

**Tartu Ülikool**

**Loodus- ja Tehnoloogiateaduskond**

**Ökoloogia ja Maateaduste Instituut**

**Geoloogia osakond**

**Siim Nirgi**

**LÄMMIJÄRVE PÕHJASETTED JÄRVE  
ARENGU PEEGELDAJATENA**

**Magistritöö**

**Juhendajad: Tiit Hang PhD**

**Argo Jõelet PhD**

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja \_\_\_\_\_

*allkiri ja kuupäev*

**Tartu 2015**

# Sisukord

Sisukord.....	2
Sissejuhatus .....	3
1. Peipsi järv .....	6
1.1 Peipsi järve nõo kujunemine ja areng.....	7
1.1.1 Geoloogilised eeldused.....	7
1.1.2 Peipsi järve põhjasetted .....	9
1.1.3 Mandrijää taandumine ja Peipsi järv liustikuvabal perioodil .....	12
2. Materjal ja meetodika.....	16
2.1 Georadari kasutamine järve põhjasetete uurimisel .....	16
2.2 Puurimised ja setete kirjeldamine .....	20
2.3 Dateeringud.....	21
3. Tulemused .....	22
3.1 Radariuuringud Piirissaare idaosas.....	22
3.2 Lämmijärve põhjareljeef ja setted .....	23
3.3 Mattunud turba vanus .....	25
4. Arutelu.....	26
5. Järeldused .....	35
Kokkuvõte .....	36
Bottom deposits of the Lake Lämmijärv as indicators of the lake evolution .....	37
Tänuõnad.....	39
Kirjandusloend .....	40
Lisad .....	45

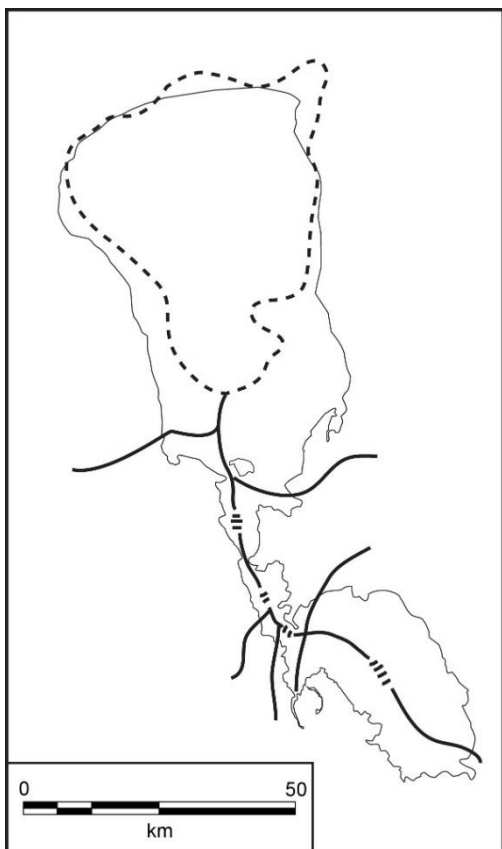
## Sissejuhatus

Peipsi järv on Euroopas pindalalt neljas ja Eesti suurim siseveekogu, kuigi piirijärvena jagatud Venemaaga. See paikneb Ida-Euroopa lausmaal Peipsi nimelises piklikus lauges nõos ümbritsevate kõrgustike vahel ja on keskmise veetasemega 30 meetrit üle merepinna (m ü.m.p.). Peipsi on olnud kauba ja sõjatee viikingite ajast saadik ning järve on kujutatud maakaartidel juba alates 16. sajandist (Varep, 1995). Peipsi nime algne tähendus ei ole teada. Vanem nimekuju „Peipus“ on säilinud saksa keeles. Tänapäevast nime „Peipsi“ kasutatakse kahes tähenduses: selle all võidakse mõelda kolmeosalisest järvest vaid suurimat, ka Suurjärvena tuntud põhjapoolset osa või kogu kolmikjärve, mis hõlmab nii Suurjärve kui ka lõunapoolset Pihkva järve ja neid ühendavat väinalist Lämmijärve. Peipsi tähtsus kalanduses, puhkemajanduses, aga ka mageveevaru ja piirijärvena on olnud suur, mistõttu ulatuvad ka teaduslikud uuringud tagasi 19. sajandi keskpaika, mil K. E. von Baer (1852, 1860) sealset kalanduse seisut uuris. Peipsi hüdroloogia, elustiku ja järvenõo pikaajaliste uuringute tulemused on koondatud mitmesse mahukasse monograafiasse (Timm ja Nõges, 1996; Miidel ja Raukas, 1999; Nõges, 2001; Pihu ja Haberman, 2001). Kui Peipsi nõo geoloogia kohta on olemas üsna mahukas andmestik, siis järve akvatoorium on tagasihoidliku uuritusega. See on ka järvenõo geoloogiat käsitleva monograafia (Miidel ja Raukas, 1999) autoreid sundinud viitama paljudele seni lahendamata probleemidele, mis muuhulgas on seotud liustiku taande ja järve arenguga liustikuvabal perioodil.

Peipsi järve hilis- ja pärastjäaaegne areng on olnud tihedalt seotud liustiku taandumise ja sellele järgnenud glatsioisostaatilise maakerkega. Peipsi jääjärve etapp lõppes liustiku taandumisega Läänemere nõkku, millele järgnes veetaseme alanemine Peipsis ja madalaveelise ning tänasest kuni 10 m madalama veetasemega nn Väike-Peipsi kujunemine. Väike-Peipsi etapp peegeldab väga olulist keskkonnamuutust ja on seega mitte ainult järve arengu, vaid ka ümbritsevate maastike ja hüdrograafilise võrgu kujunemise seisukohalt suure tähtsusega. Kuigi kõnealuse etapi olemasolu on geoloogiliste uuringutega tõestatud, ei ole veel selged selle kujunemise põhjused, aeg ega kestus. Kuna on teada, et juba siis eksisteeris tänapäevasele sarnane või Velikaja lisajõgede vee tõttu suuremgi (Hang et al. 1964, Raukas ja Rähni, 1969) sissevool järve, on keeruline ette kujutada Peipsi järve tühjaksvalgumist. Uurijatele ei ole teada vaieldamatu väljavoolu koht, kuna puuduvad selged väljavoolule viitavad erosioonilised pinnavormid. Kõige tõenäolisemaks peetakse ühtlast vete valgumist

kaasaegse Luuga madaliku kohal arvestades seda, et liustiku taandudes oli see piirkond tunduvalt madalamal kui täna (Rosentau, 2006).

Samuti puudub ühtne arusaam selle kohta, millised tingimused valitsesid Väike-Peipsi eksisteerimise ajal Peipsi nõo lõunaosas. Ühe arvamuse kohaselt oli Lämmi- ja Pihkva järves Holotseeni alguses nii madal veetase, et vesi eksisteeris vaid nõo sügavaimates lohkudes eraldiseisvate järvedena, millel puudus ühendus Väike-Peipsiga (Davõdova ja Kimmel, 1991). Veel on arvatud, et Velikaja jõgi võis suubuda madalaveelisesse Väike-Peipsisse ning kaasajal Peipsisse suubuvad jõed olid selle lisajõgedeks, moodustades Peipsi nõos sügavale lõikunud keeruka hüdrograafilise võrgu (joonis 1) (Raukas ja Rähni, 1969). Paraku on viimase tõestuseks vaid Holotseeni setetega täitunud tänapäevaste orgude suudmed ning Lämmijärve põhjas kindlaks tehtud sügav vagumus (Kimmel, 1994), mille jätkumise kohta Piirissaare ümbruses ja Suurjärve põhjas seni andmed puuduvad.



**Joonis 1.** Jõgedevõrk ja Väike-Peipsi kontuur (punktirjoonega) Väike-Peipsi etapil (Raukas ja Rähni, 1969).

Lisaks ülalmainitud ja tänasest Peipsi veetasemest oluliselt madalamale lõikunud orgudele viitavad madala veetasemega Väike-Peipsi eksisteerimisele ka Suurjärve põhjas ja Väraska lahes kindlaks tehtud mattunud jüttja ja turba leiud (Hang et al. 2008; Moora jt. 2005), mille vanus ühtib orge täitvate setete vanusega. Kahjuks on need leiud vaid üksikud ja ei võimalda

