TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
GEOLOOGIA INSTITUUT

MAARDU FOSFORIIDILEVILA TEHNOGEENSE PÕHJAVEE KVALITEEDI UURING

Lõpparuanne

KIK PROJEKT nr. 10963

TALLINN 2017

TTÜ Geoloogia Instituut, Ehitajate tee 5, GEO ja U04 4.korrus, tel. 620 3010, gi@ttu.ee

PROJEKTI TOETAS Keskkonnainvesteeringute Keskus (KIK)

KESKKONNAINVESTEERINGUTE KESKUS

TEOSTAJA: Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut

Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Registrikood: 74000323

tel. 620 3010

Veeproovivõtjate litsentsid nr. 1480/17 ja nr. 1476/17

Hüdrogeoloogiliste tööde litsents KHY000015

PROJEKTI MEESKOND:

Joonas Pärn, Jüri Ivask, Hannes Tõnisson, Enn Kaup, Kristjan Urtson ja Atko Heinsalu

Sisukord

1. Sissejuhatus 4

2. Uuringuala kirjeldus 6

3. Materjal ja metoodika 21

4. Tulemused ja arutelu 26

4.1 Veetasemed, vooluhulgad, veekogude ruumala ja vete dünaamika uuringualal 26

4.2 Vee keemiline koostis ja selle kujunemine 35

4.2.1 Maardu fosforiidilevila ala 39

4.2.2 Ümbritsevad pinnaveekogud 43

4.2.3 Maardu tehnogeense ala vee keemilise koostise kujunemine 45

4.3 Maardu tehnogeense ala vee seos ümbritseva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjaveega 51

5. Järeldused ja soovitused 55

6. Kokkuvõte 61

7. Tänuavaldused 64

8. Kasutatud kirjandus 65

Lisa 1. Maardu karjäärijärvede põhjareljeef 70

1. Sissejuhatus

Maardu fosforiidilevila koos sellel paiknevate fosforiidikarjääride ja kaevandusega on näide piirkonnast, kus lakanud kaevandamistegevuse mõju ümbritsevale keskkonnale võib kesta aastakümneid pärast selle lõppu. Maardu fosforiidikarjäärides lõppes kaevandamistegevus 1991. aastal. Karjääride peaaegu 30 aastat kestnud tegevusega kaasnesid mitmed ümbritsevat looduskeskkonda ning pinna- ja põhjavee kvaliteeti mõjutanud protsessid. Nendest olulisemad olid kaevandamistegevuse käigus maapinnale ladustatud puistangumaterjali kuumenemine seal leiduva kerogeeni ja püriidi oksüdatsioonil ning kaevandusvee mineraalsuse suurenemine, mida iseloomustas iseäranis vee sulfaadi, kaltsiumi ja magneesiumi kontsentratsiooni kasv. Kaevandamisalalt lähtuv reostus mõjutas ka ümbritsevaid pinnaveekogusid, Maardu järve ja Kroodi oja, mille keemiline koostis oluliselt muutus. Lisaks põhja- ja pinnavee reostusele mõjutas kaevandamistegevus ka rekultiveeritud aladel levivat taimkatet. On täheldatud, et graptoliitargilliiti sisaldava puistangumaterjali peale kujunenud muldadel, mida iseloomustab tavapärasest suurem raskemetallide sisaldus, esineb taimedes suuremaid Cr, Mn, Ni, Pb, Zn, Mo ja Co kontsentratsioone (Naumov, 1991).

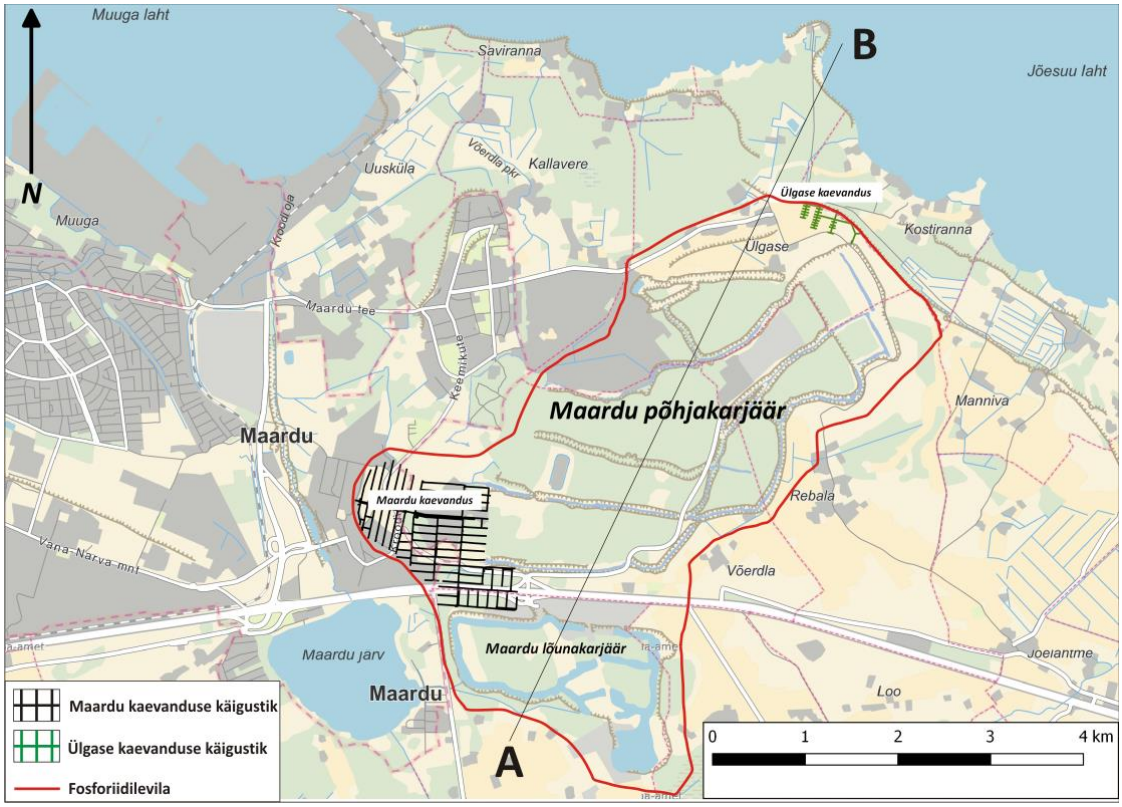
Jüriado jt (2012) viitavad asjaolule, et Maardu fosforiidilevila ala on endiselt üks kõige enam reostunud piirkondi Eestis. Kaevandamisel muudeti tundmatuseni ümbritsev maastik ning pärast kaevandamistegevuse lõppu korrastati see ainult osaliselt. Kaevandamise lakates täitusid karjääride kaevikud ja kaevanduse käigud järk-järgult veega ning tänaseks on nii Maardu lõunakarjääri kui põhjakarjääri aladele kujunenud karjäärijärved. 1991. aastal koostatud põhjakarjääri sulgemise projekt nägi ette mitmeid keskkonnameetmeid: veevahetuse reguleerimine karjäärijärvedes, järsakute tõkestamine ja laugemaks muutmine, veeseire ja muud küsimused (Mäeinstituut, 1991; Reinsalu, 2011; Reinsalu jt, 2015). Maardu fosforiiditööstuse pankrotistudes jäi projekt aga teostamata. Lõunakarjääri jaoks sulgemisprojekti ei tehtud ja seal jätkus lubjakivi kaevandamine, mis kestab tänaseni. Maardu fosforiidilevila alal pärast karjääride hülgamist teostatud uuringud kinnitavad, et pinna- ja põhjavett saastavad protsessid, mis olid aktuaalsed kaevandamistegevuse ajal, kestavad tänaseni ja karjääri ning kaevanduse

territooriumil olev pinna- ja põhjavesi erineb märkimisväärselt teiste Põhja-Eesti seisuveekogude ja ümbritsevate põhjaveekihtide veest (nt. Puura, 1998; Mäeinstituut, 2013). Kroodi oja, mis toitub osaliselt Maardu karjääridest ja kaevandusalalt pärinevast veest, veekvaliteet on jätkuvalt kesine.

Käesoleva uuringu käigus seirati Maardu tehnogeense ala pinnavee tasemeid, vooluhulki ning pinna- ja põhjavee keemilist koostist ühe aasta (2016-2017) vältel. Uuring on oma sisult järgmine etapp sama objekti varem käsitlenud uuringule (Mäeinstituut, 2013). Uuringu läbiviijate eesmärgiks oli: (1) selgitada pinna- ja põhjavee voolusüsteemi ja vee voolamise suundi uuringualal; (2) kirjeldada pinna- ja põhjavee keemilise koostise varieeruvust uuringualal; (3) selgitada saasteainete (raskemetallid, naftasaadused, fenoolid) levikut uuritavas vees ning (4) eristada peamisi protsesse, mis on mõjutanud uuringualal leviva pinna- ja põhjavee kujunemist. Saadud tulemusi võrreldi varasemate uuringute käigus kogutud andmetega (Johannes ja Karise, 1979; Pihlak jt, 1984; Naumov ja Karise, 1991; Naumov, 1991; Mäeinstituut, 2013) ning geokeemilise modelleerimise põhjal koostatud mudelite ja prognoosidega (Puura, 1998; Puura ja Pihlak, 1998; Puura jt, 1999; Puura ja Neretnieks, 2000), et anda hinnang uuringuala vee seisundile ning selle seisundi ajalisele muutusele. Lisaks eelnevale võrreldi Maardu fosforiidilevila ala pinnavee keemilist koostist alal esineva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjavee keemilise koostisega, et tuvastada kas kaevandamisalalt pärineval veel on olnud saastav mõju ümbritseva põhjaveekihi kvaliteedile.

2. Uuringuala kirjeldus

Maardu tehnogeenne ala hõlmab 18 km^2 suurust territooriumi umbes 15 km Tallinnast idas (Joonis 1). Selle tuumiku moodustab Maardu fosforiidilevila (Joonis 1). Maardu tehnogeenne ala ise on tunduvalt laiem kui fosforiidilevila ja selle ammendatud osa. See ulatub põhjas Balti klindini, lõunas Saha ja Kostivere asumiteni ning lääne-ida suunaliselt Maardu järvest ja Kroodi ojast kuni Rebala külani (Mäeinstituut, 2013; Joonis 1). Kogu nimetatud piirkond avaldab mõju alal leviva tehnogeense põhjaveekihi ning alal paiknevate pinnaveekogude vee kvaliteedile ja liikumisele ning seda eriti sademete ja maapinnal paikneva olme- ja tööstusjäätmete kaudu (Mäeinstituut, 2013). Ala on valdavalt tasane, jäädes absoluutkõrguselt vahemikku 30 kuni 45 meetrit ü.m.p. Enne fosforiidi kaevandamise algust seal suuremad voolu- ja pinnaveekogud puudusid (Mäeinstituut, 2013). Ala kirdenurgas paikneb Ülgase looduskaitseala.



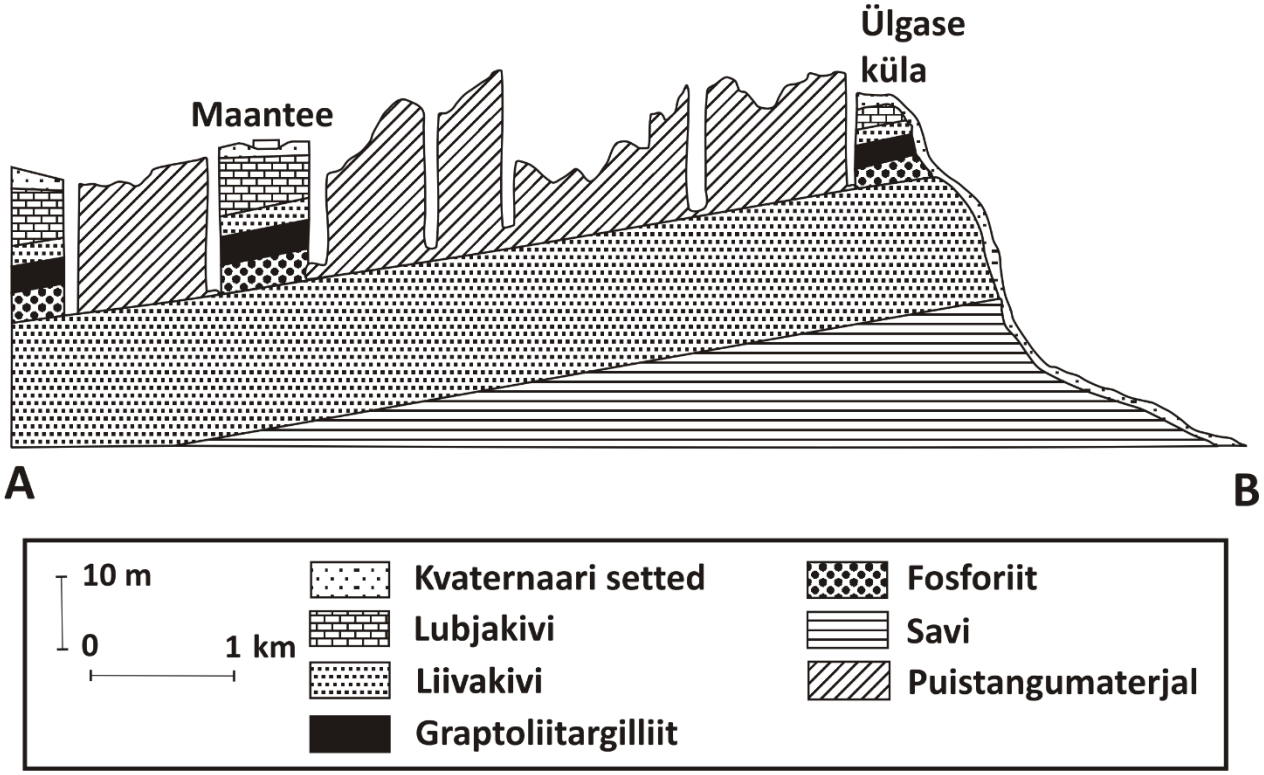
Joonis 1. Maardu tehnogeense ala kaart, kus on näidatud Maardu karjääride, Maardu kaevanduse ja Ülgase kaevanduse asukohad ning Maardu fosforiidilevila piirid (Mäeinstituut, 2013; Maa-amet, 2017). Lõik A-B tähistab joonisel 2 esitatud geoloogilise läbilõike asukohta.

Maardus kaevandatud fosforiidilasundi moodustavad Ülem-Kambriumi ja Alam-Ordoviitsiumi Kallavere kihistu liivakivid, mis sisaldavad fluoroapatiidist koosnevaid lingulaatsete brahhiopoodide kodasid. Need käsijalgsete kojad moodustavad 5 kuni 90% kogu kivimi massist (Raudsep, 1997). Maardus on Kallavere liivakivides esineva biogeense fosfaadi (P_2O_5) sisalduseks kodades hinnatud 13% ning fosforiiti sisaldava kihi paksuseks ~0,5 meetrit (Joonis 2; Raudsep, 1997). Kallavere kihistu liivakivid sisaldavad väiksemates kogustes ka dolomiiti, kaltsiiti, püriiti ja raua hüdroksiide, millega tuli arvestada maagi rikastamisel ja mis on seotud Maardu fosforiidilevila alal kujunenud keskkonnaprobleemidega.

Maardu piirkonnas paikneb biogeenset fosforiiti sisaldav liivakivi 10–20 meetri sügavusel (Pihlak jt, 1984; Raudsep, 1997). Fosforiidilasundit katab Alam-Ordoviitsiumi Türisalu kihistu must kilt – graptoliitargilliit ning Alam- ja Kesk-Ordoviitsiumi savid, glaukoniitliivakivi, lubjakivi ja dolomiit ning Kvaternaari setted (Joonis 2). Fosforiidilasundit katvate kihtide paksus kasvab lõuna suunas. Graptoliitargilliidi peamise mineraaloogilise koostise moodustavad K-päevakivid sanidiini vormis, savimineraalid (nt. illiit-smektiit ja vilgud) ja kvarts. Graptoliitargilliidi kihi paksus Maardu fosforiidilevila alal on umbes 4 meetrit (Puura, 1998). Graptoliitargilliit sisaldab suurtes kogustes settelist orgaanilist ainet ehk kerogeeni (15–20%) ja raudsulfiidi ehk püriiti (4–6%) (Petersell, 1997; Puura, 1998). Graptoliitargilliidi orgaanilise ainega on seotud mitmed raskemetallid (nt. U, Mo, V, Pb, Co, As, Sb, Ni, Cu, Re) sisaldusega 2–2000 ppm-i (Petersell, 1997; Voolma jt, 2013). Hinnanguliselt avati fosforiidi kaevandamise käigus oksüdeeruvatele tingimustele 71,7 miljonit tonni argilliiti, mille madalatemperatuuriline oksüdeerumine võib moodustada rohkem kui 5 miljonit tonni väävelhapet (KBFI, 1990).

Fosforiiti sisaldavad Kallavere kihistu liivakivid omakorda lasuvad umbes 20 m paksusel Alam-Kambriumi Tiskre kihistu liivakivide kihil. Viimane moodustab koos Kallavere kihistu liivakividega Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi, mis on oluline Maardu karjäärijärvedesse ja kaevandusse voolava põhjavee allikas. Alam-Kambriumi liivakivide all lasuvad Lükati ja Lontova kihistu savid ja aleuroliidid moodustavad tähtsa regionaalse veepideme. Aluspõhja kivimitel

lasuvate Kvaternaari setete (muld, moreen, turvas) paksus uuritaval alal on kuni 0,5 m (Reinsalu, 2011; Kolats, 2015; Joonis 2).



Joonis 2. Maardu fosforiidilevila ala geoloogiline läbilõige joonel A-B joonisel 1. Joonise vertikaalne mõõde on horisontaalse suhtes 50 korda suurem. (Puura jt, 1999 järgi)

Esimene fosforiidikaevandus rajati ala kirdeosas paiknevasse Ülgase külla 1921. aastal ja see tegutses 1938. aastani (Joonis 1). Kaevandamisviisina kasutati Ülgasel kamberlaavade tehnoloogiat, millest jäävad maapõue tühimikud (Reinsalu, 2011; Reinsalu jt, 2015). Kaevanduse stollid avanevad klinti ja sinna voolav vesi koguneb kaeveõõne põhja. 1940. aastal algas fosforiidi allmaakaevandamine Maardu kaevanduse alal, mis kestis kuni 1965. aastani. Ka seal kasutati esmalt kamberlaavade tehnoloogiat, mis asendati hiljem sammastervikutega kambritega, mille puhul on hilisem maapinna vajumine väike ja maa alla jäävad tühemikud (Reinsalu jt, 2015). Pärast kaevanduse sulgemist täitusid kaevanduskäigud veega ja sellest voolavad tänapäeval välja tehnogeensed allikad. Kaeveõõned põhja- ja lõunapool Tallinn-Narva maanteed levivad 1,6 km^2

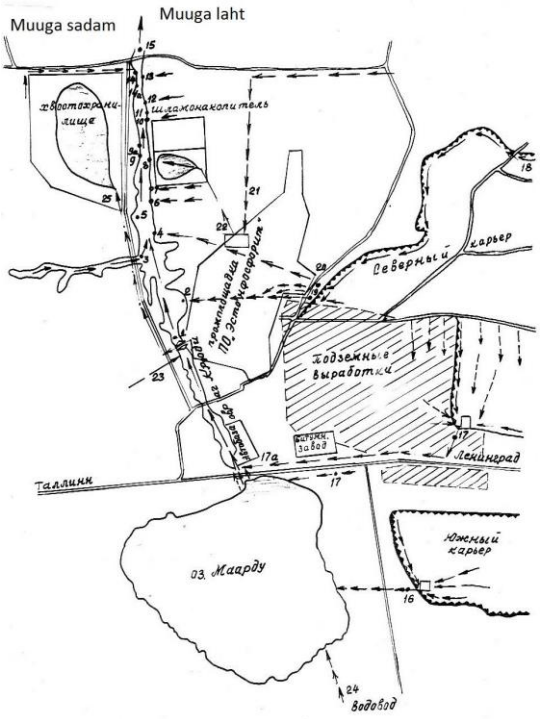
suurusel alal ja on hüdrauliliselt seotud (Reinsalu, 2011; Reinsalu jt, 2015; joonis 1). Aastatel 1964–1991 kaevandati fosforiiti Maardu karjäärides, mille tulemusena tekkis 7 suurt platood kõrgusega 5 kuni 25 meetrini kokku 10,4 km^2 suurusel alal (Puura, 1998; Tamm ja Ideon, 2011). Karjäärid paiknevad kahel pool Tallinn-Narva maanteed ja need on vastavalt oma asendile tuntud kui Maardu põhjakarjäär ja lõunakarjäär (Joonis 1). Põhjakarjäär avati 1964. aastal ja lõunakarjäär 1975. aastal. Põhjakarjääris paiknesid jaoskonnad I-III ja lõunakarjäär moodustas IV jaoskonna. Karjäärides rakendati ribakaevandamist, mille käigus kobestatud katend ekskaveeriti kaevandatud alale (Reinsalu jt, 2015). Nõukogude perioodil ulatus karjääride aastane toodang kuni 0,85 mln. t/aastas (Raudsep, 1997). Kaevandamistegevus lõpetati 1991. aastal. Osa kaevandatud alast on rekultiveeritud metsamaaks. Põhjakarjääri alale on rajatud Tallinna prügila ja lõunakarjääris tegutseb tänapäeval kaks lubjakivikarjääri. Lisaks paiknevad endisel kaevandusalal aiand ja lõhkeaineladu (Kolats, 2015).

Esimese kahe aastakümne jooksul ei arvestatud kaevandamistegevuses argilliidi kuumenemise ohuga ja kaevandamise käigus kujunes ebaühtlane kõrgendikkudega tehislik maastik. Puistangumaterjal ladustati segatuna ning moodustunud kõrgendikkudel jagunes ladustatud materjal gravitatsiooniliselt. Esimesed kuumenemiskolded hakkasid tekkima juba paar kuud pärast kaevandamistegevuse algust (Puura, 1998). 1982. aasta algusest rakendati karjäärides uut puistangumaterjali ladustamise tehnoloogiat, mis pidi takistama kuumenemiskollete tekkimist. Selle kohaselt jäeti 4–6 m paksuse kilda kihi alla 1–2 meetri paksune lubjakivi kamakatest koosnev kiht ning kilt omakorda kaeti lubjakivi, glaukoniitliivakivi ja pinnase seguga (Puura, 1998; Reinsalu, 2011). Aheraine ladustati tasaselt ilma suurte kõrgusvahede ja järsakuteta, erandiks olid puistangute servad. Puistangumaterjaliga jäid täitmata kaevikud, mida kasutati töötavas karjäärides transpordivõrgustiku ja karjääridesse voolava vee dreenidena. Kaevikud on keskmiselt 10–20 meetrit laiad ja nende järsakuliste nõlvade kalle on 25–35° (Puura, 1998). Pärast kaevandamistegevuse lõppu täitusid kaevikud järk-järgult veega ja neis moodustusid karjäärijärved.

Maardu tehnogeense põhjaveekihi moodustab Maardu fosforiidikarjääride puistanguis ja Maardu kaevanduse käikudes olev vesi. Puistematerjal on väga heade filtratsiooniomadustega (filtratsioonimoodul K=10–100 m/d; Metsur ja Tamm, 2009). Põhjaveetase puistangutes paikneb puistangute alaosas ning moodustab osa Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksist (Metsur ja Tamm, 2009). Pärast kaevandamistegevuse ja kaevandusvete väljapumpamise lõppu 1991. aastal on vesi karjääri kaevikutes kiiresti tõusnud. Kõige kiirem on veetõus olnud lõunakarjääri kaevikutes kuni tasemeni ~33 m ü.m.p. Aeglasem on veetõus olnud põhjakarjääri kaevikutes, mis veel 1990date aastate lõpus olid valdavalt kuivad (Puura, 1998). Tänaseks on ka need veega täitunud ja kaevikutes on kujunenud pinnaveekogud (karjäärijärved). Karjäärijärved toituvad sademetest ja ümbritsevate põhjaveekomplekside (Kvaternaari, Ordoviitsiumi, Ordoviitsiumi-Kambriumi) veest. Hinnanguline sademete infiltratsioonikiirus uuringualal on 0,25–0,35 $m^3/m^2/a$ (Naumov, 1991; KBFI, 1990). Pihlak jt (1984) hinnangul domineerib karjääride veebilansis põhjavesi, kusjuures sademete osakaal karjääridesse voolavast veest hinnati kõige suuremaks põhjakarjääris (48,3%), samal ajal kui lõunakarjääris hinnati sademete osakaaluks karjääri veebilansis vaid 5,6%. Uuemad statistilisel meetodil antud hinnangud sademete ja põhjavee osakaalu kohta kaevandusvees Ida-Viru põlevkivikaevanduste näitel osutavad varasemate hinnangutega võrreldes sademete suuremale osakaalule (Reinsalu, 2005). Samal ajal ei ole võimalik Reinsalu (2005) poolt esitatud statistilist meetodit rakendada Maardu karjääride puhul, sest selle eelduseks on andmete olemasolu karjäärist/kaevandusest väljapumbatava vee kohta, mis hõlmaks endasse kogu karjääri jõudva vee hulga. Maardu karjääride ja kaevanduse kohta pole aga sellise kõikehõlmava parameetri arvutamine olemasolevate andmete põhjal võimalik. Need ei ole aktiivsed kaevandamisalad ning vee väljavool neist toimub nii mitmete paljuski veel kaardistamata ja seiramata väljavoolude kaudu, kui ka infiltreerumisel ümbritsevasse põhjaveekihti.

