Granulomeetrilise analüüsi tulemused.

Lõimiskõver					
d ₁₀	d ₃₀	d ₅₀	d ₆₀	C _u	<0,06
mm	mm	mm	mm		%
<0,002	0,0026	0,0065	0,012	>6,0	79,1

Tabel 8. Lõimiskõvera parameetrid, lõimistegur ja peenosise (<0,06 mm) sisaldus.



Joonis 17. Varangu kihistu saviproovi lõimiskõver koos külmaotlikkuse tsoonidega. Külmaotlikkuse piirid ISSMFE TC 8 alusel.

Plastsus ja voolavus

Tabelis 9 on toodud minu poolt leitud ja EKUK geotehnikalaboris tehtud Atterbergi piiride testimise tulemused. Saadud näitajaid ei saa rangelt võttes kõrvutada, sest minu testide puhul on kasutatud proovi OV012-1 ning EKUKi analüüsides koondproovi (OV012-1+OV005-2021+ OV007-2021).

EKUKi laboris leitud voolavuspiiri (w_L) järgi on uuritud Varangu proovi näol tegemist väheplastse saviga (vastavalt EVS 1997-1:2003 standardile), kuigi voolavuspiir on väga lähedal ka keskplastsele savile (35–50%). Voolavusarvu (I_L) järgi on tegemist poolkõva konsistentsiga materjaliga. Plastsuspiir (w_P) on 19,4%. Minu poolt tehtud Atterbergi piiride katsed andsid plastsuspiiriks 18% ja voolavuspiiriks 25% ning leitud plastsusarvuks 7.

EKUK katsetega määratud Atterbergi piirid (%)			Minu tehtud katsetega määratud Atterbergi piirid (%)		
w_L	w_P	I_P	w_L	w_P	I_P
34,7	19,4	15,3	25	18	7

Tabel 9. Minu tehtud ja EKUK labori poolt tehtud Atterbergi piirid: voolavus (w_L), plastsus (w_P) ja plastsusarv (I_P).

Kahe katseeria võrdluses ilmneb oluline erinevus voolavuspiiride vahel. Minu poolt tehtud katsel, ei sõelutud materjali enne voolavuspiiri leidmist läbi. Atterbergi piiride leidmise meetodika kohaselt vastavalt CEN ISO/TS 17892-12 standardile tuleks seda teha ning eemaldada proovist > 0,4 mm fraktsioon mida ei tohi katsematerjalis sisalduda. Samas modifitseeritakse sõelumise tulemusena algmaterjali koostist ning saadud tulemused ei pruugi piisavalt hästi peegeldada setendi käitumist tehnogeenses katendis.

Leitud plastsupiiride 1–2% erinevus on samas ootuspärane, kui samale materjalile teevad katseid kaks erinevat inimest (Abbas, 2018).

6.3. Kuivanud proovikeha survetugevus

Kuivanud proovikeha survetugevuse katse tulemused on toodud tabelis 10. Katsetatud proovikeha (OV005-2021) oli algse struktuuriga kuid kuivanud Varangu kihistu puursüdamiku proov (Joonis 18) veesisaldusega (w) 1,3%. Survetugevus mõõdeti kuni proovikeha purunemiseni (R_f) (Joonis 19), lisaks fikseeriti proovikehal esimeste pragude tekkimisel survetugevus (R_y).

Proovi mõõtmed								Teimik	Kooramiskiirus kgf/sek
R_y	R_f	w	r_n	r_d	h	d	h/d		
MPa	MPa	%	g/cm ³	g/cm ³	cm	cm	cm		
17,1	30,7	1,3	2,11	2,08	12,5	8,30	1,51	silinder	50

Tabel 10. Survetugevusteim kuivanud silindrikujulise proovikehaga.



Joonis 18. Varangu kihistu savi kuivanud katsekeha (OV005-2021) enne survetugevusteimi.



Joonis 19. Varangu kihistu savi kuivanud katsekeha (OV005-2021) peale survetugevusteimi.

6.4. Tihendatud setendi omadused

Tihendamisaste

Standard-proctorteim on tüüpmeetod rikutud pinnaste omaduste testimiseks laboritingimustes ning võimaldab määrata olulisi pinnase tihendatavusega seotud muutujaid, sealhulgas seoseid materjali kuivtiheduse ja veesisalduse vahel. Test lubab eksperimentaalselt kindlaks teha optimaalse niiskusesisalduse, mille puhul testitav pinnas on maksimaalselt tihendatav ja saavutab oma maksimaalse kuivtiheduse. Katses määrati tihendatud proovi optimaalne niiskus (w_{opt}) ja maksimaalne kuiv mahumass ($r_{d max}$) saades vastavalt väärtusteks 14,5% ja $1,79 \text{ g/cm}^3$ (Tabel 11).

Standard Proctorteim (fraktsioon < 4 mm)			
w_{opt}	$r_{d max}$	Fraktsioon >4 mm	Tihendamisenergia A
%	g/cm^3	%	MJ/m^3
14,5	1,79	0	0,6

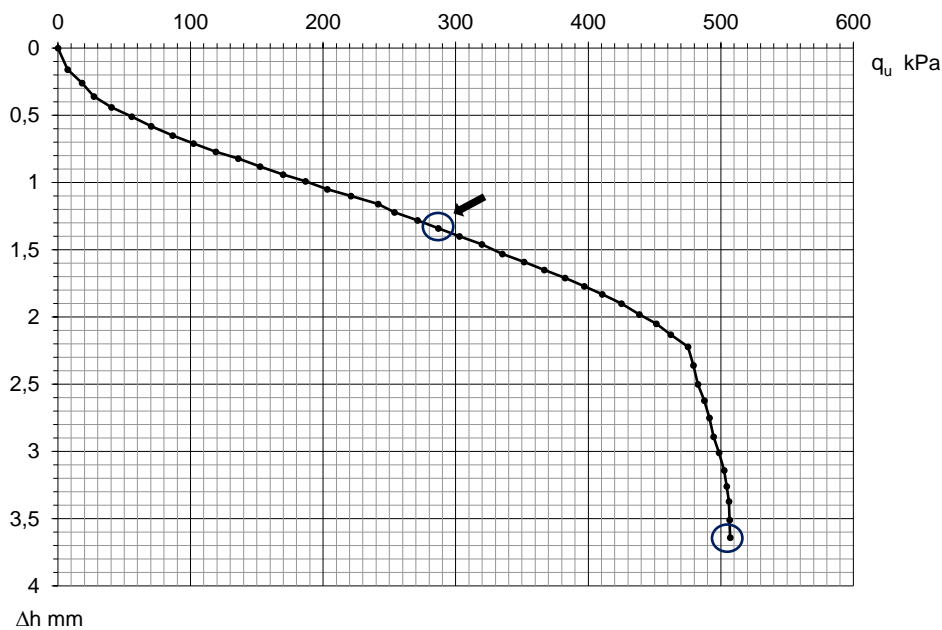
Tabel 11. Standard Proctorteim 2,5 kg raskusega.

Survetugevusteim tehti optimaalse veesisalduse juures tihendatud prooviga (Joonis 20–22, Tabel 12). Silindrikujulise katsekeha kõrgus oli 7,6 cm ja läbimõõt 10,2 cm. Esimene nähtav pragu katsekehal tekkis 287 kPa juures (survetugevuse roomamislävel q_{uy}) ning katsekeha purunes 507 kPa juures (survetugevus purunemisel q_{uf}). Vastavad dreenimata nihketugevused (C_{uf} ja C_{uy}) on võrdelised poole survetugevusega.

Survetugevusteim

									Katsekeha mõõdud		
q_{uy}	q_{uf}	C_{uy}	C_{uf}	w_1	w_2	r_n	r_d	Kiirus	h	d	h/d
kPa	kPa	kPa	kPa	%	%	g/cm ³	g/cm ³	mm/min	cm	cm	
287	507	144	253,5	14,1	13,8	1,98	1,73	0,3	7,6	10,2	0,75

Tabel 12. Ühetelgse survetugevuse katse optimaalse veesisaldusega katsekehaga.



Joonis 20. Ühetelgse survetugevuse deformatsioonigraafik. Noolega märgitud punktis tuvastati esimene nähtav pragu katsekehal.



Joonis 21. Standard Proctorteimiga tihendatud proov, enne survetugevusteimi.



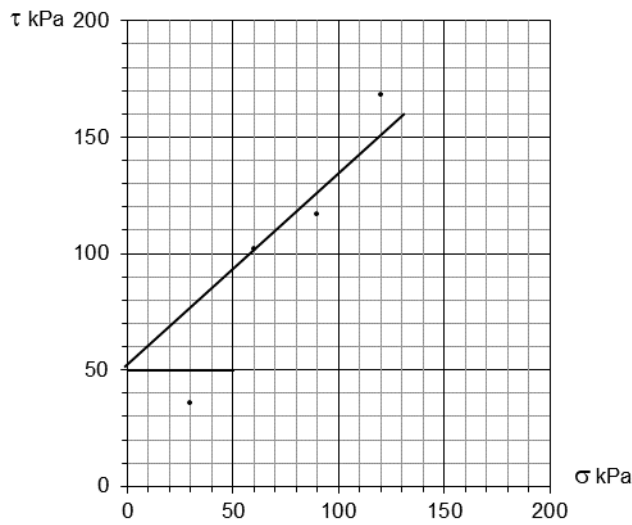
Joonis 22. Standard Proctorteimiga tihendatud proov, peale survetugevusteimi.

