

Tartu Ülikool
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geoloogia osakond

Tanel Mäger

Viirsavi poorivee isotoopkoostisest Lääne-Eestis

magistritöö geoloogias

Juhendajad: Tiit Hang
Tõnu Martma

Tartu 2013

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Teoreetiline taust	4
1.1. Viirsavi	4
1.2. Stabiilsed isotoobid	5
1.3. Vesinik ja hapnik	6
1.4. Isotoopide ja kliima vaheline seos	7
2. Uuringuala iseloomustus ja varasem uuritus	8
3. Materjal ja meetodika	11
3.1. Proovide kogumine	11
3.2. Laboratoorsed tööd	13
4. Tulemused	15
4.1. Uuritud läbilõike litoloogiline kirjeldus ning kogutud proovide üldandmed	15
4.2. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD väärtused Jaansoni läbilõike pooriveses	18
5. Arutelu	22
6. Järeldused	34
Kokkuvõte	36
Isotopic composition of pore water from varved clays in Western Estonia	38
Tänu sõnad	40
Kasutatud kirjandus	41

Sissejuhatus

Maateaduses on liustikujää, põhjavee ning pinnase isotoopkoostise uuringud laialt levinud paleokliima rekonstrueerimisel ning põhjavee päritolu, saastatuse ja liikumise välja selgitamisel. Nii on näiteks hapniku stabiilseid isotoope kasutatud Holotseeni paleokliima rekonstrueerimisel Alaskal (Anderson et al., 2001) ning põhjavee päritolu ja vanuse määramisel Türgis (Görür & Genç, 2012). Eestis on põhjavee isotoopuuringutega tõestatud Põhja-Eesti Kambriumi-Vendi põhjaveekompleksi vee pärinemine viimase liustiku sulamise ajast (Vaikmäe et al., 2001; Raidla, 2010).

Pärnu ümbruses laialdaselt levinud aastakihilised jääjärvelise tekkega viirsavid on omapärane, harvaesineva täpsusega geoloogiline arhiiv. Nende setete uurimine võimaldab kirjeldada liustiku taandumise iseloomu, kiirust ja aega ning ka jääjärvelist settimiskeskonda. Juba lihtne aastavarvide ja sesoonsete kihtide paksuse muutus peegeldab liustiku sulamise intensiivsust ja sealt kaudselt ka kliimatingimusi. Samas puuduvad head võimalused keskkonningimuste kirjeldamiseks, kuna vahetult liustikuga kontaktis olnud jääjärvedes ei olnud elustikku veel kujunenud. Teada on savide väga halb veejuhtivus. Ja kuigi viirsavid on selgelt kihilise tekstuuriga ja nende vertikaalne ja horisontaalne veejuhtivus ilmselt on erinevad, püstitati käesolevas töös hüpotees, et viirsavi halvast veejuhtivusest tingituna võib savi poorivesi pärineda settimise ajast ja peegeldada ligilähedaselt jääjärve vee omadusi. Sarnases varasemas uuringus (Niit, 2011) Sauga viirsaviläbilõikest pöörati suurt tähelepanu viirsavi poorivee eraldamise meetodikale, kuid samas jättis vähene proovide hulk õhku hulgaliselt küsimusi.

Käesoleva töö eesmärgiks on Pärnu linna viirsavilasundi poorivee isotoopkoostise ja selle vertikaalse muutlikkuse uuring vee võimaliku päritolu selgitamiseks. Läbilõige paikneb Pärnu jõe paremkaldal Kesklinna silla lähistel. Asukoha valikul sai määravaks see, et seal on viirsavilasundi eri sügavusele varem paigaldatud automaatpiesomeetrid poorivee rõhu muutuste salvestamiseks. Samuti on seal tehtud savi vertikaalse niiskusesisalduse uuringud ning pikaajaliselt seiratud viirsavi aluse põhjavee taseme muutusi. Samuti on konkreetses kohas tehtud varvokronoloogiline uuring ning läbilõige on seotud Pärnu ümbruse kohaliku varvokronoloogiasse, mis võimaldab tulemusi otseselt seostada varasema uuringuga Saugast, aga teha ka piirkondlikke järeldusi.

1. Teoreetiline taust

1.1. Viirsavi

Viirasavi on mandrijää sulamisveega jääpaisjärvedesse kantud peeneteraline kihiline sete, mille kihilisus on tingitud sellest, et liustiku sulamine toimus eri aastaegadel erineva intensiivsusega. Kevadel ja suvel, kui liustiku sulamine oli soojuse tõttu intensiivsem, kanti järve palju setteid. Suuremad liiva- ja aleuriidiosakesed settisid põhja suhteliselt kiiresti ning moodustasid viirsavi heledama, nn. suvekihi. Saviosakesed, mille suurus on ligikaudu 2 mikromeetrit, vajavad aga settimiseks väga rahulikku keskkonda. Talviti kattus veekogu jääga luues saviosakestele rahuliku settimiskeskkonna. Sel ajal settinud savidest moodustusidki tumedamad, nn. talvekihid. Suve- ja talvekiht kokku moodustavad aastavarvi ehk varvi (Niit, 2011).

Mõiste varv ise tuleneb rootsi keelest ning esialgu tähistati sellega jääjärveliste setete sesoonseid kihte. 1910. aasta Rahvusvahelisel Geoloogiakongressil esitas Rootsi geoloog G. De Geer uue, tänapäeval kasutusel oleva definitsiooni, mille kohaselt laieneb mõiste varv ühe aasta jooksul settinud sesoonsete kihtide kompleksile (De Geer, 1912).

Lugedes kokku läbilõikes esinevad varvid, on võimalik aasta täpsusega määratleda, kui kaua kulus antud lasundi settimiseks. Sesoonsete kihtide ja varvide paksus aga iseloomustab sulamise intensiivsust ja/või settimiskoha kaugust liustikust. Normaalsete settimistingimuste korral, kus liustikuserv aeglaselt kaugeneb konkreetsest settimisalast, iseloomustab viirsavilasundit varvipaksuse ühtlane vähenemine läbilõike ülemise osa suunas. Samas suunas muutub ka aastasiseste sesoonsete kihtide paksuste vahekord, kus alumistes nn. proksimaalsetes varvides domineerib suvekiht, basseini keskosa varvides on kihid võrdse kaaluga ning ülemistes distaalsetes varvides domineerib savikas talvekiht.

1.2. Stabiilsed isotoobid

Keemiliste elementide aatomid sisaldavad positiivselt laetud tuuma, kuhu on koondunud enamus antud aatomite massist. Tuuma ümber tiirlevad negatiivselt laetud elektronid. Neutraalse aatomi puhul tasakaalustab elektronide negatiivne laeng tuuma positiivset laengut. Tuuma põhilised koostisosad on prootonid ja neutronid, mis annavad sellele massi ja laengu. Prootonid on positiivse laenguga osakesed, millede laeng on võrdne, kuid vastupidine elektronide laengule. Neutronid on prootonitest suurema kaaluga ning ei oma elektrilaengut. Neutraalse aatomi puhul on elektronide ja prootonite arv võrdne. Seega määrab prootonite arv tuumas, mitu elektroni saab olla neutraalsel aatomil. Elektronide arv ning jaotus elektronpilves määravad omakorda aatomi keemilised omadused.

Aatomi koostist kirjeldatakse selle tuumas olevate prootonite ja neutronite arvu kaudu. Prootonite arvu nimetatakse aatomnumbriks ja seda tähistatakse tähega Z . Neutraalsete aatomite puhul näitab Z ühtlasi ka elektronide arvu. Neutronite arv on neutronnumber ning selle tähis on N . Prootonite ja neutronite summa on aatommass (Faure & Mensing, 2005).

Isotoobid on aatomite erimid. Kõigil sama elemendi isotoopidel on sama arv prootoneid ja elektrone, kuid nad erinevad üksteisest neutronite arvu poolest. Termin ise tuleneb kreekakeelsetest sõnadest *isos* (võrdne) ja *topos* (asukoht), mis arvatavasti viitab elementide tavapärasele asukohale perioodilisuse tabelis. Isotoobid jagunevad stabiilseteks ning ebastabiilseteks ehk radioaktiivseteks. Isotoobid on stabiilsed, kui prootonite ja neutronite suhe on väiksem kui 1,0 – 1,5. See kehtib enamasti aatomite puhul, mille N või Z on alla ~25. Stabiilsed on ka isotoobid, millede aatomnumber on paarisarv. See kehtib rohkem kui ~25 prootoni või neutroniga nukliidide puhul (Dawson & Brooks, 2001).

Radioaktiivsed isotoobid lagunevad aja jooksul stabiilseteks vormideks. Nende puhul kasutatakse mõistet poolestusaeg. See on defineeritud ajana, mille jooksul muutub aine hulk algsest poole võrra väiksemaks. Näiteks laguneb radioaktiivne ^{14}C isotoop $5\,730 \pm 40$ aasta jooksul stabiilseks ^{14}N isotoobiks (Godwin, 1962).

Stabiilseid isotoope iseloomustab see, et pärast tekkimist ei lagune need ühekski teiseks nukliidiks. Seega peetakse nende poolestusaega lõpmatuks. Suurim teadaolev stabiilsete isotoopide arv ühe elemendi puhul on 10. Samas enamus stabiilsetest elementidest sisaldab endas ühte väga suure osakaaluga isotoopi ning kuni paari isotoopi, millede osakaal on väga väike (Dawson & Brooks, 2001).

1.3. Vesinik ja hapnik

Vesinikul ($Z = 1$) on kaks stabiilset isotoopi: ^1H ning ^2H (deuteerium, D). Hapnikul ($Z = 8$) on aga kolm stabiilset isotoopi: ^{16}O , ^{17}O ning ^{18}O . Looduses on vesiniku isotoopide vahekord järgmine: $^1\text{H} = 99,985\%$ ning $^2\text{H} = 0,015\%$. Hapniku isotoobid esinevad järgnevas vahekorras: $^{16}\text{O} = 99,762\%$, $^{17}\text{O} = 0,038\%$ ning $^{18}\text{O} = 0,200\%$. Kahe stabiilse vesiniku isotoobi ning kolme stabiilse hapniku isotoobi esinemine võimaldab vee molekulil esineda üheksa erineva konfiguratsioonina, nendest kõige levinumad on $^1\text{H}^{16}\text{O}$, $^1\text{H}^{18}\text{O}$, $^1\text{H}^{17}\text{O}$ ja $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$. Faasiüleminekul (aurustumine, kondenseerumine) ja keemiliste reaktsioonide käigus isotoopide suhted muutuvad.

Erineva koostisega vee molekulidel on erineva massi tõttu ka erinevad termodünaamilised omadused. Kergematel molekulidel on kõrgem võnkesagedus ning seega omavad need ka suuremat aururõhku. Kergema isotoobi poolt moodustatud sidemed on nõrgemad ning seetõttu ka kergemini purustatavad. Tänu sellele aurustub kergeim vee molekul ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) palju lihtsamini võrreldes raskemate vee molekuliga. Seega on veeaur rikastunud $^1\text{H}_2$ ja ^{16}O -ga ning vesi, millest veeaur aurustus, D ja ^{18}O -ga (Faure & Mensing, 2005). Aurustumine aga sõltub omakorda temperatuurist ning seega on võimalik erinevate hapniku isotoopide suhte abil välja selgitada mingil kindlal ajaperioodil valitsenud keskkonnatingimused.

Isotoopide kontsentratsioone mõõdetakse massispektromeetri või laseriga ning väljendatakse võrrelduna rahvusvahelise standardiga VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), mille poolt on defineeritud suhted: $^2\text{H}/^1\text{H} = 155,76 \pm 0,10$ ppm, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O} = 379,9 \pm 1,60$ ppm ja $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2005,20 \pm 0,43$ ppm (Comité International des Poids et Mesures, 2005).

Standardi kasutamine vähendab süstemaatilisi vigu, mis võivad esineda erinevate massispektromeetritega mõõtmisel. Mõõtmistulemusi väljendatakse suhtena δ (delta), mis saadakse valemist $\delta_{\text{PROOV}} = 1000((R_{\text{PROOV}}/R_{\text{VSMOW}})-1)$, kus R on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ või $^2\text{H}/^1\text{H}$ suhe vastavalt proovis ja standardis. Hapniku ja vesiniku isotoopide suhete (vastavalt $\delta^{18}\text{O}$ ja δD) väärtused võivad olla negatiivsed või positiivsed. Positiivne $\delta^{18}\text{O}$ väärtus näitab, et proovil on suurem $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ suhe, kui standardil. See tähendab, et proov on suhteliselt rohkem rikastatud ^{18}O isotoobiga võrreldes VSMOW standardiga. Negatiivse väärtuse korral on asi vastupidine. Hapniku proovi isotoopkoostist väljendatakse alati raske isotoobi (^{18}O) rohkuse või vähesusega võrreldes VSMOW standardiga (Faure & Mensing, 2005).

Sademete vee ja sademetest pärinevate looduslike vete $\delta^{18}\text{O}$ ja δD vahel on lineaarne seos, mida nimetatakse „*meteoric water line*“ (Craig, 1961). Enamiku tänapäevaste sademete korral on see seos väljendatav kujul $\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$ ja seda nimetatakse „*Global Meteoric Water Line – GMWL*“.

1.4. Isotoopide ja kliima vaheline seos

Kerge ja raske hapniku suhe võimaldab määrata vee kujunemise aegset temperatuuri. Stabiilsete isotoopide fraktsioneerumine looduses toimub masside ja temperatuuri erinevuste tõttu. Kuna kergem hapniku isotoop (^{16}O) aurustub mereveest kergemini, on tema kontsentratsioon atmosfääris olevas veeaurus suurem kui raskeimal hapniku isotoobil (^{18}O). Aurumist kontrollib aga temperatuur. Seega, mida külmem on kliima, seda negatiivsem on sademete $\delta^{18}\text{O}$ väärtus (Faure & Mensing, 2005).

Jääaegadel salvestati suur osa ^{16}O liustikujäässe ning merevesi rikastus ^{18}O suhtes. See omakorda tähendab, et jääaegadel pidi raske hapniku (^{18}O) sisaldus ookeanivesi olema palju suurem, kui soojematel jäävaheaegadel. Kliima soojenedes liustikud sulasid ning ookeanivesi muutus isotoopide poolest kergemaks. Seega on võimalik isotoopide kontsentratsioonide võrdlemise teel välja selgitada maailmamere temperatuur ning selle muutused, mida dateeringute olemasolul saab siduda ka mingite kindlate ajaperioodidega.

2. Uuringuala iseloomustus ja varasem uuritus

Pärnu piirkonna puhul on tegemist rannikumadalikuga, mille absoluutkõrgused varieeruvad 2 ja 15 m vahel. Kristalliinsel aluskorral lasuvad aluspõhja settekivimid: Siluri lubjakivid ning Devoni liivakivid. Aluspõhja pealispind asetseb 10 – 15 m sügavusel (Tavast ja Raukas, 1982). Paleosoilised kivimid on omakorda kaetud Kvaternaari setetega, mille alumise osa Pärnu piirkonnas moodustab viimase jäätumise ajal ehk Hilis-Weichelis moodustunud saviliivmoreen (Kohv, 2011). Hilis-Weichelist vanemaid setteid Pärnu lähiümbruse pinnakattes teada ei ole, kuna iga järgnev jääliustiku pealetung lükkas minema eelnenud jäätumise või jäävaheaja setted. Seetõttu lasub noorim moreen Pärnumaal peaaegu kõikjal vahetult aluspõhja kivimite peal (Kersna, 2009). Moreeni paksus on ca. 10 m ning sellel lasuvad jääjärvelised liivad, aleuriidid ja savi. Viirsavi keskmine paksus on 5 – 9 m, ulatudes Pärnu linnas maksimaalselt kolmekümne meetrini. Viirsavi muutlik paksus tuleneb lamava saviliivmoreeni pealispinna väga ebatasasest reljeefist (Hang et al., 2007). Viirsavi omakorda on kaetud 2 – 3 m (maksimaalselt 19 m) paksuste Holotseeni mereliste liivade ja aleuriitidega ning kohati ka eoolsete setetega (Kohv, 2011).