Puistangutest leostuv vesi ja kaevikutes olev pinnavesi segunevad põhjaveega ja voolavad läbi ümbritsevate pinnaveekogude Muuga lahte. Põhjakarjääri lääneservas toimub tehnogeense veekogumi vete väljavool läbi 1965. aastal suletud fosforiidikaevanduse käikude (Joonis 1). Pärast 1894. aastal toimunud Kroodi kraavi rajamist on Maardu järv Kroodi oja kaudu ühenduses Soome

lahega. Kroodi oja toitub valdavalt sademetest, aga sinna jõuab lisaks Maardu fosforiidilevila ala veele ka ümbritsevate tööstusettevõtete (AS Eesti Energia Iru elektrijaam, AS Maardu Vesi, OÜ Petkam, Maardu Katlamaja AS, AS Technomar & Ardem, Kroodi Terminal AS, Maardu Terminal AS, WETT Eesti OÜ) heitvesi (Tamm ja Osjamets, 2009; EKUK, 2015). Olulisimaid fosforiidikarjääriga seotud heit-, sademe,- ja kaevandusvee väljalaske Kroodi ojja oli karjääride töötamise ajal kolm (EKUK, 2015; Joonis 3): (1) šlammikogujast (settetiikidest) pärinev puhastatud reovesi; (2) sademevee väljalask karjääri alalt pärineva sademevee ja kaevandusvee väljajuhtimiseks ning (3) väljalask ettevõtte Eesti Fosforiit ja Maardu vana linnaosa bioloogiliselt puhastatud olmereovee jaoks.



Joonis 3. Pinna- ja kaevandusvee liikumine Maardu karjääri ja tehase territooriumil 1987. aastal (Naumov ja Karise, 1991; Mäeinstituut, 2013). Numbriga tähistatud: 1 – tamm; 2 – sademete ja kaevandusvee väljalask; 3–14 – erinevate kaevandamisalalt lähtuvate vete väljalask; 15 – Kroodi oja suue; 16–18 – peamised pumbajaamad kaevandusala lõuna-, kesk- ja põhjaosas (17a ja 17b tähistavad kaevandusvee väljavoolu põhjakarjäärist Maardu järve); 19 – kaevandusvee väljavool Maardu kaevandusest; 20 – kaevandusvee väljavool läbi drenaažikraavi; 21 – Maardu linna heitvee väljalask; 22 – ettevõtte Eesti Fosforiit ja Maardu linna puhastatud olmereovee väljalask läbi settetiigi; 23 – Tallinnast lähtuv sissevool Kroodi ojja; 24 – veetoru Jõelähtme jõest; 25 – tselluloosiveski väljavool läbi veskist lähtuva toru.

Varasemad uuringud, mille objektiks oli Maardu tehnogeense ala pinna- ja põhjavee kvaliteet ja selle koostist mõjutavad tegurid, võib jagada nelja kategooriasse: kaevandusvee ja ümbritsevate pinnaveekogude kvaliteedi kirjeldamine, argilliidiga läbiviidud leostamiskatsed, puistangumaterjali kuumenemisega seotud uuringud ning puistangutes toimuvate protsesside geokeemiline modelleerimine. Esimestes vee kvaliteeti käsitlevates uuringutes täheldatakse, et sademed muutuvad läbi puistangute infiltreerudes suure mineraalsusega (60–70 g/L) CaMg-SO_4 tüüpi veeks, mille SO_4^{2-} iooni sisaldus on vahemikus 3–50 g/L (Johannes ja Karise, 1979; Pihlak jt, 1984). Sellist tüüpi vee kujunemise põhjusena toodi välja püriidi (FeS_2) oksüdeerumine aeratsioonivöös esineva ja vees lahustunud hapniku toimel. Lisaks makrokomponentide suurtele kontsentratsioonidele täheldati ka mitmete mikrokomponentide (Fe^{2+}, Mn^{2+} ja F^-) väga suuri sisaldusi vees, mis ulatusid valdavalt kuni 200 mg/L, kuid Fe^{2+} puhul kuni 700 mg/L (Johannes ja Karise, 1979). Suur sulfaatioonide kontsentratsioon (0,45–2,3 g/L) ja kõrge soolsus (1–3 g/L) olid iseloomulikud ka kaevandustest väljapumbatavale veele, mis suunati Maardu järve ja Kroodi oja kaudu merre (Johannes ja Karise, 1979). Aastatel 1981–1990 seirati vee kvaliteeti nii kaevanduses endas (pumbajaamad ja suletud kaevikud) kui ka ümbritsevatel aladel (Kroodi oja ja Maardu järv) (Pihlak jt, 1984; Naumov, 1991; Naumov ja Karise, 1991; Sedman ja Puura, 1995; Puura, 1998). Pihlak jt (1984) teostatud vaatluste põhjal leostus puistangust 10 kuu jooksul välja 8879,9 tonni sulfaatiooni, 1251,1 tonni kaltsiumiooni ja 1472,7 tonni magneesiumiooni. Kõige intensiivsem oli leostumine lõunakarjääris, millest väljapumbatud vett iseloomustas aga põhjakarjääriga võrreldes väiksem SO_4^{2-}, Ca^{2+} ja Mg^{2+} kontsentratsioon. Pihlak jt (1984) järgi on see tingitud puhta põhjavee suuremast juurdevoolust lõunakarjääri. Hoolimata sellest, et püriidi oksüdeerumisel muutub keskkond happelisemaks, oli puistangutest pärineva vee pH allikates, kaevikutes ja ümbritsevates veekogudes valdavalt neutraalse või nõrgalt aluselise reaktsiooniga (pH väärtused 7–8,7). Peamine anorgaanilise süsiniku liik selliste pH väärtuste juures on HCO_3^-, mille kontsentratsioon jäi vahemikku 110–440 mg/L. Peamised lahustunud katioonid vees olid Ca^{2+} ja Mg^{2+}. Sulfaadi kontsentratsioon puistangutest leostunud vees oli vahemikus 3400–5100 mg/L. Suurema sulfaadi kontsentratsiooni juures ületas Mg^{2+} kontsentratsioon Ca^{2+} oma. Ka K^+ kontsentratsioon kasvas koos sulfaadi kontsentratsiooni kasvuga, aga jäi alla 120 mg/L. Raskemetallide kontsentratsioonid olid valdavalt palju väiksemad nende sisaldusest

graptoliitargilliidis (vahemikus 0,01 kuni 3 ppm-i), kuigi ületasid vastavaid väärtusi ümbritsevates veekogudes (Puura, 1998). Kõige suuremates kontsentratsioonides esinesid Ni, Cu ja Zn. 20 aastat pärast Maardu karjääride sulgemist aastatel 2012–2013. läbiviidud Maardu tehnogeense ala vee kvaliteedi uuringu (Mäeinstituut, 2013 – KIK projekt nr. 11067) tulemused näitasid, et Maardu tehnogeense ala vee seisund on valdavas osas endiselt kesine. Karjääri kaevikutesse moodustunud pinnaveekogusid iseloomustas suur elektrijuhtivus ja SO_4^{2-} kontsentratsioon. Sulfaadi keskmine kontsentratsioon põhjakarjääri tranšeedes jäi vaatlusperioodil vahemikku 990–2050 mg/L ja seiratud lõunakarjääri tranšees oli see keskmiselt 450 mg/L. „Kesiseks“ hinnati ka endise Maardu kaevanduse käigust ja põhjakarjääri kaevikutest väljavoolavat vett, mida sarnaselt karjäärijärvede veele iseloomustas suur elektrijuhtivus ja SO_4^{2-} kontsentratsioon. „Heasse“ klassi kuuluvaks hinnati lõunakarjääri väljavoolu ja vana Ülgase kaevanduse käikudes olevat vett. „Halvaks“ hinnati Maardu järve lõunapoolt sissevoolava Maardu oja vesi suure üld-lämmastiku ja üld-fosfori sisalduse tõttu.

Maardu fosforiidilevila aladelt pärinev vesi on oluliselt mõjutanud ümbritsevate pinnaveekogude keskkonnaseisundit. Kaevandustegevuse ajal moodustas kaevandusvee osa Maardu järvest läbivoolavast veest kuni 31% (Metsur ja Tamm, 2009). Sel perioodil oli järve vesi saastunud nii mitmete makrokomponentide kui ka mikrokomponentide suhtes, olles teiste järvedega võrreldes ebatavalise HCO_3-SO_4 koostisega, mille SO_4^{2-} kontsentratsioonid küündisid 200–300 mg/L (Johannes ja Karise, 1979). Pärast kaevandamistegevuse lõppu on järvevee seisund oluliselt paranenud (Metsur ja Tamm, 2009). Siiski täheldati jälgi kaevandamistegevusest põhjustatud jääkreostusest Maardu järve põhjasetetes veel 1990date aastate keskel (Heinsalu, 1996). Lõunakarjäärist väljapumbatud vee põhjustatud saastet iseloomustas kuni 0,5 meetri paksune must FeS-rikas järvemuda kiht, mida iseloomustasid muu setteläbilõikega võrreldes suured Zn, Pb, V ja Hg sisaldused. Need raskemetallide sisaldused olid aga tunduvalt väiksemad nende sisaldusest graptoliitargilliidis. Käesoleva uuringu eelmises etapis (Mäeinstituut, 2013) hinnati Maardu järve ökoloogiline seisund „kesiseks“ lähtuvalt kõrgetest pH (~8,6) ja KHT_{Mn} (keskmiselt 9,6 mgO/L) väärtustest ning suurest $N_{üld}$ ja SO_4^{2-} kontsentratsioonist (keskmiselt vastavalt 1,3 mg/L ja 192 mg/L).

Aktiivse kaevandamistegevuse perioodil moodustas ettevõtte Eesti Fosforiit väljalaskudest pärinev vesi kuni 68% Kroodi oja veest ning veel 1990date aastate keskel moodustas karjääride alalt pärinev vesi oja veebilansist kuni 33% (EKUK, 2015). Kroodi oja vee kvaliteet oli kõige halvem 1970datel aastatel, mil vee heljumi sisaldus küündis 88000 mg/L (EKUK, 2015). Peamisteks saasteallikateks olid Eesti Fosforiidi rikastustsehh ja happetsehh, millest väljavoolava happelise vee ja sellega kandunud püriidi põletamisjääkide mõjul küündisid Fe^{2+}, F^{-} ja Cu^{2+} kontsentratsioonid ojas vastavalt 100, 64 ja 19 mg/L ning As sisaldus oli kuni 3,2 mg/L (EKUK, 2015). Kroodi oja vee keemilise koostise seire 1987. ja 1988. aastal tuvastas, et see erineb suure mineraalsuse ning mitmete põhikomponentide sisalduse (Ca^{2+}, Mg^{2+} ja SO_4^{2-}) poolest kõigist teistest Soome lahte suubuvatest jõgedest (Mäeinstituut, 2013 ning seal viidatud uuringud). Oja vee mineraalsus oli ~2900–3200 mg/L ning SO_4^{2-} kontsentratsioonid jäid vahemikku 1400 kuni 1700 mg/L. Pärast kaevandamistegevuse lõppu ja šlammikoguja tühjendamist on Kroodi oja vee kvaliteet järk-järgult paranenud ning vähenenud on šlammikogujast pärinenud fosfori ja ammooniumi kontsentratsioonid, mis olid 2013. aastaks langenud tagasi looduslikule tasemele (EKUK, 2015). 2009. aastal läbi viidud uuringus Kroodi oja põhjasetete ohtlike ainete sisalduse määramiseks tuvastati, et valdav osa oja põhjasetetest on mõjutatud jääkreostusest (Tamm ja Osjamets, 2009). Kehtestatud piirarve ületasid Kroodi oja erinevate lõikude põhjasetetes nii raskemetallide As, Zn, Cu, Pb ja Ni kui ka naftasaaduste sisaldused (Tamm ja Osjamets, 2009; Ohtlike…, 2010a). Kõige enam oli reostunud ettevõtte Eesti Fosforiidi heitvetest mõjutatud oja keskjooksul paiknev loduala. Sama uuringu käigus kogutud veeproovides ükski raskemetallide komponent seaduses kehtestatud piirväärtusi ei ületanud. Kõrgeim oli As kontsentratsioon 13,6 µg/L. Kehtestatud piirväärtust ületas vee naftasaaduste sisaldus, kuid mõõdetud väärtus seostati Maardu Terminali sadevee väljalasuga. Uuringu eelmises etapis (Mäeinstituut, 2013) hinnati Kroodi oja ökoloogilise seisundi „kesiseks“ tuues selle peamiste indikaatoritena välja suure elektrijuhtivuse (2184 µS/cm), hõljuvaine sisalduse (keskmiselt 14,8 mg/L) ja SO_4^{2-} kontsentratsiooni (keskmiselt 805 mg/L). 2015. aastal Eesti Keskkonnauuringute Keskuse poolt läbiviidud reostusuuring (EKUK, 2015) kinnitas raskemetallide (As, Zn, Cu, Pb, Ni ja Cd) reostuse esinemist nii oja ülemjooksu põhjasetetes kui selle kesk- ja alamjooksul pinnasereostusena. Oja

vees täheldati kohatist raskemetallide, fenoolide ja naftasaaduste reostust. Raskemetallidest ületasid kehtestatud piirväärtusi As, Ni, Zn, Cu ja Ba sisaldused.

Graptoliitargilliidiga läbiviidud leostamiskatsed (Puura, 1998 ja seal viidatud allikad) näitasid, et vee pH muutub läbi argilliidi voolates happeliseks (pH väärtused 2,5–3,5) ning vee poolt leostatav metallide osakaal argilliidis jäi vastavalt katse pikkusele vahemikku 1-11%. Temperatuuri tõustes 60°C-ni tõusis argilliidist leostatavate metallide osakaal aga kuni kaks korda. Seega võib puistangute kuumenemisel olla oluline mõju kuumenemiskoldeid läbiva vee kvaliteedile. 1970datel ja 1980datel aastatel läbiviidud temperatuuriseire tulemused näitasid, et puistangute keskosas ei ületa temperatuur 20°C, kuid osades piirkondades võib temperatuur tõusta 800 kuni 1200°C (Puura, 1998). Sealjuures oli kuumenemiskollete arv miljoni tonni puistangumaterjali kohta suurem aladel, kus oli rakendatud esialgset ladustamistehnoloogiat, mille käigus katendi erinevad komponendid ladustati segamini üheskoos. Kuumenemiskollete suurused jäid valdavalt ühe kuhjatise piiridesse, kuigi välistada ei saanud ka nende levikut mööda kaevikute servi. Pärast kaevandamistegevuse lõppu 1991. aastal on kuumenemiskollete arv järk-järgult vähenenud ja 1990date aastate keskel läbiviidud uuring ei tuvastanud enam ühtegi uut kollet (Sedman ja Puura, 1995). See on tõenäoliselt põhjustatud kivimi õhu- ja veejuhtivuse vähenemisest aheraine kompakteerumisel ja kuumenemisel tekkinud sekundaarsete mineraalide toimel (nt. rauahüdroksiidid, hematiit, korderiit), mis on täitnud puistangumaterjali poorid takistades hapniku liigipääsu kivimile (Puura, 1998). Lisaks vähendab oksüdeeriva hapniku levikut pinnases alal üha laiemalt leviv taimkate.

Maardu karjääride puistangutes toimuvate keemiliste protsesside kulgemist kirjeldav mudel on puistangumaterjali mineraloogilise koostise ning geokeemilise modelleerimise põhjal esitatud Erik Puura ja tema kaasautorite töödes (Puura, 1998; Puura ja Pihlak, 1998; Puura jt, 1999; Puura ja Neretnieks, 2000). Kuigi puistangumaterjali kuumenemisel võib olla lokaalne mõju kaevandamisala vee kvaliteedile, on regionaalsel skaalal kõige olulisemaks vee kvaliteeti mõjutavaks teguriks madalatemperatuuriline püriidi oksüdatsioon (Puura, 1998). Püriidi oksüdatsiooni kirjeldav üldine reaktsioonvõrrand on (Puura ja Pihlak, 1998):

$$FeS_2(s) + 3.75O_2 + 3.5H_2O \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 2SO_4^{2-} + 4H^+ \ (\boldsymbol{R1})$$

Maksimaalne oksüdeerunud püriidi hulk moolides 1 kg H_2O kohta saavutatakse puistangutes 3–4 aastat pärast nende ladustamist ning püriidi oksüdatsiooni kiirus väheneb ajas (Puura ja Neretnieks, 2000). Protsessi käigus tekkiv happeline vesi (pH väärtused 1–2) difundeerub argilliidi osakestest välja ja liigub infiltreeruva veega sügavamale puistangutesse. Püriidi oksüdatsioonil tekkinud happelisus neutraliseeritakse ümbritsevate kivimite poolt. Happelistes tingimustes tarbitakse osa (~8%) tekkinud happelisusest (H^+) ära silikaatide lahustumisel (Puura ja Neretnieks, 2000). Olulisim sellist tüüpi reaktsioon on inkongruentne illiidi lahustumine, mille käigus vabaneb K^+ ja tekib illiit-smektiit (Puura ja Pihlak, 1998):

$$H^+ + n\ illiit \rightarrow K^+ + n(illiit -)smektiit \ (\boldsymbol{R2})$$

Happelistes tingimustes (pH 1,5–3) settib üleküllastuse tingimustes suurte K^+, Fe^{3+} ja SO_4^{2-} sisalduste mõjul välja K-jarosiit ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), mis kõrvaldab veest ajutiselt osa illiidi lahustumisel vabanenud kaaliumist (Puura ja Pihlak, 1998):

$$1/3K^+ + Fe^{3+} + 2/3SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow 1/3KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 2H^+ \ (\boldsymbol{R3})$$

K-jarosiidi leiud puistangutes on üheks peamiseks tõendiks väga happeliste tingimuste esinemisest läbi puistangute infiltreeruva vee varases arengujärgus (Puura jt, 1999). Reaktsioon R3 on oluline ka selle poolest, et lahusest viiakse välja sinna madala pH ja aeroobsetes tingimustes akumuleerunud Fe^{3+}, mis tekib püriidi oksüdatsiooni käigus.

Valdav osa püriidi oksüdatsioonil tekkivast happelisusest neutraliseeritakse Mg-kaltsiiti sisaldava lubjakivi lahustumisega (Puura ja Pihlak, 1998):

$$Ca_{0.86}Mg_{0.14}CO_3 + H^+ \rightarrow 0.86Ca^{2+} + 0.14Mg^{2+} + HCO_3^- \ (\boldsymbol{R4})$$

Puistangumaterjalis esinev lubjakivi on olulisimaks teguriks, mis vähendab happeliste vete kahjulikku mõju keskkonnale Maardu tehnogeensel alal. Geokeemilise modelleerimise käigus tehtud arvutused näitavad, et puistangumaterjali Mg-kaltsiidi sisaldus ületab 8–10 kordselt koguse, mis on vajalik püriidi oksüdatsioonil tekkiva happelisuse neutraliseerimiseks (Puura,

1998). Mg-kaltsiidi puhverdusvõimet võivad aga vähendada selle pinnale settivad püriidi oksüdatsiooni mõjul tekkinud sekundaarsed mineraalid (nt. Fe-hüdroksiidid, K-jarosiit, kips; Puura jt, 1999). Osaliselt üleküllastunud ja karbonaatsete mineraalide poolt puhverdatud kaevandusveele omane nähtus on, et karbonaatide lahustumisel tekkiv vesinikkarbonaat muutub happelistes tingimustes CO_2-ks ning difundeerub puistangutest välja (Puura ja Pihlak, 1998):

$$HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow CO_2(g) + H_2O \ (\boldsymbol{R5})$$

See reaktsioon on oluline kuna nii kulub happelisuse puhverdamiseks vähem karbonaati (Puura ja Pihlak, 1998). Reaktsioon peaks olema eriti aktiivne puistangumaterjali varases geokeemilises arengujärgus, kui happelisust puhverdavat kaltsiiti leidub aeratsioonivöös (Puura, 1998). Puistangumaterjali hilisemas arengujärgus, kui aeratsioonivöös leiduv karbonaatne faas on ammendatud, liigub kaltsiidi lahustumine küllastusvöösse, mille tulemuseks on suuremad HCO_3^- kontsentratsioonid ja madalamad pH väärtused (Puura, 1998). Anorgaanilise lahustunud süsiniku kontsentratsiooni vähenemine difusiooniprotsesside tulemusena võib viia ka üleküllastuse tekkimiseni ja sekundaarsete karbonaatsete mineraalide väljasettimiseni, mis suurendab puistangumaterjali puhverdavat potentsiaali (Puura, 1998). Lubjakivi lahustumise edenedes ja aktiivsete neutralisatsioonireaktsioonide tingimustes (R4, R5) kasvab Ca^{2+} kontsentratsioon, mis koos suurte SO_4^{2-} kontsentratsioonidega võib viia kipsi ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$) väljasettimiseni (Puura ja Pihlak, 1998):

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \leftrightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \ (\boldsymbol{R6})$$

See reaktsioon on oluline suurema püriidi oksüdatsiooni kiiruse juures (Puura jt, 1999). Puhverdatud neutraalse pH tingimustes toimub ka varem settinud K-jarosiidi inkongruentne lahustumine, mille tulemusel tekivad raua hüdroksiidid ja vabanevad H^+ ioonid:

$$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 3H_2O \rightarrow 3Fe(OH)_3(s) + K^+ + 2SO_4^{2-} + 3H^+ \ (\boldsymbol{R7})$$

Kirjeldatud protsesside tulemusena moodustub puistangutes vesi, mida iseloomustab neutraalne või kergelt aluseline reaktsioon (pH 7–8.5), väga suur SO_4^{2-} kontsentratsioon (1–10 g/L) ja suured Mg/Ca suhte väärtused (1–4) (Puura ja Pihlak, 1998). Mg/Ca suhte kasv tuleneb sellest, et

erinevalt Ca-sulfaatidest on Mg-sulfaatide lahustuvus palju suurem, mistõttu need jäävad alaküllastunuks isegi kõige intensiivsema püriidi oksüdatsiooni juures (Puura, 1998). Eelnevat kontseptuaalset mudelit kinnitavateks tõenditeks on puistangumaterjali pindadelt leitud sekundaarsed mineraalid K-jarosiit, raua hüdroksiidid, kips ja savimineraalid (illliit-smektiit) (Puura, 1998; Puura jt, 1999), mis on tüüpilised happelistele kivimitele ja happelistele leostumistingimustele. Lubjakivide pinna kattumine sekundaarsete mineraalidega vähendab nende puhverdavat potentsiaali. Puura jt, (1999) tuvastasid mineraloogiliste uuringute käigus, et osade 10–40 cm diameetriga lubjakivitükkide puhverdusvõime oli sekundaarsete mineraalide toimel vähenenud algsega võrreldes isegi 1 kuni 5%-ni. Seetõttu ei saa välistada puistangutes esineva lubjakivi puhverdusvõime vähenemist ajas ning võimalust, et raskemetallid (U, Mo, V, Pb, Zn, Cu) mida graptoliitargilliidis leidub anomaalselt suurtes kogustes, võivad ühel hetkel vee happelisuse kasvades mobiilseks muutuda (Puura, 1998). Uuringualalt seni määratud raskemetallide kontsentratsioonid on palju väiksemad nende sisaldustest graptoliitargilliidis (Puura, 1998).

Argilliidi kuumenemise mõju vee kvaliteedile Maardu karjääride piirkonnas on väike, kuid nende mõjul võib lokaalselt esineda väga suuri Mg^{2+}, K^{+} ja SO_4^{2-} kontsentratsioone, mis pärinevad põlemisel tekkinud sulfaatide lahustumisest (Puura, 1998). Kuumenemisest mõjutatud piirkondades toimub kõrgetemperatuurilisel püriidi oksüdatsioonil tekkiva happelisuse neutraliseerimine ja protsessi käigus tekivad mitmed sekundaarsed mineraalid (nt. hematiit, korderiit ja lepidokrokiit). Erinevalt madalatemperatuurilisel püriidi oksüdatsioonil tekkivatest mineraalidest ei muuda nende mineraalide lahustumine vee reaktsiooni happelisemaks (Puura, 1998). Jahtunud kuumenemiskolded võivad aga olla soodsad raskemetallide (nt. U, Mo, V) leostumisalad, sest orgaanilise aine oksüdeerumisel vabanevad need orgaanilise aine pinnalt ning muutuvad migreeruvaks (Puura, 1998; Reinsalu, 2011). Kõige soodsamad tingimused raskemetallide leostumiseks on eeldatavalt juhtudel, kus madalatemperatuurilisel püriidi oksüdatsioonil tekkinud happeline vesi liigub läbi jahtunud kuumenemiskollete. Soodsad tingimused raskemetallide leostumiseks tekivad ka temperatuurivahemikus 40–100°C, kus püriidi

ja orgaanilise aine oksüdatsioon saab toimuda samaaegselt ja raskemetallide vabanemine argilliidist võib olla väga kiire (Puura ja Pihlak, 1998).