Tasapinnaline nihketeim

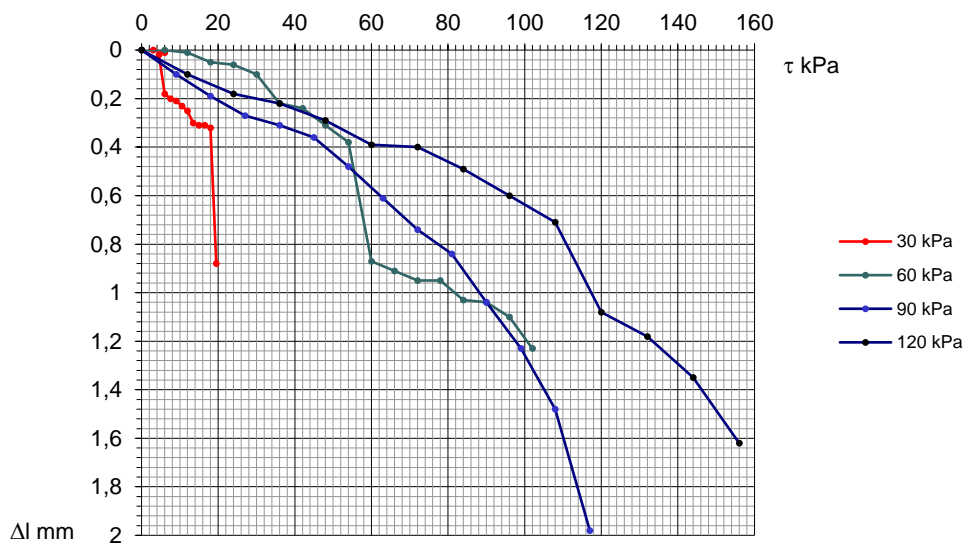
Ka tasapinnalisel nihketeimil (dreenitud teim) kasutati Proctorteimiga optimaalse veesisalduse juures tihendatud proovi (Tabel 13, Joonis 23 ja 24). Nihketeimid tehti normaalpingetel (σ) 30 kPa, 60 kPa, 90 kPa ja 120 kPa. 30 kPa juures oli katsekeha liiga rabe ning purunes. Nihkeparameetrite arvutamisel kasutati seetõttu kolme punkti. Teimi tulemusena saadi katsekeha sisehõordenurgaks (ϕ) 42°. Proovi nidususeks (C) arvestati 50 kPa.

σ	τ	w_1	w_2	r_n	r_d	ϕ	C
kPa	kPa	%	%	g/cm ³	g/cm ³	kraad	kPa
30	36	13,7	13,3	1,89	1,66	42	50
60	102	14,2	14,1	1,97	1,73		
90	117	14,1	13,7	1,92	1,68		
120	168	14,3	13,8	1,97	1,72		

Tabel 13. Varangu kihistu savi nihketeim optimaalse veesisalduse juures.



Joonis 23. Nihketeimi graafik.



Joonis 24. Nihketeimi katsekeha deformatsioonigraafik.

Filtratsioon

Uuritud materjali filtratsioonimooduli leidmiseks kasutati optimaalse veesisalduse juures tihendatud proovi, mis oli survekambris kolm ööpäeva. Katsete tulemusel leitud savi filtratsioonimoodul (k) on $0,77 \times 10^{-9}$ m/s (Tabel 14).

Survekamber											
W ₁	W ₂	ρ _n	ρ _d	ρ _s	n	e _n	S _r	k	Gradient I	Teimik	
										10° C	d
%	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%			m/sek x10 ⁻⁹		cm	cm
14,8	22,0	1,98	1,72	2,73	37,0	0,59	0,69	0,77	65,4	5,0	3,0

Tabel 14. Survekambris tehtud filtratsioonimooduli tulemused.

7. Arutelu

Vastavalt uuringus püstitatud eesmärkidele oli läbiviidud analüüside ja testide eesmärk selgitada, kas Varangu kihistu savid sobiksid oma omadustelt kasutamiseks graptoliitargilliidi utiliseerimisel, sealhulgas efektiivsete ja ajas püsivate savibarjääride ehitamisel. Eelnevalt kirjeldatud mustade kiltade utiliseerimisskeemide kirjeldustest nähtub, et tihendatud savide ja teisi plastseid pinnaseid võidaks sõltuvalt aheraine utiliseerimisskeemist, kasutada nii aheraine kuhjete aluste, siseste kui ka pealmiste katete rajamiseks.

Tihendatud savibarjäärid on laialt kasutusel erinevate prügiladustus ja teiste keskkonnarajatise puhul. Daniel (Daniel, 1993) toob välja tihendatud looduslikest pinnastest savibarjääride tüüpilised tunnused ja probleemid võrreldes sageli eelistatud geosünteesiliste savikatetega (savikangad):

- tihendatud savibarjääride suhteliselt suur paksus;
- rajamine toimub objektile kohapeal ja on ajakulukas;
- savibarjääri korrektne rajamine on keeruline;
- savibarjääridel puudub torkekindlus;
- nõuavad ehitamiseks rasketehnikat (pinnaserulle);
- rajamine nõuab sageli testpolügoonide rajamist konkreetsetes kohtades;
- iseloomulik suur leostumisproduktide inaktiveerimisvõime;
- suhteliselt pikaajaline reostuse leviku piiramisvõime;
- suure paksuse tõttu võtavad palju ruumi;
- rajamise kulud varieeruvad suurtes piirides;
- iseloomulik madal tõmbetugevus;
- võib kuivada ja oht kuivamisõhede tekkeks;
- parandamine on keeruline;
- on tundlikud külmumis-sulamis kahjustustele;
- efektiivsus sõltub suuresti rajamise korrektsusest;
- rajamine on ajamahukas.

Eelkirjeldatust nähtub, et efektiivsete barjääride rajamine sõltub lisaks konkreetse pinnase omadustele ka väga olulisel määral barjääri rajamise tingimustest. Samas nõuab looduslike savibarjääride ehitus konkreetsete kasutatavate pinnaste eelnevat põhjalikku karakteriseerimist (Daniel, 1993).

Käesolev Varangu kihistu setendite uuring tugineb piiratud proovimaterjalil Toolse PH014B puursüdamikust. Proovide röntgenfluorestsentsanalüüsil leitud makrokomponentide sisaldused on sarnased 1972. a tehtud Toolse maardla kattekivimite uuringuga saadud keemiliste elementide tulemustele (Kivimägi & Teedumäe, 1970). Arvestades, et varasemad uuringud ei näita Toolse maardla piires olulisi muutusi Varangu kihistu setendite keskmine keemilises koostis, saab antud uuringu tulemusi seetõttu käsitleda üldisemas piirkondlikus kontekstis. Maardla piires, sealhulgas ka uuritud läbilõikes on jälgitav sarnane keemilise koostise (Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 ja K_2O) sisalduse muutlikus kihistus vertikaalselt, mis tuleneb Varangu kihistu litoloogilisest ülesehitusest (Kivimägi & Loog, 1972).

Geoloogias laialdaselt kasutatavate purdsetete lõimise klassifikatsioonide (Sinisalu & Kleesment, 2002) järgi liigitub uuritud Varangu kihistu setend geoloogiliselt kui savikas aleuriit, kohati oma

märkimisväärse liivafraktsiooni osa tõttu ka kui liivaleuriit. Määratud geotehnoloogiliste parameetrite alusel võib Varangu kihistu setendit lugeda väheplastseks ja ebaühtlase terastikulise koostisega savipinnaseks (Jaaniso, 2011). EKUKi uuringutes rakendatud EVS 1997-1:2003 standardi põhjal vastab Varangu kihistu kesendatud proov väheplastsele savile. Et käesoleva uuringu fookuses on Varangu kihistu setendite geotehnilised omadused on töös selle materjali kirjeldamiseks läbivalt kasutatud terminit savi.

Isoleerivate katete ehitamiseks kasutatav materjal peab olema keemiliselt inertne maapinnal atmosfääritingimustes ning sademete- ja infiltreeruvate vete keskkonnas. Varangu kihistu läbilõikes esineb kohati väikeseid isoleeritud püriiditaskuid, püriidi konkretsioone ja orgaanikat sisaldava kilda vahekihte. Kui Varangu kihistu all olev Türisalu kihistu graptoliitargilliit sisaldab ligi 15–20% orgaanilist ainet ning keskmiselt 2,4–6% püriiti (Petersell, Dictyonema argillite, 1997), siis Varangu kihistu savis olevate orgaanikat sisaldava kilda vahekihtide orgaanilise aine sisaldus on 1,1–2,7% ning ülejäänud savikivimis leidub orgaanilist materjali minimaalsetes kogustes 0,2–0,6% (Kivimägi & Loog, 1972). Käesolev uuring näitab, et väävli sisaldus Varangu kihistu proovides on keskmiselt 0,7–0,8% ning püriidi sisaldus varieerub suhteliselt suurtes piirides ulatudes ligi 0,5% kuni 2,5% (Tabel 2 ja Lisa 15).

Euroopa Liidu komisjoni otsuse 2009/359/EÜ artikli 1 punkt b sätestab, et kaevandamisjäätmete inertseks püsijäätmeks klassifitseerumiseks on vaja, et jäätmete maksimaalne sulfiidse väävli sisaldus on 0,1% või jäätmete maksimaalne sulfiidse väävli sisaldus on 1% ja neutraliseerimisvõime suhtarv, mis on määratletud neutraliseerimisvõime ja hapestumisvõime suhtena ja kindlaks määratud prEN 15875 staatilise katse alusel on suurem kui 3 (Euroopa Liidu Komisjon, 2009). Antud töös katsetatud Varangu kihistu savi sisaldas sulfiidset väävli rohkem kui 0,1% ja töö raames ei tehtud leostumisriski välja selgitamiseks katseid. Sellepärast tuleb määrata Varangu kihistu savi neutraliseerimisvõime (NP) ja hapestumisvõime (AP) suhe (NP/AP), et teada saada, kas savi klassifitseerub Euroopa Liidu kaevandustööstuse jäätmete käitlemise direktiivi 2006/21/EÜ alusel (Euroopa Parlament ja Nõukogu, 2006; Lemière, Cottard, & Peantone, 2011) kui

- inertne jääde (sulfiidide sisaldus <1% ja NP/AP>3);
- mitte-inertne, mitte-ohklik jääde (sulfiidide sisaldus >1% või sulfiidide sisaldus <1% aga NP/AP<3).