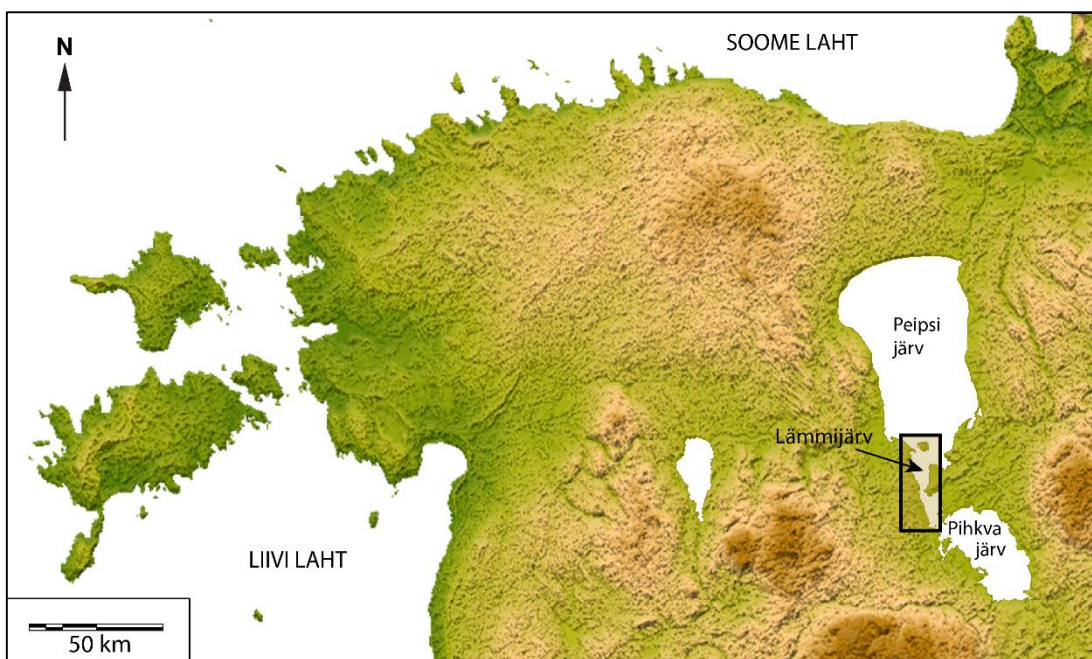
seni täpsemini Väike-Peipsi aegset hüdrograafiat kirjeldada. Samas on varasemate geoloogiliste uuringute käigus kirjeldatud mattunud turbaid ka Piirissaare ümbruses (Valt, 1976). Nende levik ja eelkõige vanus võiksid oluliselt kaasa aidata Väike Peipsi eksisteerimisega seotud huvitavate küsimuste lahendamisele.

Käesoleva töö eesmärgiks on koguda täiendavaid andmeid Lämmijärve põhjareljeefi ja põhjasetete kohta ning kinnitada mattunud turba esinemist ja kaardistada selle levikut Lämmijärves Piirissaarega piirneval alal. Lisaks võimalusel püüda kogutud andmeid kasutades seletada Väike-Peipsi aegset veetaset ja hüdrograafiat. Metoodika seisukohalt selgitatakse maaradari kasutatavust ja efektiivsust järve põhjasetete uurimisel talviselt jäält. Nii maaradari kui ka puurimise andmed koguti autori osalusel välitöödel järvejäält ja Piirissaare kirdeosa teedelt ning heinamaadelt. Lisaks kasutati varasemate geoloogiliste uuringute andmeid Eesti Geoloogiakeskuse Geoloogiafondist ning Veeteede Ameti kaardistatud põhjareljeefi andmeid. Dateeringud ja seotud arvutused tegi töö autor Tartu Ülikooli radiosüsiniku laboris.

# 1. Peipsi järv

Peipsi, suuruselt neljas järv Euroopas, pindalaga 3555 km<sup>2</sup>, asub Ida-Eestis ning koosneb kolmest selgesti eristatavast osast: Peipsi e. Suurjärv, Pihkva järv ja Lämmijärv. Põhjapoolseima, Suurjärve pindala on u. 2611 km<sup>2</sup>, suurim sügavus 12,9 m ja keskmine sügavus 8,3 m. Pihkva järve iseloomustavad parameetrid on vastavalt u. 708 km<sup>2</sup>, 5,3 m ja 3,8 m ning eelnevaid ühendaval Lämmijärvel u. 236 km<sup>2</sup>, 15,3 m ja 2,5 m (Haldna et al. 2008). Peipsi järve vesikond koos järvega jaotub Eesti, Venemaa, Läti ja Valgevene vahel ning katab u. 47815 km<sup>2</sup> suuruse ala. Järve suubub ligikaudu 240 vooluveekogu. Neist suurimate valglatega on Velikaja ja Emajõgi, mille valglate pindalad moodustavad vastavalt 57% ja 22% kogu vesikonna pindalast. Väljavool Peipsi järvest toimub vaid Narva jõe kaudu (Jaani ja Raukas, 1999). Veetaseme kõikumised Peipsis on märkimisväärsed. Ajaloos on veetase ulatunud 28,72 m ü.m.p. (1964) kuni 31,76 m ü.m.p. (1924) (Jaani, 1973). Keskmiseks veetasemeks loetakse tänapäeval 30 m ü.m.p. Peipsi rannajoon on väikeste eranditega (Raskopeli laht, Väraska laht) suhteliselt vähe liigestatud. Erinevate rannatüüpide loend on aga kirju, hõlmates endas nii Devoni liivakivis kujunenud pankrandu, Kvaternaarisetetes tekkinud astangrandu kui ka mitmesuguseid madalaid lauskrandu (Tavast, 2008).

Antud töös keskenduti eestkätt Piirissaare ümbruse ja sellest lõuna poole jääva Lämmijärve uurimisele (joonis 2).



**Joonis 2.** Uurimisala paiknemine. Reljeefikaart SRTM kõrgusmudelilt.

## 1.1 Peipsi järve nõo kujunemine ja areng

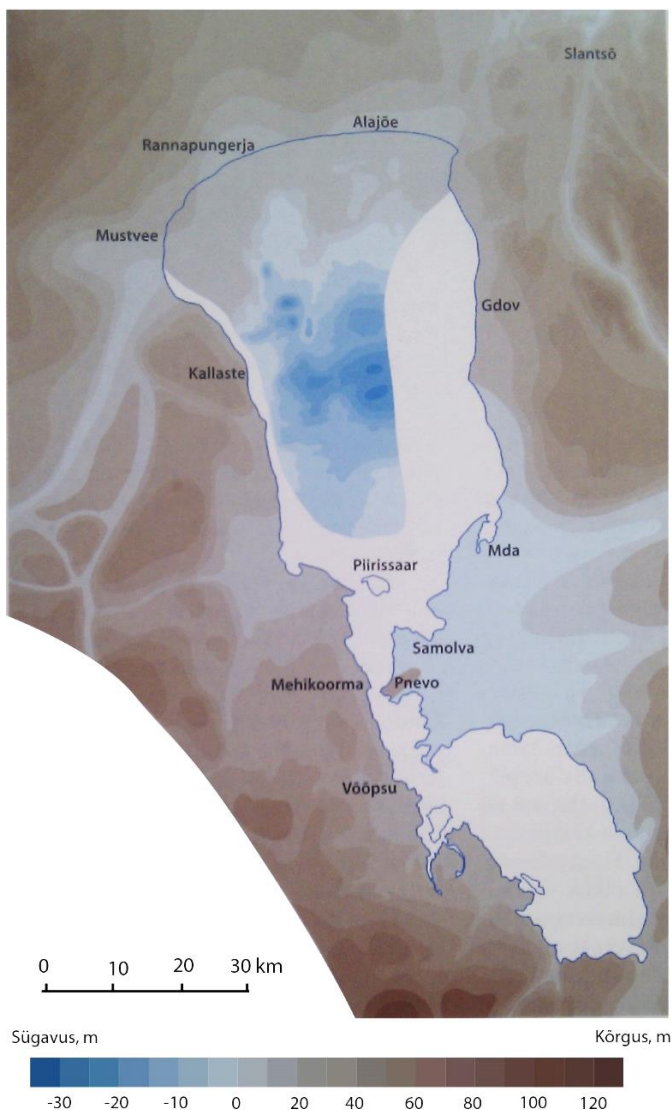
### 1.1.1 Geoloogilised eeldused

Peipsi nõgu on lame põhja-lõuna sihiline ebaselgete piirjoontega negatiivne pinnavorm. Seda piiritletakse võttes arvesse viimase jäätumise servamoodustisi, kus need on jälgitavad (Kajak, 1964). Ülejäänud osas lähtutakse piiritlemisel kokkuleppeliselt 40 m samakõrgusjoonest. Nõo serva on võimalik jälgida Lõuna-Eestist piki jää servamoodustisi alates Orava–Leevi–Himmiste–Põlva joonest, mööda Ahja jõe orgu Läänisteni ning edasi põhja poole mööda Ugandi lavamaa idaserva Võõbste–Kavastu–Torma–Avinurme ja Viru-Roela joonel (Kajak, 1964). Nõo põhjaserv kulgeb üle Mäetaguse ja Illuka kuni Narva veehoidlani. Ugandi lavamaast idas olev, Peipsi madaliku nime kandev maismaaline Peipsi nõo edelaosa on klassifitseeritud selle geoloogilise, geomorfoloogilise, klimatoloogilise ja bioloogilise ühtsuse alusel Eesti maastikurajoonide jaotuses omaette üksuseks (Varep, 1964).

Uurijate seas puudub üksmeel kaasaegse Peipsi järve nõo kujunemise kohta. Varasemad uuringud on toonud välja Kvaternaarieelse pikaajalise kulutuse või tektoonilise alangu sügaval paikneva rikketsooni kohal (Schmidt, 1883; Zur Mühlen, 1918; Orviku, 1958, cit. Miidel ja Raukas, 1999). Tänapäeval ollakse aga üksmeelsel arvamusel liustiku olulises rollis nõo kujunemisel (Grewingk, 1879).