Geokeemilise modelleerimise tulemusena koostatud prognooside järgi jätkub püriidi oksüdatsioon puistangualadel veel mitmesaja aasta vältel (400–1000 aastat; Puura ja Pihlak, 1998; Puura jt, 1999). Prognooside kohaselt on kõrgem potentsiaal pikaajaliste keskkonnaprobleemide püsimiseks nendel aladel, kus rakendati alates 1982. aastast selektiivset puistangumaterjali ladustamist. Sellistes tingimustes tekivad maapinnalähedases argilliiti katvas kihindis esimeste aastakümnetega aeroobsed tingimused ning seal oksüdeerub 95% seal leiduvast püriidist. Pealmise katendi all olevas argilliidi kihis on pH tugevalt happeline ning seal esineb kipsi väljasettimist. Pikas perspektiivis kujunevad kogu puistangu ulatuses aeroobsed tingimused 300–400 aastaga. Umbes 100–200 aasta jooksul muutub läbi puistangu infiltreeruva vee pH tugevalt happeliseks, sest argiliidi kihi alla ladustatud lubjakivi puhverdusvõime ammendub. Samal ajal ei saa argilliidi kohale ladustatud karbonaatsed mineraalid osaleda argilliidi kihis moodustuva happelisuse neutraliseerimises. Aladel, kus puistangumaterjal koosneb fosforiidi katendi mitteselektiivsest segust (ladustatud enne 1982. aastat) on esimestel aastakümnetel püriidi oksüdatsioonist mõjutatud vaid maapinnalähedane 2–4 m paksune kiht ning sellel protsessil tekkiva happelisuse mõjul toimuva kaltsiidi lahustumisega kaasneb kipsi väljasettimine. Pikas perspektiivis (200–300) aastat oksüdeeritakse 90% puistangutes olevast püriidist ning valdvaks saavad aeroobsed tingimused. Läbi puistangute leostuva vee pH väärtused tõusevad neutraalseni ja maapinnalähedases kihis (kuni 2 m) on toimunud kipsi lahustumine infiltreeruva vee toimel. Lõunakarjääris pärsib püriidi oksüdatsiooniprotsesse kõrge veetase. Pikaajalise saaste oht valitseb karjääride kõige põhjapoolsemas osas, kus lubjakivi kiht on kõige õhem. Koos püriidi oksüdatsiooni frondi liikumisega sügavamale puistangutesse püriidi oksüdatsioon aeglustub, sest aeglustub protsessi kontrolliv hapniku difusiivne transport. Selle tulemusena peaks vähenema nõrgvee SO_4^{2-} kontsentratsioon ja Mg/Ca suhe. Mg/Ca suhte väärtuste järgi on võimalik hinnata püriidi oksüdeerumise kiiruse muutust ajas, sest see on seotud 1 kg vee poolt oksüdeeritud püriidi kogusega moolides (Puura, 1998; Puura jt, 1999). Esimesel paarikümnel aastal on umbes 60–80% püriidi oksüdatsioonil vabanenud SO_4^{2-} fikseeritud

puistangumaterjali väljasettinud kipsina. Hiljem umbes paarisaja aasta pärast hakkab tekkinud kips lahustuma ning sulfaadi kontsentratsiooni hakkab kontrollima kipsi lahustuvus. Nõrgvee SO_4^{2-} kontsentratsioonid saavad langeda alla 1200 mg/L vaid juhul, kui kogu kips on lahustunud. Olulisem küsimus tulevikuks on see, kas puistangutes leiduva lubjakivi kogus on piisav, et puhverdada püriidi oksüdatsiooniga kaasnevat happelisust vees. Kui lubjakivide puhverdusvõime peaks vähenema (kas lahustumise või nende pinda katvate sekundaarsete mineraalide toimel), kaasneb sellega kiire pH langus ning sellega rööpne Al, Fe ja raskemetallide kontsentratsioonide kasv puistangutes tsirkuleerivas vees. Praegusel hetkel on Maardu karjääride ala veel varases aktiivse oksüdatsiooni staadiumis (Puura ja Pihlak, 1998).

Vastavalt AS Mavese poolt 2012. aastal läbi viidud inventariseerimisele loetakse nii Maardu põhja- kui ka lõunakarjäär B-kategooria (kaevandamis)jäätmehoidlateks (Tamm ja Ideon, 2012). B-kategooria määramine tähendab, et jäätmehoidlal ei esine järgmisi asjaolusid: jäätmehoidla praegust või tulevast suurust, asukohta ja keskkonnamõju arvesse võttev analüüs näitab, et rike, näiteks puistangu varing või tammi purunemine, või väär käitamine võib põhjustada suurõnnetuse; jäätmehoidlas on ohtlikeks jäätmeteks klassifitseeritud jäätmeid üle teatava piiri; jäätmehoidlas on kemikaaliseaduse kohaselt ohtlikeks aineteks või valmistiteks klassifitseeritud aineid või valmistisi üle teatava piiri (komisjoni otsus 2009/337/EÜ). Maardu karjääridega seostuvate peamiste ohuallikatena mainitakse kuumenemisohtu, järske 30–60 kraadise kaldega kaevikute nõlvu ning karjääride puistanguis esineva ca 70 miljoni tonni potentsiaalselt keskkonnaohtliku graptoliitargilliidi esinemist (Tamm ja Ideon, 2011).

3. Materjal ja metoodika

Välitöid põhja- ja pinnavee seireks Maardu tehnogeense ala 10 mõõtepunktis teostati kord kvartalis kokku viiel korral kogu uuringuperioodi jooksul novembrist 2016 kuni oktoobrini 2017 (Joonis 4, 5; Tabel 1). Kasutatud mõõtmispunktid kattuvad eelmises Maardu tehnogeense ala vee kvaliteedi uuringus kasutatud mõõtepunktidega nr. 1-10 (Tabel 1; Mäeinstituut, 2013; Kolats, 2015). Kõigis mõõtepunktides määrati kohapeal vee põhiparameetrid (pH, elektrijuhtivus, temperatuur, lahutunud hapniku sisaldus) Hach HQ40d^{TM} portatiivse mõõturiga. Lisaks mõõdeti kohapeal veetasemete kõrgus eelnevalt paika pandud reeperpunktide suhtes ning määrati vee vooluhulk ja liikumissuund vooluveekogudes. Vooluhulga mõõtmiseks kasutati mõõteseadet Universal Current Meter ja vooluhulk arvutati valemist:

$$Q = K \cdot S \cdot k \cdot n$$

kus

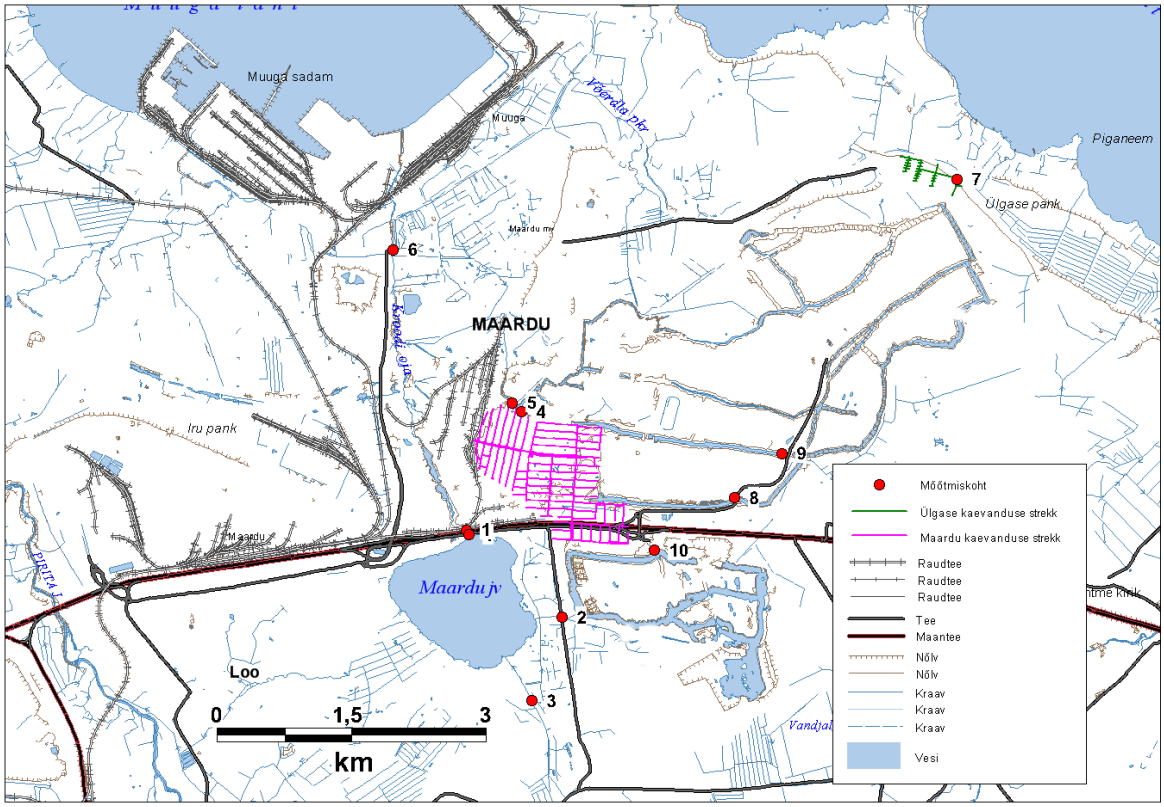
n – tiiviku pöörlemiskiirus (1/s);

k – tiivikut iseloomustav konstant (0,30 m);

S – voolusängi ristlõike pindala (m^2);

K – kallast iseloomustav tegur: järsk kallas või ebatasane sein K=0,8 (mõõtepunktid 4 ja 6); sile betoonsein K=0,9 (mõõtepunktid 3 ja 5).

Tuleb tähele panna, et antud valem võimaldab hinnata vooluveekogude madalaimat võimalikku vooluhulka. Mõõtmispunktis nr. 7 ei olnud võimalik mõõta vooluhulka eelpool kirjeldatud meetodiga ja see määrati mõõtes mahumeetodil ämbri täitumise kiirust. Välitööde käigus määrati lisaks kiirgusfoon igas mõõtepunktis portatiivse seadmega Pakri-E.



Joonis 4. Uuringus kasutatud mõõtepunktide paiknemine Maardu fosforiidilevila alal. (Mäeinstituut, 2013 järgi)

Joonis 5. Ülevaatlikud fotod uuringus kasutatud mõõtepunktidest. Fotol olev tähis vastab mõõtepunkti numbrile tabelis 1. Fotode kuupäevad: P1 – 21.08.2017; P2 – 10.10.2017; P3 – 21.08.2107; P4 – 21.08.2017; P5 – 10.10.2017; P6 – 16.05.2017; P7 – 10.10.2017; P8 – 10.10.2017; P9 – 10.10.2017; P10 – 16.05.2017. (Autor: Jüri Ivask)

Kord kvartalis võeti kõigis 10 punktis proovid vee keemilise koostise analüüsimiseks TTÜ Geoloogia instituudile kuuluva välilaboratooriumiga HACH DREL2800 (NH_4^+, $N_{üld}$, $P_{üld}$, SO_4^{2-}, Fe(tot), NO_3^-, NO_2^-; Hach Company, 2017). Ülejäänud parameetrid ja vees lahustunud ained, mille väärtusi ja kontsentratsioone välilaboratooriumiga mõõta ei saa (hõljuvained, KHT_{Mn}, BHT_7, PO_4^{3-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, K^+, Na^+, F^- leelisus, kuivjääk ja üldkaredus) määrati Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laboris. Lisaks võeti 2016. aasta IV kvartalis ja 2017. aasta III kvartalis proove vees lahustunud raskemetallide (As, Ba, B, Hg, F, Cr, Mn, Pb, Cd, Mo, Zn, Ni, Cu, V, U), fenoolide (1- ja 2-aluselised) ja naftasaaduste kontsentratsioonide määramiseks. Kontsentratsioonid määrati Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laboris.

Tabel 1. Uuringus kasutatud mõõtepunktide kirjeldus.

Punkti nr	Asukoht	L-EST97 koordinaat X	L-EST97 koordinaat Y	Märkus
P1	Maardu järv enne väljavoolu Kroodi ojja	6590832.522	556538.644	Seisev vesi
P2	Maardu lõunakarjääri väljavool	6589910.213	557583.666	Voolav vesi
P3	Sissevool Maardu järve lõunast	6588969.131	557247.025	Voolav vesi
P4	Väljavool Maardu kaevanduse käigust	6592206.282	557132.278	Voolav vesi
P5	Maardu põhjakarjääri ja kaevanduse väljavool	6592313.099	557031.253	Voolav vesi
P6	Kroodi oja enne suubumist merre	6594012.431	555694.658	Voolav vesi
P7	Ülgase kaevanduse väljavool veekõrvaldusstollist	6594816.400	561998.000	Voolav vesi
P8	Põhjakarjääri kaevik	6591243.047	559513.763	Seisev vesi
P9	Põhjakarjääri kaevik	6591734.905	560052.080	Seisev vesi
P10	Lõunakarjääri kaevik	6590648.837	558609.759	Seisev vesi

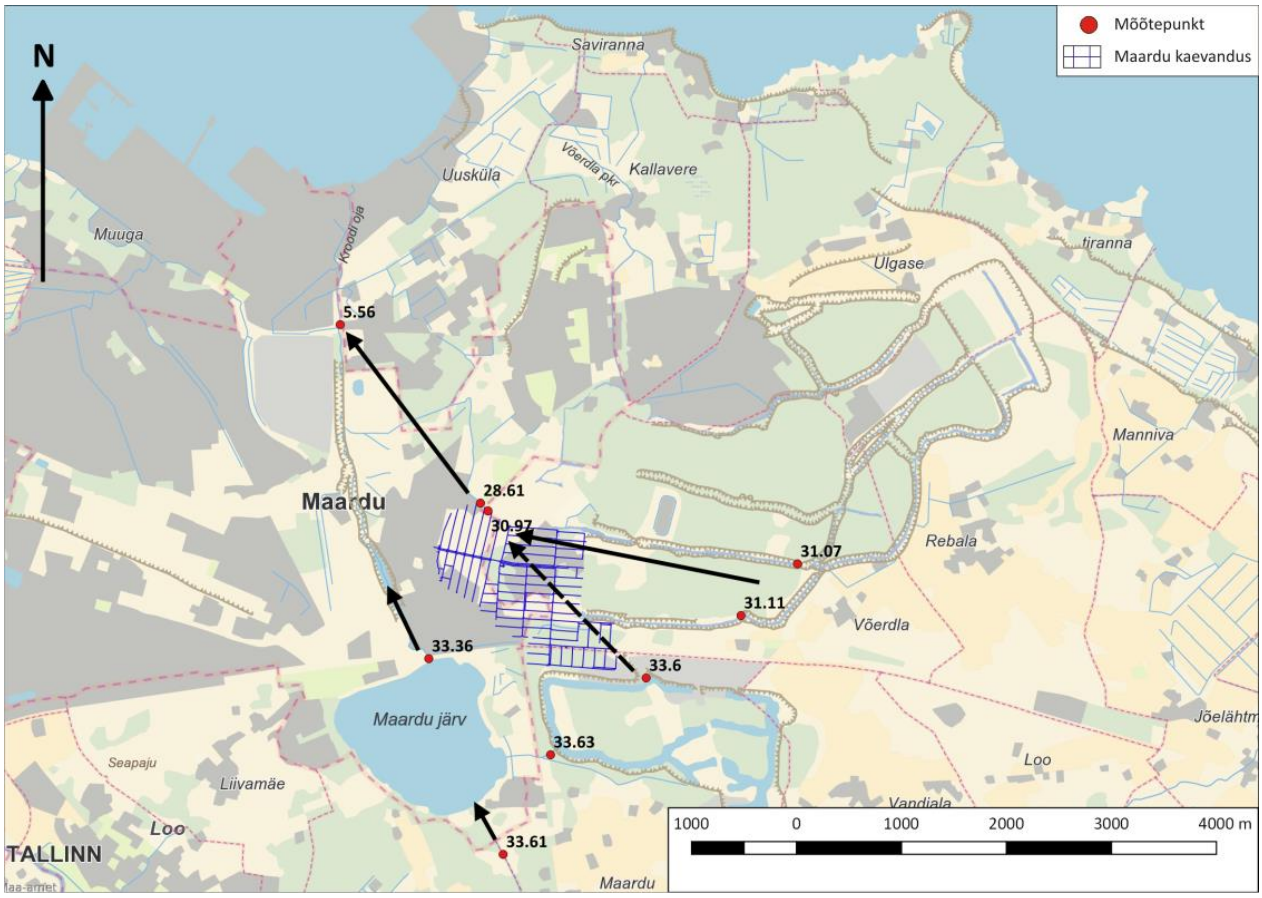
Perioodil 12.09.2017–05.10.2017 korraldati lisaks viis välitööd Maardu lõuna- ja põhjakarjääride põhjareljeefi ja sügavuse kaardistamiseks ning voolusängide ruumala määramiseks.

Karjäärijärvede sügavuse määramiseks ja põhjasetete olemasolu kontrolliks kasutati Maardus esmakordselt Pinger tüüpi profilograafi sagedusega 24kHz. Voolusängi kuju ning põhjareljeefi detailseks kaardistamiseks kasutati külgvaatega sonarit Sontec Sidescan sagedusega 900 kHz. Asukoha määramiseks kasutati Leica RTK-GPS seadet. Reaalsete sügavusväärtuste andmisel kombineeriti 24 kHz profilograafi ja külgvaatega Sonari andmed Meridata programmides MDCS ja MDPS. Reaalsed sügavused määrati samasügavusega polügoonide loomise teel, millele igal ühele anti kõrgusväärtus. Selleks kasutati MapInfo tarkvara. Vee ruumala saadi polügooni pindala ja kõrgusväärtuse korrutise tulemusena. Hiljem summeeriti kõikide polügoonide ruumalad. Mõlema sonariga kaardistati täielikult Maardu lõunakarjäär. Maardu põhjakarjäärist oli vastava metoodikaga võimalik kaardistada lõunapoolsed sügavamad karjäärijärved. Põhjakarjääri põhjapoolsemas osas takistas sonarimõõdistusi madalas vees leviv taimestik. Selles piirkonnas rakendati ühel näidisalal põhja sügavuse käsitsi mõõdistamist ja madalamates karjäärijärvedes oleva vee mahtude arvutamiseks üldistati sealsed tulemused kogu põhjakarjääri põhjaosale. Vastava lihtsustusega kaasnev viga arvutatud vee mahtudes on hinnanguliselt ±20%. Lõunakarjääris ja põhjakarjääri osades, mis said täielikult profilograafi ja külgvaatega sonariga kaardistatud on arvutatud ruumalade hinnanguline täpsus ±10%. Kasutatud metoodika eripärast tulenevalt on ruumalad esitatud vea piires pigem üle hinnatud.

4. Tulemused ja arutelu

4.1 Veetasemed, vooluhulgad, veekogude ruumala ja vete dünaamika uuringualal

Veetasemete absoluutkõrgused seiratud mõõtepunktides on esitatud Tabelis 2. Kõrgemad veetasemed iseloomustavad uuringuala lõunaosa ja seostuvad Maardu lõunakarjääri ja selle ümbrusega. Madalamad veetasemed esinevad uuritud ala põhja- ja loodeosas (Joonis 6).



Joonis 6. Seireperioodi keskmised veetasemed mõõtepunktides (m. ü.m.p; Tabel 2) ja iseloomulikud vee liikumise suunad (mustad nooled) Maardu tehnogeensel alal.

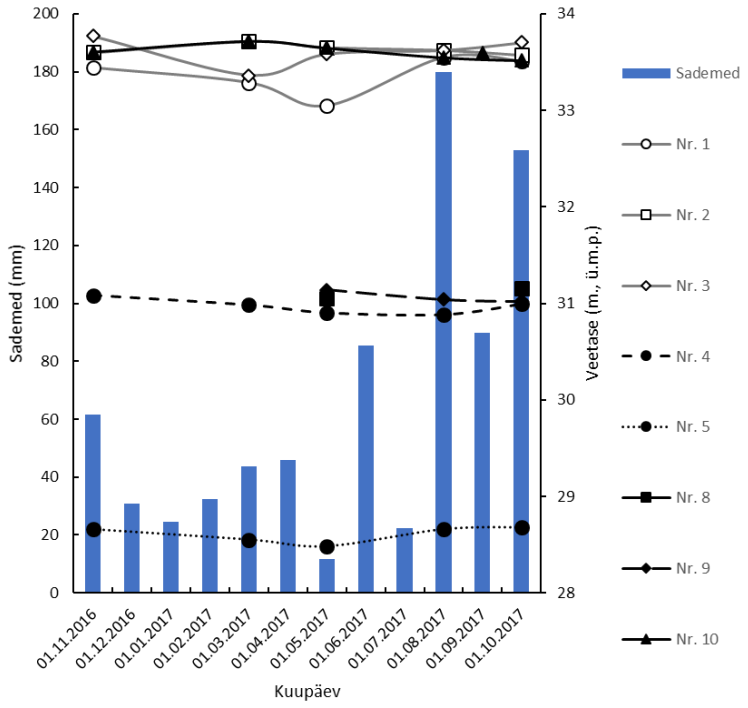
Maardu karjääri kaevikutesse kujunenud karjäärijärvede (mõõtepunktid nr. 8–10) veetase oli vaatlusperioodi vältel stabiilne varieerudes vaid ~20 cm ulatuses (Tabel 2). Karjäärijärvede veetasemete seos sademete hulga muutusega on nõrk (Joonis 7). Sademete hulga iseloomustamiseks kasutati sarnaselt eelmisele uuringule (Mäeinstituut, 2013) Maardu tehnogeensele alale lähima meteoroloogiajaama Tallinn-Harku andmeid, mis paikneb

uuringualast umbes 25 km kaugusel. Väikesed veetasemete muutused karjäärijärvedes viitavad põhjavee olulisusele karjäärijärvede veebilansis, sest järvi toitev pindmiste vooluvete hulk karjääride alal puudub. Viiteid allikate olemasolule karjäärijärvede põhjas leiti ka teostatud sonarimõõdistamise käigus. Lisaks näitab veetasemete stabiilsus vee efektiivset äravoolu karjäärijärvedest. Tuleb tähele panna, et käesolevas uuringus on põhjakarjääri veetasemete vaatlusrida lühem, kui eelmises uuringus (Mäeinstituut, 2013) ja seetõttu ei saa välistada veetaseme tegelikku suuremat varieeruvust põhjakarjääri järvedes nagu varasem uuring on tuvastanud (kuni ~65 cm). Põhjakarjääri järvede veetasemete ja väljavoolu veetasemete (mõõtepunktid 4 ja 5) võrdlus näitab selge hüdraulilise gradiendi olemasolu lääne suunas (Tabel 2; Joonis 6). Seda kinnitab ka märkimisväärne mõõdetud vooluhulk nii Maardu kaevanduse kui põhjakarjääri väljavoolude juures (Tabel 3). Maardu kaevanduse Lõunakarjääri väljavoolu ja lõunakarjääri järvede (mõõtepunktid nr. 2 ja 10) veetasemete vaheline erinevus on väga väike (~1 kuni 8 cm) ja sellest tulenevalt on väike ka väljavoolus esinev vooluhulk ning aastaaegade lõikes vee voolusuunad muutuvad (Tabel 2, 3). 2016. ja 2017. aasta IV kvartalis tuvastati vaatlustel nõrk vool ümbritsevalt alalt lõunakarjääri suunas. Kuna lõunakarjääri loodeosa külgneb Maardu kaevanduse käikudega (Joonis 6) ning hüdrauliline gradient lõunakarjäärist Maardu kaevanduse väljavoolu suunas on oluliselt suurem kui karjäärijärve ja selle väljavoolu vahel (~2,6 m/2,2 km ehk 1,2 m/km) saab nõustuda eelmises uuringus (Mäeinstituut, 2013) tehtud järeldusega, et peamine vee väljavool lõunakarjäärist toimub läbi Maardu kaevanduse.

Tabel 2. Veetasemete absoluutkõrgused mõõtepunktides seireperioodil. Veeru number tähistab mõõtepunkti numbrit Tabelis 1.