Uuritud keskmistatud Varangu kihistu materjali, võib olemasoleva piiratud info põhjal siiski tinglikult lugeda piisavalt inertseks kaevandusjäätmeks, mis oma keemilistelt omadustelt sobib graptoliitargilliidi isoleerimiseks. Samas eksisteerib risk, et kui barjäärade rajamisel ei ole tagatud piisav setendi segunemine võib toimuda püriidirikka materjali valikuline kuhjumine ning tekkida sellega kaasnev leostumisrisk. Varangu kihistu savi geokeemilised omadused vajavad edasisi uuringuid sulfiidide leostumisvõime ja aheraine puistangutes kujuneda võivate keskkonnatingimuste seisukohast.

Savibarjäärade ehitamisel jäätmehoidlatesse või kaevandusjääkidele on esmaseks eesmärgiks vee ning gaaside liikumise takistamine. Kuna hetkel kvalifitseerub graptoliitargilliit ohtlikuks jäätmeks, siis peavad Eesti seadusandluse kohaselt ohtlike jäätmete utiliseerimiskohas olev pinnas ja küljed koosnema sellise paksuse ja filtratsioonimooduliga homogeenselt kihist, mis tagab pinnase, pinna- ja põhjavee kaitse. Määruse „Prügila rajamise, kasutamise ja sulgemise nõuded“ järgi peab kaitsev kiht

olema filtratsioonimooduliga $\leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ja paksus ≥ 5 m (Riigi Teataja, 2021). Lisaks on mäetööstuses laialdaselt kasutusel vettpidavatele kaitsebarjääridele nõutud ≥ 5 m paksus ja filtratsioonimoodul $\leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s (Waters & O'Keane, 2003; Daniel, 1993). Antud töö raames katsetatud Varangu kihistu savi filtratsioonimoodul optimaalse niiskuse juures oli $0,77 \times 10^{-9}$ m/s (Tabel 14). Seega näitavad laboriuuringud, et tihendatud Varangu kihistu savidega on teoreetiliselt võimalik rajada tõhus hüdroisolatsiooni barjäär. Ka mõõdetud plastsusindeksi väärtustelt, mille osas küll erinevates laborites saadud tulemused erinevad märkimisväärselt, rahuldab Varangu kihistu savi tüüpiliste savibarjääride miinimumnõudeid ($I_p \geq 7-10\%$) (Daniel, 1993).

Korrektelt tihendatud Varangu kihistu savi võiks seega sobida oma filtratsiooniomaduste ja plastsusnäitajate poolest tihendatud savibarjääride rajamiseks. Savi tihendamise eesmärk on katendist väljatud savitükkide homogeniseerimine, et ehitusel vältida barjääri sisse tekkivaid tühimikke, mis võiksid suurendada savibarjääri filtratsioonimoodulit. Kõige väiksemat filtratsioonimoodulit on pinnastes võimalik saavutada tehes tihendamist optimaalse veesisalduse juures ning kasutades pinnase sõtkumisel rasketehnikat (Daniel, 1993). Varasemad geotehnilised uuringud näitavad, et savibarjääride ehituse optimaalse niiskusesisalduse leidmine ei ole üldiselt laboratoorselt võimalik. Kindlasti tuleb teha katsepuistangud välistes tingimustes, et saada teada kuidas kõik erinevad tehnoloogilised iseärasused omavahel reageerivad (Daniel, 1993).

P. Kollu magistritöös „Väikekarjääri projekteerimine fosforiidi tehniliseks proovimiseks“ on arvatud välja, et karjääri viisilisel fosforiidikaevandamisel tekib Varangu kihistu savi mahuliselt ca 1,8 korda rohkem kui graptoliitargilliiti (Koll, 2017). Kasutades graptoliitargilliidi kihulist matmist (Joonis 10) ei ole katendist eemaldatud Varangu kihistu savi maht piisav selleks, et rajada isoleerivad kihid puistangu põhja, graptoliitargilliidi kihtide vahel ja puistangute kattekihiks. Graptoliitargilliidi puistangu põhjas ja nõlvadel oleva savi kuivamist tuleb vältida. Kindlasti ei tohi jätta savibarjääri kõige pealmiseks kihiks, vaid tuleb see katta mõne muu pinnasega. Vajadusel tuleb savipinnast niisutada nii selle rajamisperioodil, kui ka peale seda või katta pinnas niiskust hoidva kattega.

Kasutades savi graptoliitargilliidi utiliseerimisel aluses barjäärina või puistangut katva materjalina tuleb tagada nende kihtide piisav püsivus ajas. Nõlvade või põhja vael ehitusviisil väheneb nende vee- ja õhupidavus, mis on kõige tähtsamad graptoliitargilliidi utiliseerimisel. Lisaks tuleb arvestada, et potentsiaal barjääride pragunemiseks on suurim barjääride pealispinna lähedal, kus temperatuurist, niiskusest ja teistest välistest muutujatest tingitud gradiendid on kõige järsumad ning muutused kõige sagedasemad (Reddi & Inyang, 2000).

Käesolevas töös tehtud uuringu näitavad, et Varangu kihistu savi on külmakerke ohuga (Joonis 17). Taolises pinnases olev niiskus jäätub ja paisutab korduvalt pinnast, mille tulemusel savipinnas väsib ja selle struktuur muutub. Struktuuri muutudes väheneb pinnase veepidamisvõime. Iga pinnase külmumise ja sulamisega muutub savi veepidamisvõime väiksemaks. Plastsed savid on kõige rohkem mõjutatud jäätmisest (Reddi & Inyang, 2000). Seega tuleb vältida puistangute disaini, kus savi võib külmuda miinuskraadidel. Soovitav oleks savi peal veel kasutada kattekihti või isolatsioonimaterjali, et Varangu kihistu savi jääks allapoole maapinna külmumispiiri (Daniel, 1993). Külmakerke ohuga tuleks arvestada nii savi kasutamisel puistangu kattematerjalina, kui ka savi kasutamisel puistangu põhjas.

Savibarjääride püsivus puistangute nõlvade katmisel võib osutuda problemaatiliseks. Üldistest printsiipidest lähtudes on märgade savide tugevus väiksem kui kuivadel savidel ning seega on ka nõlvad ebastabiilsemad (Ghazaly, et al., 2014). Et Varangu kihistu proovide nihketeimil toimus proovi purunemine väikeste normaalpingete korral oleks nõlvade püsivuse selgitamiseks vaja teha täiendavaid uuringuid. Vältimaks korstna-efekti teket graptoliitargilliidi puistangutes tuleb nõlvade kalle nii või teisiti hoida madal (Eestis juba praktiseeritud puistangu nõlvakalle graptoliitargilliidi utiliseerimisel alla 6°) (Eesti Geoloogiateenistus, 2020). Puistangutesse tuleb rajada drenaažitorud, et paremini vett ära juhtida puistangu nõlvadelt ning savibarjääri peale lisada veel pinnasekiht, mis suudaks hoida ära liigse sademetevee ja kaitsta savibarjääri vee-erosiooni eest. Store and release kattesüsteemi tüüpi kattekihi rajamine võiks olla üks viis, mis aitab graptoliitargilliidi puistangu pinda kaitsta väliste tingimuste eest (Wilson, Williams, & Rykaart, 2003).

Kokkuvõte

Hetkel ei ole Eestis välja töötatud karjääriviisilise fosforiidikaevandamisega tekkiva graptoliitargilliidi jaoks utiliseerimistehnoloogiat. Graptoliitargilliidi ohutuks utiliseerimiseks on vaja, et selle ladustamisel ei pääseks õhuhapnik ja hapnikurikas vesi graptoliitargilliidini ning minimeerida orgaanikarikka aheraine isesüttimisohtu. Isesüttimist peab vältima, sest hilisem graptoliitargilliidi puistangute kustutamine on peaaegu võimatu, nagu on meile näidanud endise Maardu fosforiidikarjääri kogemused.

Mustade kiltade, nagu graptoliitargilliit, ohutuks ladustamiseks on kasutatud maailmas mitmeid utiliseerimisviise. Kõige paremad tulemused on saadud siis, kui potentsiaalselt isesüttiv must kilt on maetud allapoole hapnikuvaest põhjavee piiri või puistangutesse, kus puistangusisesed musta kilta kihid vahelduvad inertse materjali kihtidega. Inertse materjali kihina on laialt kasutuses tihendatud savibarjäärid.

Keskmistatud Varangu kihistu savi võib selle keemilisest koostisest lähtuvalt tinglikult lugeda inertseks materjaliks -- selle mineraalkoostises esinevad valdavalt savimineraalid, kvarts ja kaaliumpäevakivi. Probleeme tekitab kõrge sulfiidide sisaldus savis (S keskmiselt 0,8%), mis enamjaolt seostub ebaühtlaselt levinud püriidi kogumitega Varangu kihistu setendites. Et uurimistöö raames ei tehtud detailsemaid uuringuid Varangu savide ja aheraines kujuneda võivate keskkonnatingimuste vastasmõjude selgitamiseks, vajavad setendi geokeemilised omadused täiendavaid uuringuid.

Geotehniliste laborikatsete tulemuste põhjal saab järeldada, et enamike geotehniliste näitajate poolest sobib korrektselt tihendatud Varangu kihistu savi graptoliitargilliidi utiliseerimiseks mõeldud puistangute ehitamiseks. Plastsusomadustelt väheplasteks saviks liigituv Varangu kihistu kesendatud setendil, mis on tihendatud optimaalse veesisalduse juures, on vastavalt katsetele iseloomulikud madalad filtratsioonikiirused (filtratsioonimoodul $0,77 \times 10^{-9}$ m/s). Arvestada tuleb siiski, et lõimise analüüside kohaselt on Varangu kesendatud proovid ebaühtlase terastikulise koostisega savikas aleuriit ning langeb suure külmatundlikkusega pinnaste kategooriasse. Proovi purunemine nihketeimil madalate normaalpingete juures (30 kPa) näitab, et vastavast materjalist rajatud katete püsivus nõlvadel võib kujuneda probleemiks.