Peipsi järv paikneb piklikus aluspõhjalises nõos, mille piirjooned on ebaselged. Üldiselt laskub aluspõhja reljeef ümbritsevatelt aluspõhjalise tuumaga kõrgustikelt või lavamaadelt nõo keskosa suunas kus Suurjärve keskosas saavutab madalaima taseme, olles 31 m allpool merepinda (Hang ja Miidel, 1999a). Nõo keskosa suunas laskuvat reljeefi liigestavad lavamaad ja sügavad Kvaternaarieelsed orud (joonis 3), mis näiteks Mustvee kohal saavutavad kuni 10 m sügavuse (ü.m.p.). Järve akvatooriumilt on aluspõhja reljeefi kohta andmeid vaid Suurjärve põhjast. Oluline info pärineb seal läbi viidud seismoakustilise pidevsondeerimise meetodil tehtud uuringutest (Noormets et al. 1998; Miidel et al. 2001). Järve põhjaosas, Mustveest idas ja Alajõest lõunas, eristuvad pealispinna reljeefis tasased lavad, mille kõrgused vähenevad nõo keskosa poole ja lõppevad suhteliselt järskude nõlvadega. Lavade vahelt algab lõuna poole kulgev vagumus, mis muutub Kallaste joonel lohuks, mille põhi paikneb 31 m allpool merepinda. Sellest lõuna poole tõuseb aluspõhja

pealispind uuesti, olles Piirissaarest 4-5 km põhja pool juba võrdne meretasemega. Huvitav on see, et järvest väljaspool kindlaks tehtud aluspõhjaliste orgude levikut järve all ei ole seni veel tõestatud (Miidel et al 2001).



**Joonis 3.** Peipsi nõi ja selle lähiümbruse aluspõhja reljeef (Kajak, 1964; Tavast ja Raukas, 1982; Hang ja Miidel 1999a; Miidel jt. 2001).

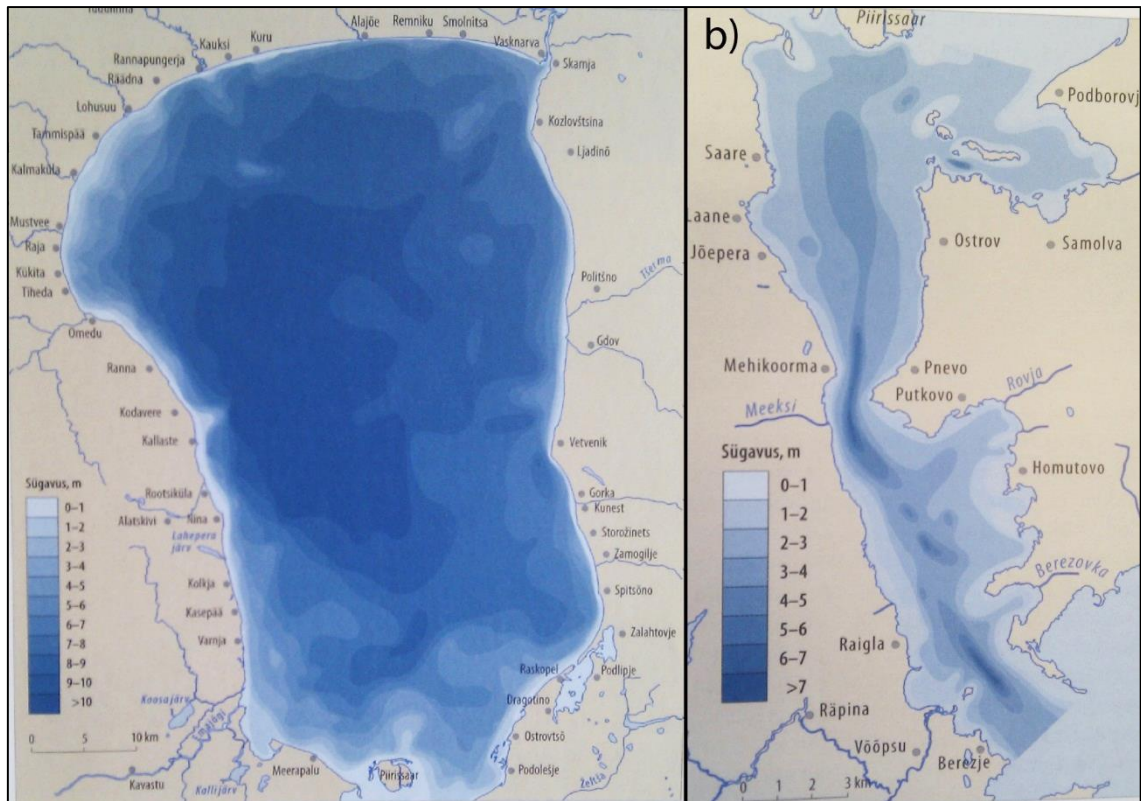
Peipsi nõos katavad aluspõhja peamiselt viimase jäätumisega kuhjunud punakaspruun moreen, mis on ühtlasi valdavaks lähtematerjaliks enamikule noorematest setetest (Raukas, 1978). Kvaternaarisetete paksus jääb enamasti 2-10 m vahele, kuid ooside, mõhnastike ja otsamoreenide puhul võib ulatuda kuni 80 meetrini (Rähni, 1973). Geneesilt jagunevad Peipsi nõos esinevad liustiku-sulamisveetekkelised setted nii liustikujõe- kui ka jääjärveseteteks. Liustikujõesetteid moodustavad nii liustikusisese tekkega pikioosid ja mõhnad kui ka liustiku ees tekkinud põikoosid, sandurid ja glatsiofluviaalsed deltag. Suurimad liustiku-sulamisveetekkelise liiva ja kruusa varud on mattunud orgudes (Tavast ja Raukas, 1982), mille ilmekaks esindajaks on Eesti suurim, Pannjärve liivamaardla (Raukas, 2008a).



## 1.1.2 Peipsi järve põhjasetted

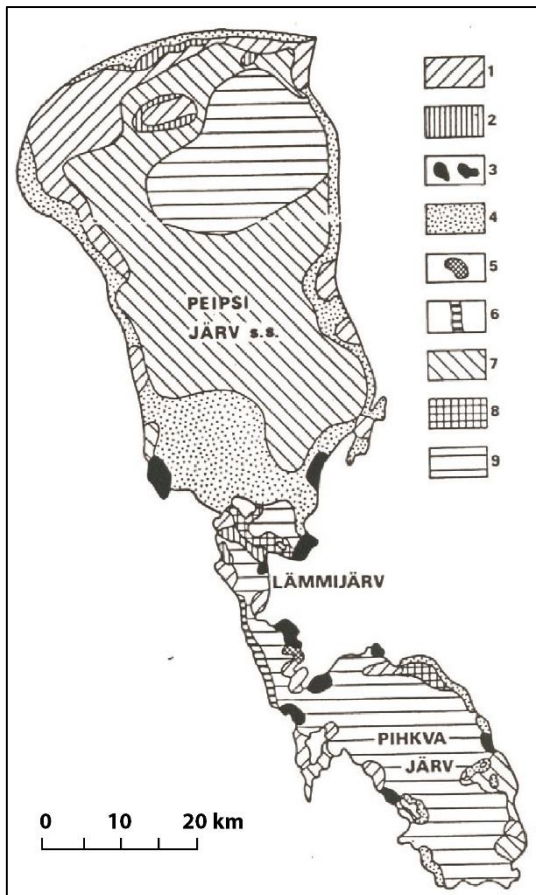
Peipsi nõos laiuvat Peipsi järve on tema tähtsuse juures võrdlemisi vähe uuritud, peamiseks takistuseks on olnud järve suured mõõtmed. Järve põhjasetete kohta annab kõige objektiivsemat infot puurimine. Viimane nõuab aga häid töötingimusi ning on võrdlemisi kulukas, mistõttu on kogu Peipsi akvatooriumil vaid üks aluspõhja ulatuv puurauk: Sahmeni madalal järve põhjaosas (Kajak, 1964). Uuritud on Peipsi põhjasetete levikut (Raukas ja Rähni, 1981; Terasmaa, et al. 2013), kirjeldatud setete koostist, diatomeede ja õietolmu levikut (Davõdova, 1981; Pirrus, 1981; Raukas ja Rähni, 1981) ning tehtud Remnikul, Kodavere ja Lahepera vahelisel alal ning Emajõe suudme ja Piirissaare ümbruses rohkelt puurimisi liiva- ja kruusavarude praktilise kasutamise eesmärgil (Valt, 1976). Lisaks on läbi viidud biostratigraafilised uuringud Lahepera järves, Lämmijärves ja Värskas lahes (Pirrus ja Tassa 1981; Davõdova ja Kimmel, 1991). Viimases on detailsemalt kirjeldatud karavimudavarused (Tassa, 1976; Pirrus ja Tassa, 1981). Suurjärve põhja- ja lääneosa aluspõhja reljeefi, pinnakatte paksuse ja hilisjäaaegsete ning jääajajärgsete järvesetete leviku kohta koguti rohkelt detailset informatsiooni 1990. aastatel tehtud seisimokustiliste uuringute käigus (Noormets et al. 1998; Miidel et al. 2001; Miidel ja Hang 2002; Hang jt. 2002). Veel on põhjasetete kohta materjali kogutud järvejäält tehtud käsipuurimistega (Niinemets, 1999; Hang et al. 2001; Hang jt, 2002; Hang, 2003).