	Veetase mõõtepunktis (m)								
Kuupäev	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**9**	**10**
2016-11-20	33.44	33.60	33.77	31.08	28.66	5.72			33.61
2017-03-16	33.29	33.72	33.36	30.98	28.55	5.50			33.72
2017-05-16	33.05	33.66	33.58	30.90	28.48	5.50	31.05	31.14	33.65
2017-08-21	33.55	33.63	33.62	30.88	28.66	5.50		31.04	33.55
2017-09-12									33.59
2017-10-05							31.16		
2017-10-10	33.51	33.58	33.70	30.99	28.68	5.61		31.02	33.52
Keskmine	*33.36*	*33.63*	*33.61*	*30.97*	*28.61*	*5.56*	*31.11*	*31.07*	*33.60*

Maardu tehnogeense alaga külgnevate pinnaveekogude veetasemete sõltuvus sademete hulgast on oluliselt suurem kui Maardu karjäärijärvedel ja nende väljavooludel (Tabel 2, Joonis 7). Kõige suuremad veetaseme kõikumised seireperioodil esinesid Maardu järves (~50 cm; mõõtepunkt nr. 1) ja Maardu järve lõunast sissevoolavas ojas (~41 cm; mõõtepunkt nr. 3). Kroodi oja veetase varieerus seireperioodil ~22 cm ulatuses, mis viitab suuremale püsivoolu osakaalule selles vooluveekogus. Peamised vee voolusuunad (Joonis 6) uuringualal kulgevad mõõdetud põhjaveetasemete alusel põhjakarjäärist läänesuunas Kroodi ojja trajektooril mõõtepunkt 8/9-4-5-6 ning lõunakarjäärist läbi Maardu kaevanduse käikude loodesse, kus see seguneb põhjakarjäärist väljavoolava veega (trajektooril mõõtepunkt 10-4-5; Joonis 6). Väljaspool Maardu fosforiidilevila ala kulgeb pinnavee liikumine Maardu järve valgalalt (mõõtepunkt nr. 3) läbi järve (mõõtepunkt nr. 1) põhja suunas Kroodi ojja (mõõtepunkt nr. 6). Kroodi oja on seega vooluveekoguks, kuhu voolab kokku Maardu kaevandamisalalt lähtuv pinnaveereostus, kuigi vete segunemisel nende mineraalsus enne Kroodi ojja jõudmist oluliselt langeb (vt. peatükk 4.2).



Joonis 7. Veetasemete muutus Maardu tehnogeensel alal ja selle seos sademete hulgaga vaatlusperioodil november 2016–oktoober 2017 (Keskkonnaagentuur, 2017; Ilmateenistus, 2017). Numbrid joonise legendis vastavad mõõtepunkti numbritele tabelis 1 ja 2.

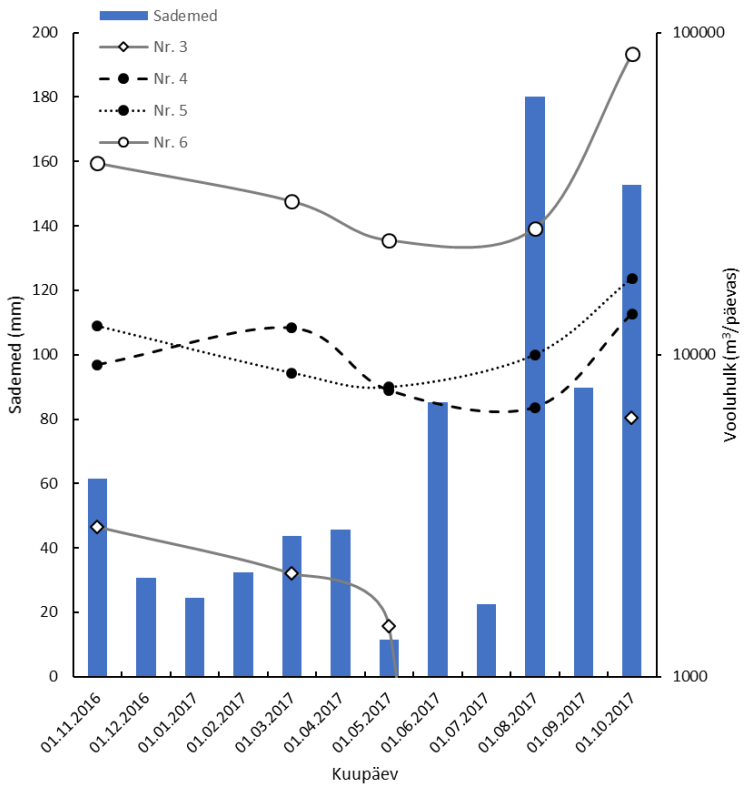
Antud uuringu käigus mõõdetud vooluhulgad Maardu tehnogeensel alal on esitatud Tabelis 3. Suurimad vooluhulgad iseloomustasid suuremaid hüdraulilisi gradiente põhjakarjääri järvede ning nende väljavoolu (mõõtepunktid nr. 4 , 5) ning Kroodi oja (mõõtepunkt nr. 6) vahel. Vooluhulgad lõunakarjääri ümbruses olid väikesed, mis on ootuspärane vaadates selle piirkonna pinnaveekogude veetasemete väikeseid erinevusi. Lõunakarjääri väljavoolus (mõõtepunkt nr. 2) olid vooluhulgad nii väikesed, et neid ei olnud võimalik käesolevas uuringus kasutatud metoodikaga mõõta ning seal sai hinnata vaid vee voolu suunda (Tabel 3). Märksa suuremad vooluhulgad iseloomustasid Maardu järve lõunast sisse voolavat oja (mõõtepunkt nr. 3). Väikeses mahus voolab vett välja ka vana Ülgase kaevanduse käigust (mõõtepunkt nr. 7), kuid vee voolusuund ning hulk ei mõjuta uuringuala teisi piirkondi. Vooluhulkade seos uuringuperioodi sademete hulgaga (Joonis 8) näitab, et suurimad vooluhulgad iseloomustavad kevadist

lumesulamise perioodi ning hilissuvist ja sügisest sademeterohkemat aega. Kevadel-suvel kui sademeid oli vähem ja evapotranspiratsioon on kõrgem, vooluveekogude vooluhulgad valdavalt langesid. Vooluhulkade muutused Maardu kaevanduse väljavoolus (mõõtepunkt nr. 4) toimusid teiste pinnaveekogudega võrreldes paarikuise viibega, mille tõenäoliseks põhjuseks on põhjavee suur osakaal kaevandusest välja voolavas vees. Et mõõtepunktis nr. 5, mis toitus lisaks kaevandusele ka Maardu põhjakarjäärist välja voolavast veest toimusid vooluhulkade muutused teiste vooluveekogudega samaaegselt kinnitab eelnevalt tehtud järeldust, et põhjakarjääri järvede veerežiim ning veetasemed reageerivad sademete hulga muutusele kiiresti ning väikesed aastasisesed veetasemete kõikumised on põhjustatud efektiivsest väljavoolust (Mäeinstituut, 2013).

Tabel 3. Maardu tehnogeense ala vooluveekogude vooluhulgad seireperioodil[1]. Veeru number tähistab mõõtepunkti numbrit Tabelis 1.

	Vooluhulk mõõtepunktis (m^3/päevas)					
Kuupäev	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
2016-11-20	*nõrk vool karjääri suunas*	2925	9309	12270	39322	43
2017-03-16		2090	12115	8786	29934	22
2017-05-16	*nõrk vool karjäärist välja*	1435	7749	7933	22638	32
2017-08-21	*väga nõrk vool karjäärist välja*	0	6857	9997	24701	15
2017-10-10	*nõrk vool karjääri suunas*	6359	13416	17263	85717	34
Keskmine		*2562*	*9889*	*11250*	*40462*	*29*

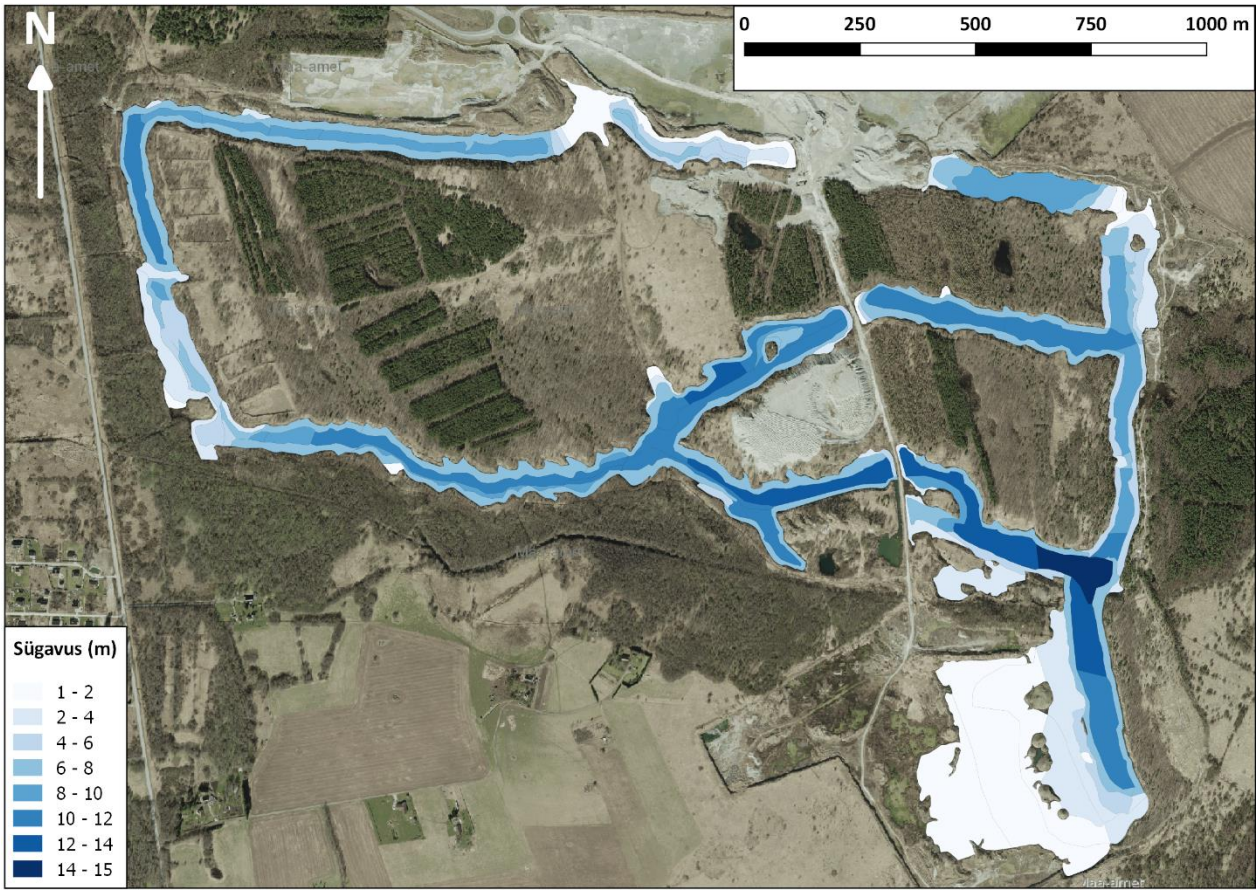
[1] Mõõtepunkti nr. 7 vooluhulk on väiksem võimalik hinnang.



Joonis 8. Mõõtepunktides mõõdetud vooluhulkade seos sademete hulga muutusega vaatlusperioodil november 2016–oktoober 2017 (Keskkonnaagentuur, 2017; Ilmateenistus, 2017). Vooluhulgad on esitatud logaritmilisel skaalal. Numbrid joonise legendis vastavad mõõtepunktide numbritele tabelis 1 ja 3.

Uuringu käigus kaardistati Maardu karjääride sügavused ja määrati Maardu põhja- ja lõunakarjääri järvede ruumala. Maardu lõunakarjääri järvede sügavus varieerub 0,7 meetrist kuni 16,5 meetrini ja karjäärijärvede keskmine sügavus lõunakarjääris on 7,6 meetrit (Joonis 9). Karjäärijärvede põhi on valdavalt tasane ja järskude kohati püstloodis kallastega (Lisa 1: Joonis 18, 19). Kaldanõlvade jalamil esinesid kõikjal rusukalded. Madalamad kohad paiknevad lõunakarjääri lõuna- ja põhjaosas. Viimati nimetatud piirkonnas on karjäärijärve põhjareljeefi mõjutanud selle põhjakaldal paiknev ehituslubjakivi karjäär, ja sellele alale on iseloomulik veekogu madalam keskmine sügavus ja järve põhjareljeefi mitmekesisus. Maardu põhjakarjääris oli sonarimõõtmisi võimalik läbi viia ainult sügavamates tranšeedes, kus veetaimestik ei ulatunud veepinnani (Joonis 10). Nendes tranšeedes jäi karjäärijärvede sügavus vahemikku 0,8 kuni 7,7 meetrit ja keskmine sügavus oli 4,3 meetrit. Suuremad sügavused esinesid põhjakarjääri lõunaosas ning

karjäärijärvede sügavus vähenes põhja suunas. Madalamate karjäärijärvede sügavuse hindamiseks, kus käesolevas uuringus kasutatud metoodika ei olnud rakendatav, mõõdeti karjäärijärve sügavus käsitsi mõõtelatiga ühel katselõigul (joonis 10) ning saadud tulemused ekstrapoleeriti ülejäänud mõõdistamata põhjakarjääri alal paiknevate karjäärijärvede ruumala hindamiseks. Nimetatud katselõigul varieerus karjäärijärve sügavus selle keskteljel 1,2 meetrist kuni 3,4 meetrini ja lõigu keskmine sügavus oli 2,6 meetrit. Profilograafi- ja sonariandemete analüüsimisel selgus, et mõlema karjääri järvede sügavamad osad on suures osas kaetud kuni 30 cm paksuse settekihiga. Kontrolliks teostatud sondeerimistööde käigus tuvastati nii lõuna- kui põhjakarjääri järvede põhjas kuni paarikümne sentimeetri paksune settekiht. Willner tüüpi proovivõtja abil tehti kindlaks, et tegemist on musta värvuse ja ebameeldiva lõhnaga mudaga, mis on mõneti sarnane Maardu järves kaevandusvete mõjul kujunenud järvemudale (Heinsalu, 1996).

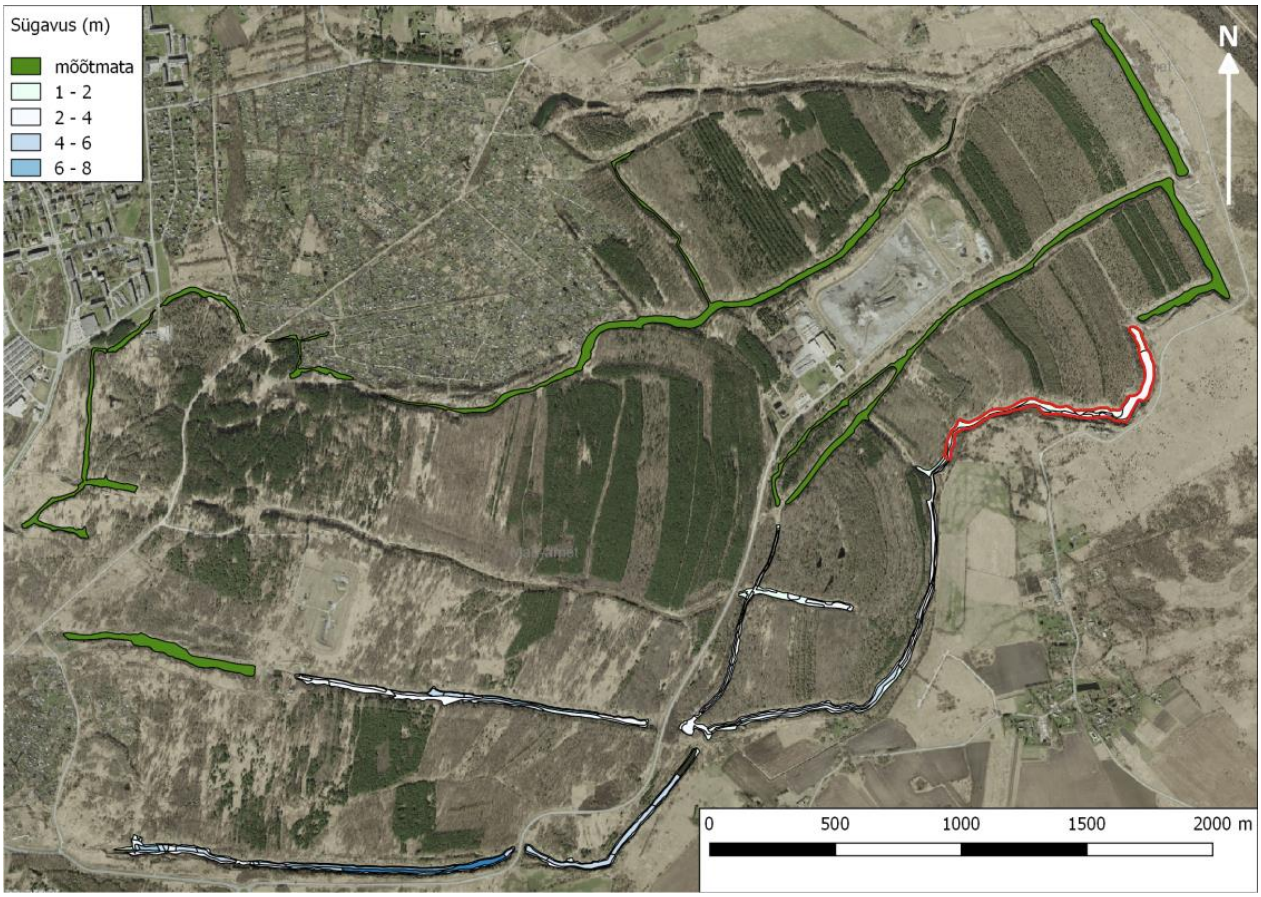


Joonis 9. Maardu lõunakarjääri järvede sügavused september 2017 seisuga. (aluskaart: Maa-amet, 2017).

Vastavalt mõõdistatud sügavustele hinnati lõuna- ja põhjakarjääri järvede ruumalad (Tabel 4). Ülejäänud Maardu tehnogeense ala pinnaveekogudes (Maardu järv, Kroodi oja) ja kaevandustes (Ülgase kaevandus, Maardu kaevandus) oleva vee mahtude esitamisel lähtutakse uuringu eelmise etapi aruandes antud hinnangutest (Mäeinstituut, 2013). Karjäärijärvede ruumala arvutamiseks jagati sonariga mõõdistatud alal järved vastavalt sonaripildile ja põhjareljeefi iseärasustele iseloomulikeks sarnase sügavusega piirkondadeks, mille ruumala arvutati vastava piirkonna pindala ja selle keskmise sügavuse järgi. Karjäärijärvede koguruumala arvutati selliste väiksemate piirkondade summana. Enamasti eristati karjäärijärvede piirkondadeks jagamisel nende tasase reljeefiga sügavamat keskosa ja rusukalletest ning muudest kalda iseärasustest mõjutatud nõlvaosa. Mitmekesisema põhjareljeefiga aladel oli piirkondadeks jagamine tihedam ja lähtus vastava ala põhjareljeefi muutlikkusest. Eelnevale kirjeldusele vastavalt hinnati lõunakarjääri järvedes oleva vee mahuks 4,4 milj. m^3, mis on 59% võrra vähem kui eelnevas uuringus (Mäeinstituut, 2013) antud hinnang 7,3 milj. m^3. Kahe uuringu poolt saadud hinnangute erinevused tulenevalt sellest, et eelmises uuringus ei kaardistatud lõunakarjääri sügavusi kogu lõunakarjääri ulatuses ning alal levivate karjäärijärvede keskmiseks sügavuseks loeti 11 meetrit, mis on oluliselt suurem kui käesolevas uuringus leitud keskmine sügavus 7,6 meetrit. Põhjakarjääri alal levivate karjäärijärvede ruumala hinnati sarnaselt lõunakarjääriga aladel, kus oli võimalik läbi viia sonarimõõtmisi. Madalamate karjäärijärvede ruumala, kus sonarimõõtmisi läbi viia polnud võimalik, hinnati vastavalt põhjakarjääri katselõigul toimunud käsitsi mõõdistamise tulemustele võttes arvesse nii saadud keskmist, maksimaalset kui ka minimaalset sügavust. Kahe meetodi kombineerimisel hinnati Põhjakarjääri alal paiknevate karjäärijärvede vee mahuks 1,4±0,25 milj. m^3, kus esitatud viga kirjeldab vee mahu erinevusi hinnangute vahel, kus mõõdistamata järvede sügavusena kasutati keskmist (2,6 meetrit) maksimaalset (3,4 meetrit) või minimaalset (1,2 meetrit) katselõigul mõõdetud sügavust. Antud hinnang langeb esitatud vea piirides kokku eelmises uuringus esitatud hinnanguga 1,6 milj. m^3 (Mäeinstituut, 2013).

Tabel 4. Veekogude ruumala Maardu fosforiidilevila alal ning seda ümbritsevates pinnaveekogudes.

Uuritud ala	**Väikseim sügavus**	**Suurim sügavus**	**Keskmine sügavus**	**Pindala**	**Ruumala**	**Viide**
	m			m^2	m^3	
Põhjakarjäär	0.8	7.7	4.3	228048	1394000 ± 255000	
Lõunakarjäär	0.7	16.5	7.6	640565	4343600	
Maardu kaevandus			1.3–1.6		1267700	Mäeinstituut, 2013
Ülgase kaevandus			0.2	1000	200	Mäeinstituut, 2013
Maardu järv					2368500	Mäeinstituut, 2013
Kroodi oja			1.2-2.4		79600	Mäeinstituut, 2013



Joonis 10. Maardu põhjakarjääri järvede sügavused septembri-oktoobri 2017 seisuga. Punasega on tähistatud katselõik, kus järve sügavused määrati käsitsi. (aluskaart: Maa-amet, 2017)

4.2 Vee keemiline koostis ja selle kujunemine

Uuringu käigus kogutud andmed Maardu fosforiidilevila ala ja sellega piirnevate pinnaveekogude keemilisest koostisest on esitatud Tabelites 5 ja 6 ning veekogu seisundi hindamiseks kasutatud füüsikalis-keemiliste parameetrite väärtused Tabelis 7. Järgnevas arutelus on Maardu tehnogeense ala veed jaotatud kahte gruppi. Esimese grupi moodustavad veed, mis paiknevad fosforiidi kaevandamisega seotud Maardu fosforiidilevila aladel (edaspidi „Maardu fosforiidilevila ala“) - Maardu kaevandusest ja põhjakarjäärist väljavoolavad veed (mõõtepunktid nr. 4 ja 5), Ülgase kaevanduse käigus olev vesi (mõõtepunkt nr. 7) ja Maardu karjääride kaevikutes kujunenud karjäärijärvede veed (mõõtepunktid nr. 8–10). Teise grupi (edaspidi „ümbritsevad pinnaveekogud“) moodustavad Maardu lõunakarjääri väljavool (mõõtepunktid nr. 2), Maardu järve lõunast sisse voolav oja (mõõtepunkt nr. 3), Maardu järv (mõõtepunkt nr. 1) ja Kroodi oja (mõõtepunkt nr. 6).

Tabel 5. Maardu tehnogeense ala vete põhiparameetrid ja keemiline koostis. Number tähistab mõõtepunkt numbrit tabelis 1.