Puistangutes utiliseerimisel tuleb kindlasti arvestada Eesti kliimatiliste tingimustega (sademed, külmumis-sulamis tsüklid) ja sellega kuidas need mõjutavad puistangu tehisbarjääride pikaajalist kestvust. Nõlvade vee-erosiooni kaitseks ja muutliku sademete hulgast tulenevate mõjude vähendamiseks oleks üheks võimaluseks rajada *store and release-tüüpi* kattesüsteem.

Arvestades, et töös uuritud proovide kogus oli väga piiratud ei anna töö tulemused usaldusväärset ülevaadet Varangu kihistu savide geotehnilistest omadustest Toolse maardla lõikes. Kindlasti oleks vastavate omaduste testimiseks vaja teha katsepuistangud, et saada teada keskkonnaohutu ja majanduslikult otstarbekas kattesüsteem ning ühtlasi graptoliitargilliidi kriitiline maht, millal algavad isesüttimisprotsessid.

Tänuavaldused

Täna enda lõputöö juhendajat Rutt Hintsit suurepärase juhendamise ja heade nõuannete eest. Eesti Geoloogiateenistust, et nad lubasid kasutada Toolse maardlas puuritud puursüdamiku materjali teadustööks. Eesti Keskkonnauuringute Keskuse geotehnikalabori oma abivalmiduse eest katsete tegemisel ja nõustamisel.

Kirjanduse loetelu

- Abbas, H. (2018). Assessment of accuracy in determining Atterberg limits for four Iraqi local soil laboratories. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (lk 1-9). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/433/1/012030
- B3 Mining Services. (2015). *Spontaneous combustion technical report; review of spontaneous combustion management at McArthur River Mine*. Toowong: B3 Mining Services.
- Daniel, D. (1993). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Austin: Springer Science+Business Media. doi:10.1007/978-1-4615-3070-1
- Eesti Geoloogiateenistus. (2020). *Graptoliitargilliidi käitlemise juhend*. Rakvere: Eesti Geoloogiateenistus.
- e-Maapõu*. (2020). Kasutamise kuupäev: 20. 04. 2021. a., allikas Geoloogia.info: <https://geoloogia.info/drillcore/501/>
- Euroopa Liidu Komisjon. (01. 05 2009. a.). *KOMISJONI OTSUS, 30. aprill 2009, püsijäätmete mõiste täiendava määratlemise kohta kaevandustööstuse jäätmete käitlemist käsitleva Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2006/21/EÜ artikli 22 lõike 1 punkti f rakendamiseks*. Kasutamise kuupäev: 24. 05 2021. a., allikas Euroopa Liidu Teataja: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009D0359&from=EN>
- Euroopa Parlament ja Nõukogu. (11. 04. 2006. a.). *EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2006/21/EÜ, 15. märts 2006, kaevandustööstuse jäätmete käitlemise ja direktiivi 2004/35/EÜ muutmise kohta*. Kasutamise kuupäev: 24. 05. 2021. a., allikas Euroopa Liidu Teataja: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c370006a-063e-4dc7-9b05-52c37720740c.0007.02/DOC_1&format=PDF
- European Committee for Standardization. (2004). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits (ISO/TS 17892-12:2004)*.
- Ghazaly, Z., Mustaqqim, A. R., Nur, F. I., Liyana, A. S., Muhammad, A. A., & Fazdeli, A. I. (2014). *Influence of Soft Clay on Slope Stability*. Perlis: Universiti Malaysia Perlis.
- Green, R. (2009). Holistic management of sulphides at Rio Tinto Iron Ore's Pilbara mine sites. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 241-246.
- Green, R., & Borden, R. (2011). Geochemical Risk Assessment Process for Rio Tinto's Pilbara Iron Ore Mines. rmt: S. Kumar, *Integrated Waste Management - Volume I* (lk 365-390). InTech. doi:10.5772/20473
- Hade, S., & Soesoo, A. (2014). Estonian graptolite argillites revisited: a future resource? *Oil Shale*, 34(1), 4-18. doi:10.3176/oil.2014.1.02

- Heinsalu, H., & Viira, V. (1997). Varangu Stage. rmt: A. Raukas, & A. Teedumäe, *Geology and Mineral Resources of Estonia* (lk 58). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Jaaniso, V. (2011). *Pinnasemehaanika*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- Jüriado, K., Raukas, A., & Petersell, V. (2012). Alum shales causing radon risks on the example of Maardu area, North-Estonia. *Oil Shale*, 29(1), 76-84. doi:10.3176/oil.2012.1.07
- Kivimägi, E., & Loog, A. (1972). Основные типы текстур граптолитовых аргиллитов месторождения Тоолсе. *Известия Академии наук Эстонской ССР. Химия. Геология*, 21(2), 143-147.
- Kivimägi, E., & Teedumäe, A. (1970). *Технологическая характеристика и геолого-экономическая оценка вскрышных пород месторождения тоолсе*. Tallinn: геологии СМ ЭССР.
- Koll, P. (2017). *Väikekarjääri projekteerimine fosforiidi tehniliseks proovimiseks*. Tallinn: TTÜ Geoloogia Instituut.
- Landers, M., & Usher, B. (2015). Management of spontaneous combustion for metalliferous mines. *10th ICARDIMWA* (lk 1-10). Santiago: Gecamin.
- Lemière, B., Cottard, F., & Peantone, P. (2011). Mining waste characterization in the perspective of the European mining waste directive. *25th International Applied Geochemistry Symposium (IAGS)*. Rovaniemi.
- Liira, M., Puhke, M. H., Paiste, P., Paaver, P., Külaviir, M., Mänd, K., . . . Kirsimäe, K. (2018). *Eesti glaukoniitliivakivi K-termoväetise toormena I: glaukoniidi omadused ja töödeldavus*. Tartu: Tartu Ülikool Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geoloogia osakond.
- Meunier, A. (2005). *Clays*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/b138672
- O'Kane, M., & Ayres, B. (2012). Cover systems that utilise the moisture store-and-release concept - do they work and how can we improve their design and performance? *Mine closure 2012: proceedings of the seventh international conference on mine closure* (lk 1-9). Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Pahapill, L., Rulkov, A., Rajamäe, R., & Åkerblom, G. (2003). *Radon in Estonian dwellings - Results from a National Radon Survey*. Stockholm: Swedish Radiation Protection Authority.
- Petersell, V. (1997). Dictyonema argillite. rmt: A. Raukas, & A. Teedumäe (Toim-d), *Geology and Mineral Resources of Estonia* (lk 327-331). Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus.
- Petersell, V., Karimov, M., Täht-Kok, K., Shtokalenko, M., Nirgi, S., Saarvik, K., & Milvek, H. (2017). *Eesti pinnase radooniriski ja looduskiirguse atlas*. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- Pihlak, A. (1984). О склонности диктионемовых сланцев из месторождений фосфоритов Эстонской ССР к самовозгоранию. *Oil Shale*, 251-264.

- Pihlak, A. (1986). Критическая и допустимая температура самонагрева диктионемового аргиллита. *Oil Shale*, 3(3), 247-255.
- Pihlak, A. (1999). Composition and spontaneous ignition tendency of Dictyonema argillites of Northwest Estonia. *Oil Shale*, 16, 478-507.
- Pihlak, A. (2011). Eesti diktüoneemaargilliidivarudest ja nende kasutamise võimalustest. *Keskkonnatehnika*, 5, 33-37.
- Pihlak, A., Maremäe, E., & Jalakas, L. (1985). Водное выщелачивание диктионемовых сланцев и известняков из фосфоритовых месторождений Маарду и Тоолсе Эстонской ССР. *Oil Shale*, 2(2), 155-169.
- Puura, E. (1994). Geochemical zonation of Maardu mine tailings dump. *Eesti Aluspõhja Geokeemia ja Mineraloogia Küsimusi*, lk 78-86.
- Puura, E., Neretnieks, I., & Kirsimäe, K. (1999). Atmospheric oxidation of the pyritic waste rock in Maardu, Estonia. 1 field study and modelling. *Environmental Geology* (39), 1-19. doi:<https://doi.org/10.1007/s002540050432>
- Puura, V. (1987). *Геология и полезные ископаемые Раквереского фосфоритоносного района*. Tallinn: Valgus. Allikas: <https://files.geocollections.info/4f/24/4f240b3c-0e3a-48d9-b63f-b3939182f642.pdf>
- Pärn, J., Ivask, J., Tõnisson, H., Kaup, E., Urtson, K., & Heinsalu, A. (2017). *Maardu fosforiidilevila tehnogeense põhjavee kvaliteedi uuring*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut.
- Raudsep, R., & Sinisalu, R. (1972). *По детальной разведке месторождения фосфоритов Тоолсе проведенной в 1969 - 1971 гг.* Keila: Geoloogia Valitsus.
- Reddi, L. N., & Inyang, H. I. (2000). *Geoenvironmental Engineering Principles and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc. doi:10.1201/9780203913734
- Reinsalu, E. (2011). *Eesti Mäendus*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Energeetikainstituut.
- Restuccia, F., Ptak, N., & Rein, G. (2017). Self-heating behaviour and ignition of shale rock. *Combustion and Flame*, 176, 213-219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.09.025>
- Riigi Teataja. (2021). *Prügila rajamise, kasutamise ja sulgemise nõuded (01.01.2021)*. Kasutamise kuupäev: 21. 05. 2021. a., allikas Riigi Teataja.
- Riigi Teataja. (05. 03. 2021. a.). *Üldgeoloogilise uurimistöö ning maavara geoloogilise uuringu kord ja nõuded ning nõuded fosforiidi, metallitoorme, põlevkivi, aluskorra ehituskivi, järvelubja, järvemuda, meremuda, kruusa, liiva, lubjakivi, dolokivi, savi ja turba omaduste kohta maavarana*. Kasutamise kuupäev: 13. 04. 2021. a., allikas Riigi Teataja: <https://www.riigiteataja.ee/akt/102032021016>