Viirsavi on settinud pärast mandrijää taandumist moodustunud ulatuslikus mageveelises Balti jääpaisjärves. Järve põhja settisid jääjärvelised liivad, aleuriidid ja savid. Kuna viirsavide selge kihilisuse tekkimiseks on vaja vähemalt 15 – 20 m sügavust vett, on need settinud jääjärve kõige sügavamatesse osadesse (Hang et al. 2008).

Pärnu piirkonna viirsavilasund on jaotatud viieks üleminekuliste piiridega ning erineva paksusega intervalliks (A – E) (Tabel 1), mis erinevad üksteisest geotehniliste parameetrite, varvide paksuse ja koostise poolest. Hang et al. (2007) töös toodud kirjelduse alusel jaotub viirsavilasund järgnevalt: intervall A on perioodiliste kuivamis- ja külmumisjälgedega lasundi kõige ülemine osa, kus varvide kihiline struktuur on kohati hävinenud. Intervall B on õhukeste domineeriva talvekihiga varvide kompleks, mis on moodustunud jääpaisjärve distaalses osas. Edasi sügavuse suunas tuleb intervall C, kus samuti domineerivad varvide talvekihid, kuid varvide üldine paksus on suurem, kui eelnevas intervallis. Intervall C on settinud jääpaisjärve sügavaimas keskosas. Intervall E sisaldab endas Pärnu piirkonna kõige paksemaid varve, kus domineerivad suvekihid ning see on moodustunud liustiku serva läheduses erinevates settimistingimustes. Normaalse varvide seeria on kohati katkestatud diamiktoni (savimoreeni) kihiga (intervall D). Tegemist on kuni 8 m paksuse massiivse

aleuriitse-savise liivaterasid ja kukkekive sisaldava kompleksiga. D intervall on lateraalselt muutliku paksusega ning puudub kohati üldse.

Tabel 1. Pärnu piirkonna viirsavikompleksi üldistatud kirjeldus Hang et al. (2007) järgi.

Intervall	Kirjeldus
A	Kuivanud rohekashall savi, varvide struktuur hävinenud tänu jääjärve veetaseme alanemisele ja savi võimalikule kerkimisele üle veetaseme ning mullatekkeprotsessidele.
B	Viirsavi, sisaldab seeriat õhukesti domineeriva talvekihiga varve; savikad varvid raskesti eristatavad.
C	Viirsavi, domineeriva talvekihiga varvid; savikad varvid selgesti eristatavad. Varvide kogupaksus väiksem, kui intervallis E ning nende paksus väheneb maapinna suunas. Seal, kus esineb intervall D, on kahe kompleksi piir järsk.
D	Diamikton. Hall massiivne aleuriitne-savine hajutatud liivaterasid sisaldav kompleks. Lateraalselt katkendlik esinemine, maksimaalne teadaolev paksus 8 m.
E	Viirsavi, domineeriva suvekihiga varvid; varvid väga selgesti eristatavad. Viirsavikompleksi kõige paksemad varvid, millede paksus väheneb maapinna suunas. Ebastabiilne settimiskeskond liustiku serva läheduses väljendub sorteeritud suvekihtides, kus esinevad üksikud virgmärgid. Intervalli D esinemisalal on kahe kompleksi piir järsk, mujal on üleminek E ja C intervalli vahel katkematu kihilisusega.

Seni põhjalikuma ülevaate Eesti, sh. Pärnu ümbruse viirsavide litoloogiast, on esitanud E. Pirrus (1968), mida hiljem on täiendatud viirsavide geotehniliste omaduste kirjeldamisega (Saarse & Pirrus, 1988; Kattel, 1989, Saarse 1992; Kersna, 2009). Viimastel aastatel on ilmunud rida publikatsioone Pärnu ümbruse savipinnastes toimunud maalihetest, nende tekkemehhanismist ja nende seostest savi geotehniliste omadustega ning esitatud on ka lihkeohtlikkuse hinnang (Kohv et al. 2009, 2010a, 2010b; Kohv 2011).

Esimesed varvomeetriselised mõõdistamised Eestis teostas 1924. a. Soome geoloog M. Sauramo (Sauramo, 1925). Ka varvokronoloogia rajaja G. De Geer on mõõdistanud paar läbilõiget Pärnu linnast (Kirsis, 2006), kuid pole neid publitseerinud. Hiljem on E. Rähni uurinud 32 viirsaviläbilõiget Lääne-Eestis, kuid ei suutnud neid usutavalt korreleerida. Tema katse kasutada korrelatsiooniks pakse liivakaid ülevooluvarve ei andnud samuti usaldatavaid tulemusi (Saarse & Pirrus 1988). Hiljuti esitasid Talviste et al. (2012) Pärnu viirsavibasseini distaalse osa varvokronoloogia ning Hang & Kohv (2013) kogu Pärnu viirsavibasseini 585 aastat haarava varvokronoloogia ning vastava settimiskeskkonna interpretatsiooni.

Pärnu viirsavidest leitud karbonaatsete konkretsioonide keemilist ja isotoopkoostist on kirjeldanud Kiipli et al. (1995) ning seostanud nende kujunemist Litoriinamere arenguetapiga Läänemere arengus. Nimetatud tööga sarnaseid tulemusi esitas ka R. Torp (2011).

Viirsavi poorivee isotoopkoostist uuris oma bakalaureusetöös J. Niit (2011) ning seda uurimust käesolevas töös ka jätkatakse.

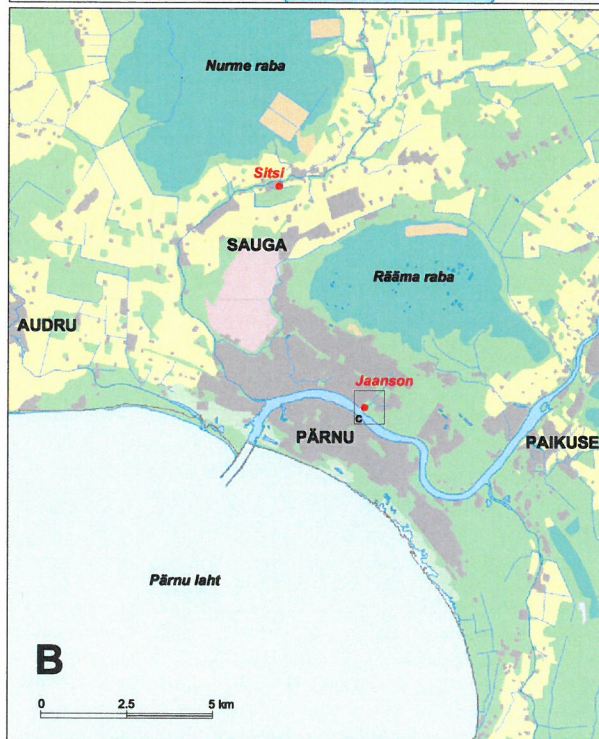
3. Materjal ja metoodika

3.1. Proovide kogumine

Proovid koguti 2012. aasta juulis Pärnu linnas Pärnu jõe paremal kaldal Ringtee mets kinnistul (N 58°23'11,2", E 24°31'55,4") (Joonis 1). Koha valikul sai määravaks see, et antud asukohas on ka varem läbi viidud viirsavi uuringuid ja läbilõike litoloogia on detailselt teada. Lisaks on proovivõtukohta kõrval savisse installeeritud 4 automaatset piesomeetrit savi poorivee rõhu muutuste jälgimiseks. Samas paikneb ka puurkaev, kus pikaajaliselt on monitooritud savialuse põhjavee taseme muutusi (Talviste, 2004) ning konkreetsest kohast pärinevad ka korduvad savi niiskusesisalduse uuringud (Kersna, 2009).

Proovide võtmiseks kasutati vene tüüpi soopuuri ning mehhaanilist puurseadet „Dando Terrier 2002“. Vene tüüpi soopuur on möödunud sajandi keskpaigas loodud puur, mille ehitus on järgmine: enamasti meetri pikkune ja vastavalt töö eesmärgile erineva läbimõõduga, otstest suletud renn (puurkann) on kaetud ümber pikitelje pöörleva metall-lehega. Puurkann surutakse vertikaalselt settesse ning väljaulatuvatest varrastest pööratakse kannu pool ringi ümber paigalseisva lehe. Selle tulemusena jäävad puurkannu rikkumata lasumuses setted meid huvitavast sügavusvahemikust (Hang jt, 2002).

Uuringualale puuriti kõrvuti kolm puurauku: Jaanson-1-12 ja Jaanson-2-12, kus prooviti sügavusvahemik 2 – 12 m ning Jaanson-3-12, kus prooviti sügavusvahemik 2,3 – 12,3 m. Kolmest puursüdamikust võetud 1 m pikkused prooviintervallid pakiti kuivamise vältimiseks kilesse ning paigaldati ohutuks transpordiks PVC rennidesse. Võrdluseks savi poorivee isotoopkoostisele võeti välitööde käigus proovid ka puurimiskoha kõrval (ca. 10 m) asuvast Niidu ojast ning puurimiskohast ca. 120 m kauguselt Pärnu jõest.



Joonis 1. Uuringuala asukoht (A). Sitsi ja Jaansoniga vaatluskohtade asukohad (B). Jaansoniga puuraugua asukoht (C). Kaardialused: Wikipedia, Eesti Geoloogiakeskus, Maa-amet.

3.2. Laboratoorsed tööd

Välitöö käigus kogutud puursüdamike proovipindade puhastamine, setete kirjeldamine ja sesoonsete kihtide mõõtmine ning poorivee pressimiseks sobivate setteintervallide ettevalmistamine teostati käesoleva töö autori poolt. Lisaks paigutati kolm läbilõiget kõrvuti ning korreleeriti sarnase paksuse ja struktuuriga varvide abil.

Proovimiseks valiti läbilõige puuraugust Jaanson-2-12 ning proovivõtu intervallid valiti nii, et vertikaalselt oleks esindatud kogu viirsaviläbilõige ning varvide suve- ja talvekihid. Võimaluse korral võeti proovid sama varvi nii aleuriitset suvekihist kui ka savisest talvekihist. Õhemate varvide puhul võeti üldproov kogu varvist ning läbilõike ülemise osa puhul hõlmas proov kahel juhul ka mitut varvi. Lisaks võeti kolm proovi läbilõikes esinevast ca. 1 m paksusest savidiamiktoni (savimoreeni) kihist. Poorivee eraldamiseks vajalike proovide võtmisel kooriti töö autori poolt noaga savilt pealmine kiht, et eemaldada puurimise ja käsitlemise käigus tekkinud saaste. Proovid pakiti koheselt toidukilesse ning paigutati õhukindlasse plastiktopsi, mida hoiti 4°C temperatuuril kuni edasise tegevuseni.

Proovi kogus sõltus konkreetse kihi paksusest ning jäi 16,87 – 89,39 grammi piiresse (Tabel 3). Esialgelt võeti 32 proovi. Kuna viiest proovist (J-2, J-4, J-5, J-8 ja J-9) ei õnnestunud koguda isotoopanalüüsiks piisavat veekogust, võeti hiljem veel täiendavalt kaks proovi samast puursüdamikust (proovid J-37 ja J-39, mis asendasid vastavalt proove J-5 ja J-9). Lisaks võeti viis proovi puuraugust Jaanson-3-12. Nendest proovid J-35, J-36 ja J-38 asendasid vastavalt proove J-2, J-4 ja J-8 (Tabel 4). Kuna erinevad südamikud oli varvide alusel võimalik väga täpselt korreleerida (Joonised 2 ja 3), siis tulemuste osas käsitletakse neid kui ühe südamiku proove.

Proovidest poorivee välja pressimine toimus autori poolt Tartu Ülikooli Geoloogia osakonnas. Press valmistati Kelln et al. (2001) ja Patterson et al. (1977) esitatud jooniste põhjal, kuid pressi sisemine mõõt valiti vastavalt olemasoleva keraamilise filtri mõõtmetele. Silindri välisdiameeter oli 60 mm, sisediameeter 42 mm ja kogupikkus 82 mm. Antud pressi kasutati edukalt üle-eelmisel aastal läbi viidud uurimuses, kus esmakordselt üritati viirsavidest poorivett pressimise teel eraldada (Niit, 2011). Filtreerimiseks kasutati keraamilist filtrit läbimõõduga 7 mm ja diameetriga 42 mm. Et vältida keraamilise filtri saastumist, lisati savi ja keraamilise filtri kokkupuutepinna vahele kahekordne paberist filter. Paberfiltri peale asetati omakorda kummirõngas, et vältida savi võimalikku sattumist eraldatavasse poorivette.

Enne pressimist kaaluti iga proov koos pressiga. Surve tekitamiseks kasutati hüdraulilist pressi „Herzog Laboratory Press TP20“. Niit (2011) katsetas pressimisel survega vahemikus 5 kuni 100 kN/cm². Autor märkis, et suurema rõhu rakendamine vee eraldumise kiirusele mõju ei avaldanud, kuna vee eraldumise määras lõpuks ikkagi keraamilise filtri veeläbilaskvus. Sellest lähtuvalt suurema rõhu rakendamist ei proovitud ning antud töö käigus katsetati survega vahemikus 5 kuni 10 kN/cm². Kõige kiiremini eraldus vesi pressimisel survega 8 – 10 kN/cm². Vesi hakkas proovidest eralduma 2 – 20 minutiga. Kokku vältas pressimise protsess hilisemaks isotoopanalüüsiks vajaliku veekoguse (2 ml) saamiseks 5 – 65 minutit. Eraldunud vesi imeti otse pressist süstlasse ja sisestati 6 ml mahuga korgiga suletavasse plastikpudelisse. Veeproovid säilitati 4°C temperatuuriga külmikus. Kuivaks pressitud proov ning press kaaluti uuesti. Pärast igat pressimist puhastati press destilleeritud veega. Keraamiline filter pesti läbi destilleeritud veega kasutades vaakumpressi, mis töötas 15 minutit. Destilleeritud vee eemaldamiseks filtrist kuumutati seda 30 minutit 105°C temperatuuriga ahjus.

Proovide isotoopkoostis ($\delta^{18}\text{O}$ ja δD) määrati Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudi laboris kasutades seadet „Picarro L2120-i Isotopic Water Analyzer“. L2120-i kasutab isotoopide kontsentratsioonide määramiseks CRDS (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*) meetodit (http://www.picarro.com/technology/cavity_ring_down_spectroscopy). CRDS on ajal põhinev mõõtesüsteem, mis kasutab laserkiirt kolme peegli optilises õõnsuses, et koguseliselt mõõta gaasi faasi viidud molekulide spektraalseid omadusi (spetsiifiliselt neeldumisjooni, mis on unikaalsed H₂¹⁶O, H₂¹⁸O ja HD¹⁶O molekulidele) (<http://www.picarro.com/sites/default/files/L2120-i%20Datasheet.pdf>).