Olles Euroopa suuruselt neljas järv, erineb Peipsi konkureerivatest suurjärvedest väikese sügavuse poolest, mis on üheks tõendiks järvenõo glatsiaalse päritolu kohta. Peipsi järve põhjareljeef on võrdlemisi tasane. Rannanõlv on lauge ja valdavalt madal, kuid järve keskosas ilmnevad mõned lohud sügavusega kuni 12,4 m. Samal ajal on aga Lämmijärve põhi mõnevõrra liigestatum (joonis 4), ulatudes maksimaalselt 15,3 m sügavusele. Põhja suurem liigestatis arvatakse olevat tingitud Ürg-Velikaja jõe oru ebaühtlasest täitumisest ja tänapäevasest Peipsi järvest tuleva settekanne iseloomust (Raukas ja Rähni, 1981). Suure osa transporditavatest setetest Piirissaare ümbruses moodustavad rannikuvööndi liivad. Intensiivset randade kulutust soodustab tugev järve veetaseme kõikumine, mille amplituud võib ulatuda kuni kolme meetrini. Erineva veetaseme juures alluvad tormilainete kulutusele aga erinevad järve põhja- ja rannaalad, kust pärinev materjal settib lainevarjulistes kohtades. Taolise protsessi ilmekaks näiteks on Piirissaarest läänes, Eesti Väravates, toimuv pidev settekuhje. Veetaseme erinevused Peipsi ja Pihkva järves põhjustavad Lämmijärves tugevaid hoovuseid, mis on järve kitsamates kohtades kulutanud põhjareljeefi silmapaistvaid süvikuid (Orviku, 2007).



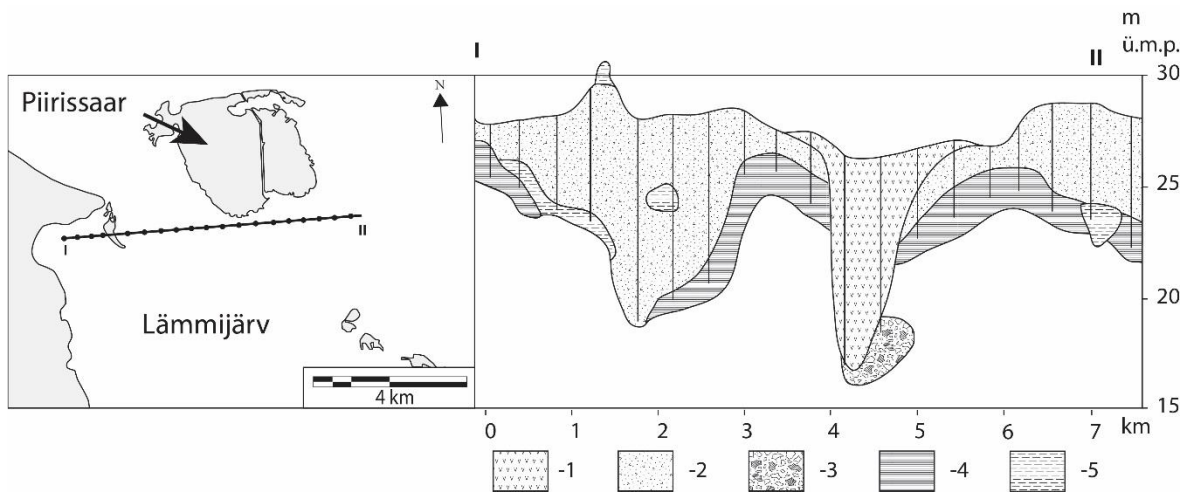
**Joonis 4.** Peipsi (a) ja Lämmijärve (b) põhjareljeef (Raukas, 2008b).

Peipsi järve põhi on valdavalt kaetud orgaanikarikka järvemudaga, mille mineraalse osa moodustab peamiselt aleuriit (joonis 5) (Raukas ja Rähni, 1981). Terasuurus suureneb rannalähedastel aladel, kus on enamasti tegemist aleuriitliiva või liivaka aleuriidiga. Paiguti puuduvad järves pehmed setted ning paljanduvad moreen, viirsavi või Devoni liivakivi. Suurjärve põhjasetted on suhteliselt ühekülgised, samal ajal kui pindalalt oluliselt väiksema Lämmijärve setted on märgatavalt vaheldusrikkamad. Peipsi järvest on kaevandatud ehitusliiva, kuid see on enamjaolt nii peeneteraline, et vajab enne sihtotstarbelist kasutamist fraktsioneerimist ja rikastamist. Suurimad ehitusliiva maardlad asuvad Kodavere ja Piirissaare ümbruses, Meerapalu ja Podborovje madalal, Sigovetsi neeme ja Salu saare lähedal, Talabski saarte piirkonnas ning Velikaja deltaalal (Raukas ja Vaher, 2008). Lisaks liivadele on Peipsi järves, eeskätt Väraska lahes, suured ravimuda varud. Kogu lahe prognoosvarud on 44,5 milj. m<sup>3</sup>. Samuti esineb ravimuda näiteks Raskopeli lahes ja Lämmijärve põhjas Meeksioja ja Salusaare vahel (Raukas ja Rähni, 1981).



**Joonis 5.** Peipsi põhjasetted (Raukas ja Rähni, 1981): 1 – moreen, 2 – viirsavi, 3 – turvas; 4 – liiv; 5 – aleuriidikas liiv; 6 – liivakas aleuriit, 7 – kergelt savikas aleuriit; 8 – liivakas-savikas aleuriit; 9 – savikas aleuriit. Terasuurus on antud pärast orgaanilise aine eemaldamist. Viimase hulk setteis ulatub Peipsi põhjaosas 40, Lämmijärves 83 ja Pihkva järves 35%-ni.

Käesolevas töös suurema tähelepanu all olevas Lämmijärves tehtud uuringud näitasid, et setete paksus suureneb järve keskosa suunas ning ulatub kohati üle 10 m. Järve keskosas on pindmiste setete hulgas enamlevinud peliitaleuriidid ja laiguti järvemuda, kaldalähedases vööndis on levinud aleuriitsed või aleuriidikad liivad ja kohati peeneteraliseid liivad (Kimmel, 1994). Piirissaarest vahetult lõunas Lämmijärve põhjas on puurimistega (Valt, 1976) kirjeldatud ümbritsevast selgelt eristuvat negatiivset, veepinnast kuni 13,2 m alla poole ulatuvat järvemudaga täidetud ligi 300 m laiust orulaadset struktuuri (joonis 6). Taolist orundit on kirjeldatud ka Lämmijärve lõunaosas Võhandu suudme juures (Kimmel, 1994). Viimane võib suure tõenäosusega olla seotud eelpool mainitud Ürg-Velikaja jõe oruga Väike-Peipsi perioodist, mil erosioonibaasiks olev Peipsi tase oli tunduvalt madalamal kui praegu (Rosentau, 2006). Lisaks mattunud orundile viitavad madalamale veetasemele ka Piirissaare ümbruses ja Lämmijärve põhjasetetes vahemikus 21 – 27 m ü.m.p. (Valt, 1976) levivad turbakihid. Viimaseid on aga kirjeldatud vaid üksikutes puuraukudes ja erineval sügavusel, mistõttu ei ole suure tõenäosusega tegemist ühtse turbakihiga, vaid pigem lainetuse poolt ümber paigutatud mätaste või pangastega, mis on mattunud liivaste setete alla. Täpsemate järelduste tegemiseks oleks vajalikud vanusemäärangud erinevatel sügavustel lasuvatest turvastest.



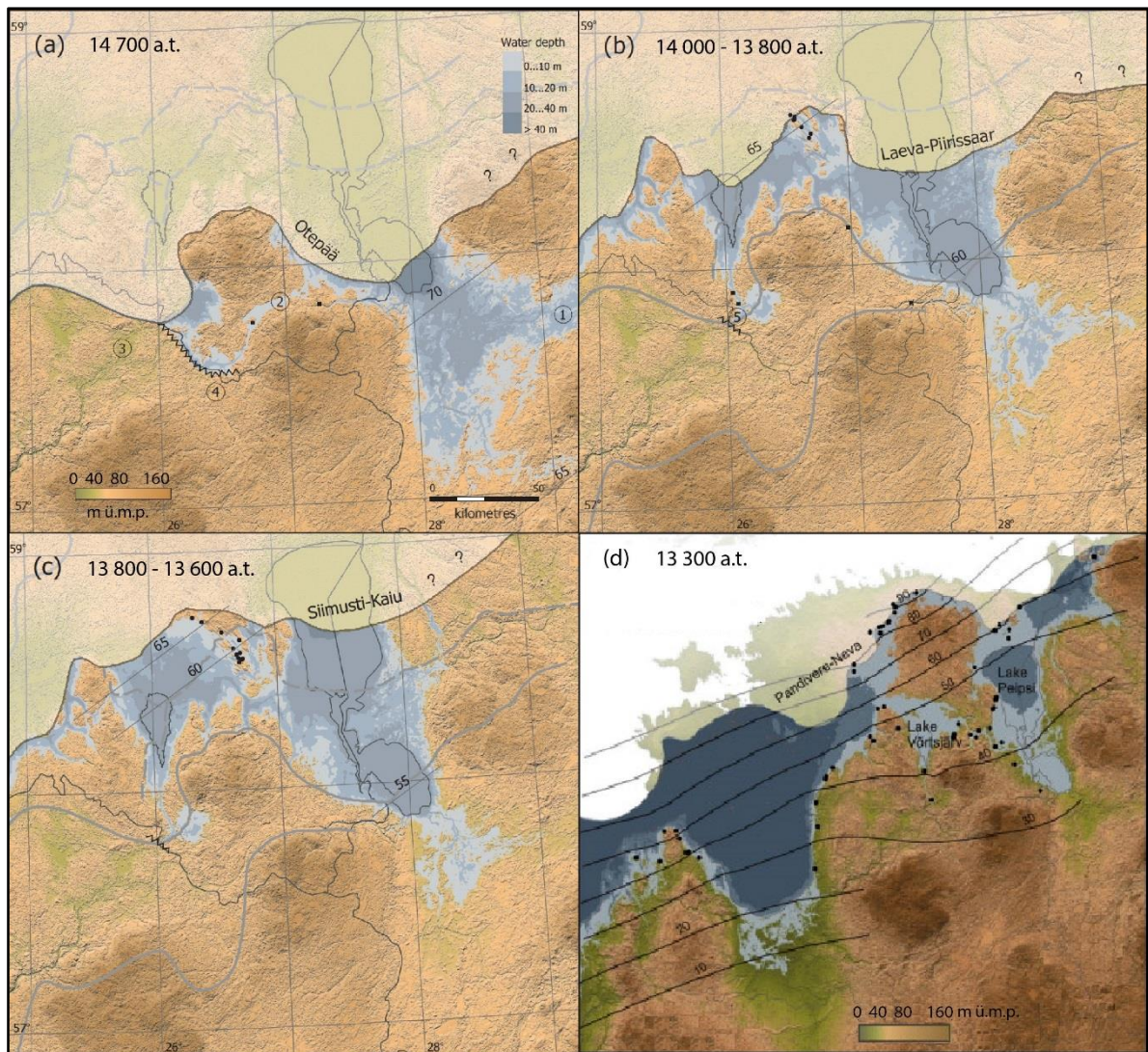
**Joonis 6.** Lääne-ida sihiline geoloogiline profiil Piirissaarest lõunas, mis näitab kuni 13,2 m (16,8 m ü.m.p.) sügavusega Holotseense järvemudaga täitunud oru olemasolu, mille kulgemine profiiliga külgneval alal ei ole selge. Koostatud Valt (1976) andmetel (Hang & Miidel, 2008). 1 - järvemuda, 2 – liiv, 3 – moreen, 4 – sav, 5 - turvas