- Schneider, A., Baumgartl, T., Doley, D., & Mulligan, D. (2010). Store and release cover systems: A suitable preventive for acid mine drainage in semi-arid monsoonal Queensland? *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World* (lk 77-80). Brisbane: The University of Queensland.
- Sinisalu, R., & Kleesment, A. (2002). Purdsetendite granulomeetrilisest klassifikatsioonist. *Bulletin of the Geological Survey of Estonia*, 20-26.
- Slunga, E., & Saarelainen, S. (1989). Determination of frost susceptibility of a soil. *12th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering* (lk 1465-1468). Rio de Janeiro: Balkema.
- Soesoo, A., & Hade, S. (2015). Geology of Estonian graptolite argillite. *Eesti strateegilised maavarad*, (lk 20-25). Rakvere.
- Valgma, I., Kolats, M., Reinsalu, E., Väizene, V., Nurme, M., Karu, V., . . . Orru, M. (2013). *Maardu fosforiidilevila tehnogeense põhjavee kvaliteedi uuring*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut.
- Waters, P., & O'Keane, M. (March 2003. a.). Mining and Storage of Reactive Shale at BHPBilliton's Mt Whaleback Mine. *6th ICARD: Sixth International Conference Acid Rock Drainage : Application and Sustainability of Technologies : Proceedings*, lk 155-161.
- Wilson, G., Williams, D., & Rykaart, E. (2003). The Integrity of Cover Systems — An Update. *6th ICARD*, (lk 1-7). Cairns.

Lisa 1. Toolse PH014B puursüdamik



Toolse PH014B puursüdamik, kast nr 7 märjalt.

Foto autor: Hints, Olle

Foto kuupäev: 12.02.2021



Toolse PH014B puursüdamik, kast nr 7 kuivalt.

Foto autor: Hints, Rutt

Foto kuupäev: 18.03.2021

Lisa 2. Katsetatud proovide intervallid

Kood	Intervall (m)	Proovi tüüp	Proovi liik	Kaal (g)	Geoloogiline iseloomustus
OV001	19,32-19,67	veerand	suur proov	713,53	kihiline pruunikas kuni helehall savirikas mudakivim
			väike proov	525,87	
OV002	19,00-19,32	veerand	suur proov	877,39	helehall mudakivim glaukoniiti sisaldavate kihtidega
			väike proov	776,67	
OV003	18,78-19,00	veerand	suur proov	578,55	glaukoniidirikas mudakivim
			väike proov	464,69	
OV004	18,52-18,78	veerand	suur proov	667,59	savikas glaukoniidirikas aleuroliit
			väike proov	545,5	
OV005	18,32-18,52	täis	filtratsioon	645,56	hall mudakivim
			survetugevus	1536,66	
OV006	18,2-18,32	veerand	suur proov	248,33	aleuriidirikas mudakivim
			väike proov	467,77	
OV007	18,12-18,20	täis	filtratsioon	881,71	glaukoniidirikas aleuroliit
OV008	17,85-18,12	veerand	suur proov	752,03	glaukoniidirikas aleuroliit
			väike proov	695,47	
OV009	17,66-17,85	veerand	suur proov	322,06	glaukoniiti sisaldav aleuroliit
			väike proov	416,34	
OV010	17,40-17,66	veerand	suur proov	534,51	helehall mudakivim
			väike proov	615,53	
OV011	17,20-17,40	veerand	suur proov	345,69	helehall mudakivim
			väike proov	344,63	
OV012	17,20-19,67	4x poolitatud		319,26	üldproov
OV012	17,20-19,67	4x poolitatud jääk		4693,88	üldproov

Lisa 3. EKUK katsete seltuskiri

Seletuskiri

Varangu savi proov toodi EKUK-i geotehnikalaborisse 6.04.2021. TalTech Geoloogia Instituudi töötaja O.Vilu poolt. Proov oli rikutud struktuuriga, osa kuivanud ja osa veega segatud märg pinnas.

Proovi ette valmistamisel materjal kuivatati õhkkuivaks ja siis vastavalt katse nõuetele lisati vett, segati, lasti proovil seista ca 24 tundi enne katset.

Kuna proovi loodusliku veesisalduse ja mahumassi kohta puudusid andmed, siis kasutati standard Proctorteimiga määratud materjali optimaalset niiskust ja sellele iseloomulikku maksimaalset kuiva mahumassi proovide ettevalmistamiseks nihketeimi, filtratsiooni ja ühetelgse surve määramiseks.

Laboris määrati proovi veesisaldus (CEN ISO/TS 17892-1), mahumass (CEN ISO/TS 17892 – 2), erimass (CEN ISO/TS 17892-3), lõimis (CEN ISO/TS 17892-4), plastsuspiirid (CEN ISO/TS 17892 -12), stand. Proctorteim (DIN 18127), filtratsioonimoodul (CEN ISO/TS 17892-11), ühetelgne survetugevus (CEN ISO/TS 17892-7, EVS-EN 1926) ja tehti tasapinnaline nihketeim (CEN ISO/TS 17892-11). Pinnas liigitati geotehnikas kasutusel oleva liigituse EVS 1997-1:2003 järgi.

Kõikide katsete kohta on EKUK-i geotehnikalabori tööjuhendid, milles on täpsemalt kirjeldatud katseid ja Eestis kasutatud määramise meetodeid.

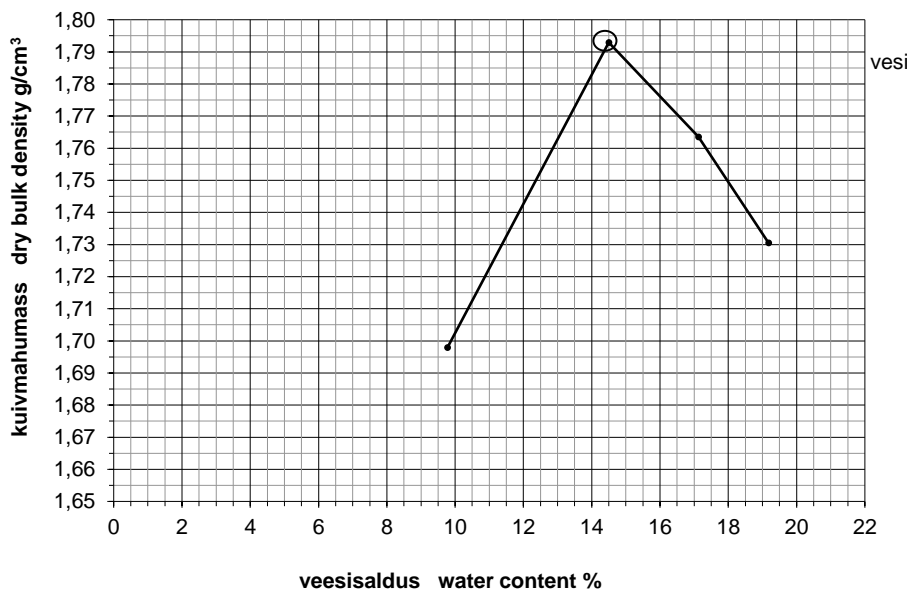
Labori tulemused on antud tabelite ja graafikute kujul. Lisatud on 6 pilti toodud materjalist ja survetugevuse katse proovidest. Need andmed kindlasti ei iseloomusta loodusliku veesisalduse ja mahumassiga Varangu savi. Pinnase geotehniliste omaduste määramisel ei ole piisav ka omaduste määramine väikese katsete arvuga.

Lisa 4. Standard Proctorteimi tulemused

**EESTI
KESKKONNAUURINGUTE
KESKUS**
ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE
GEOTEHNIKALABOR
GEOTECHNICAL LABORATORY
EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008
A testing laboratory accredited by EAK under reg. no. L008

STANDARD PROCTORTEIM - 2,5 KG RASKUS	
STAND.COMPACTION TEST - 2,5 KG RAMMER	
Objekt:	Teimiprotokoll:
Varangu savi	06X-21

Labori No. Sample No.	PA BH	Sügavus, m Depth, m	Pinnas Soil EVS 1997-1:2003	W _{opt} %		ρ _{d max} g/cm ³		Frakts.>4 mm Particles >4 mm %
7014	kuivanud peenendatud proov		väheplastne savi	14,5	14,5*	1,76	1,76*	0



Fraktsioon <4 mm
Lab. 7014

W %	ρ _d g/cm ³
9,8	1,698
14,5	1,793
17,1	1,764
19,2	1,731

Standard Proctorteim:

ELE automaatseade
haamer 2,5 kg
kukkumiskõrgus 30 cm
tihendamine 3x25 lööki

W_{opt}*, ρ_{d max}* - arvestatud on
>4 mm frakts. sisaldust

Tellijä / Customer: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu

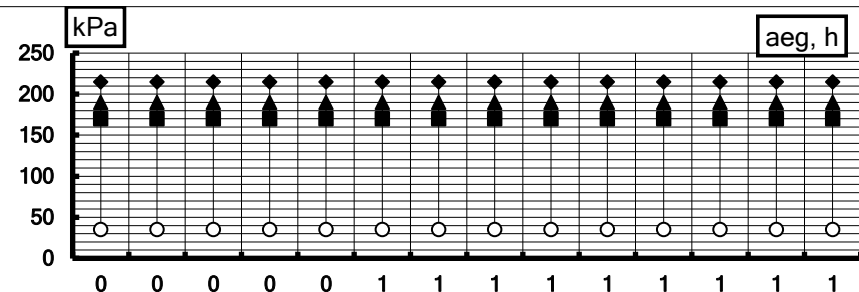
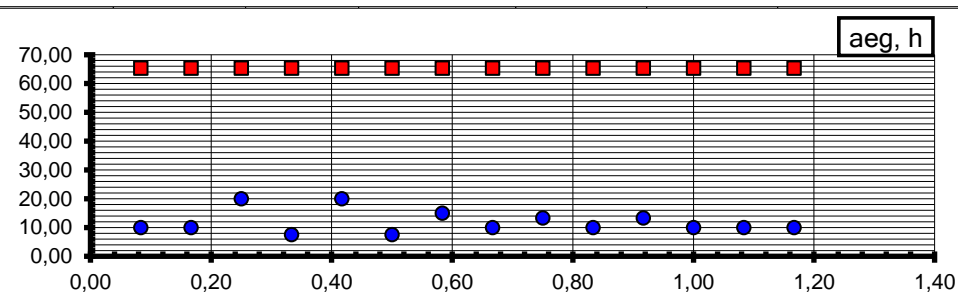
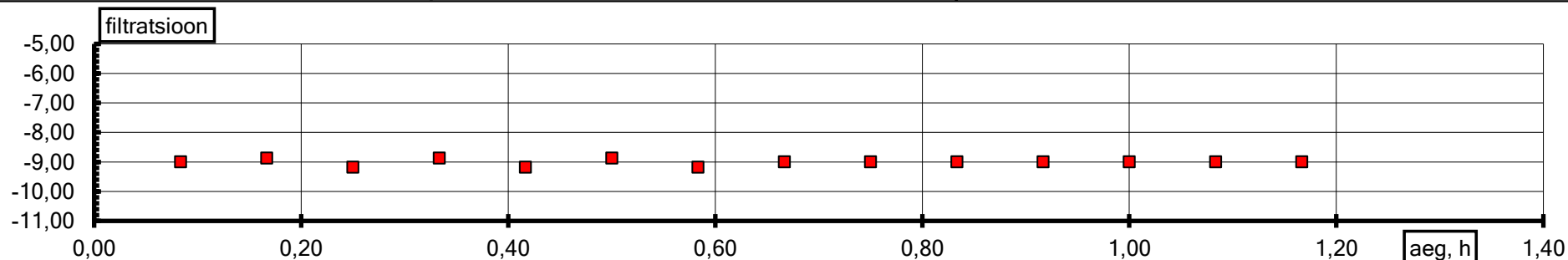
Teimimeetod / Method of test: DIN 18127

Suur-Sõjamäe 34 Tallinn Tel. 6112992 Fax 6112990	Teimis Operator	Kontrollis Checked	Kuupäev Date	Lisa tabelile 1 Add for table 1
				1 (1)

Lisa 6. Filtratsioonikatsed graafik

FILTRATSIOON				Teimiprotokoll:	06X-21	KESKKONNAUURINGUTE KESKUSE GEOTEHNICALABOR		
Proov No.	7014	Optimaalne w%	14,5	<i>k 20°C (KA)</i>		-9,00	1,007E-09	m/s
Pinnas (välimäärang)	savi	Max. kuivmahumass g/cm ³	1,79	<i>k 10°C</i>		-9,00	7,767E-10	m/s
Kuupäev	27.4.21	Tihedusaste %	96,28	<i>keskhälve</i>		#NUM!	0,000E+00	m/s
Tellijä	TTÜ Geoloogia Instituut			<i>k 4°C (ka)</i>		-9,14	7,248E-10	m/s

Pinnase omadused enne katset		Pinnase omadused peale katset			
Mass, g	116,5	Mass, g	123,8	Poorsustegur	0,58
Diameeter, mm	50,0	Diameeter, mm	50,0	Poorsus, %	36,64
Kõrgus, mm	30,0	Kõrgus, mm	30,0	Eristamisarv E	9,0
Veesisaldus, %	14,8	Veesisaldus, %	22,0	Temperatuur, °C	19,0
Mahumass g/cm ³	1,98	Mahumass g/cm ³	2,10	Mõõtkambri diameeter mm	4,0
Kuivmahumass g/cm ³	1,72	Kuivmahumass g/cm ³	1,72	Suht. mahu muutus, %	0,0
Küllastusaste %	69,52	Erimass g/cm ³	2,72	Küllastusaste muutus, %	33,74
Tihedusaste %	96,28	Küllastusaste %	103,26	Kasutatud lahus	VESI



● (mive/tuve)*10 ■ gradient

○ omõjupinge ◆ kambrisurve ▲ algurve ■ lõppsurve

Lisa 7. Lõimiskõver

EESTI KESKKONNAUURINGUTE KESKUS

ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE

GEOTEHNIKALABOR

GEOTECHNICAL LABORATORY

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008

A testing laboratory accredited by EAK under reg. no. L008

LÕIMISEKÕVER GRADING CURVE

Objekt:

Varangu savi

Teimiprotokoll:

06X - 21

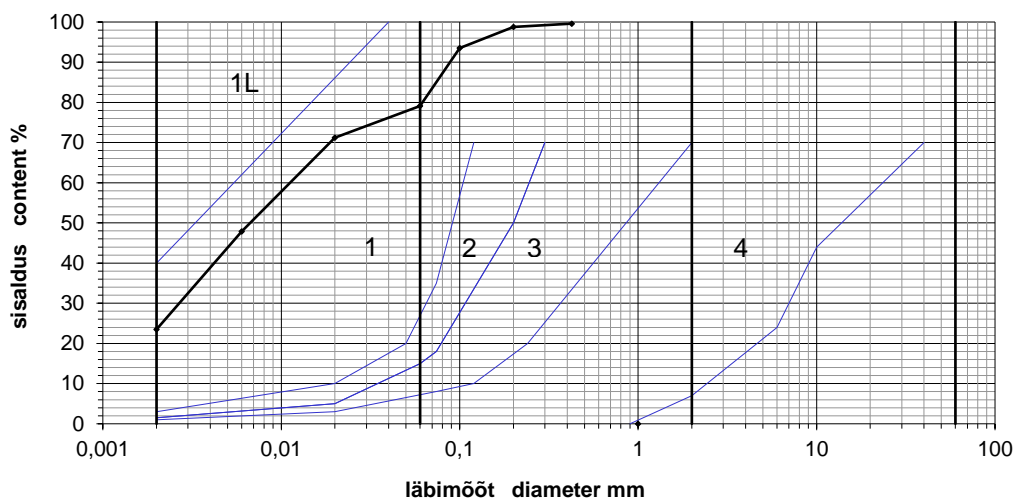
Labori nr. Sample No.	PA BH	Sügavus, m Depth, m	Pinnas EVS 1997-1:2003	Soil	d ₁₀ mm	d ₃₀ mm	d ₅₀ mm	d ₆₀ mm	C _u	<0,06 %	w _L ^S %	w _P %	I _P ^S %
7014	kuivanud, peenendatud proov		väheplastne savi		<0,002	0,0026	0,0065	0,012	>6,0	79,1	34,7	19,4	15,3

Külmaohtlikkuse piirid ISSMFE TC 8 järgi

Frost susceptibility groups according to ISSMFE TC 8

1; 2 - külmaohtlik

1L; 3; 4 - ei ole külmaohtlik



Lab. 7014

Sau
Clay

Mõll
Silt

Liiv
Sand

Kruus
Gravel

Veeris
Cobble

Tellijä / Customer: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu

Analüüsimetod / Method of analysis: CEN ISO/TS 17892- 4;12

Labor ei vastuta toodud proovide kvaliteedi eest

Laboratory isn't responsible for the samples quality

Suur-Sõjamäe 34 Tallinn	Teimis Operator	Kontrollis Checked	Kuupäev Date	Lisa tabelile 1 Add for table 1
Tel. 6112992 Fax 6112990				1 (1)

Lisa 8. Lõimise tulemused ja pinnase omadused

**EESTI
KESKKONNAUURINGUTE
KESKUS**
ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE
GEOTEHNIKALABOR
GEOTECHNICAL LABORATORY

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008
Labor ei vastuta laborisse toodud proovide kvaliteedi eest

Tabel: 1 LÕIMIS	Objekt: Varangu savi	Teimiprotokoll: 06X - 21
---------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Labori nr.	PA nr.	Proov		Kiht	Pinnas EVS 1997-1:2003	Fraktsiooni läbimõõt mm, sisaldus %														C _u d ₆₀ / d ₁₀		
		Sügavus m	Abs. kõrgus m			Kruus				Liiv				Möll			Sau	<0,06	<0,002 / <0,06			
						Veeris	Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen					
7014	algsest õhkkuiv materjal				väheplastne savi	>60	60...20	20...6	6...2	kokku	2...0,6	0,6...0,2	0,2...0,06	kokku	0,06...0,02	0,02...0,006	0,006...0,002	kokku	<0,002	<0,06	<0,002 / <0,06	>6,0

* Määratud fraktsioonist < 2 mm

Dispergaatorina on kasutatud Na-heksametafosfaadi 2 %-list lahust

PINNASE OMADUSED		Pinnas EVS 1997-1:2003	Rootsi koonus				Standard-Proctorteim (fr. < 4 mm)																
Labori nr.	PA nr.		w _L ^S	w _P	I _P ^S		w _{opt}	ρ _d max	w _{opt} [*]	ρ _d max [*]	Fraktsioon >4 mm	Tihenemisenergia Δ											
			%	%	%		%	g/cm ³	%	g/cm ³	%	MJ/m ³											
7014	algsest õhkkuiv materjal	väheplastne savi	2,73	34,7	19,4	15,3																	

Tellija: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu

Teimimeetod: CEN ISO/TS 17892-4,12; DIN 18127

Leht: 1 (1)

Lisa 9. Nihketeimi tulemused

**EESTI
KESKKONNAUURINGUTE
KESKUS**
ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE
GEOTEHNIKALABOR
GEOTECHNICAL LABORATORY