Proovidest mõõdetud $\delta^{18}\text{O}$ ja δD võimaldas arvutada deuteeriumi ekstsessi (*deuterium excess*) $d = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964) ja näidata saadud tulemusi kõrvalekaldena üldisest globaalsest keskmisest sademetevee joonest (*GMWL, Global Meteoric Water Line*) (Froehlich et al., 2001).

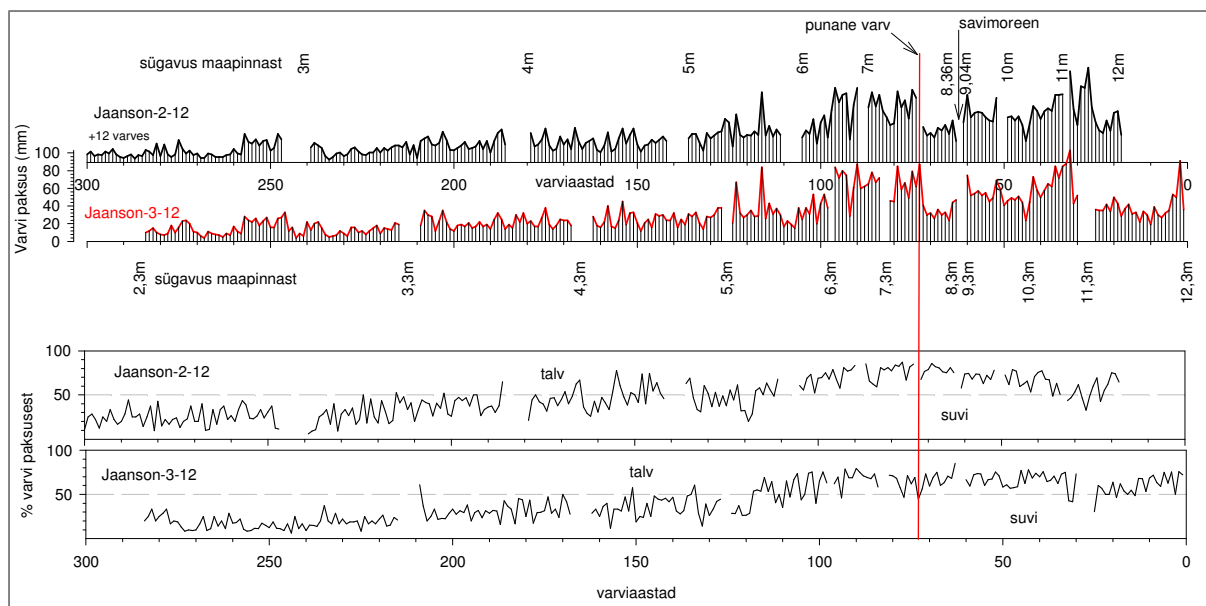
4. Tulemused

4.1. Uuritud läbilõike litoloogiline kirjeldus ning kogutud proovide üldandmed

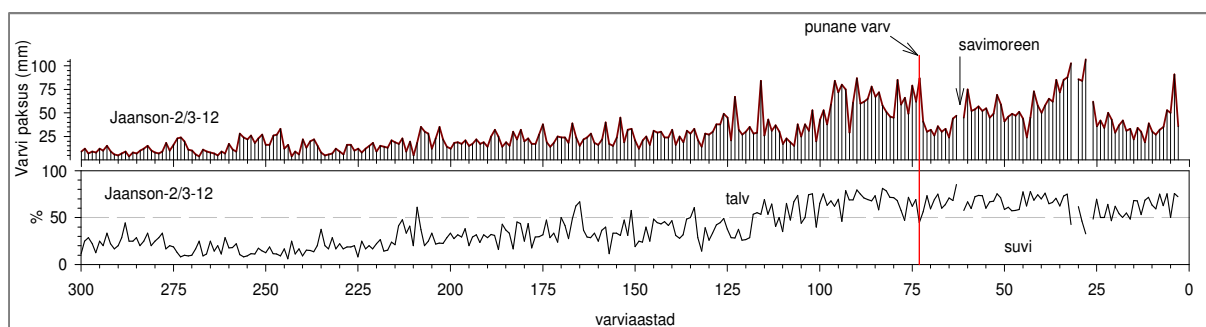
Jaanson'i uuringuala setteläbilõike litoloogiline kirjeldus on järgmine: maapinnast kuni 2 m sügavuseni (Tabel 2) esines tihe valkjashall peenliiv, mille läbistamiseks tuli kasutada puurseadme löökomadusi. Alates 2 m sügavuselt toimus muutus, kus liiv asendus viirsaviga. Kuni 6 m sügavuseni esinesid õhukesed, tumeda hallikaspruuni värvusega varvid. Järgmises 1,8 m paksuses intervallis muutusid varvid järjest paksemaks ning alates 7,8 m sügavuselt algasid paksud varvid, millel suve- ja talvekihid olid selgesti eristatavad ning suvekihid sisaldasid rohkelt aleuriitseid kihte. 8,25 – 9,40 m sügavusvahemikus varve ei esinenud, seal oli tegemist massiivse savidiamiktoni kihiga. Sügavusel 9,4 m kuni 12 m jätkusid paksud varvid. Alates 12 m sügavuselt algasid varvide suvekihid halli aleuriitse kihiga ning suvekihid sisaldasid punaka tooniga liivakihte.

Tabel 2. Jaanson-2/3-12 setteläbilõike litoloogiline kirjeldus. Puuraugu asukoht on toodud Joonisel 1.

Jaanson-2/3-12	
N 58°23'11,2'' E 24°31'55,4'' 2 m ü.m.	
Sügavus (m)	Kirjeldus
0,0 – 2,0	Valkja tooniga kuiv peenliiv kojafragmentidega, sügavuse suunas muutub hallikamaks ning terasuurus jämedamaks. Vähesest veesisaldusest tingituna raskesti puuritav.
2,0 – 6,0	Viirsavi. Õhukesed varvid, milles selgesti eristatavad suve- ja talvekihid. Varvide paksus 4 – 79 mm. Suvekihid sisaldavad üksikuid aleuriidikihte ning talvekihtides esineb massiivne peliit. Varvid on nii suve- kui talvekihtides tumeda hallikaspruuni värvusega.
6,0 – 7,8	Varvid muutuvad paksemaks. Suvekihid on hallikaspruuni algusega ning üldise tumeda hallikaspruuni värvusega. Talvekihtides esineb massiivne, tume hallikaspruun peliit.
7,8 – 12,0	Paksud varvid. Suvekihid sisaldavad rohkelt aleuriitseid kihte. Suve- ja talvekihid on kergesti eristatavad. Varvide värvus on tume hallikaspruun ning suvekihtide puhul esineb hele hallikaspruun värvus. 8 m sügavusel selgelt eristatav punakaspruuni värvi talvekihiga varv. 8,25 – 9,40 m varvid puuduvad (diamiktoni kiht).
12,0 – 12,3	Suvekihid algavad halli aleuriitse kihiga. Üldine suvekihtide värvus on tumedast hallikaspruunist kuni hallikaspruunini. Suvekihid sisaldavad punaka tooniga liivakihte. Talve- ja suvekihid on hästi eraldatavad. Talvekihtides esineb tume hallikaspruun peliit.



Joonis 2. Paralleelsete setteläbilõigete Jaanson-2-12 ja Janson-3-12 varvogrammide ja sesoonsete kihtide suhtediagrammid koos sügavusandmetega. Varvide numeratsioon algab läbilõike alumisest osast.



Joonis 3. Jaansoni vaatluskohas puuritud paralleelsete setteläbilõigete kombineeritud varvogramm koos sesoonsete kihtide suhtediagrammiga.

Uuritud viirsaviintervall sisaldas 312 aastavarvi. Varvipaksuste analüüs näitas suhteliselt ühtlast paksuste vähenemist maapinna suunas. Läbilõike sügavaimas osas (varvid 1 – 100) esinevad uuringuala kõige paksemad domineeriva suvekihiga varvid. Suvekiht moodustab varvi kogupaksusest 55 – 80% ning varvide paksused küündiva kuni 107 millimeetriteni. Sügavusvahemikus 6 – 5 m (varvid 100 – 130) toimub muutus, kus varvides väheneb kiirelt suvekihtide osakaal ning hakkavad domineerima talvekihid. Varvide paksused on 30 – 80 mm ning suvekiht moodustab 30 – 60% varvi kogupaksusest. Sealt edasi on hästi märgatav suvekihtide väga ühtlane paksuste vähenemine, samas kui talvekihtide paksus on kuni läbilõike lõpuni suhteliselt ühtlane (Joonis 3). Varvid on kuni 30 mm paksused ning suvekiht moodustab kuni 30% varvi kogupaksusest. Selline varvipaksuste üldine vähenemine ning

talvekihtide domineerimine läbilõike ülemises osas viitab liustikuserva järkjärgulisele kaugenemisele uuringuala piirkonnast.

Viirsavikompleksi kahest paralleelsest setteläbilõikest võeti poorivee analüüsiks kokku 40 proovi kaaluga 16,87 kuni 89,43 grammi (Tabelid 3 ja 4). Kolmest proovist (J-2, J-8 ja J-9) ei õnnestunud üldse vett kätte saada ning need proovid asendati. Proovidest J-4 ja J-5 õnnestus kätte saada vaid 0,5 ml vett, mis ei ole piisav kogus usaldusväärseks isotoopkoostise analüüsiks. Ka nende proovide puhul leiti lahendus asendusproovide näol. Kaks asendusproovi võeti läbilõikest Jaanson-2-12 ning kolm proovi läbilõikest Jaanson-3-12 (Tabel 4).

Tabel 3. Jaanson-2-12 viirsaviläbilõikest kogutud proovide üldandmed. Punasega on tähistatud proovid, millest ei õnnestunud koguda isotoopanalüüsiks piisavat veekogust ning mis seetõttu asendati kordusproovidega (seletus tekstis).

Proov	Sügavus (m)	Kaal (g)	Kiht	Märkused
J-1	11,92-11,88	25,62	Talv	Savi
J-2	11,56-11,53	32,66	Suvi	Aleuriit
J-3	11,51-11,48	33,33	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-4	10,90-10,88	17,86	Talv	Savi
J-5	10,78-10,76	30,71	Suvi	Aleuriit
J-6	10,74-10,72	27,91	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-7	10,15-10,13	26,39	Suvi	Kihiline peliit-aleuriit
J-8	10,12-10,10	16,87	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-9	9,52-9,50	27,32	Suvi	Hajusa kruusa-liivaga kihiline aleuriit
J-10	9,48-9,46	25,32	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-11	9,27-9,24	89,39	Diamikton	Alumine osa
J-12	8,82-8,79	76,89	Diamikton	Keskosa
J-13	8,53-8,50	77,56	Diamikton	Ülemine osa
J-14	8,21-8,19	18,77	Talv	Savi paari aleuriiditriibuga
J-15	7,98-7,95	23,13	Talv	Savi (nn , punase varvi' talvekiht)
J-16	7,75-7,73	30,83	Suvi	Kihiline peliit-aleuriit
J-17	7,71-7,68	39,32	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-18	7,34-7,32	29,21	Suvi	Peenkihiline peliit-aleuriit
J-19	7,29-7,26	33,90	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-20	6,55-6,52	36,91	Suvi	Ebaselge kihilisusega peliit-aleuriit
J-21	6,50-6,47	27,78	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-22	5,81-5,78	31,80	Suvi	Kihiline peliit-aleuriit
J-23	5,77-5,74	21,88	Talv	Savi, eelmisega sama varv (pressimise tulemusena eraldus erkkollane vesi)
J-24	5,41-5,38	27,62	Talv	Savi
J-25	4,78-4,75	35,23	Üldproov	Üks varv (suve- ja talvekiht ühes proovis)
J-26	4,47-4,43	38,74	Üldproov	Kaks varvi
J-27	3,93-3,90	27,39	Üldproov	Üks varv

Proov	Sügavus (m)	Kaal (g)	Kiht	Märkused
J-28	3,55-3,52	38,34	Üldproov	Üks varv
J-29	2,94-2,92	21,53	Üldproov	Üks varv
J-30	2,75-2,72	32,11	Üldproov	Üks varv
J-31	2,56-2,53	31,65	Üldproov	Üks varv
J-32	2,32-2,29	29,82	Üldproov	Kolm varvi
J-37	10,71-10,67 10,65-10,61	89,43	Suvi	Aleuriit, kahe järjestikuse varvi suvekihid (asendab proovi J-5)
J-39	9,65-9,61 9,59-9,56	81,97	Suvi	Hajusa kruusa-liivaga kihiline aleuriit, kahe järjestikuse varvi suvekihid (asendab proovi J-9)

Tabel 4. Jaanson-3-12 viirsaviläbilõikest kogutud proovide üldandmed.

Proov	Sügavus (m)	Kaal (g)	Kiht	Märkused
J-33	12,26-12,20	72,41	Suvi	Hall aleuriit, mille sees 4 cm paksune punane liivakiht
J-34	12,20-12,17	23,88	Talv	Savi, eelmisega sama varv
J-35	12,15-12,12	28,20	Talv	Savi (asendab proovi J-2)
J-36	10,93-10,87	60,04	Talv	Savi (asendab proovi J-4)
J-38	10,09-10,07 10,05-10,02 10,00-9,97	71,74	Talv	Savi, kolme järjestikuse varvi talvekihid (asendab proovi J-8)
J-42	5,61-5,58	25,85	Talv	Savi (dubleerib proovi J-23)

4.2. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD väärtused Jaansoni läbilõike poorivees

Proovidest tehtud isotoopanalüüsi tulemustest annavad ülevaate Tabel 5 ning Joonis 4. Läbilõike ülemises osas, kus varvid on väga õhukesed, võeti üldproovid. Alates 5,3 m sügavuselt muutus varvide paksus piisavaks, et oleks võimalik proovida ühe varvi nii aleuriitset suvekihti kui ka savikat talvekihti eraldi. Viiel juhul võeti proov sama aastavarvi nii suve- kui talvekihist. Lisaks võeti kolm proovi ka savikompleksis esinevast diamiktonist (Tabelid 3 ja 4).

Tabel 5. Jaansoni läbilõike viirsavi poorivee $\delta^{18}\text{O}$ ja δD andmed koos arvutatud deuteeriumi ekstsessi väärtustega.