Nr	Kuupäev	Temp.	pH	S	O_2	Hõljum	Kuivjääk	Üld-karedus	BHT_7	KHT_{Mn}	$P_{üld}$	$N_{üld}$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Fe (tot)	NH_4^+	leelisus	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	NO_2^-	PO_4^{3-}-P	F^-	Veetüüp
		(°C)		*µS/cm*	*mg/L*			*mg-ekv/L*	*mgO/L*		*mg/L*								*mg-ekv/L*	*mg/L*							
1	2016-11-20	1.0	8.8	522	14.2	20	350	4.8	11	18	0.066	3.08	59	23	4.2	6	<0,02	<0,015	1.98	121	9.4	83	0.1	<0,002	0.03	0.38	CaMg-HCO_3SO_4
	2017-03-16	3.4	7.7	606	7.43	6	200	2.4	5	6.2	<0,05	1.92	35	7.7	2.4	4.3	0.04	<0,015	1.60	98	7	48	0.7	0.002	<0,02	0.2	Ca-HCO_3SO_4
	2017-05-16	12.4	9.1	506	13.5	11	380	5	3.3	12	3.000	1.63	57	26	4.4	*5,6*	<0,02	0.065	1.97	120	9.2	134	1.3	<0,002	<0,02	0.43	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-08-21	19.3	8.2	478	8.28	<2	350	4.6	1.3	11	1.450	1.02	52	25	4.4	7.3	0.07	0.101	2.50	153	10	106	0.4	0.008	<0,02	0.42	CaMg-HCO_3SO_4
	2017-10-10	8.8	7.9	464	10.3	8	320	4.3	2	9.6	<0,05	1.73	47	24	3.7	6.3	<0,02	0.020	1.50	92	8.4	104	1.8	<0,002	<0,02	0.36	CaMg-SO_4HCO_3
2	2016-11-20	2.7	7.6	453	8.14	2	330	4.77	1.3	24	0.162	4.11	73	14	2.3	4.6	0.05	0.056	3.60	220	8.3	48	1.2	0.014	0.20	0.59	Ca- HCO_3
	2017-03-16	1.6	7.5	1355	10.4	4	1200	14	1.3	3.4	<0,05	<1	92	120	7.9	9.1	0.06	0.066	3.20	195	14	292	0.7	<0,002	<0,02	0.68	MgCa-SO_4HCO_3
	2017-05-16	11.9	8.1	1563	11.8	11	1400	19	2.7	4.6	0.060	<1	230	96	10	*11*	<0,02	0.087	3.28	200	17	474	0.6	<0,002	<0,02	0.88	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-08-21	16.2	7.1	1294	0.87	4	1100	16	7.3	9.2	0.175	1.02	210	67	11	13	0.31	<0,015	3.90	238	20	432	0.5	0.005	0.25	0.85	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-10-10	8.9	6.9	468	5.58	22	360	4.7	2	32	0.147	2.02	74	12	3.8	6.4	0.10	<0,015	3.70	226	7.1	42	0.9	<0,002	0.23	0.41	Ca- HCO_3
3	2016-11-20	4.5	7.7	628	8.62	2	1700	22.8	1.6	2.9	0.095	9.69	280	110	13	4.4	0.11	0.042	4.70	287	9.4	84	4.1	0.020	<0,02	1.9	CaMg- HCO_3
	2017-03-16	4.7	7.9	686	10.4	6	470	6.9	1.5	12	0.050	7.11	100	21	3.9	4	0.15	0.031	4.40	268	6.7	72	5.5	<0,002	0.06	0.24	Ca- HCO_3
	2017-05-16	10.2	7.9	764	11.3	11	520	8	2.5	8.4	<0,05	8.14	79	50	4.5	*4,6*	<0,02	<0,015	5.25	320	8.1	82	4.1	0.032	0.04	0.21	CaMg- HCO_3
	2017-08-21	12.9	7.4	846	5.97	2	580	9.2	1.2	6.4	0.055	3.66	140	25	5.4	7.2	0.24	<0,015	5.90	360	13	116	3.5	0.076	0.10	0.32	Ca- HCO_3SO_4
	2017-10-10	8.8	7.0	624	6.89	9	440	6.6	2.2	26	0.075	4.84	110	17	4.1	4.8	0.10	<0,015	4.50	275	5.9	52	4.3	0.036	0.10	0.31	Ca- HCO_3
4	2016-11-20	8.0	6.9	2880	2.90	5	3200	41.2	<1	1.6	<0,05	<1	430	240	24	13	0.93	0.074	5.62	343	39	112	0.1	<0,002	<0,02	1.7	CaMg-HCO_3SO_4
	2017-03-16	7.0	6.9	3020	2.75	5	3300	40	<1	1.7	<0,05	1.34	410	240	23	12	0.82	0.022	5.90	360	20	1010	0.7	<0,002	<0,02	1.3	CaMg- SO_4
	2017-05-16	8.1	6.8	3020	4.26	13	3000	41	1.8	2	<0,05	<1	430	230	24	*14*	1.20	0.073	5.90	360	21	1260	1.1	<0,002	<0,02	1.3	CaMg- SO_4
	2017-08-21	11.7	6.5	3110	2.77	3	3200	42	<1	2.1	0.064	<1	510	210	26	15	0.93	<0,015	5.80	354	22	1080	0.6	0.006	<0,02	1.6	CaMg- SO_4
	2017-10-10	9.9	6.5	2900	1.76	8	2900	38	<1	1.9	<0,05	<1	400	220	23	13	0.90	0.022	5.50	336	21	1083	0.2	<0,002	<0,02	1.5	CaMg- SO_4
5	2016-11-20	7.9	6.9	2830	5.38	8	3200	40.8	<1	1.9	<0,05	<1	430	240	24	14	0.82	<0,015	5.59	341	22	680	0.2	<0,002	<0,02	1.7	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-03-16	6.5	7.0	2960	4.69	8	3200	39	<1	2.3	<0,05	1.27	390	230	23	12	0.86	0.021	7.60	464	23	1030	0.7	<0,002	<0,02	1.3	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-05-16	8.1	6.8	2960	6.67	14	3000	41	1.2	2.6	<0,05	<1	420	240	23	*14*	0.93	<0,015	5.74	350	22	980	0.3	<0,002	<0,02	1.4	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-08-21	12.1	6.6	3050	4.26	4	3200	41	<1	2.1	<0,05	2.57	480	200	25	15	1.00	<0,015	5.80	354	22	1900	0.5	0.006	<0,02	1.6	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-10-10	9.8	6.5	2860	3.81	12	2900	37	<1	2.2		1.67	420	200	23	13	0.80		5.50	336	22	858	0.1	0.015	<0,02	1.4	CaMg-SO_4HCO_3

6	2016-11-20	4.8	7.7	1616	9.46	76	1500	18.1	3.4	11	0.455	4.1	220	87	15	28	1.09	0.024	4.18	255	45	490	1.0	0.025	0.12	1.7	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-03-16	4.6	7.9	1832	10.2	52	1500	19	2	7.2	0.076	5.51	110	160	14	25	1.20	0.035	5.00	305	52	370	1.3	<0,002	0.14	1.4	MgCa-SO_4HCO_3
	2017-05-16	12.2	8.0	1994	10.1	28	1800	23	3	8.2	0.063	3.98	270	110	15	*29*	1.40	1.760	4.92	300	44	420	0.6	0.035	0.13	1.4	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-08-21	17.8	7.5	1488	6.25	19	1300	16	2.5	10	0.100	<1	190	77	12	28	1.02	<0,015	4.80	293	41	340	2.2	0.175	0.19	1.4	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-10-10	9.6	7.2	1230	7.68	54	950	12	4.5	12	<0,05	2.06	110	79	12	24	0.52	<0,015	4.00	244	39	250	1.7	0.062	0.13	1.1	MgCa-SO_4HCO_3
7	2016-11-20	5.3	7.3	1366	7.39	2	1300	16.6	1.9	2.5	<0,05	<1	230	64	3.3	4.6	0.19	<0,015	5.04	308	6.6	400	0.2	0.007	<0,02	0.4	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-03-16	4.6	7.4	1432	9.53	5	1200	16	1.3	2.1	<0,05	<1	140	110	3.1	5.3	0.19	<0,015	4.60	281	6.7	280	0.6	<0,002	<0,02	0.34	MgCa-SO_4HCO_3
	2017-05-16	5.3	7.6	1421	10.1	13	1200	17	1.5	1.7	<0,05		230	72	3.1	*4,2*	<0,02	0.132	5.90	360	4.6	270	0.3	<0,002	<0,02	0.29	CaMg-HCO_3SO_4
	2017-08-21	8.8	7.4	1352	9.51	9	1200	15	1.2	2.6	<0,05	<1	220	47	3.3	5.1	0.24	<0,015	4.70	287	6.8	415	0.7	0.010	0.03	0.41	Ca- SO_4HCO_3
	2017-10-10	7.5	7.0	1284	8.48	14	1000	13	1.3	2.8	<0,05	<1	130	79	4.7	4.7	0.02	0.015	4.90	299	4.8	300	0.4	0.023	0.06	0.24	CaMg-SO_4HCO_3
8	2016-11-20	6.5	7.0	2300	1.80	6	1400	17.4	1.7	1.9	<0,05	<1	220	80	6.8	8.8	1.03	0.022	3.45	211	16	430	<0,1	<0,002	<0,02	0.96	CaMg- SO_4
	2017-03-16	3.6	6.9	2290	3.21	3	1300	17	1.4	1.7	<0,05	31.5	130	130	6	14	0.37	0.022	4.50	275	25	320	0.9	<0,002	<0,02	0.77	MgCa-SO_4HCO_3
	2017-05-16	10.0	7.0	2230	6.21	11	2200	29	2.3	4.1	<0,05		340	140	8.2	*11*	0.24	<0,015	6.23	380	15	430	0.1	<0,002	<0,02	1.4	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-08-21	19.0	7.5	2260	7.03	5	2200	26	<1	3.9	<0,05	<1	360	97	9.4	16	0.15	<0,015	5.30	323	25	850	0.4	0.006	<0,02	1.4	Ca- SO_4
	2017-10-10	10.3	6.8	2420	4.34	7	2300	28	1.2	3.9		<1	370	120	10	12	0.20	<0,015	6.10	372	18	940	<0,1	0.017	<0,02	1.4	Ca- SO_4
9	2016-11-20	2.7	7.1	3940	3.00	6	480	6.72	1.3	29	<0,05	<1	110	15	4.2	4.4	0.07	<0,015	4.06	248	7.3	780	<0,1	<0,002	0.12	0.32	Ca- SO_4
	2017-03-16	4.5	6.7	4170	0.88	10	2500	33	1.5	2.2	<0,05	25	390	170	17	21	0.89	0.035	5.50	336	23	950	0.2	<0,002	<0,02	1.6	CaMg-SO_4HCO_3
	2017-05-16	11.0	7.3	4070	6.92	11	4500	59	2.2	3.5	<0,05		500	420	44	*14*	0.25	<0,015	7.38	450	20	970	0.1	<0,002	<0,02	2.2	MgCa-SO_4HCO_3
	2017-08-21	17.8	7.1	3770	5.52	10	4100	51	3.4	4.9	<0,05	<1	490	320	38	15	0.17	<0,015	6.80	415	21	1660	0.4	0.007	<0,02	2	MgCa- SO_4
	2017-10-10	9.2	6.9	4020	8.31	16	3700	44	1.4	4.2	<0,05	<1	420	280	35	12	0.05	<0,015	6.80	415	17	1742	0.1	<0,002	<0,02	2	MgCa- SO_4
10	2016-11-20	3.2	7.6	1653	9.74	12	950	8.41	1.9	3.3	<0,05	<1	110	33	5.1	140	<0,02	<0,015	3.48	212	250	80	<0,1	<0,002	0.03	0.39	Ca- HCO_3SO_4
	2017-03-16	3.2	7.3	1676	17.4	2	480	6	2	1.4	<0,05	<1	68	31	3.6	23	0.02	0.026	2.20	134	52	100	0.6	<0,002	0.03	0.37	CaMg-HCO_3SO_4
	2017-05-16	11.2	8.2	1585	12.0	11	1400	17	3.5	4.2	0.113		210	72	10	*13*	<0,02	<0,015	2.95	180	20	320	0.1	<0,002	<0,02	0.87	Ca- SO_4HCO_3
	2017-08-21	20.2	7.9	1520	9.66	2	1300	17	1.3	3.8	<0,05	<1	230	68	10	13	0.07	<0,015	2.70	165	21	620	0.4	0.007	<0,02	0.99	Ca- SO_4
	2017-10-10	10.2	7.4	1491	8.57	11	700	5.7	1.3	3.2	<0,05	1.11	70	27	5.7	46	<0,02	<0,015	4.30	262	53	210	0.2	0.009	0.04	0.38	CaMg-SO_4HCO_3

kaldkirjas Na^+ kontsentratsioonid mõõdetud TTÜ geoloogia instituudi ioonkromatograafiga

Tühi lahter tähendab, et tulemusi ei ole mõõdetud.

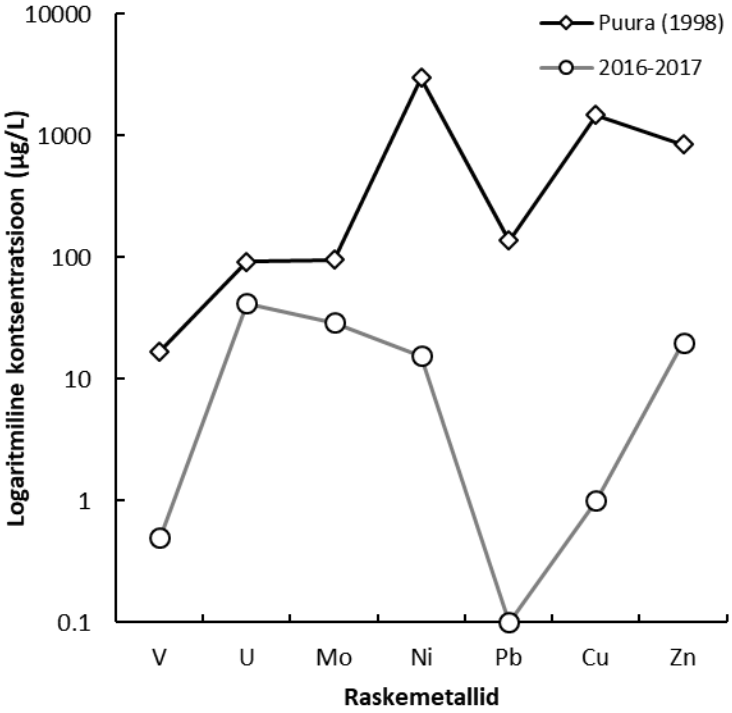
Tabel 6. Raskemetallide, naftasaaduste ja fenoolide sisaldused Maardu tehnogeense ala vees. Number tähistab mõõtepunkt numbrit tabelis 1.

Nr.	Kuupäev	Cd	As	Ba	B	Cr	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn	U	Cu	V	Hg	Nafta-saadused	5-Metüül-resortsiin	2,5-Dimetüül-resortsiin	p,m-kresool	Fenool	2,3-Dimetüül-fenool	2,6-Dimetüül-fenool	3,4-Dimetüül-fenool	O-kresool	Resortsiin	3,5-Dimetüül-fenool
		µg/L										mg/L	*µg/L*													
1	2016-11-20		0.45	19	<0,1	<0,5	1.3		2.1	<0,1	5.2	0.02	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	<0,02																								
	2017-08-21	<0,02	0.58	20	<0,1	<0,5	1.7	3.3	2.3	<0,1	<1	<0,02	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
2	2016-11-20		1.1	8.2	<0,1	<0,5	85		6.9	<0,1	7.3	0.02	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	0.02																								
	2017-08-21	<0,02	1.5	39	0.1	<0,5	1700	9.4	5.2	<0,1	<1	0.02	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
3	2016-11-20		0.63	28	<0,1	<0,5	58		2.1	<0,1	2.3	<0,02	<1	0.53	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	<0,02																								
	2017-08-21	<0,02	0.5	40	<0,1	<0,5	130	2.2	1.6	<0,1	1.2	0.03	1.3	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
4	2016-11-20		0.44	7.8	0.27	<0,5	0.29		25	<0,1	91	0.04	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	0.06																								
	2017-08-21	0.08	0.54	6.1	0.3	<0,5	280	36	26	<0,1	97	0.07	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
5	2016-11-20		0.54	6.6	0.27	<0,5	0.34		25	<0,1	88	0.04	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	0.05																								
	2017-08-21	0.07	0.62	6.4	0.3	<0,5	360	37	27	<0,1	95	0.08	1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
6	2016-11-20		8.9	27	0.19	<0,5	0.24		22	<0,1	0.2	0.03	<1	<0,5	<0,015	600	3.9	<3	2.6	2	1.6	3.4	<0,3	12	<3	0.92
	2017-03-16	0.02																								
	2017-08-21	0.02	29	36	0.22	<0,5	280	20	12	<0,1	54	0.04	2.5	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
7	2016-11-20		0.17	48	<0,1	<0,5	0.45		3.7	<0,1	5.2	0.02	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	<0,02																								
	2017-08-21	<0,02	0.3	34	0.1	<0,5	370	17	3.6	<0,1	4	0.04	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
	2017-10-10																									
8	2016-11-20		0.54	3.9	<0,1	<0,5	0.47		12	<0,1	1.7	0.02	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	0.03																								
	2017-08-21	0.05	0.53	9.9	0.17	<0,5	44	30	6.3	<0,1	2.9	0.05	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
9	2016-11-20		0.13	2.6	0.17	<0,5	0.84		43	0.21	57	0.05	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	0.11																								
	2017-08-21	0.06	0.28	3.8	0.39	<0,5	200	40	23	<0,1	19	0.07	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3
10	2016-11-20		0.26	34	<0,1	<0,5	29		2.4	<0,1	1.6	0.03	<1	<0,5	<0,015	<20	<3	<3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<3	<0,3
	2017-03-16	<0,02																								
	2017-08-21	<0,02	0.49	13	0.16	<0,5	14	18	3.1	<0,1	<1	0.04	<1	<0,5	<0,015	<20	<1	<1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<1	<0,3

4.2.1 Maardu fosforiidilevila ala

Maardu fosforiidilevila alal esinev pinna- ja põhjavesi on suure mineraalsusega (kuivjääk 1000-3100 mg/L) ja valdavalt Ca-Mg-SO_4/Mg-Ca-SO_4 või Ca-Mg-SO_4-HCO_3 tüüpi. Kõige suurema mineraalsusega on põhjakarjääri karjäärijärvede ja Maardu kaevandusest väljavoolav vesi, milles lahustunud ainete sisaldus on kaks kuni kolm korda suurem lõunakarjääri järvede veest (Tabel 5). Vesi on neutraalse või kergelt aluselise reaktsiooniga (pH 6,5–8,2) ja väga kare (üldkaredus 5,7 kuni 59 mg-ekv/L). Aastaaegadevahelised erinevused on kõige väiksemad Maardu kaevanduse väljavoolus, milles lahustunud ainete sisaldus kõikus erinevate kvartalite lõikes ±200 mg/L. Maardu karjäärides oli vastav muutlikkus suurem, jäädes vahemikku ±500–2000 mg/L ning olles suurim Maardu põhjakarjääri mõõtmispunktis nr. 9. Vee iseloomulikuks tunnuseks on suur SO_4^{2-} kontsentratsioon, mis kõigub vahemikus 100–2000 mg/L (Tabel 5). Ohtlikele ainetele ja saasteainetele kehtestatud piirväärtusi maismaa pinnavees ületasid Maardu fosforiidilevila ala vees kohati Ni (>4 µg/L), Zn (>10 µg/L) ja F^- (>1,5 mg/L) kontsentratsioonid (Prioriteetsete…, 2010; Tabel 7). Sealjuures oli Ni kontsentratsioon kohati kuni kolm korda suurem ohtlikele ainetele ja saasteainetele kehtestatud suurimast lubatud piirväärtusest maismaa pinnaveekogudes (>8,6 µg/L) ning tsingi sisaldus ületas veekeskkonna spetsiifilisi piirväärtusi 2–10 kordselt (Tabel 5). Kuna Maardu kaevanduse väljavoolu võib käsitleda põhjaveena, siis seoses põhjaveele kehtestatud madalamate piirväärtustega ületavad seal kehtestatud piirväärtusi lisaks eelnevalt nimetatud raskemetallidele ka Mo (>10 µg/L) kontsentratsioonid (Ohtlike…, 2010b; Tabel 6). Nimetatud molübdeeni künnisarvu ületav kontsentratsioon on iseloomulik kogu põhjakarjääri veele (Tabel 6). Võrreldes 1990date aastate alguses mõõdetud raskemetallide sisaldusega Maardu karjääridest väljapumbatud vees (Puura, 1998) olid käesolevas uuringus mõõdetud raskemetallide (V, U, Mo, Ni, Pb, Cu, Zn) sisaldused Maardu kaevandamisalal 2 kuni 200 korda madalamad (Joonis 11). Kõige vähem on võrreldes aktiivse kavandamise perioodiga muutunud U kontsentratsioonid. Naftasaaduste ja fenoolide kontsentratsioonid Maardu fosforiidilevila ala vees jäid alla määramispiiri (Tabel 6). Maardu karjäärijärvede ja kaevanduse veest erineb 1938. aastal suletud Ülgase kaevanduse käigus olev vesi. See on võrreldes Maardu karjäärijärvede ja kaevanduse veega keskmiselt väiksema mineraalsusega (kuivjääk 1200–1300 mg/L) ja väikese aastaaegadevahelise varieeruvusega (±50 mg/L) Ca-Mg-SO_4-HCO_3/Mg-Ca-SO_4-HCO_3 või Ca-Mg-

HCO_3-SO_4 tüüpi vesi (Tabel 5). Vesi on neutraalse või kergelt aluselise reaktsiooniga (pH väärtused 7,3–7,6) ja väga kare (üldkaredus 13 kuni 17 mg-ekv/L). Raskemetallide kontsentratsioonid Ülgase mahajäetud kaevanduse käigus olevas vees jäävad alla ohtlikele ainetel ja saasteainetele kehtestatud piirisisaldusi ning sarnaselt teistele Maardu fosforiidilevila ala vetele on naftasaaduste ja fenoolide kontsentratsioonid alla määramispiiri (Tabel 6).



Joonis 11. Raskemetallide (V, U, Mo, Ni, Pb, Cu, Zn) kontsentratsioonid Maardu karjääridest väljapumbatavas vees 1990-date aastate alguses (Puura, 1998) ja keskmine kontsentratsioon Maardu karjäärijärvedes antud uuringu perioodil (2016-2017). Andmete omavahelise võrdlemise hõlbustamiseks on kontsentratsioon esitatud logaritmilisel skaalal.

Maardu karjääri kaevikutes olevad karjäärijärved võib Veeseadusest lähtudes lugeda I tüübi seisuveekogude hulka[2] (Pinnaveekogumite…, 2010)[3]. Valdavalt antropogeensetest allikatest pärinevate ühendite kontsentratsioonid (NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, $N_{üld}$, $P_{üld}$) ja vees lahustunud orgaaniliste aine sisaldusega korreleeruvad näitajad (BHT_7 ja KHT_{Mn}) on Maardu fosforiidilevila ala vees madalad (Tabel 5). Kõigi Maardu fosforiidilevila ala vete seisund jäi vaatlusperioodil registreeritud keskmiste füüsikalis-keemiliste kvaliteedinäitajate väärtuste järgi valdavalt „väga heasse“ või „heasse klassi“ (Tabel 7; KKM, 2010a). Vaid mõned pH väärtused Maardu kaevanduse vees ja $N_{üld}$ näitajad põhjakarjääri karjäärijärvedes liigituvad vastavalt „kesisesse“ või „väga halba“ klassi (Tabel 7). Kui aga võtta arvesse vee suurt mineraalsust, suuri sulfaatiooni kontsentratsioone ja kohatisi piirväärtusi ületavaid raskemetallide kontsentratsioone, siis on vete seisund pigem „kesine“ (Mäeinstituut, 2013). Täielikuma hinnangu andmiseks veekogude ökoloogilisele seisundile tuleks neid tulevikus hinnata ka bioloogiliste kvaliteedinäitajate alusel.

[2] Veepeegli pindalaga alla 10 km^2, kalgiveelised (üldaluselisus >240 HCO_3^- mg/l, elektrijuhtivus >400 µS/cm), kloriidivaesed (kloriidide sisaldus kuni 25 mg/l), kihistumata veega järved sõltumata vee heledusest või tumedusest.
[3] Kohati esineb lõunakarjääris selle veetüübi kohta kõrgemaid kloriidide sisaldusi (vt. Tabel 5).

Tabel 7. Maardu piirkonna vooluvee pinnaveekogumite seisundi määramine füüsikalis-keemiliste kvaliteedinäitajate järgi (KKM, 2010a-c).

Mõõtepunkti nr.	Pinnaveekogu tüüp	BHT_7	$N_{üld}$	$P_{üld}$	NH_4^+	O_2	pH	Üldhinnang
		mgO_2/L	*µg/L*	*µg/L*	*mg/L*	*%, küllastus*		
1	Tüüp II	4.5	1876	903	0.04	93	8.3	
Hinnang			*halb*	*väga halb*			*kesine*	***halb***
2	Tüüp IB	2.9	1430	109	0.04	63	7.4	
Hinnang		*hea*	*väga hea*	*halb*	*väga hea*	*hea*	*väga hea*	***hea***
3	Tüüp IB	1.8	6688	55	0.02	73	7.6	
Hinnang		*hea*	*halb*	*hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	***hea***
4	Tüüp IB	0.4	<1000	<50	0.04	25	6.7	
Hinnang		*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga halb*	*väga hea*	*kesine**
5	Tüüp IB	0.2	1102	<50	<0.015	43	6.8	
Hinnang		*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*halb*	*väga hea*	*kesine**
6	Tüüp IB	3.1	3130	139	0.36	77	7.7	
Hinnang		*kesine*	*kesine*	*väga halb*	*kesine*	*väga hea*	*väga hea*	***kesine***
7	Tüüp IB	1.4	<1000	<50	0.03	73	7.4	
Hinnang		*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	*väga hea*	***väga hea***
8	Tüüp I	1.3	7873	<50	<0.015	40	7.1	
Hinnang			*väga halb*	*väga hea*			*väga hea*	*kesine**
9	Tüüp I	2.0	6250	<50	<0.015	43	7.0	
Hinnang			*väga halb*	*väga hea*			*väga hea*	*kesine**
10	Tüüp I	2.0	<1000	<50	<0.015	100	7.7	
Hinnang			*hea*	*hea*			*hea*	*kesine**

** Vt. hinnangu põhjendusi peatükk 4.2.1*

Uuringu käigus määratud keskmine kiirgusfoon mõõtepunktides varieerus vahemikus 0,12 kuni 0,22 µSv/h. Suuremad keskmised kiirgusfooni väärtused esinesid Maardu kaevanduse ja Maardu põhjakarjääri väljavoolude juures (mõõtepunktid nr. 4 ja 5), kuid üldiselt viitab väike muutlikkus

sellele, et vähemasti uuritud ala ulatuses on kiirgusfoon ühetaoline. See võib seletuda asjaoluga, et kõrgemad kiirgusfooni väärtused peaksid olema seotud puistangute kuumenemiskolletega (Mäeinstituut, 2013), mida aga pärast kaevanduse sulgemist ei ole enam esinenud. Siiski tuleb toonitada, et käesoleva seire käigus ei mõõdetud kiirgusfooni põhjakarjääri idaosas, kus 1990date aastate alguses tuvastati kõrgeim kiirgusfoon (Mäeinstituut, 2013).