### 1.1.3 Mandrijää taandumine ja Peipsi järv liustikuvabal perioodil

Kaasaegse Peipsi järve areng algas u. 14700 a.t. viimase, Weichseli jääaja lõpul, mil liustikuserv taandus Haanja kõrgustikult Otepää kõrgustikule ja tänapäevase Pihkva järve lõunaosas algas nn Peipsi jääjärve areng (joonis 7). Peipsi jääpaisjärv oli Ida-Euroopa lausmaal ühte jääpaisjärvede süsteemi osaks, olles ühenduses ida suunas Loode-Venemaal laiunud Privaldai jääjärvega ja lääne suunas Balti jääpaisjärvega. Vene uurija Kvasovi (1979) arvamuse kohaselt valgus jääjärvede süsteemi idapoolsete Privaldai ja Peipsi järvede vesi läände madalama veetasemega Balti jääpaisjärve poole. Hilisemad uuringud (Lepland, 1991; Hang, 1995) on toetanud väinalise ühenduse eksisteerimist, mis katkes siis, kui veetase alanes 75 m ü.m.p. ning Võru orundi idapoolses osas, Tabina kohal, kerkis mineraalpinnas veelahkmena veetasemest kõrgemale.

Ligikaudu 14500 a.t. taandus jääserv Otepää–Kulje–Talabski saarte joonelt ja Peipsi jääjärve akvatoorium laienes põhja suunas. Kuna järve lõunaosa rannajoon oli alaneva veetaseme tõttu regressiivse iseloomuga, sulgus ka idasuunaline väinaline ühendus ja asendus sissevooluga Velikaja oru kaudu. Erosioonibaasi alanemise tõttu hakkasid kujunema nüüdisaegse Piusa, Võhandu ja Ahja jõe orgude ülemjooksuosad.





**Joonis 7.** Mandrijää taandumine ja jääpaisjärve levik Peipsi nõos Otepää (a), Laeva-Piirissaare (b), Siimusti-Kaiu (c) ja Pandivere-Neeva (d) joonel (Rosentau et al. 2004; Saarse et al. 2007).

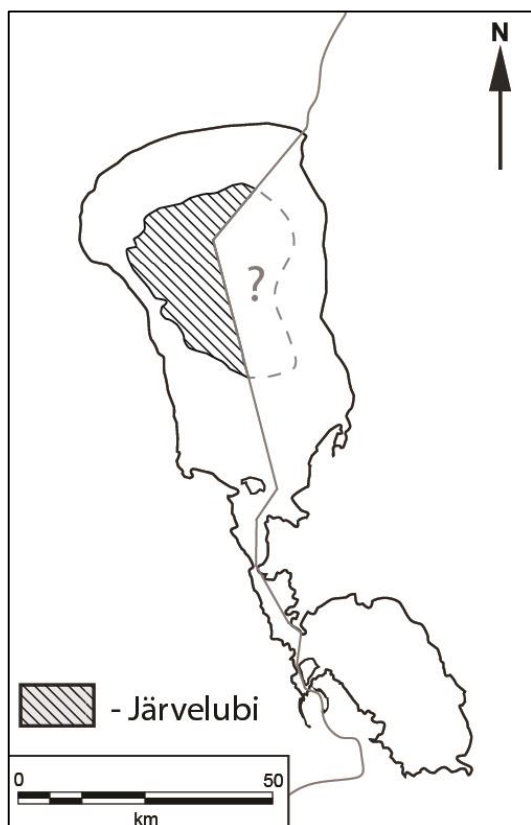
Umbes 14000-13600 a.t. jätkus liustikuserva taandumine põhja suunas lühiajaliste seisakutega Laeva-Piirissaare-Knjäzja Gora joonel ja seejärel Siimusti-Kaiu-Oudova joonel (joonis 7). Samal ajal kujunes Emajõe orundi ja Saadjärve voorestiku kohal ühendus Peipsi ja Võrtsjärve jääpaisjärvede vahel (Rosentau et al. 2004).

Kui liustikuserv peatus ligikaudu 13300 a.t. järvenõo põhjaosas Iisaku-Vaivara joonel, täitis Peipsi jääpaisjärv kogu tänapäevase Peipsi järve nõo, olles ida suunas ühenduses Loode-Venemaal paiknenud Luuga ja Neeva jääpaisjärvedega ning lääne suunas üle Emajõe orundi Võrtsjärve ning Balti jääpaisjärvega (Rosentau jt. 2009) (joonis 7).

Peipsi jääpaisjärve veetase alanes oluliselt pärast liustikuserva taandumist Soome lahe nõkku, mille tulemusena katkes ühendus Peipsi jääjärve ja Balti jääpaisjärve vahel. Peipsi isoleerumise aja suhtes puudub ühtne seisukoht. On arvatud, et see võis toimuda nii Holotseeni alguses (Orviku, 1960; Raukas ja Rähni, 1969) kui ka mõnevõrra varem Balti jääjärve faaside B<sub>I</sub> ja B<sub>III</sub> vahel (Hang ja Miidel, 1999b). On teada, et pärast isoleerumist jätkas Peipsi järve veetase langustrendi, kuni järve akvatoorium kahanes vaid kaasaegse Suurjärve nõo põhjaossa. Seda perioodi Peipsi arengus tuntakse Väike-Peipsi arenguetapina (Orviku, 1960).

Väike-Peipsi ulatuse ja veetaseme kohta on erinevaid arvamusi. Mõnede uurijate arvamus kohaselt oli veetaseme erinevus tänapäevast vaid 3-5 m ehk u. 27-25 m ü.m.p. (Jaanits ja Moora, 1999). Peipsi põhjasetete uuringute käigus (Hang et al. 2008) on aga selgunud, et veetase Väike-Peipsis jätkas alanemistrendi ka Holotseeni alguses kuni saavutas ligikaudu 9100 a.t. madalaima taseme. Sellele viitab kuni 0,8 m paksune tugevasti kokku pressitud 1,5-2 m sügavusel liivaste setete alla mattunud ja rohkelt taimejäänuseid sisaldav järvemuda. Dateeringud näitavad, et see kiht kujunes 9600-9100 aastat tagasi (Hang et al. 2008) ning õietolmu- ja diatomeeanalüüsid viitavad selle kujunemisele vaid paari meetri sügavuses või väga kõikuva veetasemega veekogu kaldalähedases piirkonnas. Mudakiht paikneb tänapäevasest veetasemest keskmiselt 8,35-9,10 m allpool, mistõttu võis järve veetase mudakihi settimise lõpus olla ligikaudu 22 m ü.m.p. (Hang et al. 2008). Suurem puutükide sisaldus ja diatomeede puudumine mudakihi ülemises umbes 7 cm paksuses kihis viitab piirkonna võimalikule kerkimisele üle järve veetaseme.

Lisaks kirjeldatud mudakihile viitab Väike-Peipsi etapile ka Suurjärve põhjasetetes lasuv järvelubja kiht, mille paksus ulatub mõnest sentimeetrist kuni kahe meetrini (Hang et al. 2001) (joonis 8). Järvelubja kujunemist seostatakse madala põhjaveetotelise seisuveekoguga (Punning jt. 2005), mille sügavus pidi olema arvestades analüüsitud ostrakoodide kooslust lubja settimise algul vähem kui 4 m (Niinemets, 1999). Sarnaselt eelnevatele viitab madalale veetasemele Väike-Peipsi etapil ka turba kujunemise algus Emajõe suursoos (Sarv ja Ilves, 1975) ja Väraska lahes (Moora jt. 2005).