Sama aastavarvi
sesoonsed kihid

Proov	Sügavus, m	Varvi nr	Kiht	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d
J-32	2,29-2,32	321	Üldproov	-9,00	-72,78	-0,7
J-31	2,53-2,56	300	Üldproov	-3,33	-47,35	-20,7
J-30	2,72-2,75	280	Üldproov	-8,29	-69,82	-3,5
J-29	2,92-2,94	271	Üldproov	-7,89	-68,50	-5,4
J-28	3,52-3,55	230	Üldproov	-9,06	-73,21	-0,7
J-27	3,90-3,93	211	Üldproov	-10,09	-75,07	5,6
J-26	4,43-4,47	187	Üldproov	-10,11	-75,18	5,7
J-25	4,75-4,78	174	Üldproov	-9,30	-73,14	1,3
J-24	5,38-5,41	149	Talv	-8,36	-67,69	-0,8
J-23	5,74-5,77	139	Talv	-10,11	-74,74	6,1
J-22	5,78-5,81	139	Suvi	-7,65	-65,52	-4,3
J-21	6,47-6,50	119	Talv	-8,17	-65,64	-0,3
J-20	6,52-6,55	119	Suvi	-8,35	-67,29	-0,5
J-19	7,26-7,29	107	Talv	-5,74	-53,34	-7,5
J-18	7,32-7,34	107	Suvi	-8,58	-69,94	-1,3
J-17	7,68-7,71	100	Talv	-8,64	-70,38	-1,2
J-16	7,73-7,75	100	Suvi	-9,90	-73,94	5,3
J-15	7,95-7,98	96	Talv	-7,67	-66,11	-4,7
J-14	8,19-8,21	89	Talv	-6,98	-63,56	-7,7
J-13	8,50-8,53	85	Diamikton	-7,37	-66,69	-7,7
J-12	8,79-8,82	85	Diamikton	-8,77	-71,54	-1,4
J-11	9,24-9,27	85	Diamikton	-8,36	-70,09	-3,2
J-10	9,46-9,48	83	Talv	-8,58	-69,08	-0,5
J-39	9,50-9,52	83	Suvi	-8,80	-72,57	-2,2
J-38	10,02-10,05	71	Talv	-8,82	-72,51	-1,9
J-7	10,13-10,15	71	Suvi	-8,07	-69,30	-4,7
J-6	10,72-10,74	59	Talv	-8,13	-69,56	-4,5
J-37	10,76-10,78	59	Suvi	-8,77	-71,17	-1,0
J-36	10,88-10,90	57	Talv	-8,53	-70,64	-2,4
J-3	11,48-11,51	51	Talv	-9,03	-71,23	1,0
J-1	11,88-11,92	44	Talv	-10,25	-75,45	6,6
J-35	12,12-12,15	28	Talv	-9,60	-75,01	1,8
J-34	12,17-12,20	27	Talv	-7,20	-67,76	-10,1
J-33	12,20-12,26	27	Suvi	-10,07	-76,74	3,8
Niidu oja	17.07.2012			-9,56	-68,43	8,1
Pärnu jõgi	17.07.2012			-10,09	-73,65	7,1

Mõlema isotoobi puhul oli tegemist negatiivsete δ -väärtustega, mis viitab kergemate isotoopide ülekaalule poorivees ja pinnavees.

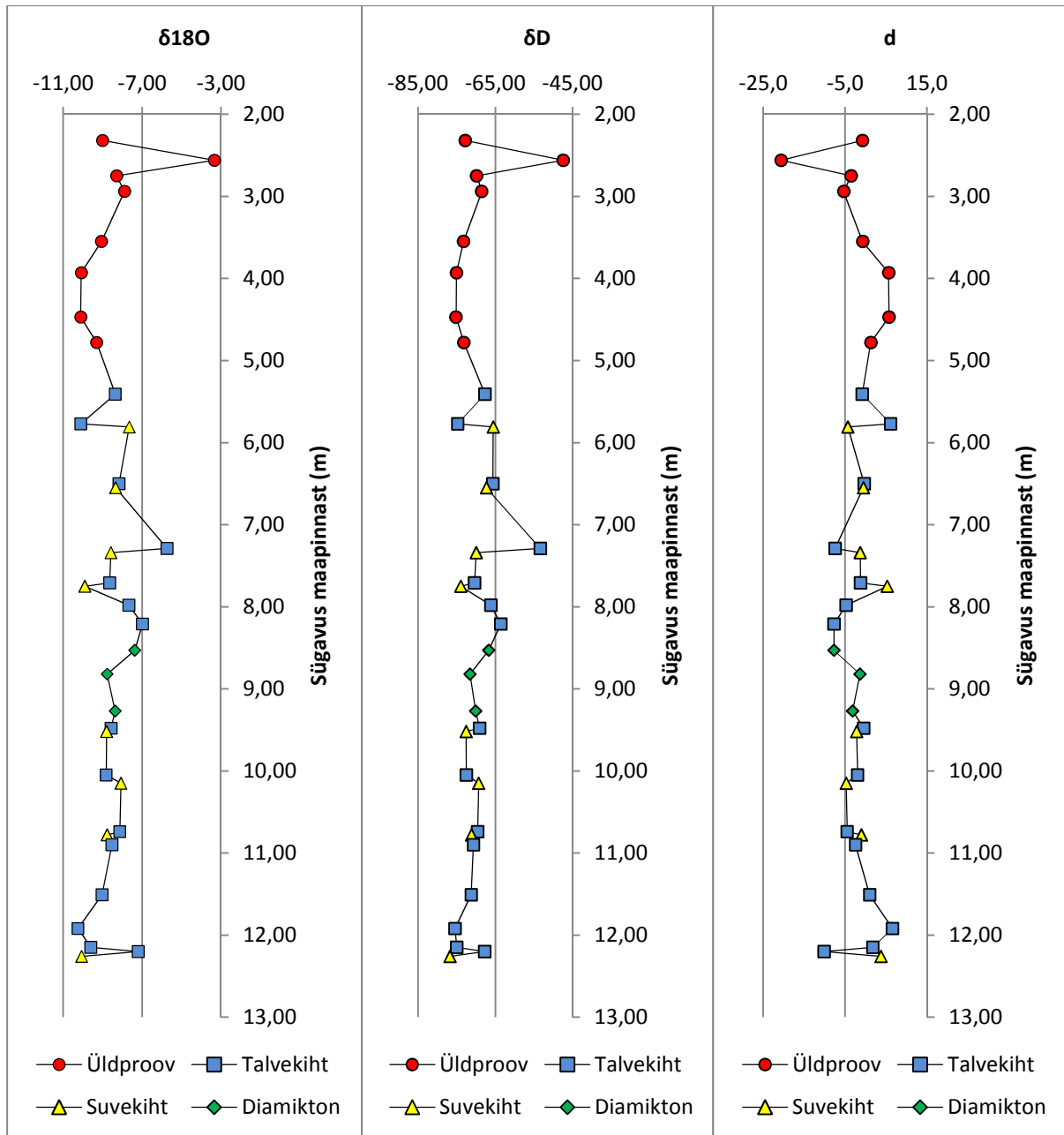
$\delta^{18}\text{O}$ väärtused proovides (Tabel 5) jäid vahemikku $-10,25\text{‰}$... $-3,3\text{‰}$ andes keskmiseks väärtuseks $-8,46\text{‰}$. $\delta^{18}\text{O}$ mõõtmistulemuste lineaarne trendijoon näitab negatiivsuse vähenemist läbilõikes vertikaalselt ülespoole liikudes. Selgelt erinev oli $\delta^{18}\text{O}$ väärtus proovi J-31 puhul ($-3,33\text{‰}$), mis oli ligikaudu $5,3\text{‰}$ positiivsem vertikaalselt kõrvalasetsevatest proovidest (Joonis 4). Talvekihtidest võeti kokku 15 proovi ning nende $\delta^{18}\text{O}$ väärtused jäid vahemikku $-10,25\text{‰}$... $-5,74\text{‰}$ (keskmine väärtus $-8,39\text{‰}$). Suvekihtidest koguti 8 proovi, millede $\delta^{18}\text{O}$ väärtused jäid vahemikku $-10,07\text{‰}$... $-7,20\text{‰}$ (keskmine väärtus $-8,77\text{‰}$). Kolme diamiktonist võetud proovi $\delta^{18}\text{O}$ väärtused varieerusid 1‰ vahemikus ($-8,36\text{‰}$... $-7,37\text{‰}$). Proovivõtukohta lähedusest võetud jõe- ja ojavee proovide väärtused olid vastavalt $-10,09\text{‰}$ ja $-9,56\text{‰}$ (Tabel 5) jäädes seega samasse vahemikku poorivee proovidega.

Poorivee δD tulemused (Tabel 5) varieerusid vahemikus $-76,74\text{‰}$... $-47,35\text{‰}$ andes keskmiseks väärtuseks $-69,49\text{‰}$. δD mõõtmistulemuste lineaarne trendijoon käitub sarnaselt $\delta^{18}\text{O}$ -le ja näitab negatiivsuse vähenemist läbilõikes vertikaalselt ülespoole liikudes. Ülejäänud proovidest erines oluliselt proovi J-31 δD väärtus ($-47,35\text{‰}$) (Joonis 4). 15-ne talvekihtidest kogutud proovi δD väärtused jäid vahemikku $-75,45\text{‰}$... $-53,34\text{‰}$ andes keskmiseks väärtuseks $-68,85\text{‰}$. Kaheksa suvekihtidest kogutud proovi δD väärtused jäid vahemikku $-76,74\text{‰}$... $-65,52\text{‰}$ (keskmine väärtus $-70,81\text{‰}$). Kolme diamiktoni kihist võetud proovi δD väärtused varieerusid vahemikus $-71,54\text{‰}$... $-66,69\text{‰}$. Pärnu jõe ja Niidu oja proovide väärtused olid vastavalt $-73,65\text{‰}$ ja $-68,43\text{‰}$ (Tabel 5) jäädes samasse vahemikku poorivee proovide väärtustega.

Viiest aastavarvist võeti proovid nii suve- kui talvekihist eesmärgiga selgitada välja võimalik kihtide isotoopkoostise erinevus ühe varvi piires. Väikseim suve- ja talvekihi väärtuste erinevus ühe varvi piires oli $0,18\text{‰}$ (proovid J-20 ja J-21) ning suurim väärtuste erinevus oli $2,87\text{‰}$ (proovid J-33 ja J-34). Üldiselt olid suvekihtide väärtused negatiivsemad, va. varv nr 139 (proovid J-22 ja J-23) puhul, kus talvekiht oli suvekihist negatiivsema väärtusega.

Läbilõike Jaanson-2-12 proovist J-23 eraldus pressimisel kollast vett. Seega otsustati võtta proov ka läbilõike Jaanson-3-12 samast varvist (proov J-42), millest pressimisel eraldus aga värvuseta vesi. Proovide J-23 ja J-42 isotoopanalüüsil märgatavaid erinevusi ei esinenud ($\delta^{18}\text{O}$ sisaldused vastavalt $-10,11\text{‰}$ ja $-9,95\text{‰}$ ning δD sisaldused vastavalt $-74,74\text{‰}$ ja

-75,57‰). Kuna antud uurimustöö käigus poorivee keemilist koostist ei uuritud, pole ka võimalik öelda, mis põhjustas vee kollast värvust proovis J-23.



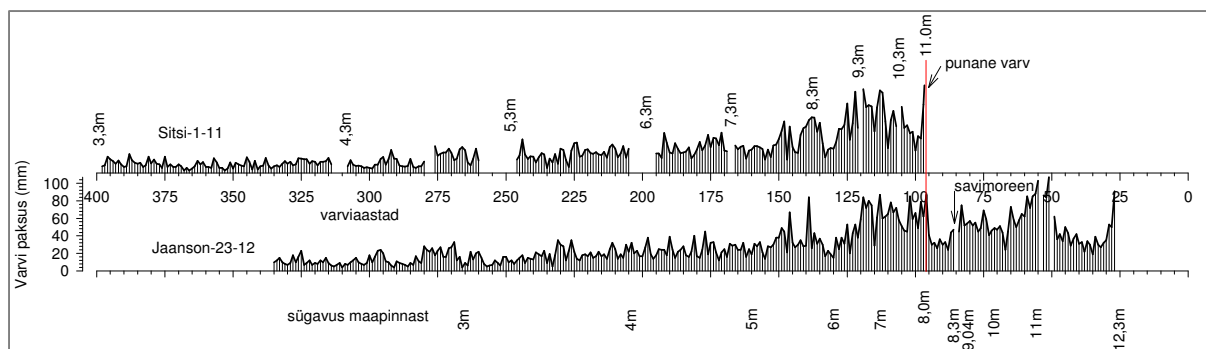
Joonis 4. Viirsavi poorivee isotoopkoostise vertikaalne muutlikkus ning arvutatud deuteriumi eksstessi väärtused Jaanson-2/3-12 setteläbilõikes.

5. Arutelu

Viimastel aastatel läbi viidud Pärnu ümbruse viirsavide litoloogilised uuringud on lisanud hulgaliselt andmeid savide settimiskeskonna ja ka varvokronoloogia kohta. Käesolevas töös uuritud Jaansoni setteläbilõike piirkonnast on varem uuritud savi geotehnilisi omadusi (Kersna, 2009; Kohv et al., 2009, 2010; Kohv, 2011), niiskusesisaldust (Kersna, 2009) ning läbilõiget on varvokronoloogiliselt korreleeritud Pärnu viirsavibasseini teiste läbilõigetega (Pai, 2010; Talviste et al., 2012; Hang & Kohv, 2013).

Poorivee isotoopkoostise uurimine sellel alal oli aga esmakordne. Varasem analoogne uuring (Niit, 2011) on tehtud Sauga jõe kaldalt Sitsi vaatluskohast. Kuna viimane paikneb 2005. a. Sauga maalihke astangu peal, siis on sealt tehtud nii savi niiskusesisalduse kui ka geotehniline ja varvomeetiline uuring (Kersna, 2009; Kohv et al., 2010; Kohv, 2011), millele toetudes on Sauga ümbruse läbilõiked seotud nii Pärnu linna kui ka Pärnu lahe läbilõigetega (Pai, 2010; Hang & Kohv, 2013). Nendele töödele toetudes on võimalik käesolevas töös käsitletavad viirsaviläbilõiked omavahel korreleerida (Joonis 5). Kindlust korrelatsiooni õigsusele lisab asjaolu, et mõlemas läbilõikes esines Pärnu ümbruse viirsavidele omane nn. „punane varv”. Korrelatsioonile toetudes võib öelda, et savi settimine Jaansoni vaatluskohas algas 96 aastat varem kui ca. 7 km loodes paiknevas Sitsi vaatluskohas.

Hang ja Kohv (2013) on selget ja väga järsku värvimuutust sinakashallist punakaspruuniks seletanud liustikuserva taandumisega Pandivere servamoodustiste joonelt, mille proksimaalses osas paikneb ka Sitsi vaatluskoht (Joonis 1), kus viirsaviläbilõige algas punase varviga. Värvimuutusele eelnes liustikuserva stagnatsioon Pandivere joonel, mida tähistavad kas varieeruva paksusega massiivne savimoreen (diamikton) Pärnu linnas või õhukeste aleuriitsete varvide seeria Pärnu lahes (Talviste et al., 2012). Eeldades, et viirsavi poorivesi pärineb settimise ajast, loodeti käesoleva töö planeerimisel saada olulist lisainfot selliste liustiku taandumise ja jääjärve arengu seisukohalt oluliste sündmuste jada – liustiku aeglane taandumine → liustiku stagnatsioon → liustikuserva uus kiire taandumine – kohta.