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008
Labor ei vastuta laborisse toodud proovide kvaliteedi eest

Tabel: 3 NIHKETEIM	Objekt: Varangu savi	Teimiprotokoll: 06X - 21
------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Labori nr.	PA nr.	Proov		Pinnas EVS 1997-1:2003	σ kPa																				ϕ kraad	c kPa	Teimimistingimused	
		Süga- vus m	nr.		30					60					90					120								
					w ₁ %	w ₂ %	ρ_n g/cm ³	ρ_d g/cm ³	τ_f kPa	w ₁ %	w ₂ %	ρ_n g/cm ³	ρ_d g/cm ³	τ_f kPa	w ₁ %	w ₂ %	ρ_n g/cm ³	ρ_d g/cm ³	τ_f kPa	w ₁ %	w ₂ %	ρ_n g/cm ³	ρ_d g/cm ³	τ_f kPa				
7014		opt. w juures tihendatud proov		väheplastne savi	13,7	13,3	1,89	1,66	36	14,2	14,1	1,97	1,73	102	14,1	13,7	1,92	1,68	117	14,3	13,8	1,97	1,72	168	42	50		
					Märkus:																						Aparaat TSNiIS	
					Proovikeha $\sigma = 30$ kPa oli rabe ja purunes. Nihkeparameetrite arvutamisel on kasutatud 3 punkti.																						Proov:	
																												opt. w juures stand. Proctoriga tihendatud proov, w = 14% h = 24 mm; d = 71 mm
																												Teim:
																												nihkedeformatsiooni vaibumine
																												0,02mm/ 2 min
																												Nihkepinge aste:
																												$\Delta\tau = 10\%$ vertikaalsurve

Tellijä: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu

Teimimeetod: CEN ISO/TS 17892-10

Leht: 1 (1)

Lisa 10. Nihketeimi graafikud

EESTI KESKKONNAUURINGUTE KESKUS

ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE

GEOTEHNIKALABOR

GEOTECHNICAL LABORATORY

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008

A testing laboratory accredited by EAK under reg. no. L008

NIHKETEIM

SHEAR STRENGTH TEST

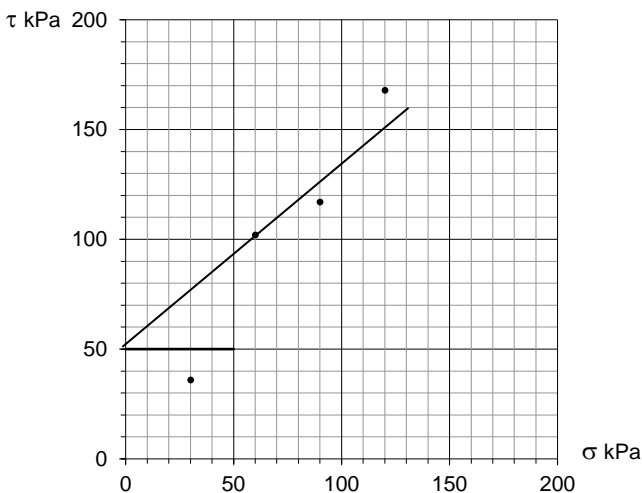
Objekt:

Varangu savi

Teimiprotokoll:

06X - 21

Labori nr. Sample No.	PA BH	Sügavus, m Depth, m	Pinnas Soil EVS 1997-1:2003	σ kPa	τ kPa	w_1 %	w_2 %	ρ_n g/cm ³	ρ_d g/cm ³	φ kraad	C kPa
7014	opt.w juures tihendatud proov		väheplastne savi	30	36	13,7	13,3	1,89	1,66	42	50
				60	102	14,2	14,1	1,97	1,73		
				90	117	14,1	13,7	1,92	1,68		
				120	168	14,3	13,8	1,97	1,72		



Teimimistingimused:

Aparaat: TSNIIIS

Proov: opt. w juures

tihendatud proov

h = 24 mm; d = 72 mm

Teim: nihkedeform.

vaibumine 0,02 mm/2 min

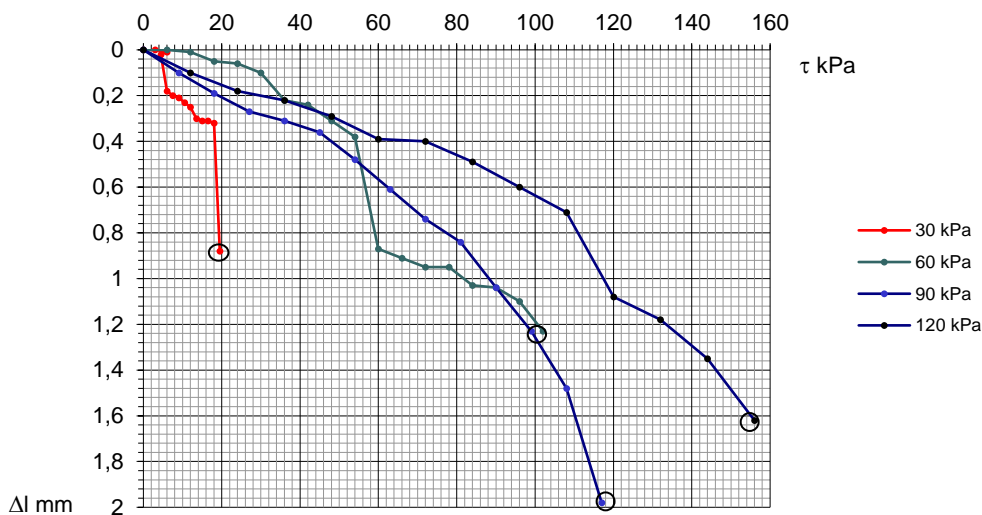
Nihkepinge aste:

$\Delta\tau = 10\%$ vertikaalsurve

Graafikul on joonistatud

c - nidusus 50 kPa ja

sisehõordenurk 42 kraadi



Tellija / Customer: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu

Teimimeetod / Method of test: CEN ISO/TS 17892-10:2004

Labor ei vastuta toodud proovide kvaliteedi eest

Laboratory isn't responsible for the samples quality

Suur-Sõjamäe 34 Tallinn	Teimis Operator	Kontrollis Checked	Kuupäev Date	Lisa tabelile 3 Add for table 3
Tel. 6112992 Fax 6112990				1 (1)

Lisa 11. Ühetelgse survetugevusteimi tulemused

**EESTI
KESKKONNAUURINGUTE
KESKUS**
ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE
GEOTEHNIKALABOR
GEOTECHNICAL LABORATORY

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008
Labor ei vastuta laborisse toodud proovide kvaliteedi eest

					Tabel: 4 ÜHETELGNE SURVE				Objekt: Varangu savi					Teimiprotokoll: 06X - 21				
Labori nr.	PA nr.	Proov		Kiht	Pinnas EVS 1997-1:2003	q _{uy} kPa	q _{uf} kPa	c _{uy} kPa	c _{uf} kPa	w ₁ %	w ₂ %	ρ _n g/cm ³	ρ _d g/cm ³	Kiirus mm/min	Silinder			Teimimistingimused
		Süga- vus m	Abs kõrgus m												h cm	d cm	h/d	
7014	opt. w juures tihendatud proov				väheplastne savi	287	507	144	253,5	14,1	13,8	1,98	1,73	0,3	7,6	10,2	0,75	Aparaat: automaatne WF-500 kg Proov: tihendatud optimaalse niiskuse juures Teim: pidev koormamine purunemiseni kiirus 0,3 mm/min lugem iga 30" järel (3mm deformatsiooni ületamisel iga 1min. järel) q _{uy} - ühetelgne survetugevus roomelävel q _{uf} - max ühetelgne survetugevus c _{uy} = q _{uy} /2 c _{uf} = q _{uf} /2

Tellijä: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu

Teimimeetod: CEN ISO/TS 17892-7

Leht: 1 (1)

Suur - Sõjamäe 34 Tallinn
Tel 6112992 Fax 6112990

Labori juhataja

/U.Lemberg/ Kuupäev

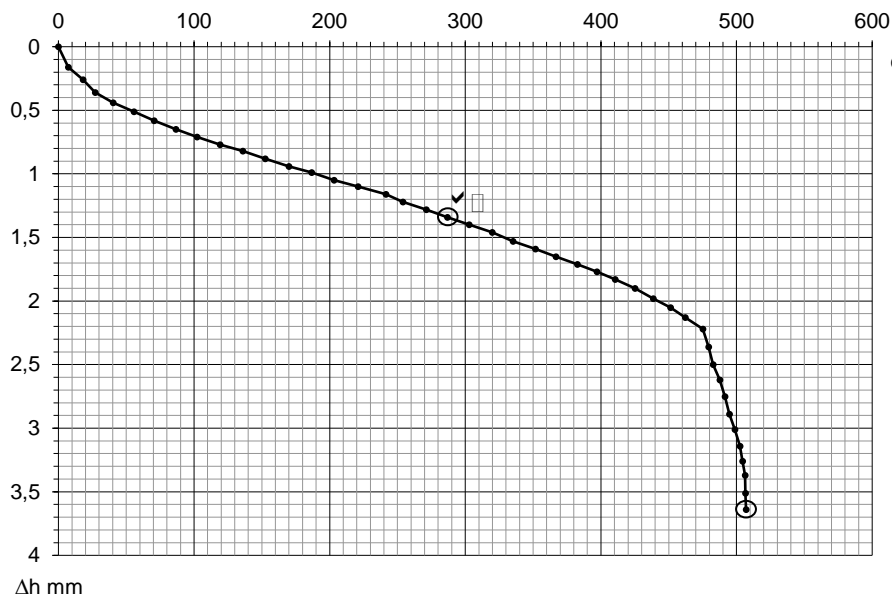
ühet-tab-06x-21.xls

Lisa 12. Ühetelgse survetugevusteimi graafik

**EESTI
KESKKONNAUURINGUTE
KESKUS**
ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE
GEOTEHNIKALABOR
GEOTECHNICAL LABORATORY
EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008
A testing laboratory accredited by EAK under reg. no. L008