**Joonis 8.** Järvelubja levik Peipsi järves puurimiste ja seismomeetriliste uuringute alusel (Hang et al. 2001). Riigipiirist välja jäävast alast toodud autoripoolne hüpotees.

Väike-Peipsi etapi lõpuks loetakse järve veetaseme tõusu algust. Sellega kaasnevast järve toitumise muutusest annab aimu järvelubja kujunemise asendumine järvemuda settimisega. Lisaks kajastub Peipsisse suubuvate jõgede erosioonibaasi tõus soosetete ja alluviumi kuhjumises jõgede suudmetes ja nende oluline levik jõeorgudes ülesvoolu (Hang ja Miidel, 2008a). Siinkohal omab määravat rolli glatsioisostaatiline maakerge, mille tulemusena on Peipsi põhjaosa kuni tänaseni kerkinud kiiremini kui lõunaosa. See on oluliselt mõjutanud järve sisse- ja väljavoolutingimusi ja tinginud järve vee aeglase valgumise lõuna suunas (Hang ja Miidel, 2008b).

## 2. Materjal ja metoodika

### 2.1 Georadari kasutamine järve põhjasetete uurimisel

Georadar ehk maaradar on tänu oma kõrgele lahutusvõimele, olematule keskkonnamõjule ja kõrgele mõõtekiirusele hea geofüüsikaline vahend maapinnalähedase pinnase iseloomustamiseks, mistõttu on kasutusvaldkondade loetelu lai, hõlmates endas näiteks maavarade ja põhjavee otsinguid ning arheoloogilisi ja geoloogilisi uuringuid. Georadari varustus on kerge ja lihtsasti kaasaskantav, koosnedes keskseadme külge ühendatud saatja- ja vastuvõtuantennist ja distantsiloendurist. Mõõtmistulemusi on võimalik reaalajas jälgida näiteks sülearvutist. Mõõtmistel saadud andmestik põhineb kindla vahemaa tagant välja saadetud elektromagnetlainetel, mis peegelduvad pinnases esinevatelt erinevate dielektriliste omadustega kihtide pindadelt, jõudes viimaks vastuvõtja-antenni, mille järel registreeritakse lainel pinnase läbimiseks kulunud aeg. Aeg, mis signaalil peegelduspinnani ja vastuvõtja-antenni jõudmiseks kulub, sõltub elektromagnetlainete levikukiirusest pinnases. Tagasi jõudnud signaali tugevuse määrab aga peegelduspinnal olev dielektriliste läbitavuste erinevus (Neal, 2004). Lisaks sõltub suhteline dielektriline läbitavus suuresti nii kihtide erinevast kompaktsiooniastmest (poorsusest) kui ka pinnase veega küllastusest. Signaali tugevalt peegeldavateks pindadeks võivad olla näiteks maapõues lasuvate liiva ja savi või aluspõhja ja pinnakatte omavaheline piir.

Georadari maksimaalne uuringusügavus sõltub suuresti pinnase elektrijuhtivusest ja signaali sagedusest (tabel 1). Näiteks võivad madala juhtivusega materjalides nagu kuivad liivad ja kruusad, ulatuda uuringusügavused kümnete meetriteni. Samal ajal võib hea juhtivusega materjalide puhul nagu savid, kildad ja soolane vesi, piirduda uuringusügavus mõne meetriga (Isaac ja MacCulloch, 2004). Lisaks võimaldab uuringusügavust suurendada kasutatava sageduse vähendamine, millega kaasneb aga ka radargrammi lahutusvõime vähenemine.

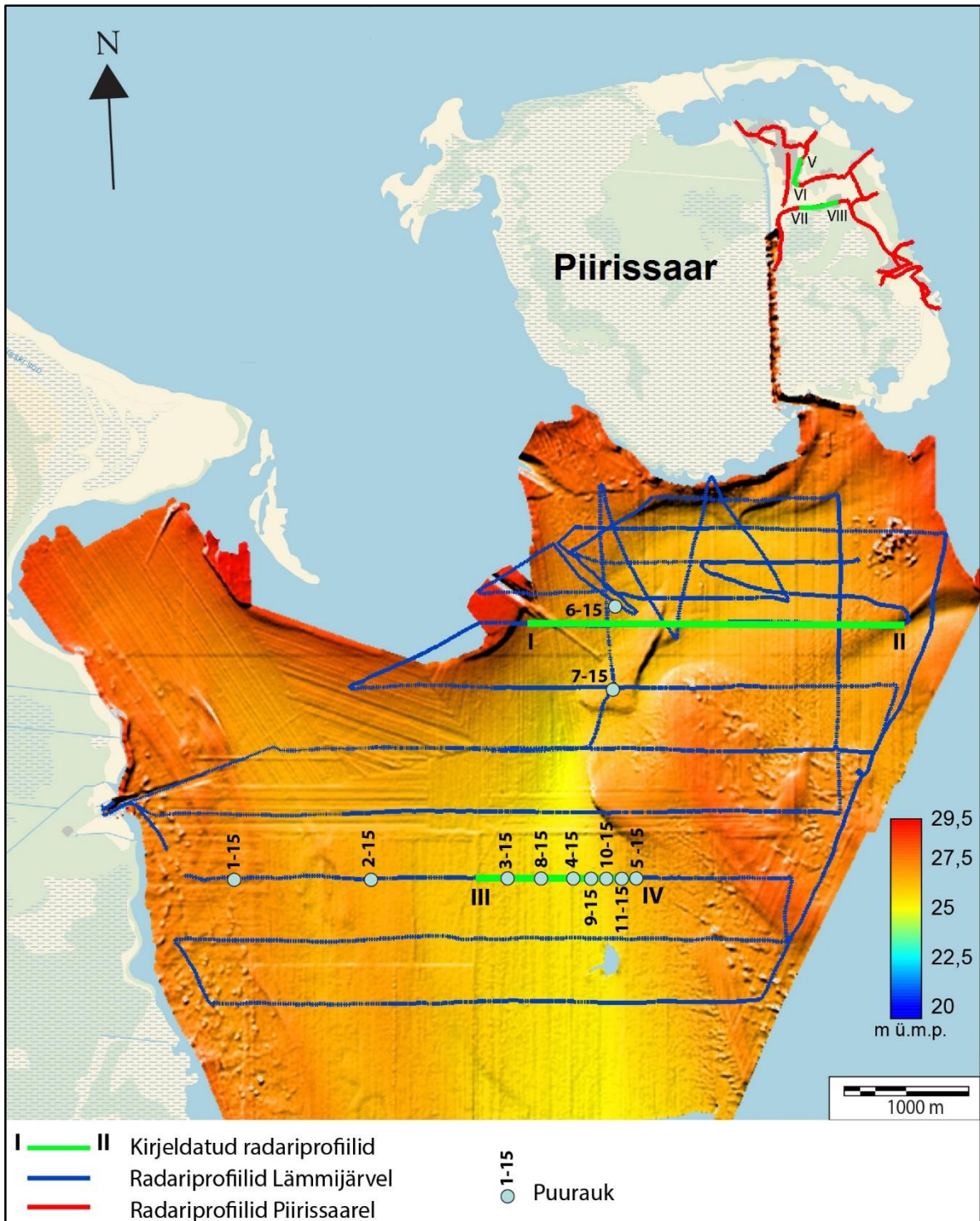


**Tabel 1.** Tüüpilisemate materjalide suhtelised dielektrilised läbitavused, elektrijuhtivused, laine levikukiirused ja radargrammi lahusvõime sagedusel 100 MHz (Davis ja Annan, 1989).

Materjal	Suhteline dielektriline läbitavus	Elektrijuhtivus (mS m <sup>-1</sup> )	Laine levikukiirus (m ns <sup>-1</sup> )	Lahutusvõime (sagedusel 100 MHz) (m)
Õhk	1	0	0.3	0.75
Puhas jää	3-4	0.01	0.16	0.4
Dest. Vesi	80	0.01	0.033	0.08
Mage vesi	80	0.5	0.033	0.08
Merevesi	80	30 000	0.01	0.03
Veega küllastunud liiv	20-30	0.1-1.0	0.06	0.15
Veega küllastunud savi	5-40	500	0.09	0.25
Graniit	4-6	0.01-1.0	0.13	0.33
kilt	5-15	1-100	0.09	0.25

Antud töös oli georadari kasutamisel eesmärgiks saada enne puurimist eelinfot uuritava orundi asukoha ja setete tüübi kohta. Käesoleva töö raames kasutati Läti päritolu georadarit Zond 12-e.

Esimesed välitööd georadariga viidi läbi 2014. aasta sügisel Piirissaarel. Välitöödel kasutati 300 MHz sagedusega antenni, millega profileeriti ligi 10 km ulatuses. Profiile tehti nii piki- kui ka ristisuunas üle saare kirdeosas paikneva loode-kagu sihiliselt asetseva positiivse pinnavormi (joonis 9).



**Joonis 9.** Georadariga mõõdistatud profiilide ja puurimiskohtade asukohad ning näitena joonistel 12 ja 14 esitatud radariprofiilide (I-II, III-IV, V-VI ja VII-VIII) paiknemine. Lämmijärve põhjareljeef tugineb Veeteede Ameti andmetel. Taustaks on Maa-ameti põhikaart.