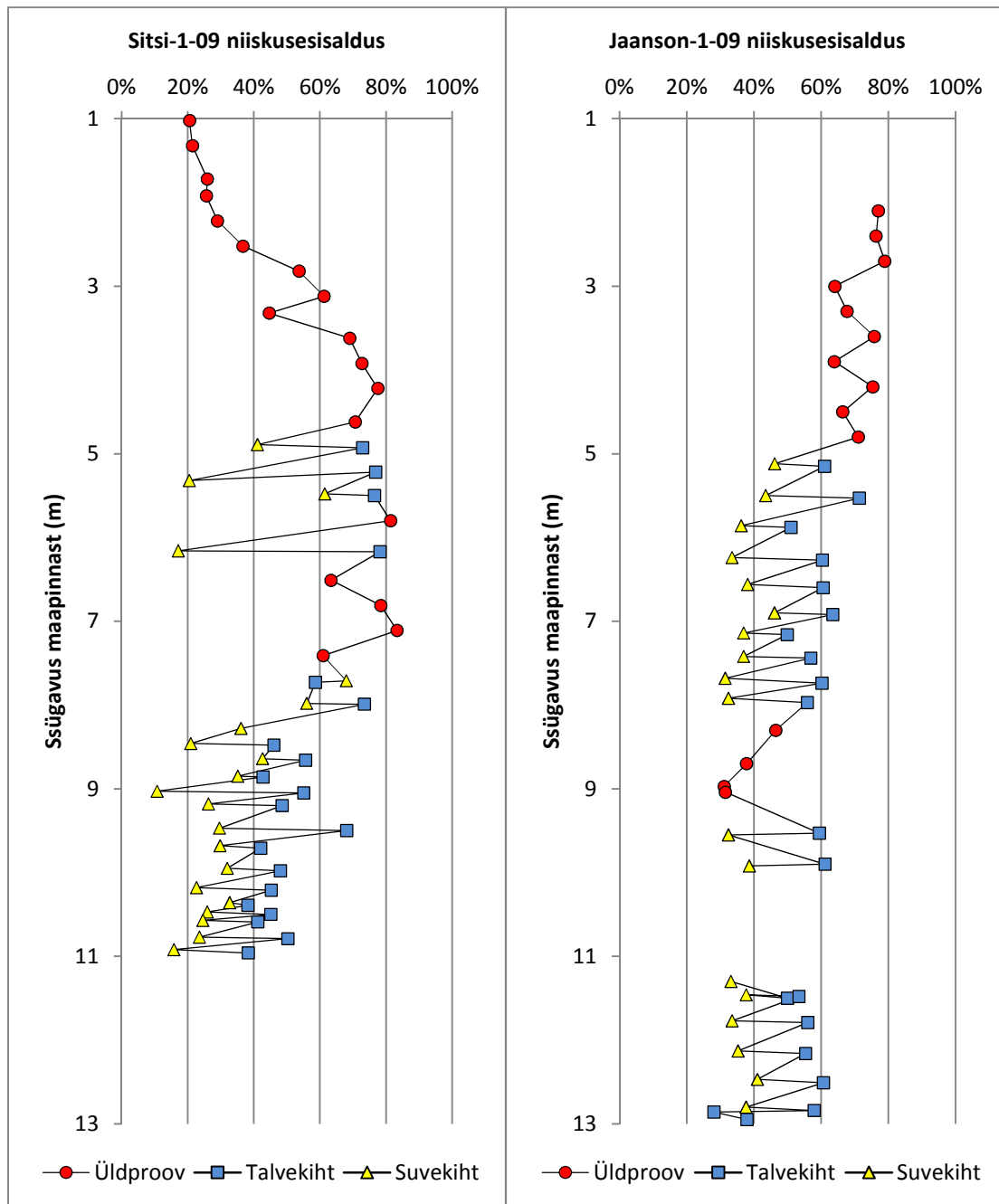
Joonis 5. Jaanson- ja Sitsi vaatluskohas puuritud viirsaviläbilõigete varvogrammide korrelatsioon Pärnu kohaliku varvokronoloogia ajaskaalal vastavalt Hang & Kohv (2013).

Varasemalt on nii Jaanson- kui Sitsi vaatluskohas uuritud viirsavi niiskuse vertikaalset muutust (Kersna, 2009). Selle uuringu tulemused näitavad, et esineb selge erinevus suve- ja talvekihtide niiskusesisalduste vahel (Joonis 6).

Sitsi läbilõike ülemise osa puhul on tegemist madala niiskusesisaldusega savikoorikuga. Sügavuse suunas niiskusesisaldus kasvab, jõudes maksimaalselt 83%-ni seitsme meetri sügavusel. Sealt edasi on hästi jälgitav niiskusesisalduste suur varieeruvus sesoonsete kihtide vahel, kuid ka üldine niiskusesisalduse vähenemise tendents sügavuse kasvades. Keskmine niiskusesisaldus suvekihtide puhul on 32% ning talvekihtide puhul 55%.

Jaanson- läbilõike puhul savikoorik pindmises osas puudub ning viirsavi katvat täitepinna kihti 2009. a. töö käigus ei proovitud. Suurima niiskusesisaldusega (maksimaalselt 79%) proovid paiknevad läbilõike ülemises osas. Sarnaselt Sitsi läbilõikele on sügavuse suunas märgatav niiskusesisalduse ühtlane vähenemine. Samuti on hästi jälgitav sesoonsete kihtide niiskusesisalduste varieeruvus. Keskmine niiskusesisaldus suvekihtides on 37% ja talvekihtides 56%.

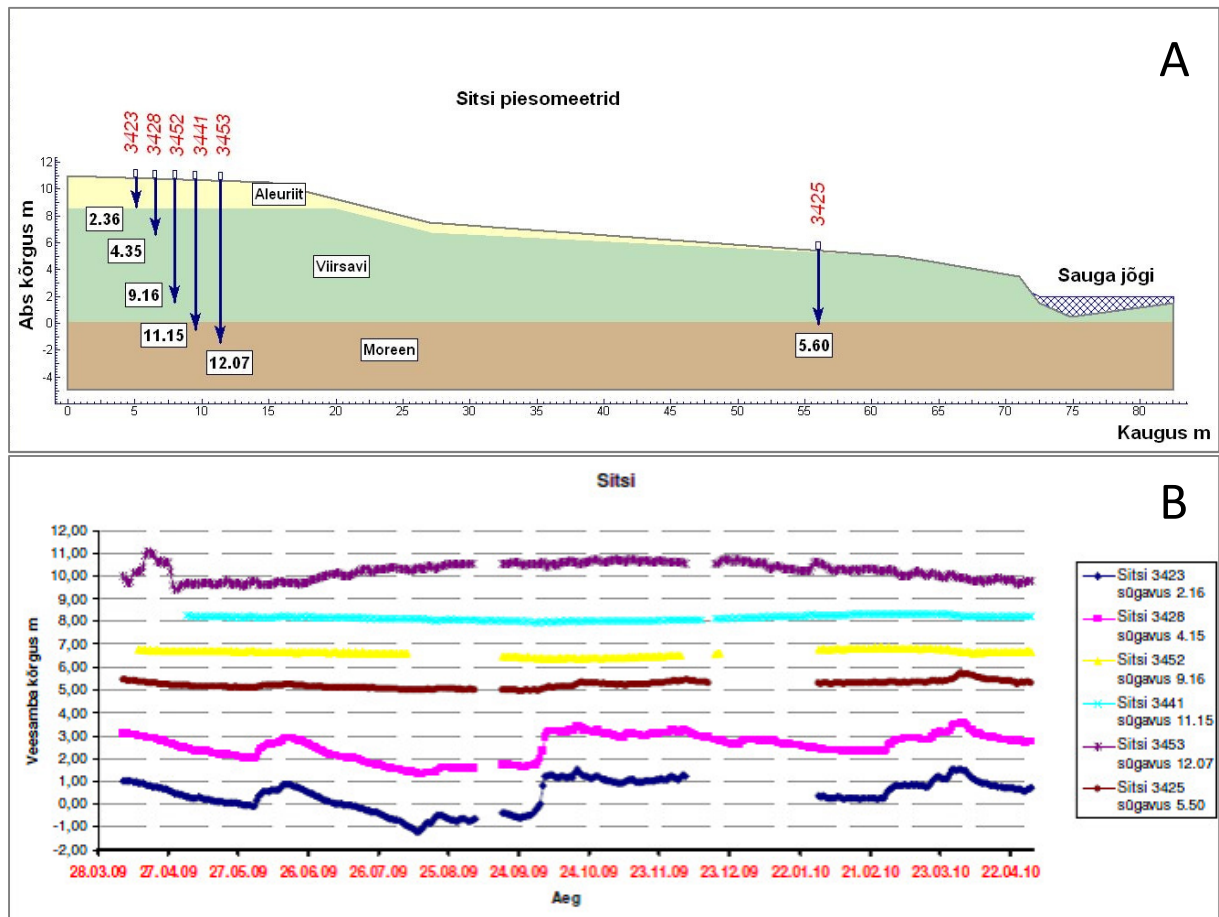
Suve- ja talvekihtide niiskusesisalduste küllaltki suure erinevuse tõttu saab eeldada, et reeglina väiksem veesisaldus avatud pooriruumiga aleuriitsetes suvekihtides võiks peegeldada vee aktiivsemat liikumist võrreldes suletud pooriruumiga savikate talvekihtidega. Seega võib eeldada, et liustikuline või jääjärveline vesi on pigem säilinud savistes talvekihtides, kus vee liikumine on vähetõenäoline.



Joonis 6. Viirsavi niiskusesisalduse vertikaalne muutlikkus Sitsi ja Jaanson settelabilõigetes (Kersna, 2009).

Nii Sitsi kui ka Jaanson vaatluskohta on viirsavilasundi eri sügavusele varem paigaldatud automaatpiesomeetrid poorivee rõhu muutuste salvestamiseks. Sitsi vaatluskohta andmed näitavad väga väikest aastaringset poorirõhkude kõikumist viirsavilasundi sügavamas osas paiknevates piesomeetrites. Viirsavil lasuvas kuivanud savikoorikus ning viirsavilasundi ülemises osas paiknevate piesomeetrite (nr 3423 ja 3428) andmed näitavad suurimat poorirõhkude muutust (veesamba kõrguse muutus kuni 2,6 m) aasta lõikes (Joonis 7).

Poorirõhkude muutus kuni nelja meetri sügavuseni on ca. 5 – 6 tunnise nihkega kooskõlas sademete langemisega, mis viitab vett juhtivale lõhededüsteemile viirsavil lasuvas savikoorikus (Kohv, 2011). Seega võib eeldada aktiivsemat veevahetust viirsavikompleksi ülemises osas ning kuni nelja meetri sügavuselt kogutud poorivee proovidest saadud analüüsitulemustesse tuleks suhtuda ettevaatusega.



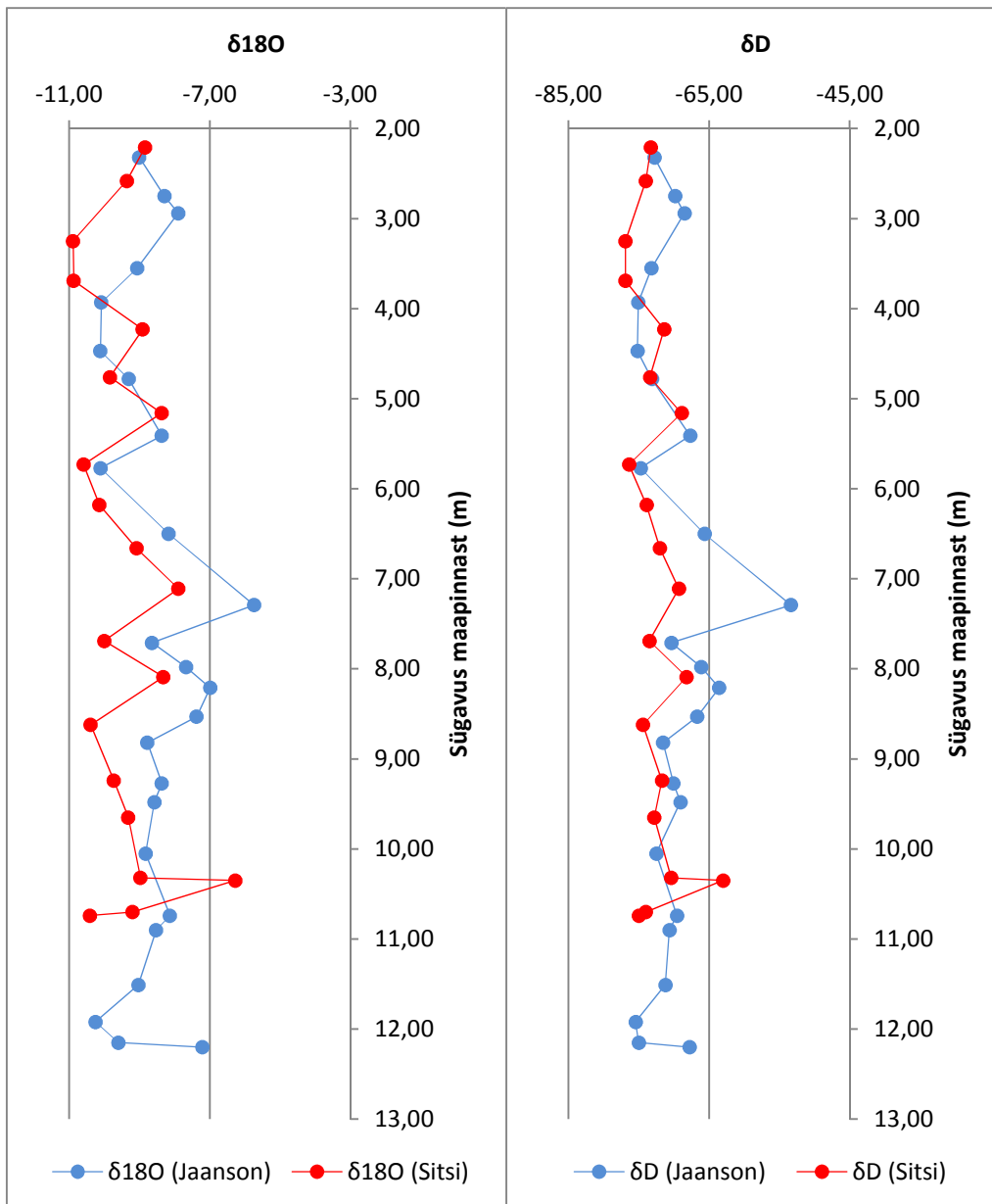
Joonis 7. Automaatpiesomeetrite paigutus Sitsi vaatluskohal (A). Poorivee rõhu, väljendatuna veesamba kõrguses, muutus aasta jooksul Sitsi vaatluskohas (B) (Kohv, 2011).