4.2.2 Ümbritsevad pinnaveekogud

Maardu lõunakarjääri väljavool (mõõtepunkt nr. 2) on sarnaselt lõunakarjääriga endaga põhjakarjääri veekogudest ja nende väljavoolust väiksema mineraalsusega (kuivjääk 330-1400 mg/L) ning selle veetüüp on vastavalt aastaajale ja veetasemele kas Ca-HCO_3 või Ca-Mg-SO_4-HCO_3/Mg-Ca-SO_4-HCO_3 (Tabel 5). Veetüübi muutus on seotud vee voolusuunaga – sügisesel sademeterohkemal ajal kui veetase voolukanalis on kõrgem, liigub vesi karjääriga külgnevatelt aladelt karjääri suunas mitte karjäärist välja, nagu see toimub madalama veetasemega perioodidel (Tabel 2, 3). Sarnaselt veetüübi muutustele varieerus ka lõunakarjäärist väljavoolava vee mineraalsus erinevate kvartalite lõikes laialt (±540 mg/L). Vesi on neutraalse või nõrgalt aluselise reaktsiooniga (pH väärtused 6,9–8,1) ning mõõdukalt kare kuni väga kare (üldkaredus 4,7 kuni 19 mg-ekv/L). Raskemetallidest ületas kehtestatud piirväärtust Ni kontsentratsioon, kuid ülejäänud raskemetallide ning naftasaaduste ja fenoolide kontsentratsioonid jäid seireperioodil allapoole kehtestatud piirväärtusi (Tabel 6). 1B tüüpi vooluveekogudele[4] kehtestatud füüsikalis-keemiliste kvaliteedinäitajate ($N_{üld}$, $P_{üld}$, NH_4^+, pH ja lahustunud O_2, BHT_7) väärtused vastavad väljavoolus kas „väga heale“ ja „heale“ või „kesisele“ ja „väga halvale“ klassile (Tabel 7; KKM, 2010a). Kokkuvõtvalt vastab lõunakarjääri väljavoolu vesi selle keskmise koostise põhjal „heale“ klassile (Tabel 7).

Maardu järve lõuna poolt voolav vesi (mõõtepunkt nr. 3) oli muutliku mineraalsusega (kuivjääk 440 kuni 1700 mg/L, ±630 mg/L) ning erines Maardu kaevandusala ja selle väljavooludest oma

[4] Heledaveelised ja vähese orgaanilise aine sisaldusega (KHT_{Mn} 90%-ne väärtus alla 25 mgO/L) jõed valgala suurusega 10–100 km^2.

veetüübilt, mis oli kogu vaatlusperioodi vältel kas Ca-HCO_3/Ca-HCO_3-SO_4 või Ca-Mg-HCO_3 (Tabel 5). Vesi oli neutraalse või nõrgalt aluselise reaktsiooniga (pH väärtused 7,0–7,9) ja väga kare (üldkaredus 6,6 kuni 22,8 mg-ekv/L). Kõigi raskemetallide ning naftasaaduste ja fenoolide sisaldused vees jäid allapoole ohtlikele ainetele ja saasteainetele kehtestatud piirväärtusi (Tabel 6). Füüsikalis-keemiliste kvaliteedinäitajate põhjal ($P_{üld}$, NH_4^+, pH ja lahustunud O_2, BHT) on väljavoolu seisund vastavuses peamiselt „väga hea“ kuni „kesise“ klassiga, aga väga kõrged $N_{üld}$ sisaldused (3,6 kuni 9,7 mg-N/L) vastavad „väga halvale“ klassile (Tabel 7; KKM, 2010a). Kokkuvõtvalt vastab Maardu oja vesi mõõtepunktis nr. 3 selle keskmise koostise põhjal „heale“ klassile (Tabel 6).

Maardu järve vesi enne väljavoolu Kroodi ojja mõõtepunktis nr. 1, mis iseloomustab antud uuringus Maardu järve vett, on võrreldes teiste mõõtepunktidega madala mineraalsusega (kuivjääk 200–380 mg/L) ning veetüübilt Ca-Mg-SO_4-HCO_3 või Ca-Mg-HCO_3-SO_4 tüüpi vesi, mille SO_4^{2-} kontsentratsioon jääb vahemikku 48 kuni 134 mg/L (Tabel 5). Vee mineraalsus kõikus vaatlusperioodil vähe (±90 mg/L). Vesi on nõrgalt aluselise kuni aluselise reaktsiooniga (pH väärtused 7,7–9,1) ning mõõdukalt kare kuni kare (üldkaredus 2,4 kuni 5 mg-ekv/L). Kõigi raskemetallide ning naftasaaduste ja fenoolide sisaldused vees jäid allapoole ohtlikele ainetele ja saasteainetele kehtestatud piirväärtusi (Tabel 6). Maardu järv on loetud Tüüp 2 seisuveekoguks[5] (KKM, 2010c). Sellele seisuveekogu tüübile vastavate füüsikalis-keemiliste kvaliteedinäitajate põhjal ($N_{üld}$, $P_{üld}$, pH) on järve seisund vastavuses peamiselt „kesise“ kuni „väga halva“ klassiga (Tabel 7; KKM, 2010b). Kokkuvõtvalt vastab Maardu järve vesi mõõtepunktis nr. 1 selle keskmise koostise põhjal „halvale“ klassile (Tabel 7). See hinnang näitab, et erinevalt varasemast Maardu lõunakarjäärist lähtuvast reostusest, mõjutavad Maardu järve „halba“ seisundit tänapäeval pigem ümbritsevatelt aladelt lähtuv lämmastiku ja fosfori reostus. Maardu järve pindmised setted on aktiivse kaevandustegevuse perioodist kõrgenenud fosforisisaldusega (Heinsalu, 1996), seetõttu võib fosforireostus olla seotud ka vee ja sette piirpinnal toimuva intensiivne ainevahetusega ja setetest fosfori vabanemisega järvevette.

[5] Vee keskmise karedusega madal järv.

Kroodi oja vesi (mõõtepunkt nr. 6) on vooluveekogu kohta suure mineraalusega (kuivjääk 950–1800 mg/L; ±430 mg/L) ning veetüübilt Ca-Mg-SO_4-HCO_3 või Mg-Ca-SO_4-HCO_3 tüüpi vesi, mille SO_4^{2-} kontsentratsioon jääb vahemikku 250 kuni 490 mg/L (Tabel 5). Vesi on neutraalse või nõrgalt aluselise reaktsiooniga (pH väärtused 7,2–8,0) ning väga kare (üldkaredus 12 kuni 23 mg-ekv/L). Seireperioodil ületasid Kroodi oja vees ohtlikele ainetele ning saasteainetele kehtestatud piirväärtusi nii Ni (>4 µg/L) ja Zn (>10 µg/L) kui kohati ka F^- (>1,5 mg/L) ja As (>10 mg/L) kontsentratsioonid (Tabel 6). Kuigi naftasaaduste ja fenoolide sisaldused jäid uuringuperioodil valdavalt alla määramispiiri, ületasid naftasaadused ohtlikele ainetele kehtestatud piirväärtust (>200 µg/L) 2016. aasta IV kvartalis (Tabel 6). Kroodi oja on loetud 1B tüüpi vooluveekogude hulka (KKM, 2010a,c). Sellele seisuveekogu tüübile vastavate füüsikalis-keemiliste kvaliteedinäitajate põhjal ($N_{üld}$, $P_{üld}$, pH, NH_4^+, BHT ja lahustunud O_2 sisaldus) on oja seisund vastavuses valdavalt „hea“ kuni „halva“ klassiga, kuid kohati on selle $P_{üld}$ ja NH_4^+ kontsentratsioonid vastavuses „väga halva“ klassiga (Tabel 7; KKM, 2010a). Kokkuvõtvalt vastab Kroodi oja vesi mõõtepunktis nr. 6 selle keskmise koostise põhjal „kesisele“ klassile (Tabel 7). Täielikuma hinnangu andmiseks Maardu fosforiidilevila ala ümbritsevate pinnaveekogude ökoloogilisele seisundile tuleks neid tulevikus hinnata ka bioloogiliste kvaliteedinäitajate alusel.

4.2.3 Maardu tehnogeense ala vee keemilise koostise kujunemine

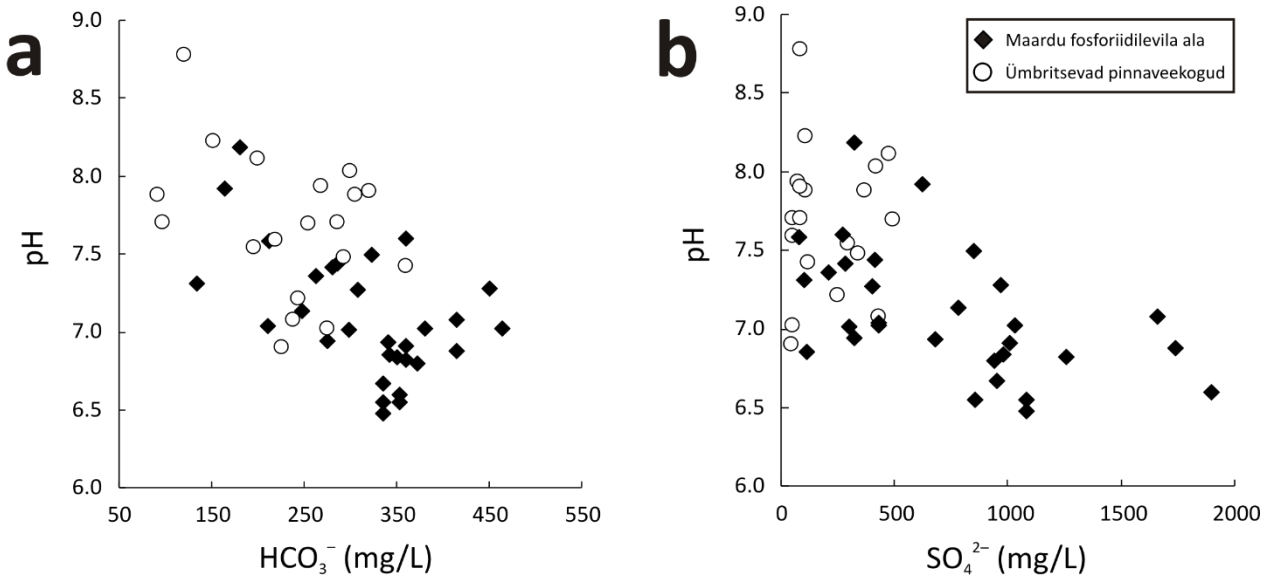
Maardu tehnogeense ala veele on valdavalt iseloomulik suur SO_4^{2-} kontsentratsioon ja vee tüüp, mille anioonkoostises domineerib sulfaatioon. Selle põhjuseks on Maardu karjääri puistangutes leiduva püriidi (FeS_2) madalatemperatuuriline oksüdatsioon nii aeratsioonivöös tsirkuleeriva hapniku kui ka infiltreeruvas vees lahustunud hapniku toimel (reaktsioon R1), mis initsieerib puistangutes terve rea protsesse (Puura, 1998). Püriidi oksüdatsioonil tekkiv happelisus puhverdatakse puistangutes leiduva lubjakivi ning vähemal määral silikaatide (illiidi) lahustumisega, millega kaasneb K-jarosiidi, kipsi ja rauahüdroksiidide väljasettimine puistangutes ringlevast lahusest (vt. Puura, 1998; Puura ja Pihlak, 1998; Puura jt, 1999; Puura ja Neretnieks, 2000; reaktsioonid R2-R7 peatükis 2). Lisaks püriidi oksüdatsioonile võib sulfaadi sekundaarseks allikaks olla sekundaarse kipsi lahustumine kipsi suhtes alaküllastunud vees. Oluline on märkida,

et Maardu endiste karjääride kaevikutesse kujunenud karjäärijärvedes seguneb läbi puistangute infiltreerunud vesi ümbritsevatest põhjaveekihtidest karjääri voolava „saastumata“ veega ning seega on karjäärijärvede vesi võrreldes puistangutes tsirkuleeriva veega lahjendunud. Maardu karjääride ja kaevandusega piirnevates voolu- ja seisuveekogudes toimub vee täiendav lahjendumine segunemisel veekogude valgala teistest osadest sissevoolava veega.

Käesolevas uuringus tuvastatud seosed Maardu tehnogeense ala vee põhikomponentide vahel on sarnased varasemates uuringutes leitule (Puura, 1998; Puura jt, 1999; Puura ja Neretnieks, 2000), millest võib järeldada, et peamiste vee keemiat mõjutavate protsesside iseloom ei ole viimase 20 aasta jooksul muutunud. Maardu fosforiidilevila aladel seireperioodil mõõdetud neutraalsed või nõrgalt aluselised pH väärtused (6,5 kuni 8,2) näitavad, et lubjakivide puhverdav võime ei ole ammendatud ning tänase seisuga ei ole tõendeid happelise vee lisandumisest Maardu karjäärijärvedesse ja sealtkaudu ümbritsevatesse pinnaveekogudesse. Neutraalse ja sellest kõrgema pH juures ei ole käesolevas uuringus ootuspäraselt täheldatud ka varasema ajaga võrreldes suuremaid raskemetallide (V, U, Mo, Ni, Pb, Cu, Zn, Cr, As, Ba, Cd) kontsentratsioone ja nende sisaldused Maardu tehnogeense vees on võrreldes aktiivse kaevandustegevuse perioodiga hoopis langenud (Joonis 11).

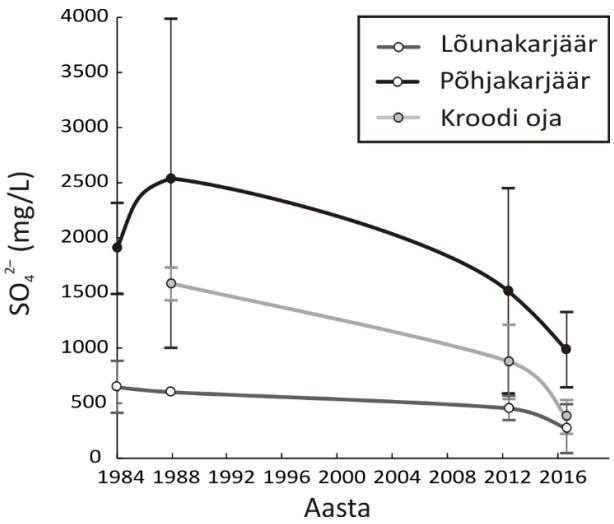
Iseloomulikuks seoseks uuritud vees on pH langus koos SO_4^{2-} ja HCO_3^- kontsentratsiooni kasvuga (Joonis 12a,b). See on seletatav sellega, et süsteemi pH-d kontrollivad püriidi oksüdatsioonil tekkiv happelisus ja seda neutraliseeriv kaltsiidi lahustumine. Kõrgemad pH väärtused ja väiksem HCO_3^- kontsentratsioon on iseloomulikud Maardu fosforiidilevila ala ümbritsevatele pinnaveekogudele ja vastupidised madalamad pH väärtused koos suuremad HCO_3^- kontsentratsioonid iseloomustavad Maardu fosforiidilevila alal paiknevat vett. Selline seos viitab selgelt suuremale püriidi oksüdatsioonil moodustuvale happelisusele Maardu karjääride puistangutes, mille mõjul lahustub rohkem kaltsiiti. Ümbritsevates pinnaveekogudes sõltub karbonaatsete mineraalide lahustumine CO_2 osarõhust. CO_2 lahustumisel tekkiv neutraliseerimist vajav happelisus on palju väiksem püriidi oksüdatsioonil tekkivast happelisusest (saastumata

sademete pH on ~5,5) ning selle tulemusena moodustuv HCO_3^- kontsentratsioon on väiksem kui Maardu kaevandusala vees.

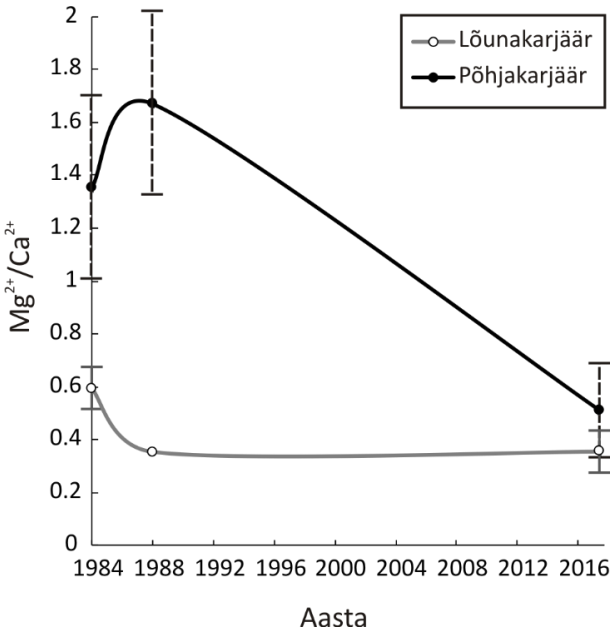


Joonis 12. pH väärtuste seos (a) SO_4^{2-} ja (b) HCO_3^- kontsentratsiooniga Maardu fosforiidilevila ala vetes (Maardu karjäärid, Maardu kaevandus ja selle väljavoolud, Ülgase kaevandus) ja ümbritsevates pinnaveekogudes.

Võrreldes Maardu karjäärides oleva vee SO_4^{2-} kontsentratsioone varasemates uuringutes esitatud tulemustega (Johannes ja Karise, 1979; Pihlak jt, 1984; Naumov, 1991; Mäeinstituut, 2013) nähtub, et sulfaatiooni kontsentratsioon on sarnaselt raskemetallidele alates karjääri sulgemisest tunduvalt langenud (Joonis 13). Selle põhjuseks näib olevat püriidi oksüdatsiooni aeglustumine tänu püriidi ammendumisele aeratsioonivöös või sekundaarpindade tekkele püriidi pinnal (Puura jt, 1999), millele viitab vee Mg/Ca suhte väärtuste langus kaevandustegevuse lõppemise järel (Joonis 14). See on kooskõlas varasemates uuringutes prognoositud püriidi oksüdatsiooni kiiruse langusega puistematerjalis suletud kaevandusalade geokeemilise arengu käigus (Puura, 1998; Puura jt, 1999; Reinsalu jt, 2006). Lõunakarjääris on Mg/Ca suhe jäänud suuresti muutumatuks ja selle väärtused on põhjakarjääri veega võrreldes madalamad, mida on tinginud aeglasem püriidi oksüdatsioon veega küllastunud tingimustes.

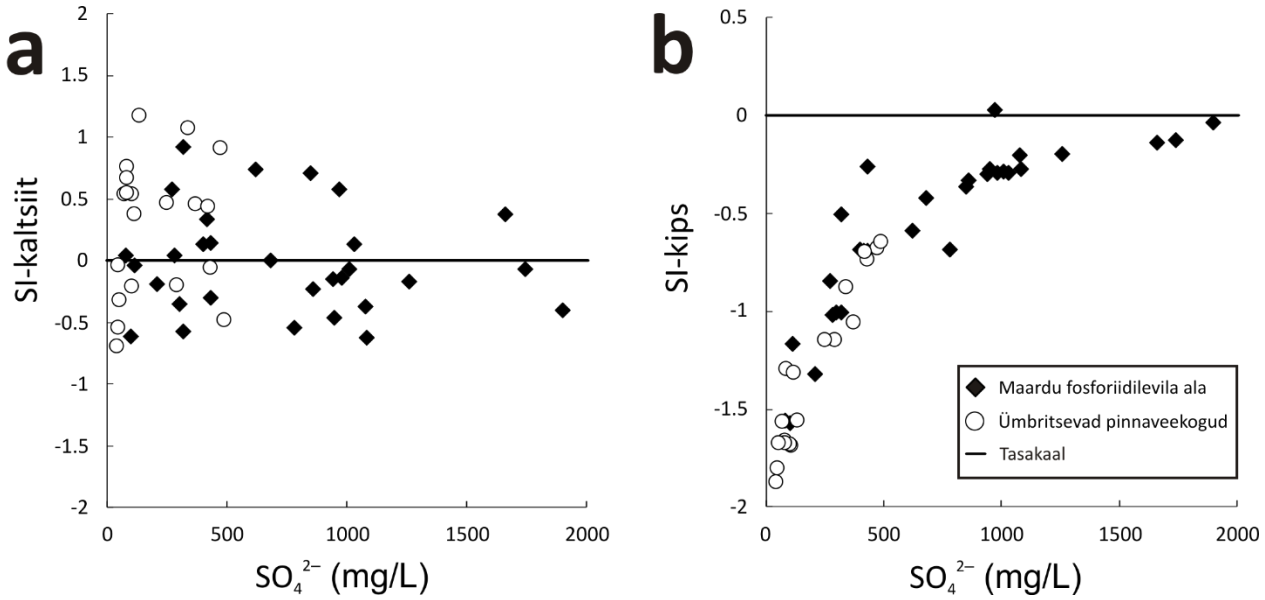


Joonis 13. Sulfaadi kontsentratsiooni muutus ajas Maardu põhjakarjääris, lõunakarjääris ja Kroodi ojas (Pihlak jt, 1984; Naumov, 1991; Keskkonnaagentuur, 2013; Mäeinstituut, 2013; Tabel 5). Joonisel esitatud veapiirid kirjeldavad uuringutes esitatud tulemuste varieeruvust keskväärtuse ümber.

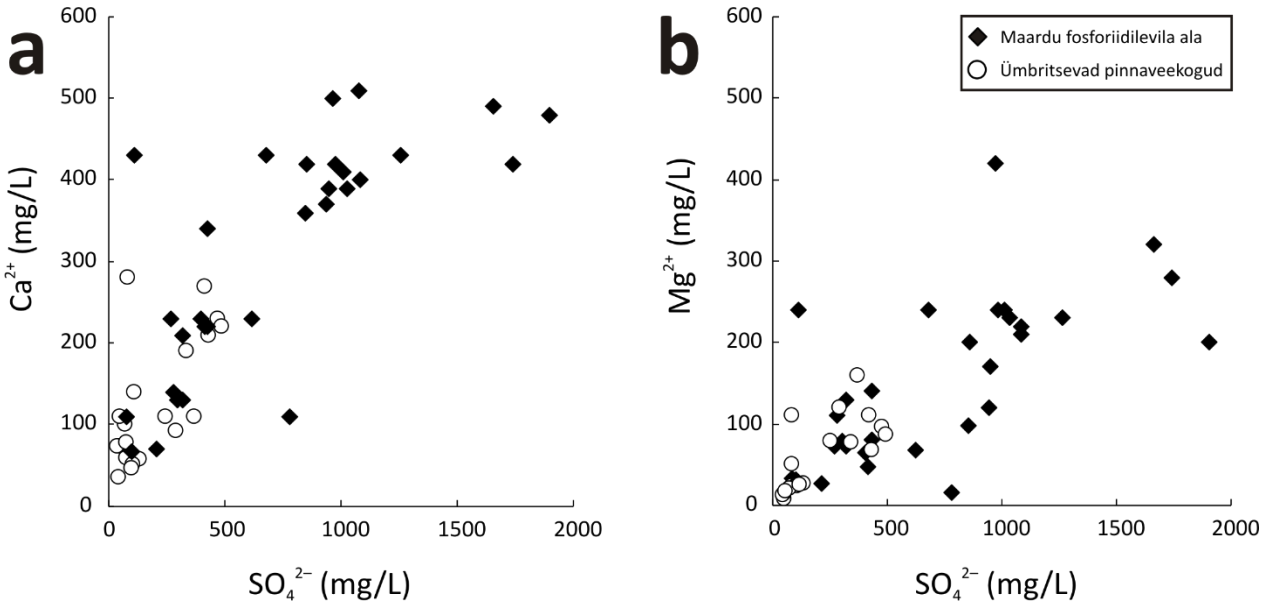


Joonis 14. Mg^{2+}/Ca^{2+} suhte väärtuse muutus ajas Maardu põhja- ja lõunakarjääris (Pihlak jt, 1984; Naumov, 1991; Tabel 5). Joonisel esitatud veapiirid kirjeldavad uuringutes esitatud tulemuste varieeruvust keskväärtuse ümber.