Mõõdistamised Lämmijärvel toimusid 2015. aasta veebruaris järve jäält (joonis 10). Kasutati fikseeritud vahega 100 MHz sagedusega antenni, mida veeti mootorsõiduki järel ühtlase kiirusega kuni 10 km/h. Antennivalikul lähtuti kompromissist saadava info lahtusvõime ja uuringusügavuse vahel. Piirissaarel kasutatud 300 MHz sagedusega antenni uuringusügavus oleks võinud jääda segavate tegurite (jää, hõljum, gaasid põhjasetteis) tõttu ebapiisavaks. Seevastu ei oleks oluliselt madalama sagedusega antenni puhul suure tõenäosusega põhjasetted üksteisest eristatavad olnud.

Profiilide planeerimisel arvestati nii Valt (1976) poolt kirjeldatud mattunud oru paiknemist (joonis 6) kui ka Veeteede Ameti poolt mõõdistatud põhjareljeefi iseärasusi (joonis 9). Kokku tehti Lämmijärvel radariprofiile ligi 70 km ulatuses (joonis 9). Radariprofiilide mõõdistamisel toimus navigeerimine käsi GPS-iga, kuid profiilide positsioneerimine käis läbi georadariga ühendatud GPS seadme. Maapinna absoluutkõrgused Piirissaarel saadi LIDAR-kõrgusmudelilt ja järve puhul loeti jääpinnaks 30 m ü.m.p.



**Joonis 10.** Autor Lämmijärve jäält, kus veeti mootorsõiduki järel liikumiskiirusega kuni 10 km/h 100 MHz antenni. Kokku tehti profiile 70 km ja töös osales 2 inimest.

Georadariga genereeriti toorandmed, mis vajasisid töötlemist enne tulemuste interpreteerimist. Käesolevas töös kasutati toorandmete töötlemiseks tarkvara Prism2. Maismaa puhul viidi sisse LIDAR-andmestikul põhinev reljeefiparand, järve korral määrati sügavuste täpsemaks hindamiseks jää pind nullpunktiks. Lisaks manipuleeriti genereeritud profiile erinevate filtrite ja võimendusega, et leida ja kirjeldada jälgitavaid kihipindu. Kuna radar käsitleb kogu mõõdetavat maapõue homogeenselt, oli vajalik pärast kihtide eristamist neile omased suhtelise dielektrilise läbitavuse väärtused määrata (tabel 1), mille tulemusena said litoloogilised üksused, sealhulgas vesi, endale tõepärased sügavusandmed. Veekihi puhul kasutati suhtelist dielektrilist läbitavust 81 ja veeküllastunud setete puhul 25.

## 2.2 Puurimised ja setete kirjeldamine

Kuna radariprofiilidelt peegeldub vaid info põhjasetetes oleva materjali signaali juhtivusomadustest, viidi põhjasetete detailsemaks kirjeldamiseks ja radariprofiilide interpreteerimiseks läbi puurimistööd. Sealjuures aitasid varem tehtud radariprofiilid leida huvipakkuvamaid ja informatiivsemaid paiku puurimiseks. Lisaks võimaldas see välistada puurimisi kohtades, kus tänapäevane settekanne on olulisel hulgal liiva kuhjanud. Radariprofiilide detailsemaks kirjeldamiseks teostati kõik puurimised profiilidel (joonis 9).

2015. aasta veebruaris puuriti kahe välitööpäeva jooksul käsitsi 11 puurauku (joonis 11), millest üheksa paiknesid ühel ida-läänesihilisel radariprofiilil, üks viimastest põhjapool oletatava orundi kohal ning üks põhjareljeefist selgelt eristuva positiivsel vormil (joonis 9, lisa 1–2). Puurimiseks kasutati 1 m pikkuse ning 4 ja 7 cm läbimõõduga nn. Vene tüüpi soopuure. Puuritavaid setteid kirjeldati kohapeal ning huvipakkuvad puursüdamikud pakiti kilesse ja plastrennidesse ning võeti kaasa dateerimis- ja biostratigraafiliste analüüside tegemiseks. Puuraukude asukohad määrati käsi GPS-iga.



**Joonis 11.** Puurimine Lämmijärve jääl. Kasutati 1 m pikkust ja raudvarrastega opereeritavat käsipuuri.

Käesolevas töös saadud puurimis- ja radariandmetele kasutati lisaks ka Valt (1976) koostatud aruannet liiva ja kruusa otsimistööde tulemustest Peipsi järve piirkonnas. Piirissaarest lääne poole jääva ala kohta saadi lisainfot Eesti Värava süvendamistööde käigus läbi viidud keskkonnamõtjude hindamise raames 2006. aastal tehtud puurimiste tulemustest. Kokku moodustus uuringuala põhjasetete kohta 279-st puuraugust koosnev andmebaas.

## 2.3 Dateeringud

Mattunud turbakihist võeti dateerimiseks kolm proovi sügavusvahemikest 6,92–6,97 m (PA 11–15), 6,34–6,39 m (PA 11–15) ja 7–7,05 m (PA 8–15) veepinnast. Proovid valmistati ette, sünteesiti ja dateeriti autori poolt Tartu Ülikooli Geoloogia osakonna radiosüsiniku laboris. Kaks proovi kujutasid endast rohkelt taimejäänuseid sisaldavat keskmiselt lagunenenud turvast ning üks mattunud puutükki (joonis 13).

Proovide eeltöötlemisel kasutati AAA (*acid-alkali-acid*) meetodit, mille käigus eraldati orgaanika vanust esindavatele humiainainetele lisaks proovis leiduvad humifitseerumise käigus moodustunud vanuse määramisel võimalikku viga tekitavad humiin- ja fulvohapped ning karbonaadid. Selleks proov homogeniseeriti ning töödeldi 4% HCl lahusega umbes 80 °C juures 20 minutit, millega eemaldati fulvohapped ja karbonaadid. Proovi pesti filtril kuni saavutati neutraalne reaktsioon. Seejärel läbiti sama protseduur 2% NaOH lahusega, et kõrvaldada dateeritavast materjalist leelises lahustuvad humiidhapped. Eeltöötlemine lõppes proovi happes neutraliseerimisega (Cook jt. 1998).

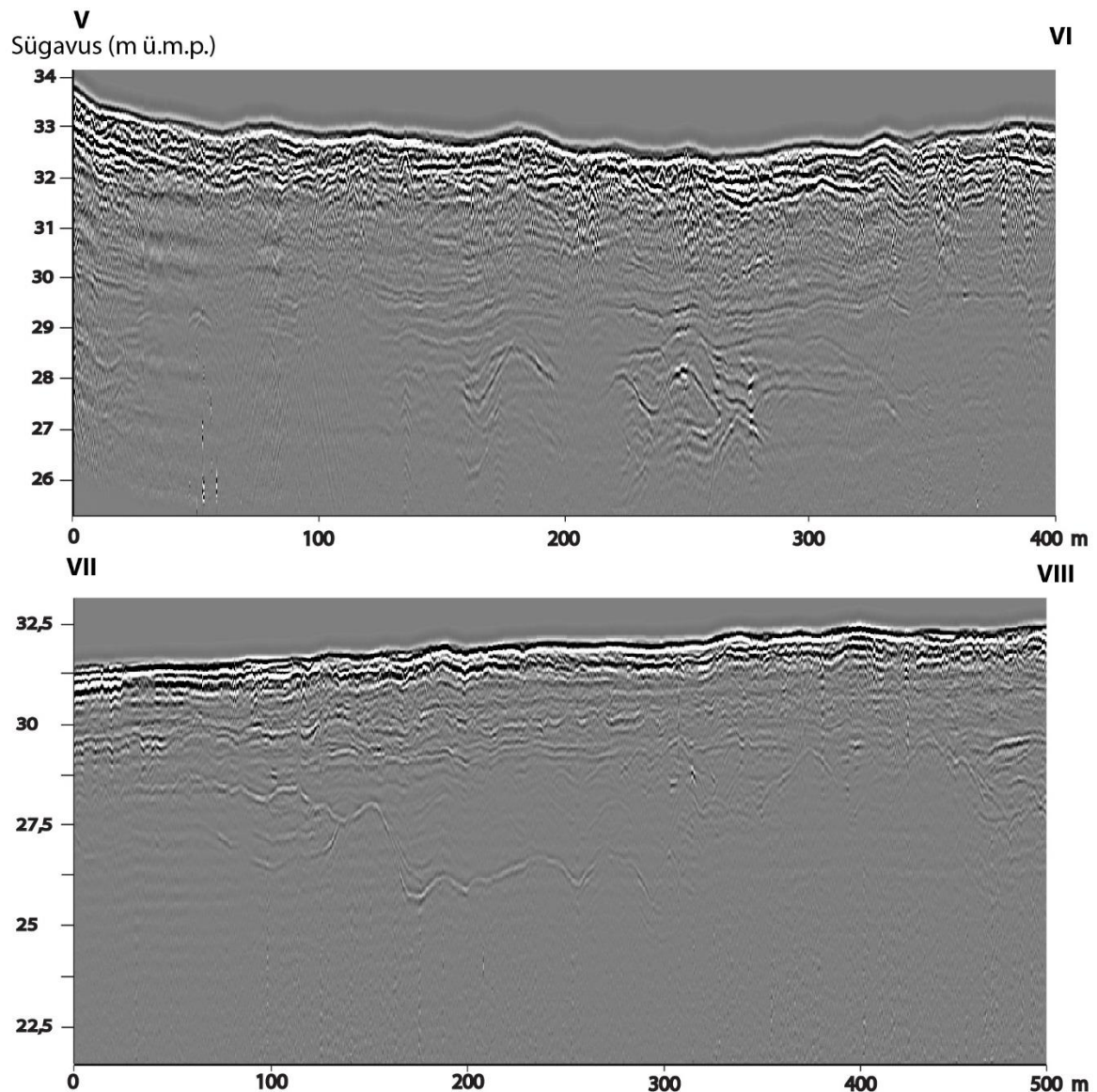
Järgnes proovi kuivatamine (105 °C) ja söestamine õhu juurdepääsuta metalltiiglis. Edasi toimusid kõik protsessid vaakumliinil. Söestunud turvas seoti 750 °C juures liitiumkarbiidi ( $\text{Li}_2\text{C}_2$ ) koosseisu. Seejärel hüdrolüüsiti liitiumkarbiid veega reageerides atsetüleeniks ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), mis juhiti puhastuseesmärgil läbi kroomoksiidi ( $\text{CrO}_3$ ) ja väävelhappe ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 10% lahuse ning külmutati vedelas lämmastikus. Atsetüleenist benseeni sünteesimiseks kasutati kroomoksiidi ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) baasil katalüsaatorit. Sünteesitud benseenile lisati vee ja teiste saastavate ainete sidumiseks kontsentreeritud väävelhapet. Seejärel eraldati sublimeerimise teel hapest puhas benseen, millest mõõdeti spetsiaalsesse küvette ettenähtud lahjendus ning lisati vajalik hulk tolüeenis lahustatud stsintsillaatorit ja spektrinihutajat (PPO ja POPOP). Proovide aktiivsused mõõdeti madalafoonilise stsintsillaatorloenduriga TRI-CARB<sup>®</sup> (Muraki ja Kocharov, 1998).