Nagu eespool kirjeldatud, jäävad Jaansoni läbilõike poorivee $\delta^{18}\text{O}$ väärtused vahemikku $-10,25\text{‰}$... $-3,3\text{‰}$. Kusjuures, kui mitte arvestada kahte väga selgelt erinevate väärtustega proovi, siis on $\delta^{18}\text{O}$ muutlikkus vaid $3,27\text{‰}$ vahemikus: $-10,25\text{‰}$... $-6,98\text{‰}$ (Joonis 8). δD väärtused muutuvad $-76,74\text{‰}$... $-47,35\text{‰}$ vahemikus ning selgelt eristuvad jällegi eelpool mainitud kaks proovi. Neid arvestamata muutuvad deuteeriumi väärtused vahemikus $-76,74\text{‰}$... $-63,56\text{‰}$ (Joonis 8). Selgelt erineva isotoopkoostisega proovid sügavuses 2,56 m (üldproov ühest aastavarvist) ja 7,29 m (talvekiht) ei eristunud ei proovi võtmise ega vee eraldamise käigus teistest proovidest. 7,34 m sügavuselt võeti ka sama varvi (107) suvekivist

proov, mis andis talvekihist 2,84‰ võrra negatiivsema $\delta^{18}\text{O}$ ja 16,6‰ võrra negatiivsema δD väärtuse, mis mõlemad sarnanevad naaberproovide tulemiga (Joonis 8). Võrdluses Sitsi läbilõikega (Joonis 8) näeme siiski, et ka seal esinevad samas sügavusvahemikus positiivsemad väärtused, mistõttu võib Jaansonil läbilõike $\delta^{18}\text{O}$ ja δD väärtusi 7,29 m sügavusel lugeda tõepärasteks. Sügavuselt 2,56 m võetud proov kattis ühe varvi ning $\delta^{18}\text{O}$ väärtus erines 5‰ ja δD väärtus 22‰ paarikümne cm kaugusel olevatest proovidest ning selle proovi tulemustesse tuleks suhtuda skeptiliselt.

Sama varvi suve- ja talvekihtidest võetud proovide $\delta^{18}\text{O}$ keskmised tulemused erinesid 0,6‰ ja δD väärtused 2,94‰, kusjuures vaid kahe paralleelselt võetud proovi korral oli suve väärtused positiivsemad talve samast näitajast (Joonis 4). Samas oli varieeruvus tulemustes siiski ebakorrapärane. Suve ja talvekihi niiskusesisalduse suure erinevuse (Joonis 6) ja isotoopkoostise varieeruvuse tõttu jäetakse edasisest analüüsist suvekihtide andmed välja.

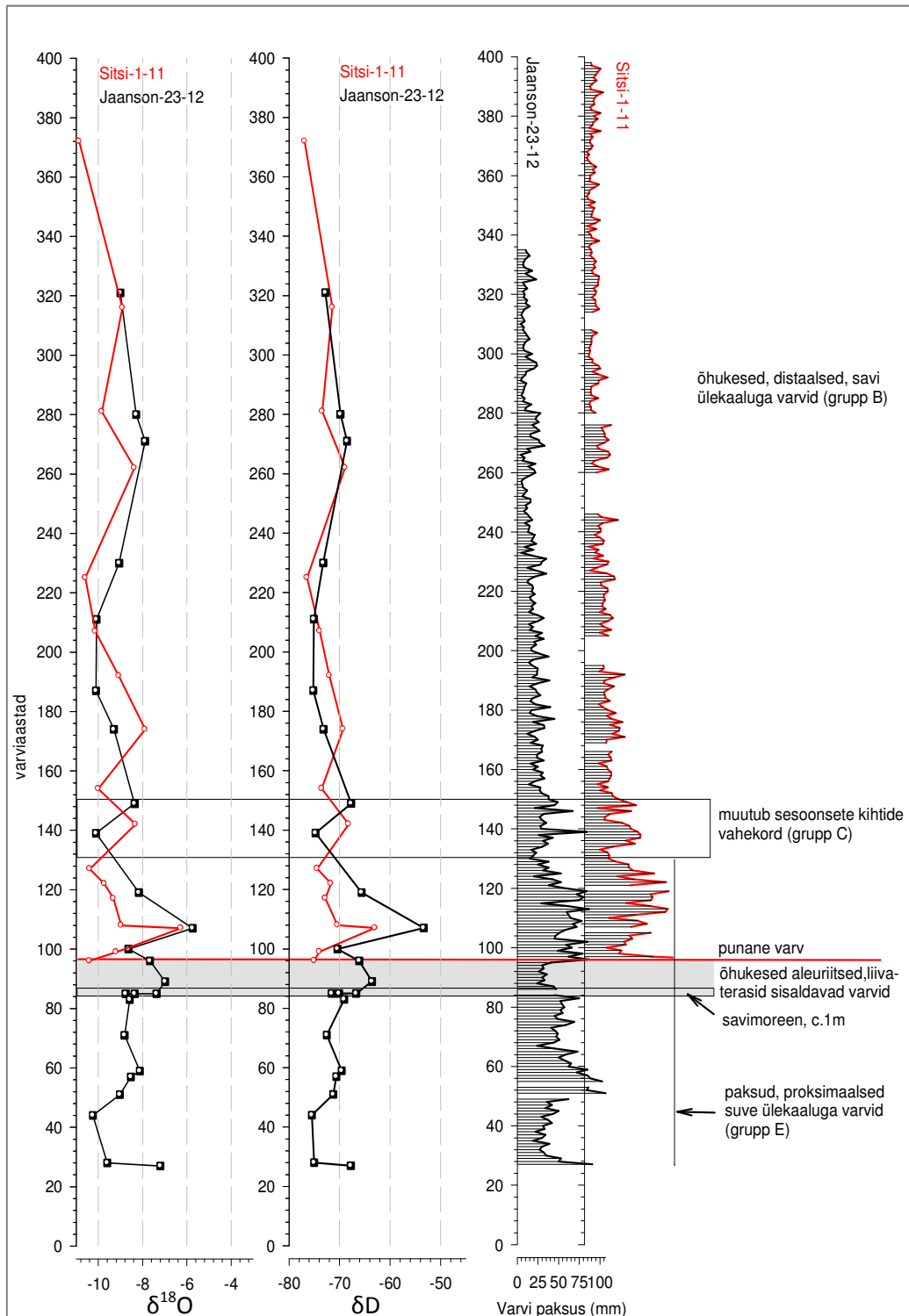
Lähtudes savi niiskusesisalduse andmetest (Joonis 6) on näha, et niiskusesisaldus aeglaselt väheneb kuni 8 m sügavuseni ja seejärel jääb kuni läbilõike lõpuni üsna stabiilseks. Poorivee isotoopkoostises seevastu sarnasel sügavusel erilisi muutusi ei esine. Poorivee rõhu perioodilised (sesoonsed) muutused on täheldatavad kuni ca. 4 m sügavuseni (Kohv, 2011), mis viitab ka võimalikule suhteliselt kiirele veevahetusele selles sügavusintervallis. Sellisel juhul peaks ka poorivee isotoopkoostis selles intervallis erinema savikihi alumisest osast eeldatavalt positiivsemate väärtuste poolest. Kuid ei Jaansonil ega varemuuritud Sitsi läbilõike ülemistes osades selget trendi positiivsemate väärtuste suunas ei täheldatud (Joonis 8).



Joonis 8. Jaanson ja Sitsi läbilõigete isotoopkoostise vertikaalne muutlikkus. Jaanson läbilõike puhul on välja jäetud suvekihtide ning 2,56 m sügavuselt võetud üldproovi andmed.

Kui lähtuda püstitatud hüpoteesist poorivee pärinemise kohta savi settimise ajast, siis tehti ka katse korreleerida erinevate saviläbilõigete andmeid suhtelisel ajaskaalal (Joonis 9). Isotoopkoostise võrdluse juures jäeti arvestamata suvekihtide andmed ja eespooltoodud põhjendusel ka 2,56 m sügavuselt võetud üldisest trendist ja tulemustest selgelt erinev proov. $\delta^{18}\text{O}$ vertikaalne muutus ajaskaalal on üllatavalt sarnane nii muutuste amplituudis kui ka väärtustes vaatamata sellele, et läbilõigete asukohtade vahe on ca. 7 km. Samas ei luba suhteliselt hõredalt võetud proovid, muutuste väike amplituud, selgete trendide või järskude muutuste puudumine siiski üheselt väita isotoopkoostise absoluutset sarnasust, et sealt

tulenevalt saada oluline argument vee kujunemise üheaegsusele ehk siis savide kujunemise ajale. Selged muutused settimiskeskkonnas, mis väljenduvad varvipaksuses, sesoonsete kihtide paksuse muutustes, värvuses ja savimoreeni olemasolus, ei peegeldu piisavalt selgelt $\delta^{18}\text{O}$ ega δD vertikaalses muutlikkuses.



Joonis 9. Jaansoni ja Sitsi läbilõigete $\delta^{18}\text{O}$ ja δD muutlikkus suhtelisel ajaskaalal koos varvikorrelatsiooni ja varvide iseloomustusega Hang & Kohv (2013) järgi.

Kirjeldatud poorivee isotoopkoostisele toetudes on keerukas vee päritolu kohta järeldusi teha. Punning et al. (1987) andmeil on Eesti sademetevee keskmine $\delta^{18}\text{O}$ -10,4‰ ja seda kuni 8‰-se kuu keskmiste väärtuste kõikumisamplituudi juures. Seejuures keskmine suvine $\delta^{18}\text{O}$ väärtus on -8,4‰ ja keskmine talvine -13,8‰. Samadele andmetele toetudes kõigub $\delta^{18}\text{O}$ sisaldus -10‰...-8‰(-5‰) Eesti pinnaveekogudes (järved). Viimase jäätumise mandrijää sulamisevee $\delta^{18}\text{O}$ väärtused jäid aga vahemikku -25‰...-20‰ (Tullborg & Larson, 1984) ning nendest mõjutatud Põhja-Eesti põhjavee väärtused vahemikku -22‰ kuni -18‰ (Vaikmäe et al., 2001). Pärnu ümbruse viirsavi poorivee $\delta^{18}\text{O}$ väärtused Jaansoni vaatlusalal (vahemik ja keskmine) ning Sitsi vaatlusalal (vahemik ja keskmine) jäävad seega suvise ja aasta keskmise sademetevee väärtustega sarnasesse vahemikku, mis võib viidata savis oleva vee segunemisele sademete ja/või pinnaveega. Sarnast järeldust toetab ka poorivee rõhu sesoonse muutuse analüüs, mis viitab sellele, et vähemalt 4 m paksuses viirsavi ülemises osas võib olla tegu suhteliselt kiire veevahetusega. Samas vee isotoopkoostise andmed aga selget erinevust savi ülemise ja alumise osa vahel ei näita. Vee segunemisele vastu räägib ka see, et mõlemas Pärnu ümbruse vaatluskohas on $\delta^{18}\text{O}$ vertikaalne muutus nii sügavuse kui eriti ajaskaalal väga sarnane. Vee segunemise korral oleks võinud eeldada suuremaid erinevusi. Teisalt jälle on liustiku sulamisvee ja neist mõjutatud põhjavee $\delta^{18}\text{O}$ väärtused tunduvalt negatiivsemad kui viirsavi poorivee vastavad väärtused, mis selgelt seab kahtluse alla poorivee liustikulise ehk siis viirsavi settimise aegse päritolu.

Kiipli et al. (1995) kirjeldavad Läänemerest ja Pärnu ümbruse (Are) viirsavist leitud karbonaatsete savikonkretsioonide $\delta^{18}\text{O}$ väärtusi, mis jäävad vahemikku -14‰...-6‰. Hiljem on Torp (2011) analüüsinud sarnaseid konkretsioone ka Sitsi läbilõike lähedalt ja saanud suhteliselt sarnased $\delta^{18}\text{O}$ väärtused vahemikus -12,41‰...-8,25‰. Mõlemas uurimuses jõutakse järeldusele, et need, juba viirsavi settimise järel ilmselt suvekihtides kujunenud konkretsioonid, on kujunemise ajal olnud mõjutatud Joldia ja Antsülusjärve vee omadustest. Viimase $\delta^{18}\text{O}$ väärtused Punning et al. (1988) andmeil olid staadiumi algul vahemikus -13‰...-10‰ ja vee soolakaks muutumise tõttu staadiumi lõpus -11‰...-10‰. Igal juhul välistavad nad Litoriinamere vee mõju, mille $\delta^{18}\text{O}$ näitajad jäävad -6,8‰-st positiivsemaks ning ka võimaliku vee temperatuuri mõju, mis nii jääjärves kui ka hilisemas Antsülusjärves ja ilmselt ka põhjasetetes oli stabiilselt 4°C ringis.

Kiipli et al. (1995) on teinud mõned $\delta^{18}\text{O}$ määrangud ka Riia lahe viirsavi ülemise 3 meetri pooriveest, mis andsid tulemused vahemikus -9,4‰...-7,6‰, mis on väga sarnane käesoleva töö tulemustele ja millest autorid järeldavad, et vesi ei pärine jääjärves settimise ajast, vaid on

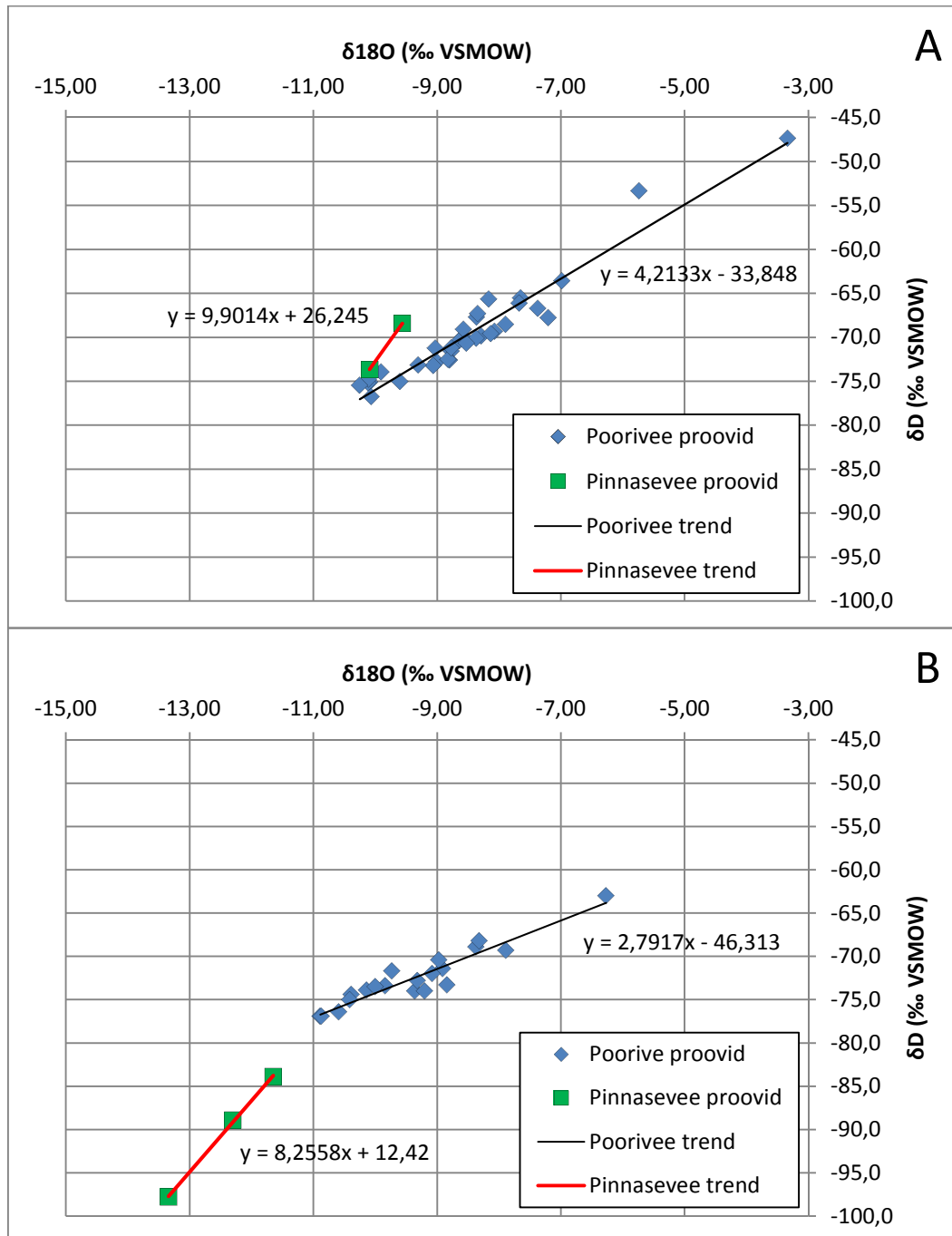
segunenud hilisemate Läänemere staadiumide veega avatud süsteemis vee difusiooni tõttu settesse.