ÜHETELGNE SURVE ONEAXIAL TEST	
Objekt: Varangu savi	Teimiprotokoll: 06X - 21

Labori nr.	PA	Sügavus, m	Pinnas	Soil	q_{uy}	q_{uf}	c_{uy}	c_{uf}	w_1	w_2	ρ_d	Kiirus
Sample No.	BH	Depth, m	EVS 1997-1:2003		kPa	kPa	kPa	kPa	%	%	g/cm ³	mm/min
7014	opt. w juures tihendatud proov		väheplastne savi		287	507	143,5	253,5	14,1	13,8	1,73	0,3



q_u kPa

Lab. 7014

Teimimistingimused:

Aparaat:
automaatne WF-500 kg
Proov:
looduslik struktuur ja
veesisaldus
 $h = 7,6$ cm; $d = 10,2$ cm
Teim:
kiirus 0,3 mm/min
lugem iga 30" järel (3 mm
deformatsiooni ületamisel iga
1' järel)

⊙ - q_{uy} q_{uf}
✓ - nähtav pragu

Tellijä / Customer: TTÜ Geoloogia Instituut; O. Vilu
Teimimeetod / Method of test: CEN ISO/TS 17892-7

Labor ei vastuta laborisse toodud proovide kvaliteedi eest
Laboratory isn't responsible for the samples quality

Suur-Sõjamäe 34 Tallinn	Koostas Operator	Kontrollis Checked	Kuupäev Date	Lisa tabelile 4 Add for table 4
Tel. 6112992 Fax 112990				1 (1)

Lisa 13. Kuivanud proovikeha survetugevusteimi tulemused

**EESTI
KESKKONNAUURINGUTE
KESKUS**
ESTONIAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTRE
GEOTEHNIKALABOR
GEOTECHNICAL LABORATORY

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg. nr. L008

Labor ei vastuta laborisse toodud proovide kvaliteedi eest

Labori		Proov			Kiht	Pinnas välimäärang	Tabel: 5 ÜHETELGNE SURVETUGEVUS KALJUPINNAS					Objekt: Varangu savi					Teimiprotokoll: 06X - 21	
No.	PA No.	Süga- vus m	Abs. kõrgus m	R _y MPa			R _f MPa	w %	ρ _n g/cm ³	ρ _d g/cm ³	h cm	d cm	h/d cm	Teimik	Koormamiskiirus kgf/sek	Teimimistingimused		
7014	kuivanud proovikeha				sinisavi	17,1	30,7	1,3	2,11	2,08	12,5	8,30	1,51	silinder	50	Automaatne survepress ADR 2000 kN ELE seade Proov: laborisse toodud looduslik kuivanud proovikeha Teim: pidev koormamine kuni purunemiseni koos prao fikseerimisega R _f - ühetelgne survetugevus MPa R _y - esimene fikseeritud pragu, MPa		
						Mahumass on määratud lineaarsel meetodil												

Tellijä: TTÜ Geoloogia instituut; O.Vilu

Teimimeetod: EVS-EN 1926

Leht: 1 (1)

Suur - Sõjamäe 34 Tallinn
Tel 6112992 Fax 6112990

Labori juhataja

/U.Lemberg/ Kuupäev

survet-tab-06x-21-7014.xls

Lisa 14. Varangu kihistu keemiline koostis (1/2)

Varangu 2021

XRF analüüsi tulemused: sulatusmeetod											
	LOI_950°C	SiO2 (%)	TiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na2O (%)	K2O (%)	P2O5 (%)
OV001-2021	3,01	64,65	0,95	16,17	3,14	0,018	1,33	0,36	0,12	9,68	0,18
OV002-2021	2,78	66,64	0,87	14,78	3,35	0,018	1,29	0,57	0,12	8,96	0,33
OV003-2021	3,14	67,99	0,72	12,53	4,70	0,014	1,25	0,89	0,12	7,83	0,54
OV004-2021	3,31	68,94	0,62	11,21	5,55	0,012	1,29	0,93	0,11	7,17	0,55
OV006-2021	2,74	67,52	0,81	13,93	3,75	0,016	1,22	0,59	0,09	8,55	0,34
OV008-2021	3,71	71,03	0,46	8,63	6,96	0,013	1,29	1,29	0,10	5,51	0,75
OV009-2021	3,50	67,32	0,71	12,28	5,05	0,015	1,13	1,13	0,12	7,74	0,68
OV010-2021	2,79	65,00	0,94	16,60	3,09	0,019	1,42	0,16	0,14	9,66	0,06
OV011-2021	2,86	65,06	0,86	15,20	3,89	0,020	1,49	0,89	0,13	8,75	0,52
OV012-1 kesk	3,96	64,44	0,77	13,57	6,04	0,020	1,27	0,85	0,09	8,16	0,35

Lisa 15. Varangu kihistu keemiline koostis (2/2)

Pulbermeetod (mõõdeti Mowiol liimiga pressitud tablette)														
Proov	S (%)	Cl (%)	As (PPM)	Ba (PPM)	Br (PPM)	Ce (PPM)	Co (PPM)	Cr (PPM)	Cu (PPM)	F (%)	Ga (PPM)	La (PPM)	Mo (PPM)	Nb (PPM)
OV-001	0,62	0,012	7,4	468,0	<5	62,1	7,3	83,8	10,1	0,10	20,5	42,2	3,3	18,6
OV-002	0,60	0,011	8,3	432,9	<5	77,4	8,2	83,1	11,8	0,11	20,7	43,9	2,0	16,0
OV-003	0,69	0,013	22,6	394,1	<5	87,1	15,8	71,6	19,9	0,13	19,9	49,8	0,9	15,4
OV-004	0,71	0,013	22,0	350,8	<5	83,9	18,2	71,9	20,1	0,14	22,1	32,4	5,1	13,0
OV-006	0,55	0,012	16,1	427,8	<5	68,4	14,4	83,2	11,0	0,10	17,6	39,6	5,1	16,1
OV-008	1,39	0,011	84,9	264,8	<5	103,9	21,3	128,7	14,9	0,16	21,5	38,4	14,5	9,1
OV-009	0,87	0,012	21,3	379,9	<5	104,0	10,5	68,1	20,5	0,16	19,7	47,8	3,5	14,8
OV-010	0,42	0,013	2,5	470,3	<5	53,5	9,3	86,5	5,8	0,08	20,9	34,7	3,1	17,8
OVO-11	0,33	0,018	8,6	438,0	<5	68,5	12,8	83,6	3,6	0,12	18,4	47,4	2,4	16,4
OVO12-1	0,80	0,022	31,4	403,6	<5	74,2	12,4	82,1	10,9	0,11	18,7	32,8	5,8	14,5

Proov	Nd (PPM)	Ni (PPM)	Pb (PPM)	Rb (PPM)	Se (PPM)	Sm (PPM)	Sr (PPM)	Th (PPM)	U (PPM)	V (PPM)	W (PPM)	Y (PPM)	Zn (PPM)	Zr (PPM)
OV-001	38,2	18,1	19,7	157,4	<5	11,1	82,6	17,9	28,0	324,9	20,9	20,9	39,1	183,5
OV-002	41,8	17,8	15,0	151,6	<5	3,6	91,3	18,3	17,8	324,6	38,5	29,0	32,8	200,4
OV-003	61,2	24,3	20,1	143,0	<5	11,1	101,0	18,3	13,5	297,4	46,5	40,5	27,6	202,0
OV-004	48,1	25,5	27,7	145,8	<5	7,3	97,9	25,6	14,1	269,1	51,5	36,6	25,3	178,2
OV-006	43,7	16,7	18,8	149,2	<5	9,8	89,6	17,9	14,2	313,5	32,3	29,7	31,9	190,4
OV-008	63,8	23,6	27,3	116,3	<5	11,1	108,3	18,4	14,6	275,3	131,9	44,7	18,4	214,1
OV-009	66,9	25,7	32,4	130,3	<5	14,8	108,3	18,0	19,4	291,4	52,4	47,4	25,2	205,9
OV-010	33,6	17,3	18,8	160,6	<5	5,4	73,0	18,9	16,2	282,3	15,2	14,2	40,9	164,9
OVO-11	36,5	14,9	10,6	155,6	<5	5,1	92,2	17,3	14,5	222,6	24,2	30,5	35,0	203,4
OVO12-1	41,9	20,3	19,0	138,3	<5	1,8	85,2	19,6	19,4	281,8	28,4	28,5	28,9	173,7

Lisa 16. Varangu kihistu Atterbergi piirid

Voolavus	Kausi nr	Kausi tühikaal	Märg kaal	Kuiv kaal	Penetratsioon (mm)	Niiskus (%)
	2	64,21	104,88	95,37	7,50	23,38
	9	54,66	91,3	82,38	8,77	24,34
	3	57,8	93,08	84,37	8,61	24,69
	4	55,52	92,66	83,34	8,85	25,09
	5	67,38	103,23	94,12	9,82	25,41
	6	61,35	97,56	88,3	8,79	25,57
	41	77,83	114,85	105,21	11,85	26,04
RU		51,27	90,57	80,39	11,40	25,90

Plastsus	Kausi nr	Kausi tühikaal	Märg kaal	Kuiv kaal	Niiskus (%)
	2	64,12	72,32	70,85	17,93
	5	67,32	74,63	73,32	17,92
	6	61,39	69,87	68,32	18,28
	41	77,81	85,88	84,41	18,22
	4	55,51	65,27	63,52	17,93
	3	57,74	66,35	64,82	17,77

	x (mm)	y (niiskuse %)
	10	25,34
Voolavuse piir	wl=	25
Plastsuse piir	wp=	18
Plastsuse indeks	lp	7