Maardu tehnogeense ala vee küllastusastet tähtsamate vee keemilist koostist mõjutavate mineraalide suhtes hinnati geokeemilise modelleerimise tarkvara PHREEQC abil (Parkhurst ja Appelo, 2013). Puura ja Pihlak (1998) järgi on Maardu karjäärides leviva lubjakivi karbonaatne osa mineraloogiliselt Mg-kaltsiit. Maardu karjääride ning kaevanduse vesi on kaltsiidi suhtes valdavalt tasakaalus või üleküllastunud ($SI_{kaltsiit}$ = −0,63 kuni 0,92), kuid alaküllastunud kipsi suhtes (SI_{kips} = −1,57 kui 0,02) (Joonis 15a,b). Sealjuures läheneb uuritud vesi tasakaalule kipsi suhtes SO_4^{2-} kontsentratsiooni kasvuga (Joonis 15b). Ca^{2+} ja Mg^{2+} ioonide kontsentratsioonid vees kasvavad samuti koos SO_4^{2-} kontsentratsiooni kasvuga (Joonis 16a,b). Puura (1998) järgi ei saa nende ioonide sellist käitumist seletada ainult püriidi oksüdatsiooni mõjul toimuva Mg-kaltsiidi lahustumise ja samaaegse kipsi väljasettimisega, vaid väiksemate SO_4^{2-} kontsentratsioonide juures toimub puistangutest väljaleostuva vee segunemine saastumata (põhja)veega. Sama mehhanism seletab ka vee kipsi küllastusindeksi järkjärgulist kasvu SO_4^{2-} kontsentratsiooni suurenedes (Joonis 15b).

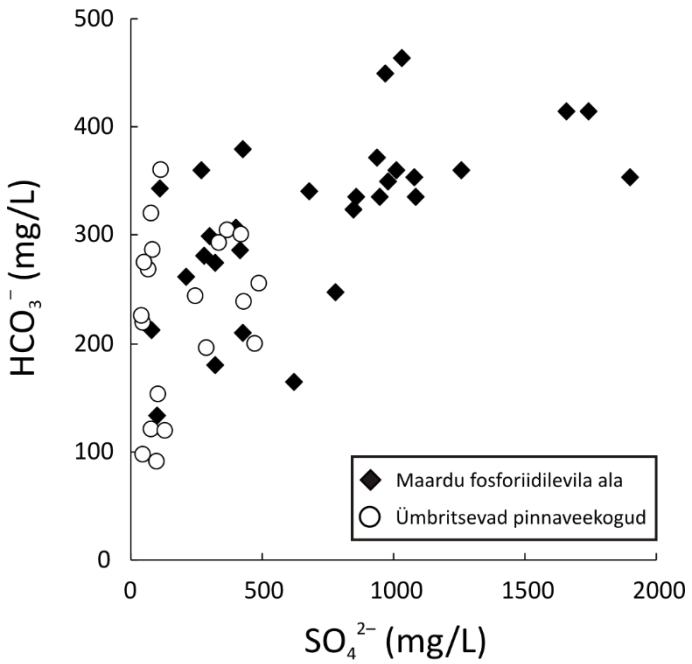


Joonis 15. Maardu tehnogeense ala vee küllastusaste (a) kaltsiidi ($SI_{kaltsiit}$) ja (b) kipsi (SI_{kips}) ja selle muutus koos SO_4^{2-} kontsentratsiooniga Maardu fosforiidilevila ala vees (Maardu karjäärid, Maardu kaevandus ja selle väljavoolud, Ülgase kaevandus) ja ümbritsevates pinnaveekogudes.



Joonis 16. (a) Ca^{2+}, (b) Mg^{2+} ja SO_4^{2-} kontsentratsioonide suhe Maardu fosforiidilevila ala vees (Maardu karjäärid, Maardu kaevandus ja selle väljavoolud, Ülgase kaevandus) ja ümbritsevates pinnaveekogudes.

Puura ja Pihlak (1998) prognoosivad, et esimestel aastakümnetel võib 60–80% püriidi oksüdatsioonil tekkivast sulfaadist ladestuda setetesse kipsina ja hiljem võib vee sulfaadi sisaldust hakata kontrollima kipsi lahustuvus. Maardu fosforiidilevila ala vee keemiline koostis viitab sellele, et enamik karjäärijärvedes esinevast sulfaatioonist pärineb püriidi oksüdatsioonist, mitte sekundaarse kipsi lahustumisest. Sellist järeldust toetab HCO_3^- kontsentratsiooni kasv samaaegselt SO_4^{2-} kontsentratsiooni kasvuga, mis viitab püriidi oksüdatsioonil tekkiva happelisuse mõjul toimuvale karbonaatsete mineraalide lahustumisele (Joonis 17).



Joonis 17. HCO_3^- kontsentratsiooni seos SO_4^{2-} kontsentratsiooniga Maardu fosforiidilevila ala vees (Maardu karjäärid, Maardu kaevandus ja selle väljavoolud, Ülgase kaevandus) ja ümbritsevates pinnaveekogudes.

4.3 Maardu tehnogeense ala vee seos ümbritseva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjaveega

Varasemates uuringutes (Puura, 1998; Mäeinstituut, 2013) on viidatud võimalusele, et Maardu tehnogeensel alal leviva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjavee keemiline koostis on kaevandamisalal toimuvatest protsessidest mõjutatud. Ümbritseva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjavesi on valdavalt väikese mineraalsusega (vees lahustunud ainete sisaldus 300–600 mg/L). Vee SO_4^{2-} sisaldus jääb vahemikku 5–100 mg/L, ja see sulfaat pärineb looduslike tegurite toimel kulgevast püriidi oksüdatsioonist (Pärn jt, 2016; EELIS, 2017). Maardu karjääride puistangutes olev põhjavesi on seirepuurkaevude MA-12, MA-13, MA-14 ja seirepuuraugu VPA1 andmetel heterogeense keemilise koostisega (Tamm ja Ideon, 2012; Tamm ja Pello, 2016). 1989. aasta seireanalüüside järgi esines Maardu põhjakarjääri puistangutes võrreldes ümbritseva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksiga suure mineraalsusega põhjavesi (kuivjääk 1060–2532 mg/L), mille SO_4^{2-} kontsentratsioon varieerus 520 kuni 1580 mg/L (Tamm ja Ideon, 2012). 2012. aastal puuritud uue seirepuuraugu VPA1 põhjavee analüüside järgi

leiti aga puistangutest vett, mille SO_4^{2-} kontsentratsioon oli <3,3 mg/L (Tamm ja Ideon, 2012). See tulemus, koos NO_3^- kontsentratsiooniga alla määramispiiri viitab redutseerivate tingimuste kohatisele esinemisele puistanguis. Maardu põhjakarjääri puistangutes olevas põhjavees esinevad ümbritseva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjaveega võrreldes suuremad raskemetallide sisaldused. Kehtestatud künnisarvust või joogiveele kehtestatud nõuetest suuremad olid Mo, Ni, Zn ja kohati As kontsentratsioonid (Tamm ja Ideon, 2012; Tamm ja Pello, 2016). Nende raskemetallide kontsentratsioonid (v.a As) ületavad kehtestatud piirväärtusi ka Maardu põhjakarjääri järvede vees (Tabel 5; peatükk 4.2.1). Orgaanilistest saasteainetest ületavasid vastavaid väärtusi benseeni ja fenantreeni sisaldused (Tamm ja Pello, 2016).

Maardu fosforiidikarjääride ja kaevanduse mõju neid ümbritsevale Ordoviitsiumi-Kambriumi veekompleksi põhjaveele peaks avalduma loodusliku fooniga võrreldes suuremates SO_4^{2-}, HCO_3^-, Mg^{2+} ja Ca^{2+} kontsentratsioonides, mis on moodustunud kaevandusalal toimuva intensiivse püriidi oksüdatsiooni ja Mg-kaltsiidi lahustumise käigus. Tabelis 8 on esitatud Maardu tehnogeensel alal ja selle vahetus lähiümbruses paiknevate Ordoviitsiumi-Kambriumi kaevude koordinaadid, staatiline veetase ja põhjavee keemiline koostis (EELIS, 2017). Kasutatud on vaid andmeid, mis pärinevad ajavahemikust 1990-2008 ning kaeve, mille juurde on lisatud andmed põhjavee keemilise koostise kohta. Esitatud andmestiku põhjal on võimalik väita, et kaevudes, mille staatiline veetase on kõrgem Maardu põhjakarjääri karjäärijärvedes staatilisest veetasemest (~31,1 meetrit ü.m.p) on põhjavee keemiline koostis vastavuses Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjavett iseloomustava loodusliku fooniga. Sellised kaevud paiknevad valdavalt Maardu tehnogeensest alast lõunas ja idas. Kaevudes, mille staatiline veetase on Maardu karjäärijärvede omast madalam esinevad piirkonna looduslikust foonist oluliselt suuremad lahustunud ainete, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Mg^{2+} ja Ca^{2+} kontsentratsioonid (Tabel 8). Sellised kaevud paiknevad valdavalt põhjakarjäärist läänes ja loodes Maardu linna territooriumil. Eelnevale arutlusele tuginedes võib oletada, et Maardu karjäärijärvedest lähtuv jääkreostus mõjutab Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi eelkõige Maardu fosforiidilevila alast läänes ja loodes sarnaselt Maardu pinnavete liikumisele. Ülejäänud alal toimub ümbritseva

põhjavee sissevool Maardu karjäärijärvedesse. Vastavat hüpoteesi tuleks tulevikus kindlasti kontrollida põhjaliku hüdrogeoloogilise uuringuga Maardu tehnogeensel alal. Sellise uuringu käigus tuleks samal ajaperioodil koguda Maardu tehnogeense ala pinnaveega võrreldav andmestik alal esineva põhjavee keemilise koostise ja veetasemete kohta.

Tabel 8. Maardu tehnogeensel alal ja selle lähiümbruses paiknevate Ordoviitsiumi-Kambriumi kaevude koordinaadid, staatiline veetase ja põhjavee keemiline koostis (EELIS, 2017). Ümbritseva Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjavee suhtes anomaalselt kõrged kontsentratsioonid koos staatilise veetasemega on välja toodud paksus kirjas.

Kaevu nr.	Asukoht	Filtri sügavus	L-EST97 koordinaat X	L-EST97 koordinaat Y	Kuupäev	Staatiline veetase	Kuivjääk	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Fe (üld)	NH_4^{+}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}	Veetüüp
		m				m	mg/L												
18176	Kallavere	11,6 - 18	6594663	558954	29.07.2003	16	280	6.9	62.1	15.8	2.5		1.1	0.5	268.5	1.4	4.8	0	Ca-HCO_3
144	Maardu linn	4 - 23	6591359	554971	15.06.1999	**21.5**	**845**						7.5			51.4	264	0.4	
15336	Maardu linn	6,8 - 23	6592768	557388	20.06.2000	**26**	**2504.5**	6.7	**471.3**	**132.6**	50.0	5.1	**47**	33	**701.5**	18.1	**1270**	<0.4	**Ca-Mg-SO_4-HCO_3**
22858	Maardu linn	13 - 25	6592611	557216	02.05.2007	**28.5**		6.8					**22**	4.3				<0.4	
17432	Rebala	17 - 34	6592125	561684	10.07.2000	30.4	490.5	7.3	135.1	14.7	4.0	2.0	0.4	0.8	448.0	9.2	<2	<0.4	Ca-HCO_3
5990	Rebala	17,9 - 29,3	6592602	561585	20.05.1994	30.5	523	7.8	140.0	15.0			0.9	0.8	506.0	4.0	15	0.6	Ca-HCO_3
11545	Võerdla	6 - 15,5	6592568	560353	04.04.1990	31.4	326		66.0	24.0	4.5	7.0		1	317.0	3.9	5.3	0.1	Ca-HCO_3
15440	Vandjala	20,5 - 25	6589437	560074	06.10.2000	31.5	493	7.1	122.0	23.0				0.1	409.0	13.5	6.2		Ca-HCO_3
23157	Maardu küla	20,6 - 39	6588431	558622	24.10.2007	33	390	7.6	96.2	19.4	6.0	4.0	0.4	0.1	323.4	22.7	59.3	0.4	Ca-HCO_3
4707	Maardu küla	25 - 40	6588673	558912	06.01.1994	33	466		118.2	25.5			0.1	0.1	341.7	23.3	85	37	Ca-HCO_3
15273	Rebala	18 - 34	6591603	561944	01.06.2000	33.8	499	7.1	136.3	21.9	5.0	4.0	4.6	1	549.2	5.3	4.1	<0.1	Ca-HCO_3
4655	Ülgase	14,5 - 24,5	6588673	558912	25.07.1991	35	412		120.5	21.9			0.5	1.9	366.1	30.0	54.1		Ca-HCO_3
17504	Maardu küla	16 - 28,6	6588062	559179	04.02.2002	37.3	419.5	7.4	106.8	18.2	6.0	3.5	<0,05	<0,05	305.0	16.3	101	5.3	Ca-HCO_3-SO_4
30582	Vandjala		6589552	560503	09.04.2008	43	454	6.9	93.2	17.6	5.3	15.0	0.2	0.1	244.1	19.5	56.4	78	Ca-HCO_3
					03.02.2005		328	7.2	90.4	13.7	4.2	3.1	<0,06	<0,07	292.8	8.5	44.9	<6	Ca-HCO_3

5. Järeldused ja soovitused

Uuringu tulemustel põhinevad tähtsamad järeldused on järgmised:

1. Maardu fosforiidilevila alal leviv pinna- ja põhjavesi on endiselt mõjutatud madalatemperatuurilisest püriidi oksüdatsioonist ja selle mõjul toimuvast intensiivsest Mg-kaltsiidi lahustumisest, mis neutraliseerib püriidi oksüdatsioonil tekkiva happelisuse;

2. Vete neutraalne või nõrgalt aluseline pH ja aktiivse kaevandamistegevuse aegadega võrreldes väiksemad raskemetallide kontsentratsioonid näitavad, et puhverdusreaktsioonid Maardu karjääride puistangutes ja kaevandusalal on püriidi oksüdatsioonil tekkiva happelisuse neutraliseerimisel endiselt efektiivsed;

3. Valdav osa vees suures kontsentratsioonis esinevast sulfaadist pärineb endiselt püriidi oksüdatsiooni protsessidest ja suure Ca^{2+} ja SO_4^{2-} kontsentratsiooni mõjul välja settinud sekundaarse kipsi lahustumine mängib Maardu fosforiidilevila ala vees teisejärgulist rolli;

4. Maardu karjääri ja kaevanduse aladelt lähtuval jääkreostusel võib olla oluline mõju Maardu fosforiidilevila alast lääne- ja loodesuunas paiknevale Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi osale, mille staatiline veetase on madalam Maardu karjäärijärvede ja nende väljavoolu aasta keskmisest veetasemest;

5. Maardu fosforiidilevilaga piirnevate pinnaveekogude vee kvaliteet on mõjutatud nii Maardu karjääride ja kaevanduse väljavooludest kui ka alal paikneva aiandi ja piirkonnas tegutsevate ettevõtete heitveest;

6. Maardu karjääride sulgemisega on oluliselt vähenenud lõunakarjääri mõju Maardu järvele, sest väga väikese loodusliku hüdraulilise gradiendi tingimustes on lõunakarjääri ja järve vahel liikuva vee vooluhulgad väga väikesed. Karjääridest ja kaevandusest lähtuv jääkreostus mõjutab aga endiselt Kroodi oja vee kvaliteeti. Loodusliku hüdraulilise gradiendi mõjul voolab sinna nii Maardu põhjakarjäärist kui Maardu kaevanduse käikudest pärinev vesi, millest osa pärineb suure tõenäosusega Maardu lõunakarjäärist;

7. Uuringu käigus läbiviidud sonarimõõtmistega täpsustati Maardu lõunakarjääri ja põhjakarjääri territooriumil paiknevate karjäärijärvede ruumala. Tuvastati, et lõunakarjääris paiknevate karjäärijärvede ruumala on võrreldes varasemate hinnangutega kuni 60% väiksem. Põhjakarjääri ruumala kattus vea piirides varasemates uuringutes esitatud hinnangutega. Karjäärijärvede põhjast avastati kuni paarikümne sentimeetri paksune setete kiht, mis proovivõtul osutus mustaks ebameeldiva lõhnaga mudaks. Selline põhjasete võib sarnaselt Maardu järves levivale FeS-rikka järvemuda kihile sisaldada olulistes kogustes raskemetalle ja toitained (nt. fosforit).

Tehtud järeldustest lähtuvalt on võimalik esitada järgmised soovitused, mida arvesse võtta kaevandustegevusest lähtuva kahju vähendamiseks (vee)keskkonnale Maardu fosforiidikarjääride ja kaevanduse näitel ning tulevastes uuringutes ja seiretel Maardu tehnogeensel alal:

1. Seadusest ja mäenduse ideoloogiast lähtuvalt ei ole Maardu karjäärides ja kaevanduses kaevandamine veel lõppenud, sest kaevandatud ala on korrastamata (Reinsalu jt, 2015; Maapõueseadus…, 2017; Rammul jt., 2017). Hetkel on tegu suures osas hüljatud kaevandamisalaga, mille territooriumil on hüdroloogilised tingimused võrreldes aktiivse kaevandamise ajaga oluliselt muutunud. Järgmise sammuna tuleks karjääride ja kaevanduse ala sulgemine lõpule viia, võttes arvesse nii varem koostatud sulgemise projekti (Mäeinstituut, 1991), karjääri aladel tänaseks juba läbi viidud uuringute tulemusi kui ka tulevasi uuringuid (vt. soovitused nr. 7-11);

2. Maardu karjääride ja kaevanduse korrastamise projektiga seotud keskkonnamõjude hindamisel tuleks kindlasti arvestada Maardu karjääride ja kaevanduse alal tänaseks toimunud looduslikke muutusi. Käesolevaks ajahetkeks on puistangumaterjali ja Maardu fosforiidilevila alal oleva pinna- ja põhjavee kaevandamisejärgne geokeemiline areng toimunud juba mitukümmend aastat. Võrreldes aktiivse kaevandamistegevuse perioodiga on tänaseks märgata püriidi oksüdatsiooni kiiruse aeglustumist. Seega käib hetkel ala looduslik stabiliseerumine. Ala korrastamisel tuleks püüelda selle poole, et ei häiritaks liigselt juba looduslikult kulgevaid protsesse, sest suured muudatused maastikus ja puistangumaterjali laiaulatuslik ümberpaigutamine võivad initsieerida rea muutusi, mille tagajärjed on täna toimuvatest hullemad. Näiteks võib puistangumaterjali ümberpaigutamine oksüdeerivatele tingimustele avada oksüdeerumisprotsessidest seni mõjutamata sügavamal paiknevad püriidirikkad kihid, mille oksüdatsioon võib omakorda avaldada mõju Maardu tehnogeensel alal leviva vee kvaliteedile;

3. Peamine tegur, tänu millele Maardu karjääride puistangutes ladestunud püriidi oksüdatsioon ei ole endaga kaasa toonud kaevandusaladele tihti omast happelise ja suure raskemetallide kontsentratsiooniga vee (nn. *acid mine drainage*) levikut, on puistangumaterjali lubjakivi, mis hoiab vee pH neutraalsena või kergelt aluselisena ega lase raskemetallidel mobiilseks muutuda. Seega on lubjakivi osutunud peamiseks teguriks, mis on Maardu tehnogeensel alal ära hoidnud tõsisema veesaaste kujunemise (Puura ja Pihlak, 1998). Eelnevast lähtub, et püriidirikka liivakivi ja argilliidiga seotud kaevandustegevuses tuleks vältida nende ladustamist eraldi kihina, sest happelisust puhverdava lubjakivi puudumine võib viia tõsise reostusallika tekkimiseni;

4. Maardu fosforiidikarjäärid ja nendest lähtuv reostus on hoiatavaks näiteks selle kohta, mida karjääride sulgemise projekti puudumine või selle ebapiisav täitmine võib endaga kaasa tuua. Seepärast on oluline, et tulevikus suletavates karjäärides reguleeritaks kaevikutesse tekkivate pinnaveekogude režiimi selliselt, et neis kogunev jääkreostus ei jõuaks ümbritsevatesse

saastumata pinnaveekogudesse ja põhjaveekihtidesse. Üheks võimaluseks on karjääriveekogude põhja tehislik veepidemeks muutmine karjääri sulgemisel peeneteralise suure savisisaldusega materjali abil juhul, kui karjääri alal maapinnalähedast looduslikku veepidet ei esine (Rammul jt., 2017). Lisaks tuleks reguleerida karjääri kaevikutesse koguneva vee äravoolu nagu nägi ette ka teostamata Maardu põhjakarjääri sulgemise projekt (Mäeinstituut, 1991; Reinsalu jt, 2015) ning korrastada olemasolevaid väljavoole selliselt, et vältida üleujutusi karjääriga piirnevatel aladel (Rammul jt., 2017). Korrastatud äravool aitab suletud karjäärides säilitada vajalikku määratud maksimaalset veetaset, mida ei ületata ka suurvee ajal. Samuti on oluline jätkata potentsiaalselt keskkonnaohtlike alade seiret ja järjepidevalt jälgida selliste alade vee kvaliteeti vähemalt paarkümmend aastat;

5. Maardu tehnogeensel alal paikneva pinna- ja põhjavee seisundi jälgimiseks ja võimaliku vee kvaliteedi halvenemise tuvastamiseks selle varajases faasis tuleks alale rajada järjepidevalt töötav seirevõrk, mille abil kogutaks proove nii pinnavees esinevate makrokomponentide, kui ka mikrokomponentide ja raskemetallide kontsentratsioonide määramiseks ning seotakse saadud tulemused muutustega pinnaveekogude veetasemetes ning vooluveekogude vooluhulkades;

6. Lähtuvalt lubjakivi olulisest puhverdavast rollist puistangutes toimuvates reaktsioonides on tulevikus keskkonnale potentsiaalselt ohtlikumad need Maardu karjääride piirkonnad, kus on rakendatud selektiivset aheraine ladustamist, milles graptoliitargilliit on eraldi kihina maetud lubjakivist ning Kvaternaari setetest koosnevate kihtide vahele. Selektiivse ladustamise tehnoloogiat on kasutatud Maardu põhjakarjääri kirdeosas ja Maardu lõunakarjääri ida- ja lääneservas (Puura, 1998), millest suurem keskkonnaoht valitseb põhjakarjääris. Just nendele piirkondadele tuleks tulevikus erilist tähelepanu pöörata ka seirevõrgu väljakujundamisel;

7. Loodavasse seirevõrku tuleks kaasata ka alal ja selle ümbruses paiknevad Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi ning Ordoviitsiumi veekihte avavad puurkaevud. Eelnevalt tuleks läbi viia uuring erinevates põhjaveekihtides leviva põhjavee kvaliteedi ja seda kujundavate protsesside selgitamiseks, et kindlaks teha need piirkonnad, kus Maardu fosforiidilevila aladelt lähtuv jääkreostus mõjutab põhjavee kvaliteeti. Enne seirevõrku lülitamist tuleks uuringukaevude seisundit kontrollida geofüüsikaliste meetoditega;

8. Välja tuleks töötada reageerimiskava olukorraks, kus Maardu karjääride või kaevanduste ala mõnes piirkonnas toimub lubjakivide puhverdusvõime vähenemisest tulenev pH langus ning raskemetallide kontsentratsiooni kasv;

9. Tulevaste uuringutega tuleks täpsustada vee mahte Maardu põhjakarjääri territooriumil paiknevates madalates karjäärijärvedes. Väikese sügavuse ja pinnani ulatuva veetaimestiku tõttu ei sobi selleks antud uuringus kasutatud sonarimõõtmiste metoodika, mille käigus tehakse sonarimõõtmised paadilt. Sobivamaks meetodiks võiks olla georadariga läbiviidavad mõõtmised talvel järvi katvalt jäält. Sama mõõdistuse käigus on võimalik määrata ka karjäärijärvede põhjas oleva settekihi paksus;

10. Tulevastes uuringutes tuleks kindlasti üle vaadata vee keemilise koostise määramiseks rakendatav metoodika. Eriti kriitiline on sulfaatiooni määramise metoodika korrigeerimine, sest see on piirkonna jääkreostuse kõige olulisem indikaator. Paralleelmõõtmised 2017. aasta II kvartali proovidega TTÜ geoloogia instituudi ioonkromatograafia laboratooriumis näitasid, et sulfaatiooni kontsentratsioonid võivad olla käesolevas uuringus valitud mõõtemetoodikat kasutades võrreldes tegelikkusega alahinnatud. Kasutatud Hach 2800DREL välilaboratooriumi mõõtevahemik sulfaatiooni jaoks on 2–70 mg/L (Hach Company, 2017), mis on oluliselt väiksem Maardu karjäärijärvedes ja kaevanduse käikudes esineva vee SO_4^{2-} kontsentratsioonist. Suuremate kontsentratsioonide mõõtmiseks tuleb proove lahjendada,

mis aga vähendab oluliselt nende mõõtmistäpsust ning võib põhjustada suuremate kontsentratsioonide puhul nende süstemaatilist alahindamist. Seega tuleks tulevikus sulfaatiooni kontsentratsioon kindlasti määrata ioonkromatograafia meetodil;

11. Tulevastes uuringutes tuleks ühe objektina kindlasti käsitleda ka karjäärijärvede põhjas tuvastatud põhjasetteid, kuhu võib olla akumuleerunud nii sekundaarset kipsi kui ka sekundaarseid karbonaatseid mineraale, mille olemasolu võib muuta hinnanguid puistangute ja karjäärijärvede puhverdusvõimele. Kuna Maardu fosforiidilevila alalt lähtunud reostusega seotud raskemetallide piirväärtusi ületavaid sisaldusi on leitud nii Maardu järve (Heinsalu, 1996) kui Kroodi oja põhjasetetes (Tamm ja Osjamets, 2009; EKUK, 2015), siis tuleks uurida, kas jälgi raskemetallide kõrgendatud sisaldustest leidub ka karjäärijärve põhjas avastatud mudas.