Kuigi ka Sitsi ja Jaansoni vaatluskohad olid Antsülusjärve eksisteerimise ajal üle ujutatud ning kui eespool kirjeldatud viisil ulatus selle mõju ka viirsavi sügavamasse ossa, siis jääb õhku ikka rida küsimusi. Esiteks on Sitsi vaatlusalal (10 m ü.m.) vabanenud Läänemere vee alt juba Antsülusjärve staadiumi ajal, õigemini olnud üle ujutatud vaid lühikest aega Antsülusjärve transgressiooni (12 m ü.m.) ajal ca 10200 a.t. (Rosentau et al., 2011). Sealt alates on Sitsi vaatlusalal maapind ulatunud üle meretaseme ja mingit püsivat pinnavee mõju ei saanud olla. Samas on Jaansoni vaatlusalal vabanenud Läänemere vee alt alles paar tuhat aastat tagasi. Nii Sitsi kui Jaansoni poorivee andmete vertikaalne muutus on aga väga sarnane ja lisaks korreleeruvad $\delta^{18}\text{O}$ absoluutväärtused ka siiani üle ujutatud Riia lahe viirsavide poorivee vastavate tulemustega. Seega on tingimused eri vaatluskohtades olnud erinevad, mis paraku ei väljendu savi poorivee koostises ja vertikaalses muutlikkuses ning selle põhjus jääb endiselt huvitavaks küsimuseks.

Eestis niinimetatud Kvaternaari põhjaveest 80-ndate aastate lõpus tehtud isotoopuuringute tulemused on enamuses publitseerimata. Enamikes kaevudes kõikisid $\delta^{18}\text{O}$ väärtused $-10,8\text{‰}$ ja $-12,8\text{‰}$ vahel, aga oli ka kaeve, mis jälgisid väikese viivitusega sademete isotoopkoostist (Punning et al., 1987). Hiljuti Läti teadlaste eestvedamisel teostatud Balti Arteesia Basseini põhjavee ulatusliku uuringu käigus tehti mõningaid isotoopanalüüse Kesk-Läti aga ka Riia lahe rannikuala Kvaternaari setetes leiduvast põhjaveest, kus $\delta^{18}\text{O}$ väärtused jäävad isegi negatiivsemaks (ca. -12‰ ... -9‰ , Alise Babre suulised andmed) kui käesolevas töös saadud poorivee näitajad.

Väga oluliseks vee võimaliku päritolu hindamisel on vee $\delta^{18}\text{O}$ ja δD vahekorra selgitamine (Joonis 10). Selleks kasutatakse ühe näitajana deuteeriumi ekstsessi (d), mille looduslikke mõjureid lõpuni ei tunta (Lacelle, 2011). Selge on see, et suuresti mõjutavad seda temperatuuri, aurumise ja õhuniiskuse kombinatsioon, mistõttu antud näitaja on sesoonselt väga varieeruv ja samuti oluliselt sõltuv geograafilisest asukohast. Pärnu viirsavi poorivee puhul on väga põnevaks deuteeriumi ekstsessi oluline varieeruvus ($-20,7\text{‰}$ kuni $6,6\text{‰}$) (Joonis 4), mis erineb märkimisväärselt globaalsest sademetevee trendist. Need näitajad ületavad küll oluliselt kaasaegsete suurte jääkilpide keskosa kliimaatilisi tingimusi peegeldavaid ekstsessi väärtusi, kuid võivad setete puhul tähendada ka näiteks korduvat külmumist ja sulamist. Viimase seostamist savi settimisaegse igikeltsa esinemisega aga on

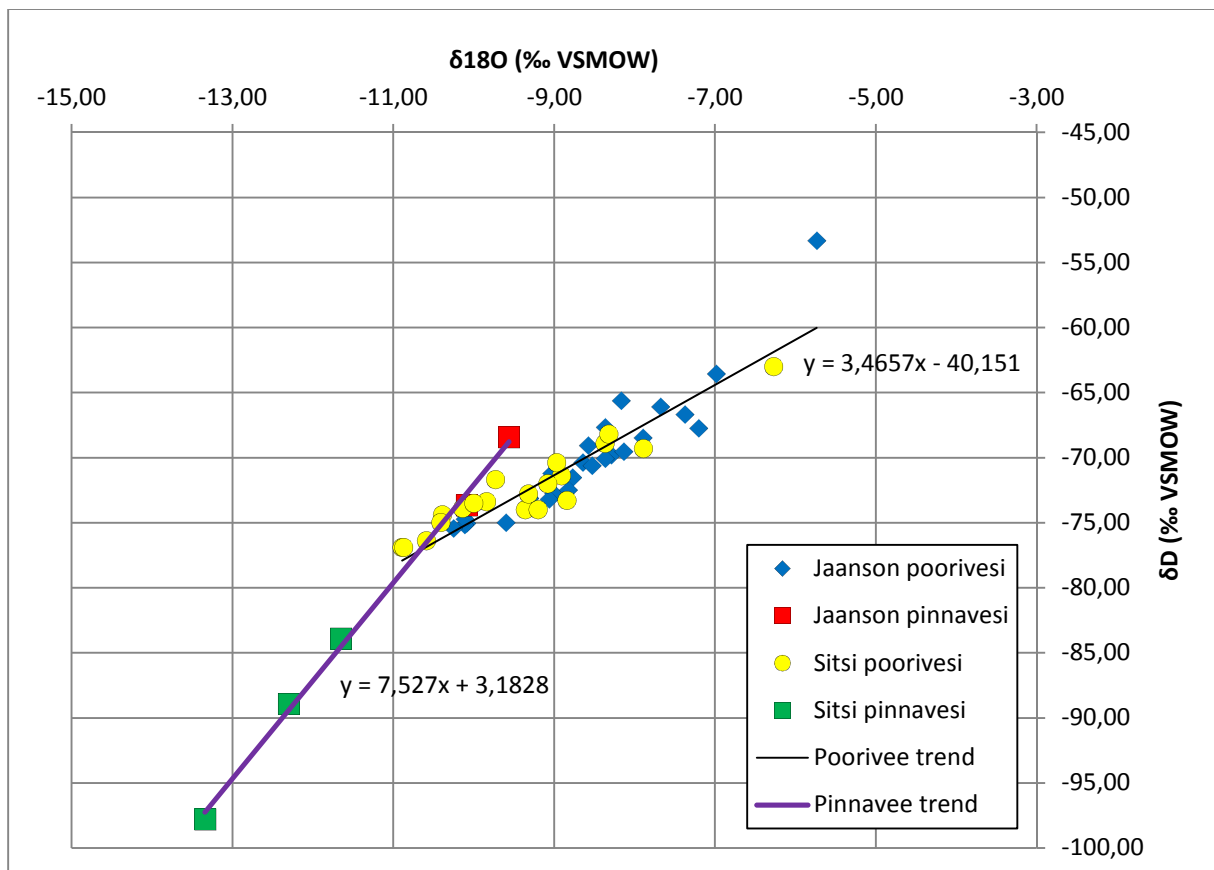
raske ette kujutada. Deuteeriumi ekstsessi võib muuta ka vee maapinda infiltreerumine, mille reaktsioone täpsemalt hinnata ei saa, kuid viirsavi poorivee puhul võib deuteeriumi ekstsessi väärtuste kõikumise suur amplituud sellele viidata.



Joonis 10. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhtediagramm Jaansonis (A) ja Sitsis (B) (Niit, 2011) setteläbilõigetel.

$\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhtediagramm kahe uuritud viirsaviläbilõike pooriveest näitab trendijoone tõusuks Jaansonis kõikide andmete jaoks 4,2133 ja Sitsi läbilõike jaoks 2,7917 (Joonis 10). Sama näitaja sademetevee globaalsele keskmisele on praegu ja kogu Holotseeni vältel olnud

8. Jäätumiseepisoodidele vastava kliima korral on see näitaja olnud 6,5 – 7,5 (Jouzel et al., 2007). Uuritud pinnavee proovides saadi trendjoone tõusu näitajateks Jaansoni ja Sitsi uuringualadel vastavalt 9,9 ja 8,2, mis on lähedased globaalsele keskmisele 8,86 (Faure & Mensing, 2005). Joonisel 11 on esitatud Pärnu ümbruse poorivee kõikide usaldusväärsete analüüside tulemused koos. Sellel graafikul on näha et $\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhte poorivee trendijoone tõus on 3,4657 ja pinnavee sama näitaja 7,527.



Joonis 11. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD kombineeritud suhtediagramm Jaansoni ja Sitsi (Niit, 2011) setteläbilõigete andmetel. Jaansoni läbilõike puhul on välja jäetud suvekihtide ning 2,56 m sügavuselt võetud üldproovi andmed.

Kui pinnavee trend vastab globaalsele keskmisele, siis poorivee trendijoone tõus on sellest oluliselt madalam ja selle põhjust on raske seletada. Lacelle (2011) jõuab järeldusele, et graafiku tõus 7,3 ning alla selle näitab juba pinnase külmumist või igikeltsa kujunemist. Samas Pärnu andmete tunduvalt positiivsemad $\delta^{18}\text{O}$ väärtused võrreldes liustike sulaveega seavad siiski võimaliku igikeltsa mõju kahtluse alla, kuigi savide kujunemise ajal, eriti läbilõike alumise osa settimise ajal, oli liustikuserv uuringualale lähedal. Maapinna hilisemat külmumist või igikeltsa pikemaajalist säilimist on raske ette kujutada, eriti tingimustes, kus

savi settimine ehk jääjärve eksisteerimine kestis vähemalt 580 aastat (Hang & Kohv, 2013). Läänemere arengumudelitele toetudes võis jääjärv Pärnu ümbruses eksisteerida isegi kuni 1500 aastat (Rosentau et al., 2011).

Madalaid trendi joone tõusu näitajaid on kirjeldatud ka ariidse kliima tingimustes ja seletatud aurumise suure osakaaluga. Seal muidugi on tegemist ka positiivsemate $\delta^{18}\text{O}$ väärtustega kui kirjeldatud poorivees ning viirsavides aurumise osa olla ei saa, isegi kui kujutaksime ette väga olulist põhjavee taseme settimisjärgset alanemist. Viimane võib uuringualal olla seotud Läänemere arenguga, kui Balti jääpaisjärve veetase 11650 a.t. kiiresti alanes ja võis Pärnu ümbruses laskuda isegi kuni -2 m ü.m. (Talviste et al., 2012). See sündmus võis alandada põhjavee taset, kuid savis oleks see kaasa toonud selgeid kihilise tekstuuri muutusi/rikkeid, mida aga Pärnu ümbruses kirjeldatud ei ole.

6. Järeldused

Käesoleva töö põhilisteks järeldusteks on:

1. Pärnu ümbruse kahe viirsaviläbilõike analüüs näitab, et viirsavi poorivee $\delta^{18}\text{O}$ väärtused varieeruvad vahemikus $-10,89\text{‰}$... $-3,33\text{‰}$ olles selgelt positiivsemad nii liustiku sulavee kui ka Eesti põhjavee vastavatest näitajatest ja sarnanedes pigem Eesti suviste sademete või pinnaveekogude (järved) vee vastavate väärtustega.

2. $\delta^{18}\text{O}$ vertikaalne muutlikkus on mõlemas uuritud läbilõikes sarnane, kus väärtused muutuvad positiivsemaks läbilõike ülemise osa suunas. Sarnase varieeruvuse juures puuduvad selged ja järsud muutused, mis kinnitaks põhjuste sarnasust ja/või üheaegsust. Selgeid väärtuste muutusi ei ilmne isegi litoloogiliselt eristuvate saviintervallide (nt. savimoreen) piires.

3. δD väärtused Pärnu ümbruse viirsavi poorivees jäävad vahemikku $-76,90\text{‰}$... $-47,35\text{‰}$ olles samas vahemikus pinnavee väärtustega.

4. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD vahetõrke kirjeldava näitaja deuteeriumi ekstsessi väärtused analüüsitud poorivees on globaalsest sademetevee keskmisest (8,86) oluliselt madalamad ja väga suure varieeruvusega jäädes vahemikku $-20,7$ kuni $10,2$ andes keskmiseks tulemuseks $-0,2$.

5. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhte graafiku tõus (3,47) jääb oluliselt alla globaalse sademetevee vastavale näitajale (8,86) ja viitaks justkui pinnase külmumisele või hoopis aurumise suurele osale, mis mõlemad on aga viirsavikeskkonnaga raskesti seostatavad. Seega jääb kirjeldatud graafiku tõus edasise arutelu temaks.

6. Ajaskaalal on $\delta^{18}\text{O}$ ja δD muutlikkus uuritud ja varvokronoloogiliselt korreleeritud läbilõigetel isegi paremini korreleeruv, kui sügavusskaalal. See ei toeta settimisjärgset poorivee sademete ja/või pinnaveega segunemise järeldust. Samas ei leitud selget seost ajas toimunud settimiskeskkonna muutuste ja porivee isotoopkoostise muutuste vahel.

7. Hea korrelatsioon viirsavi poorivee rõhu muutuste ja sademete hulga vahel savi ülemises kuni 4 m paksuses kihis lubab järeldada suhteliselt kiiret vee liikumist/segunemist selles intervallis ja vastavalt ka muutust isotoopkoostises. Paraku poorivee isotoopkoostise vertikaalses muutuses see üheselt ei kajastu.

8. Sama aasta suve ja talvekihtide $\delta^{18}\text{O}$ väärtused varieeruvad ebakorrapäraselt vahemikus -10,11‰...-5,74‰ ja δD väärtused -76,74‰...-53,34‰, kusjuures valdavalt on suvekihtides mõõdetud väärtused negatiivsemad.

9. Isotoopanalüüsi järgselt ei leidnud kinnitust hüpotees, et Pärnu ümbruse viirsavi poorivesi pärineb muutumatuna viirsavi settimise ajast. Poorivee päritolu/kujunemine jääb aga ebaselgeks. Sademete ja pinnaveega segunemise korral või ka põhjavee taseme ajaliste muutuste korral eeldaks isotoopkoostise suuremat varieeruvust nii vertikaalselt kui ka eri läbilõigetes.

Kokkuvõte

Käesoleva uurimuse eesmärgiks oli määrata viirsavilasundi poorivee isotoopkoostis, et hinnata võimaliku viirsavi settimisaegse vee esinemist settes ning võrrelda tulemusi varasema samalaadse uuringuga Sauga jõe kaldalt. Proovid koguti Pärnu linnast Pärnu jõe paremalt kaldalt Jaanson-2/3-12 setteläbilõikest. Läbilõike valikul sai määravaks uuringupiirkonna viirsavide suur ja mitmekülgne andmestik. Kokku võeti ca. 10,3-meetrisest läbilõikest poorivee pressimiseks 40 proovi. Pressimine viidi läbi TÜ Geoloogia osakonnas, kokku saadi pressimise tulemusena 34 veeproovi, mis analüüsiti koos Pärnu jõest ja Niidu ojast võetud proovidega TTÜ Geoloogia Instituudis.