6. Kokkuvõte

Uuringu objektiks oli Maardu tehnogeensel alal leviv pinna- ja põhjavesi – selle maht, veetasemed, vooluhulgad, keemiline koostis ja selle kujunemine. Uuring oli jätkuks 2012–2013. aastal läbi viidud eelmisele Maardu fosforiidilevila tehnogeense põhjavee kvaliteedi uuringule (Mäeinstituut, 2013). Lisaks eelmises etapis uuritud parameetritele koguti käesolevas uuringus proove pinna- ja põhjavee tervikliku keemilise koostise ja selle raskemetallide, naftasaaduste ja fenoolide sisalduse määramiseks. Uuringu käigus viidi läbi põhjalik Maardu endise fosforiidikarjääri alal kujunenud karjäärijärvede põhjareljeefi mõõdistamine. Selleks kasutati kõrge lahutusvõimega geoakustiliste seadmete kompleksi (Pinger tüüpi profilograaf, külgvaatega sonar Sontec Sidescan), mis võimaldas välja selgitada veekogude põhjareljeefi iseärasusi ja teha kindlaks põhjasetete olemasolu. Saadud tulemuste alusel hinnati tehisveekogudes oleva vee maht. Kord kvartalis määrati Maardu tehnogeense ala vete veetasemed ja vooluveekogusid iseloomustavad vooluhulgad.

Uuringu tulemused kinnitavad varem tuvastatud vee liikumise seaduspärasusi Maardu fosforiidilevila alal. Pinnavee peamised liikumise trajektoorid kulgevad läbi Maardu põhjakarjääri ja Maardu kaevanduse väljavoolude Kroodi oja suunas ning Maardu lõunakarjäärist Maardu kaevanduse käikudesse. Suurimad vooluhulgad iseloomustavad Maardu põhjakarjääri ja Maardu kaevanduse väljavoole ning Kroodi oja, mis kogub kokku Maardu tehnogeenselt alalt ja mujalt ümbruskonnast Muuga lahte voolavad veed. Maardu lõunakarjääris hinnati karjäärijärvede mahuks 4,4 mln m^3 ja Maardu põhjakarjääris 1,4±0,25 milj. m^3.

Maardu fosforiidilevila ala pinna- ja põhjavee keemiline koostis näitab, et aktiivse kaevandamise ajal ning vahetult selle järel vee keemiat mõjutanud madalatemperatuuriline püriidi oksüdatsioon ning sellega kaasnevad protsessid on endiselt aktiivsed, mis väljendub pinnaveekogude kohta anomaalselt suuremates SO_4^{2-}, HCO_3^-, Mg^{2+} ja Ca^{2+} kontsentratsioonides ning kohati kehtestatud piirväärtustest suuremates Ni, Zn, Mo ja As kontsentratsioonides. Siiski on varasema andmestikuga võrreldes näha, et nii SO_4^{2-} ja raskemetallide kontsentratsioonid kui ka püriidi

oksüdatsiooni kiirust kirjeldava Mg/Ca suhte väärtused on aktiivse kaevandamistegevuse lõppemisest alates vähenenud, mis on kooskõlas varasemate prognoosidega püriidi oksüdatsiooni aeglustumisest pärast kaevandamistegevuse lõppu. Ümbritsevate pinnaveekogude (Maardu järv ja Kroodi oja) keemilises koostises on endiselt viiteid Maardu karjääridest ja kaevandusest lähtuvast jääkreostusest. Sealjuures on endisel kaevandamisalal toimuvatest protsessidest enam mõjutatud Kroodi oja. Pärast kaevandusvee pumpamise lõppu on Maardu lõunakarjääri mõju Maardu järvele oluliselt vähenenud ja tänapäeval olulist vee liikumist lõunakarjäärist Maardu järve ei toimu. Tänapäeval on oluliseks Maardu järve seisundit halvendavaks teguriks ümbruskonnast lähtuv lämmastiku- ja fosforireostus. Füüsikalis-keemiliste näitajate järgi määratud pinnaveekogude seisund Maardu tehnogeensel alal on valdavalt „kesine“ kuni „hea“. Peamiseks „kesise“ hinnangu põhjuseks on Maardu karjäärijärvi endiselt iseloomustav suur mineraalsus ja SO_4^{2-} kontsentratsioon ning valdavalt antropogeensetest allikatest pärinev üld-lämmastiku ja üld-fosfori suured kontsentratsioonid Maardu tehnogeenset ala ümbritsevates pinnaveekogudes. „Väga heas“ seisundis on vana Ülgase kaevanduse käikudes olev vesi, mis on aga Maardu tehnogeense ala vee voolusüsteemist eraldatud.

Tulevikus peaks kindlasti jätkuma Maardu fosforiidilevila alal paiknevate pinnaveekogude seire, sest sealse vee keemiat mõjutavad protsessid kulgevad veel pikka aega. Lisaks sellele on varasemates uuringutes (Puura jt, 1999) viidanud ohule, et teatud geokeemilises arengujärgus võib tulevikus toimuda happelise ja kõrge raskemetallide kontsentratsiooniga vee läbimurre karjäärijärvedesse, kui puistangutes oleva lubjakivi neutraliseeriv mõju ammendub (vt. peatükk 2). Potentsiaalselt olulist infot Maardu karjäärijärvede vee kvaliteeti ja seisundit kujundavate tegurite kohta võivad anda veekogude põhjas avastatud musta värvuse ja ebameeldiva lõhnaga muda uuringud. Seni saadud tulemuste valguses tuleks edaspidi täiendavalt uurida Maardu piirkonna Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjavee keemilist koostist, et selgitada millises ulatuses on see mõjutatud kaevandusest lähtuvast jääkreostusest ning millises ulatuses avaldab see karjääri järvi toites lahjendavat mõju puistangutes moodustuvale suure mineraalsusega veele. Olemasolev andmestik viitab sellele, et Maardu karjääridest ja kaevandusest lähtuv jääkreostus võib mõjutada Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi põhjavett Maardu fosforiidilevila

suhtes läänes ja loodes paiknevatel aladel, kus põhjaveekompleksi veetasemed on madalamal karjääride ja nende väljavoolu aasta keskmistest veetasemetest.

7. Tänuavaldused

Aruande autorid tänavad emeriitprofessor Enno Reinsalu abistavate märkuste ja kommentaaride eest aruande koostamisel, Veiko Karu ja Karin Robamit abi eest varasema andmestiku leidmisel ning uuringu eelmises etapis kasutatud metoodikate rakendamisel ja Jorma Lepikut välitöödel osalemise eest.

8. Kasutatud kirjandus

EELIS, 2017. VEKA andmebaas. http://veka.keskkonnainfo.ee/veka.aspx?page=vekavek. Viimati vaadatud 10.10.2017.

EKUK, 2015. Jääkreostusobjektide inventariseerimine 2014-2015. Kroodi oja jääkreostuse ohustamisega kavandatud tegevuste keskkonnamõju hindamise aruanne. Eesti Keskkonnauuringute keskus, Tartu.

Hach Company, 2017. EPA Compliant Methods. https://www.hach.com/epa. Viimati vaadatud 16.11.2017.

Heinsalu, A., 1996. Sediment stratigraphy and chemistry of Lake Maardu, Northern Estonia, Coastal Estonia: Recent Advances in Environmental and Cultural History. Strasbourg : Council of Europe ; Rixensart : PACT Belgium, 1996, (Pact ; 51), lk. 163–173.

Ilmateenistus, 2017. Ilmavaatlused. Lumi, sademed. Sademete kuu summad. http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/sademed/sademete-kuu-summad/. Viimati vaadatud 16.11.2017.

Johannes, E., Karise., V., 1979. Формирование качества вод при открытом способе добычи фосфоритов в Маарду (ЭССР). – В кн.: Материалы VI Всесоюзного симпозиума по современным проблемам самоочищения водоемов и регулирования качества воды. Таллин, 16-18 апреля 1979 г. II секция. Гидрохимические и санитарно-биологические аспекты самоочищения (Часть I). Таллин. С.66–67.

Jüriado, K., Raukas, A., Petersell, V., 2012. Alum shales causing radon risks on the example of Maardu area, North-Estonia. Oil Shale 29, 76–84.

KBFI, 1990. (Pihlak, A., ja Lippmaa, E., toimetajad) Maardu karjääri puistangute ja nende lähiümbruse mõningate objektide ökoloogilisest seisundist. Keemilise ja Füüsikalise Bioloogia Instituut. Aruanne, Tallinn.

Keskkonnaagenduur, 2017. Eesti riiklik keskkonnaseire programm - Meteoroloogiline ja hüdrogeoloogiline seire.

http://194.126.105.145/index.php?option=com_content&view=article&id=637&Itemid=176. Viimati vaadatud 27.10.2017.

Keskkonnaagentuur, 2013. Ohtlike ainete seire veekogudes. http://seire.keskkonnainfo.ee/index.php?option=com_content&view=article&id=2109&Itemid=422. Viimati vaadatud 27.10.2017.

KKM, 2010a., Pinnaveekogumite moodustamise kord ja nende pinnaveekogumite nimestik, mille seisundiklass tuleb määrata, pinnaveekogumite seisundiklassid ja seisundiklassidele vastavad kvaliteedinäitajate väärtused ning seisundiklasside määramise kord, Lisa 4 - https://www.riigiteataja.ee/akt/125112010015?leiaKehtiv; https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1251/1201/0015/KKM59_lisa4.pdf#

KKM., 2010b. Pinnaveekogumite moodustamise kord ja nende pinnaveekogumite nimestik, mille seisundiklass tuleb määrata, pinnaveekogumite seisundiklassid ja seisundiklassidele vastavad kvaliteedinäitajate väärtused ning seisundiklasside määramise kord, Lisa 5 - https://www.riigiteataja.ee/akt/125112010015?leiaKehtiv; https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1251/1201/0015/KKM59_lisa5.pdf

KKM, 2010c. Pinnaveekogumite moodustamise kord ja nende pinnaveekogumite nimestik, mille seisundiklass tuleb määrata, pinnaveekogumite seisundiklassid ja seisundiklassidele vastavad kvaliteedinäitajate väärtused ning seisundiklasside määramise kord, Lisa 2 - https://www.riigiteataja.ee/akt/13210253

https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/0000/1321/0253/13211232.pdf#

Kolats, M., 2015. Maardu kaevandamisala vee dünaamika ja kvaliteet. Tallinna Tehnikaülikool, Energeetikateaduskond, Mäeinstituut, Magistritöö.

Maa-amet, 2017. Geoportaal: avalik WMS teenus. http://geoportaal.maaamet.ee/est/Teenused/Avalik-WMS-teenus-p65.html. Viimati vaadatud 10.10.2017.

Maapõueseadus (01.01.2017). RT I, 10.11.2016, 1. Kasutatud 19.11.2017. https://www.riigiteataja.ee/akt/110112016001

Metsur, M., Tamm, I.,, 2009. Maardu II graniidikaevanduse kaevandamise loa taotlus. Keskkonnamõju hindamise aruanne. AS Maves.

Mäeinstituut, 1991. Maardu Põhjakarjääri sulgemise projekt. Mäekateeder. Tallinna Tehnikaülikool.

Mäeinstituut, 2013. Maardu fosforiidilevila tehnogeense põhjavee uuring. KIK projekti nr. 11067 lõpparuanne. Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, Tallinn.

Naumov, B., Karise, V., 1991. Вынос минеральных веществ в Финский залив из фосфоритового карьера Маарду. – Изв. АН ЭССР. Геология 40, 165–172.

Naumov, B., 1991. Загрязнение гидросферы при выщелачивании диктионемовых аргиллитов в отвалах Маардуских фосфоритовых карьеров. – Oil Shale 8, 266–274.

Ohtlike ainete sisalduse piirväärtused pinnases (11.08.2010 nr. 38). RT I 2010, 57, 373. Kasutatud 15.11.2017. https://www.riigiteataja.ee/akt/13348997

Ohtlike ainete põhjavee kvaliteedi piirväärtused (11.08.2010 nr. 39). RT I 2010, 57, 374. Kasutatud 15.11.2017. https://www.riigiteataja.ee/akt/13349010

Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 2013, Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p., https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/

Petersell, V., 1997. Dictyonema argillite. In: Raukas, A., Teedumäe, A. (toimetajad), Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, lk. 313–326.

Pihlak, A., Maremäe, E., Pikkov, V., Lippmaa, E., 1984. Maardu fosforiidikarjääri puistangute saastav mõju veele. Eesti NSV TA Toimetised. Bioloogia 33, 166–170.

Pinnaveekogumite moodustamise kord ja nende pinnaveekogumite nimestik, mille seisundiklass tuleb määrata, pinnaveekogumite seisundiklassid ja seisundiklassidele vastavad kvaliteedinäitajate väärtused ning seisundiklasside määramise kord (28.11.2010). RTL 2009, 64, 941. Kasutatud 10.10.2017. https://www.riigiteataja.ee/akt/13210253

Prioriteetsete ainete ja prioriteetsete ohtlike ainete nimistu, prioriteetsete ainete, prioriteetsete ohtlike ainete ja teatavate muude saasteainete keskkonna kvaliteedi piirväärtused ning nende kohaldamise meetodid, vesikonnaspetsiifiliste saasteainete keskkonna kvaliteedi piirväärtused, ainete jälgimisnimekiri (11.01.2016). Riigi Teataja I. Kasutatud 10.10.2017. https://www.riigiteataja.ee/akt/108012016010

Puura, E. 1998. Weathering of mining waste rock containing alum shale and limestone: a case-study of Mardu dumps, Estonia. Stockholm: Royal Institute of Technology.

Puura, E., Pihlak, A. 1998. Oxidation of Dictyonema shale in Maardu mining waste dumps. Oil Shale 15, 239¬267.

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.

Puura, E., Neretnieks, I. 2000. Atmospheric oxidation of the pyritic waste rock in Maardu, Estonia. 2 an assessment of aluminosilicate buffering protential. Environmental Geology 39, 560–566.

Pärn, J., Raidla, V., Vaikmäe, R., Martma, T., Ivask, J., Mokrik, R., Erg, K., 2016. The recharge of glacial meltwater and its influence on the geochemical evolution of groundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern part of the Baltic Artesian Basin. Applied Geochemistry 72, 125–135.

Rammul, Ü., Niitlaan, E., Reinsalu, E. ja Keerberg, L., (koostajad) 2017. Ehitusmaavarade uuringu- ja kaevandamisalade korrastamise käsiraamat. OÜ Inseneribüroo STEIGER, Tallinn.

Raudsep, R., 1997. Mineral occurrences. In: Raukas, A., Teedumäe, A. (toimetajad), Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, lk. 331–336.

Reinsalu, E., 2005. Changes in mine dewatering after the closure of exhausted oil shale mines. Oil Shale 22, 261–273.

Reinsalu, E., 2011. Eesti mäendus. Õpik kõrgkoolidele. TTÜ Kirjastus, Tallinn.

Reinsalu, E., Valgma, I., Hind, H., Sokman, K., 2006. Technogenic water in closed oil shale mines. Oil Shale 23, 15–28.

Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I., 2015. Kaevandatud maa. Digiteavik. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, https://digi.lib.ttu.ee/i/?2215. Viimati vaadatud: 14.11.2017.

Sedman, P., Puura, E., 1995. Maardu karjääri monitooringu projekt. AS Geotehnika inseneribüroo aruanne 313.

Tamm, I., Osjamets, M. 2009. Kroodi oja ehitusgeoloogiline- ja reostusuuring. Lõpparuanne. AS Maves, Tallinn, töö nr. 9003.

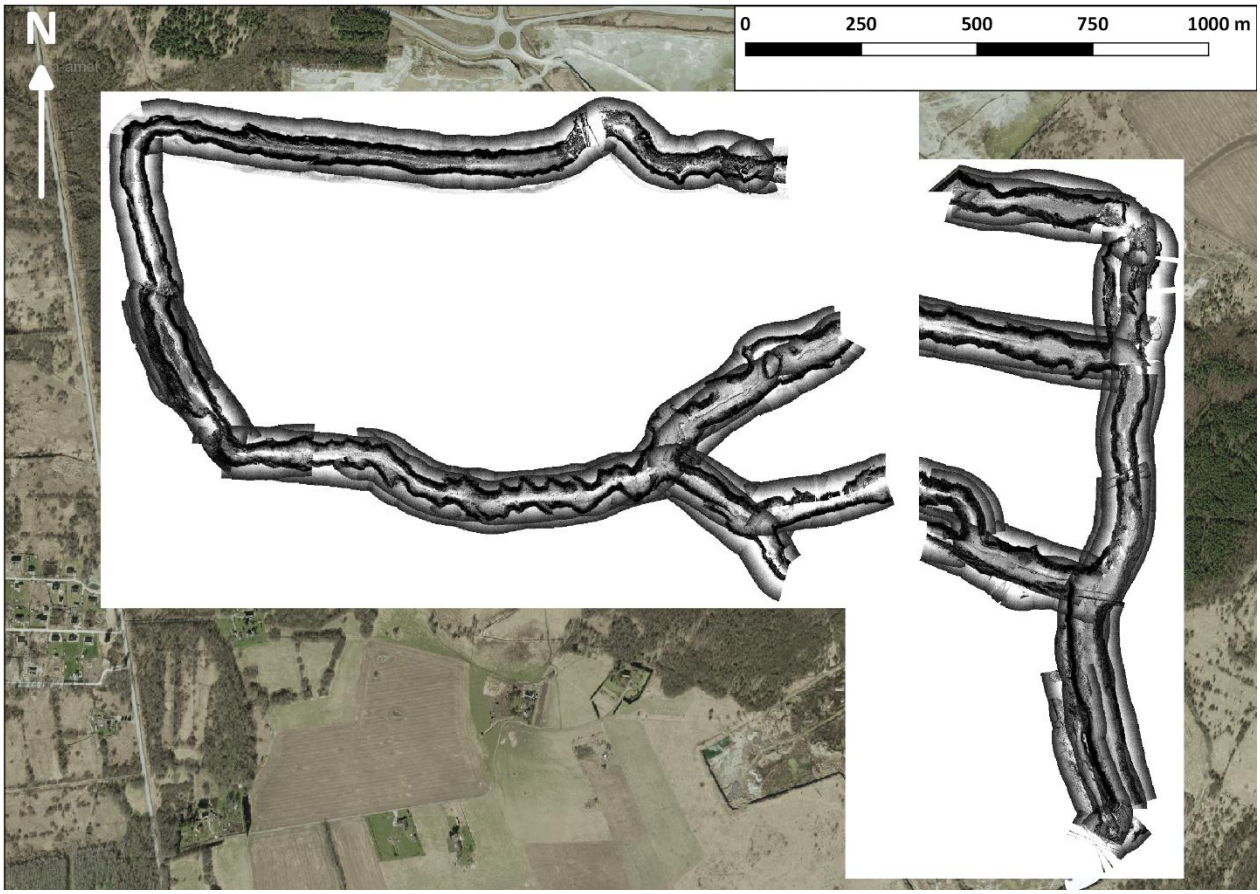
Tamm, I., Ideon, T., 2011. Suletud, sh. peremeheta jäätmehoidlate inventeerimisnimestiku koostamise I etapp. AS Maves, Tallinn, töö nr. 11093.

Tamm, I., Ideon, T., 2012. Suletud, sh. peremeheta jäätmehoidlate inventeerimisnimestiku koostamise II etapp. AS Maves, Tallinn, töö nr. 12042.

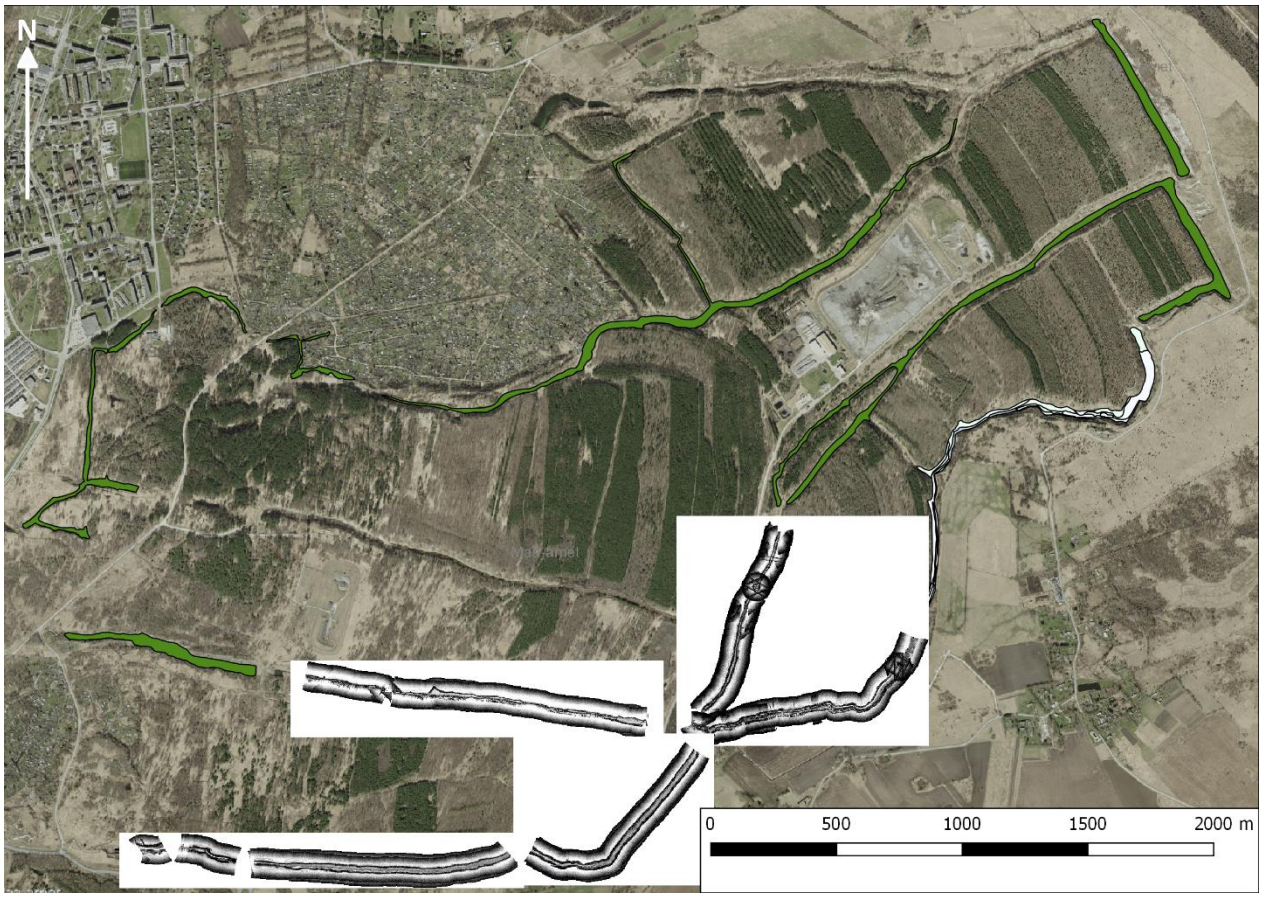
Tamm, I., Pelle, A., 2016. Harjumaa Ordoviitsiumi-Kambriumi ja Kambriumi-Vendi veekihtide Harku, Jõelähtme, Viimsi, Saku valdade ning Tallinna (välja arvatud Nõmme ja Lasnamäe linnaosa) ja Maardu linna põhjaveevarude ümberhindamise uuring. AS Maves, Tallinn, töö nr. 150039.

Voolma, M., Soesoo, A., Hade, S., Hints, R., Kallaste, T., 2013. Geochemical heterogeneity of Estonian graptolite argillite. Oil Shale 30, 377–401.

Lisa 1. Maardu karjäärijärvede põhjareljeef



Joonis 18. Maardu lõunakarjääri järvede põhjareljeef külgvaatega sonari Sontec Sidescan sonaripildi järgi. (aluskaart: Maa-amet, 2017)



Joonis 19. Maardu põhjakarjääri järvede põhjareljeef külgvaatega sonari Sontec Sidescan sonaripildi järgi. (aluskaart: Maa-amet, 2017)