Tulemused ei näidanud poorivee olulist erinevust pinnaveest. Poorivee $\delta^{18}\text{O}$ keskmine väärtus $-8,46\text{‰}$ ning pinnevee $\delta^{18}\text{O}$ keskmine väärtus $-9,83\text{‰}$ langevad samasse vahemikku Eesti keskmise sademetevee ja pinnaveekogude vee väärtustega. Poorivee ja pinnevee δD keskmised väärtused olid vastavalt $-69,49\text{‰}$ ja $-71,04\text{‰}$. Vertikaalselt muutusid $\delta^{18}\text{O}$ ja δD väärtused negatiivsemaks sügavuse suunas. $\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhte analüüs näitas deuteeriumi ekstsessi väikeseid väärtusi võrreldes globaalse sademetevee keskmisega (GMWL). Samuti oli $\delta^{18}\text{O}$ ja δD poorivee suhtediagrammi tõus oluliselt väiksem sademetevee globaalsest keskmisest.

Jaansoni ja Sitsi uuringualade poorivee isotoopkoostistes märkimisväärseid erinevusi ei esinenud. Proovide $\delta^{18}\text{O}$ keskmised väärtused erinesid ligikaudu 1‰ võrra ($-8,46\text{‰}$ vs $-9,37\text{‰}$) ning δD keskmised väärtused erinesid ligikaudu 3‰ võrra ($-69,49\text{‰}$ vs $-72,50\text{‰}$). Ka vertikaalne muutlikkus ja väärtuste kõikumise amplituud olid sarnased. Siiski vajab märkimist, et sarnasused olid suuremad, kui tulemusi võrreldi suhtelisel ajaskaalal.

Kokkuvõtteks saab öelda, et Pärnu ümbruse viirsavi poorivee isotoopkoostis erineb oluliselt nii teadaolevatest viimase jäätumise mandrijää sulamisevee (-25‰ ... -20‰) kui ka sellest mõjutatud Põhja-Eesti põhjavee (-22‰ ... -18‰) isotoopkoostistest. Selle tuginedes saab öelda, et ei leidnud kinnitust hüpotees, et Pärnu ümbruse viirsavi poorivesi pärineb viirsavi settimise ajast. Poorivee päritolu jääb aga lahtiseks. Ühelt poolt viitavad nii $\delta^{18}\text{O}$ kui δD väärtused võimalikule segunemisele sademete ja/või pinnaveega. Teisalt eeldaks sellisel juhul suuremat varieeruvust nii läbilõikes vertikaalselt kui ka eri vaatlusaladel, mis on kahtlemata arenenud eelkõige erinevates hüdrooloogilistes tingumustes. Eri läbilõigete poorivee isotoopkoostise sarnane muutlikkus just ajaskaalas seab poorivee võimaliku segunemise vee liikumise ja/või

põhjavee taseme muutuse tõttu samuti suure kahtluse alla. Küsimusi tekitab ka $\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhtediagrammi trendijooned globaalsest sademetevee keskmisest (8,86) oluliselt erinev tõus (3,47). See viitab edasiste uuringute vajadusele antud valdkonnas, et mõista võimalikke pinnasesiseseid reaktsioone, mis mõjutavad $\delta^{18}\text{O}$ ja δD suhteid viirsavi poorivees.

Isotopic composition of pore water from varved clays in Western Estonia

Tanel Mäger

Summary

The main aim of this thesis was to analyze the isotopic composition of pore water extracted from varved clays at the Jaasoni test site in Pärnu city, Western Estonia. In addition, an attempt and to assess the possible presence of melt water from the last glacial period in the varved clay sequence was made.

Approximately 10,3 m of clay at the coring site was sampled with a Russian-type peat corer operated by a drilling rig Dando Terrier 2002. The 1 m long clay sections were wrapped in plastic to avoid drying and placed in half-cut PVC tubes for safe transport. Subsampling for squeezing was done at the University of Tartu, at the sedimentology laboratory of the Department of Geology. Mechanical squeezing technique with the Herzog Laboratory Press TP20 at 10 kN/cm² was used to obtain 40 samples, containing 2 ml of pore water each, for further processing. Analysis to measure the composition of hydrogen and oxygen isotopes was executed at the Institute of Geology of the Tallinn University of Technology.

The results of the analysis showed no considerable variation between the samples of pore water and surface water. $\delta^{18}\text{O}$ content of pore water in the studied varved clay section varied between -10,25‰ and -3,33‰ with the average of -8,46‰ which is close to the average isotopic composition in precipitation and surface waters of Estonia. $\delta^{18}\text{O}$ content of two surface water samples taken from the Pärnu River and Niidu Creek gave the values of -10,09‰ and -9,56‰ respectively. δD results in pore water ranged from -76,74‰ to -47,35‰ with the average of -69,49‰. Deuterium levels in surface water samples showed similar results varying between -73,65‰ and -68,43‰.

Deuterium excess levels of pore water samples were substantially lower than the average of precipitation. Deuterium excess trendline for pore water samples was also significantly lower (3,47) compared to the Global Meteoric Water Line (GMWL) whereas the samples of surface water showed similar trend to GMWL.

Comparison between the Jaansoni test site and the Sitsi test site located at the distance of ca. 7 km and studied in 2011 (Niit, 2011) showed similar variation in the isotopic composition. The average $\delta^{18}\text{O}$ content in pore waters of the two test sites differed only approximately 1‰ (-8,46‰ vs -9,37‰) and the average δD content varied approximately 3‰ (-69,49‰ vs -72,50‰). Also vertical changes in isotope composition were of similar amplitude and trend towards more negative values in the bottom.

In conclusion, the samples of the Jaansoni and Sitsi test sites showed little variation in isotopic composition. The results of $\delta^{18}\text{O}$ varied substantially from the previously studied isotopic composition of melt water of the last glacial period and from the isotopic composition of the ground water that was influenced by the Last Weichselian glaciation in Estonia. Therefore the hypothesis that the pore water in the varved clay sequence could contain melt water of the last glacial period was not confirmed. Further research is needed to explain the formation of isotope composition of pore water in the sediments.

Tänuõnad

Suur tänu eelkõige töö juhendajatele Tiit Hangule ja Tõnu Martmale abistavate nõuannete ning aktiivse juhendamise eest. Samuti suur tänu Kalle Kirsimäele tulemuste interpreteerimise ning nõustamise eest. Lisaks tänu Marko Kohvile välitöödel abistamise eest.

Kasutatud kirjandus

- Anderson, L., Abbott, M. B. & Finney, B. P., 2001.** Holocene Climate Inferred from Oxygen Isotope Ratios in Lake Sediments, Central Brooks Range, Alaska. *Quaternary Research*, **55**(3), 313–321.
- Comité International des Poids et Mesures, 2005. CIPM: Report of the 94th meeting, Paris, 235.
- Craig, H., 1961.** Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702–1703.
- Dansgaard, W., 1964.** Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436–468.
- Dawson, T. E. & Brooks, P. D., 2001.** Fundamentals of Stable Isotope Chemistry and Measurement. In *Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture*. Unkovich, M., Pete, J., McNeill, A., Gibbs, D. J., (eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1–17.
- De Geer, G., 1912.** A geochronology of the last 12,000 years. Congress Géologique International Stockholm 1910, Comptes Réndus, Stockholm, Sweden, 241–253.
- Faure, G. & Mensing, T. M., 2005.** *Isotopes: Principles and Applications*. John Wiley & Sons Inc. New Jersey, 1–897.
- Froehlich, K., Gibson, J. J., Aggarwal, P. K., 2001.** Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. *Study of Environmental Change using Isotope Techniques, Proceedings of an International Conference in Vienna, Austria*, 54–66, C&S Papers Series 13.
- Godwin, H., 1962.** Half-life of radiocarbon. *Nature*, **195**, 948.
- Görür, F. K. & Genç, E., 2012.** The tritium, deuterium and oxygen-18 isotope levels determination in various waters in Rize and Trabzon, *Desalination and Water Treatment*, **44**:1-3, 215–222
- Hang, T., Kalm, V. ja Tuuling, I., 2008.** Pinnamood ja selle kujunemine. *Pärnumaa I, Loodus, aeg, inimene*. Pae, T., Sillaots, A., Taimla, T. ja Kalm, V., (toim.). Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn, 79–87.
- Hang, T. & Kohv, M., 2013.** Glacial varves at Pärnu, south-western Estonia: a local varve chronology and proglacial sedimentary environment. *GFF* xx; (in press).
- Hang, T., Miidel, A. ja Kalm, V., 2002.** Soopuuriga Peipsil. *Eesti Loodus*, **7/8**, 34–38.
- Hang, T., Talviste, P., Reinson, R, Kohv, M., 2007.** Proglacial sedimentary environment in Pärnu area, western Estonia as derived from the varved clay studies. In *Applied Quaternary research in the central part of glaciated terrain*. Johansson, P. & Sarala, P. (eds.). Geological Survey of Finland, 2007 (Special Paper; **46**), 1–17.

- Jouzel, J., Stievenard, M., Johnsen, S. J., Landais, A., Masson-Delmotte, V., Sveinbjornsdottir, A., Vimeux, F., von Grafenstein, U., White, J. W. C., 2007.** The GRIP deuterium-excess record. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 1–17.
- Kattel, J., 1989.** Pärnu viirsavide ruumiline muutlikkus. Diplomitöö, käsikiri TÜ geoloogia osakond, Tartu, 1–51.
- Kelln, C. J., Hendry, M. J., Wassenaar, L. I., 2001.** Stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of Pore Waters in Clay-Rich Aquitards: A Comparison and Evaluation of Measurement Techniques. *Ground Water Monitoring & Remediation*, **Spring**, 108–116.
- Kersna, H., 2009.** Pärnu viirsavi geotehniliste omaduste muutused ajas. Bakalaureusetöö, käsikiri TÜ Geoloogia osakond, Tartu, 1–57.
- Kiipli, T., Kallaste, T., Martma, T., 1995.** Mn-Fe-calcite concretions from varved clays of Estonia and the Gulf of Finland: the composition and growth history. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, **44**(3), 163–176.
- Kirsis, K., 2006.** Pärnu viirsavibasseini varvokronoloogiast. Bakalaureusetöö, käsikiri TÜ Geoloogia osakond, Tartu, 1–59.
- Kohv, M., 2011.** Landslides in clayey soils of western Estonia. *Dissertationes geologicae Universitatis Tartuensis, Estonia*, 1–116.
- Kohv, M., Hang, T., Talviste, P., Kalm, V., 2010.** Analysis of a retrogressive landslide in glaciolacustrine varved clay. *Engineering Geology*, **116**, 109–116.
- Kohv, M., Talviste, P., Hang, T., Kalm, V., 2010.** Retrogressive slope failure in glaciolacustrine clay: Sauga landslide, western Estonia. *Geomorphology*, **124**, 229–237.
- Kohv, M., Talviste, P., Hang, T., Kalm, V., Rosentau, A., 2009.** Slope stability and landslides in proglacial varved clays of western Estonia. *Geomorphology*, **106**, 315–323.
- Lacelle, D., 2011.** On the $\delta^{18}\text{O}$, δD and D-excess Relations in Meteoric Precipitation and During Equilibrium Freezing: Theoretical Approach and Field Examples. *Permafrost and Periglacial processes*, **22**, 13–25.
- Niit, J., 2011.** Pärnu ümbruse jääjärveliste savide poorivee isotoopkoostisest. Bakalaureusetöö, käsikiri TÜ Geograafia osakond, Tartu, 1–25.
- Pai, K., 2010.** Jääjärveline settimiskeskond ja varvokronoloogia Pärnu lahes. Magistritöö, käsikiri TÜ Geoloogia osakond, Tartu, 1–72.
- Patterson, R. J., Frape, S. K., Dykes, L. S. McLeod, R. A., 1977.** A coring and squeezing technique for the detailed study of subsurface water chemistry. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **15**, 162–169.
- Pirrus, E., 1968.** Eesti viirsavid. Valgus, Tallinn, 1–144. (vene keeles)

- Punning, J.-M., Martma, T., Kessel, H., Vaikmäe, R., 1988.** The isotopic composition of oxygen and carbon in the subfossil mollusc shells of the Baltic Sea as an indicator of paleosalinity. *Boreas*, **17**, 27–31.
- Punning, J.-M., Toots, M., Vaikmäe, R., 1987.** Oxygen-18 in Estonian Natural Waters. *Isotopenpraxis*, **23**, 232–234.
- Raidla, V., 2010.** Chemical and isotope evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system in Estonia. *Dissertationes geologicae Universitatis Tartuensis*, Estonia, 1–133.
- Rosentau, A., Veski, S., Kriiska, A., Aunap, R., Vassiljev, J., Saarse, L., Hang, T., Heinsalu, A., Oja, T., 2011.** Palaeogeographic model for the SW Estonian coastal zone of the Baltic Sea. In *The Baltic Sea Basin*. Harff, J., Björck, S., Hoth, P. (eds.). Springer, 165–188.
- Saarse, L., 1992.** Textural and structural characteristics of the Estonian varved clays. In *Laminated sediments*. Saarnisto, M., Kahra, A., (eds.). Espoo: Geological Survey of Finland, 1992, (Special Paper; **14**), 55–63.
- Saarse, L. & Pirrus, E., 1988.** Lithology and formation of the Estonian varved clays. In *Estonia. Geographical Researches*. Merikalju, L. (eds.). On the occasion of the 26th International Geographical Congress. Eesti Geograafia Selts, Tallinn, 73–83.
- Sauramo, M., 1925.** Geochronologische Studien in Russland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, **47**, 521–522.
- Talviste, P., 2004.** Raport nr. 04–04–0365. Pärnu survealise veehorisondi veetaseme monitooring aastatel 1993–2004. Monitooringu andmed ja vaatlusread. Geotehniline raport, käsikiri IPT Projektijuhtimine OÜ.
- Talviste, P., Hang, T. & Kohv, M., 2012.** Glacial varves at the distal slope of Pandivere–Neva ice-recessional formations in western Estonia. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, **84** (Special Issue 1), 7–19.
- Tavast, E. ja Raukas, A., 1982.** Eesti aluspõhja reljeef. Valgus, Tallinn, 1–193. (vene keeles).
- Torp, R., 2011.** Karbonaatsed konkretsioonid Pärnu viirsavides. Bakalaureusetöö, käsikiri TÜ Geoloogia osakond, Tartu, 1–22.
- Tullborg, E. L. & Larson, S. A., 1984.** $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ for limestones, calcite fissure fillings and calcite precipitates from Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, **106**, 2, 127–130.
- Vaikmae, R., Vallner, L., Loosli, H.H., Blaser, P.C., Juillard-Tardent, M. 2001.** Palaeogroundwater of glacial origin in the Cambrian-Vendian aquifer of northern Estonia. *Palaeowaters in Coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene*. The Geological Society of London, **189**, 17–27.

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Tanel Mäger
(autori nimi)
(sünnikuupäev: 18.07.1988)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose

Viirsavi pooriva isotopkoostisest Lääne-Eestis

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Tiit Haug ; Tõnu Martma
(juhendaja nimi)

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 24.05.2013