### 3. Tulemused

#### 3.1 Radariuuringud Piirissaare idaosas

Piirissaarel tehtud radariprofiilid (10 km) haarasid peamiselt saare idaosas paiknevat, kuni 35 m ü.m.p. ulatuvat kagu-loode suunalist seljandikku, kuid ulatusid ka sellest lääne suunas asuva Piirissaare kanalini (joonis 9). Madala veeseisu tõttu oli ristiprofiile võimalik teha ka kuni paarsada meetrit seljandikust ida ja kirde suunas, tavaliselt veega kaetud rannanõlval.



**Joonis 12.** Radariprofiilidelt (V-VI, VII-VIII) (joonis 9) kajastuv Piirissaare pinnakatte siseehitus näitab, et liivakad setted ulatuvad 6-7 m sügavuseni (25–26 m ü.m.p.).

Piirissaarel tehtud radariprofiilidel (joonis 12) oli saare keskosas võimalik peegelduspindasid tuvastada 6–7 m (25–26 m ü.m.p.) sügavuseni, kuid enamasti jäid uuringusügavused väiksemaks. Setetest leitud peegelduspinnad olid katkendlikud ja kiiresti varieeruva sügavusega, kõikudes kohati paari meetri ulatuses.

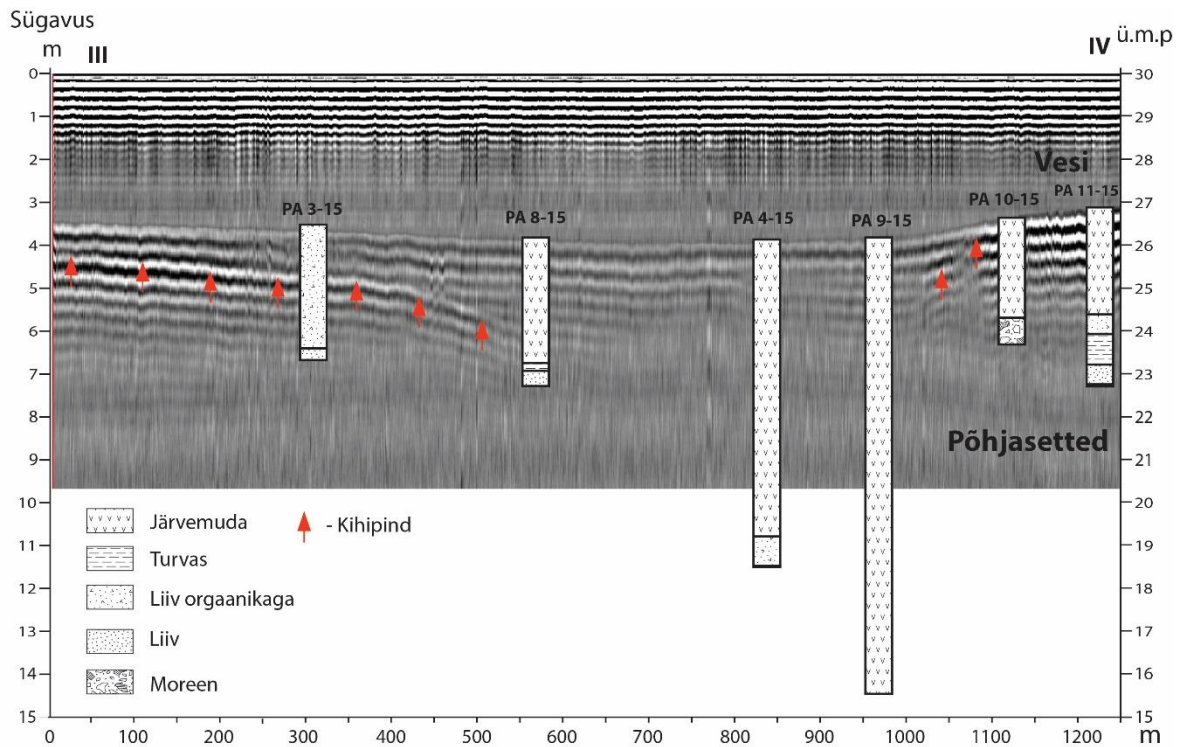
### 3.2 Lämmijärve põhjareljeef ja setted

Lämmijärve põhjareljeef on muutlik (joonis 4, joonis 9). Veēsügavused suurenevad järve keskosa suunas, olles Mehikoorma – Pnevo vahelisel alal maksimaalselt 15,3 m (Raukas, 2008b), kuid järve põhjaosas vaid 5 m. Lisaks kerkivad Laaksaare joonel ja sellest põhja pool esile huvitavad järve põhjast kuni 4 m kõrgusele ulatuvad vormid. Radariprofiilide asukohtade valikul lähtuti hüpoteesist, et Lämmijärve lõunaosale sarnase mattunud vagumuse olemasolul kulgeb see põhja-lõunasihiliselt, millest tulenevalt planeeriti järvest rohkem risti- kui pikiprofiile. Lisaks püüti koguda informatsiooni kirjeldatud positiivsete pinnavormide kohta, et seletada nende koostist ja päritolu ning võimalikku seost järve arenguga. Profiilide planeerimisel olid peamisteks piiravateks teguriteks Uhtina neeme ja Piirissaarest kagus oleva Saare madala piirkonnas olnud halvad jääolud.

Puurimistulemusi radariprofiiliga integreerides (joonis 14) selgus, et mitmel pool katavad järve põhja orgaanikarikkad, taimejäänuseid ja kohati ka karbidetriiti sisaldavad libedad beežikaspruunid kuni hallikasmustad liivad. Eriti tüsedalt levivad need settekuhjealal Piirissaarest läänes Eesti Väravate ümbruses. Mainitud liivade all lasuvad valdavalt massiivsed orgaanikasisalduseta punakaspruunid, sinakashallid ja helebeežid aleuriidid ja peenliivad ning savid ja punakaspruun moreen. Lämmijärve keskosas uuritud vagumuses ja selle ümbruses levib järvemuda (joonis 14). Vagumuse põhja sügavust puurimise käigus kirjeldada ei õnnestunud, küll aga võib väita, et orund ulatub sügavamale kui 15,5 m ü.m.p. Mõnel pool esineb vagumuse servaaladel järvemuda all keskmiselt lagunenuid pruunikasmusta turvast (joonis 13).



**Joonis 13.** Puuraugus 8-11 (22,5–23,5 m ü.m.p., sügavam ots paremal) pruuni orgaanikaga peenliiva all sügavusvahemikus 23,03–22,85 m ü.m.p. beežil peenliival lasuv turvas, milles leiduvast puutükist tehti ka vanusemäärang (Ta-3068).



**Joonis 14.** Lääne- ida sihiline radariprofiil (joonis 9) koos puurandmestikuga Lämmijärve põhjasetetest. Joonega kujutatud selgesti eristatav peegelduspindade sukeldumine, mis viitab mattunud orule.

Kuna käesoleva töö üheks eesmärgiks oli täiendavate geoloogiliste andmete kogumine Väike-Peipsi etapi veetaseme kohta, siis pakkus erilist huvi setetest leitud turvas. Puurimiste käigus leiti turvast nii kirjeldatud orundi idapervel, vahemikus 23–24,3 m ü.m.p. (PA 5–15, 8–15 ja 11–15) kui ka lääne pool (PA 1–15) vahemikus 27,5–27,1 m ü.m.p. (joonis 9, lisa 1–2).

TÜ geoloogiaosakonna teaduri Kersti Kihno andmeil on kirjeldatud turba näol tegu keskmiselt lagunenenud madalsooturbaga, mis sisaldab lepa (*Alnus*), kase (*Betula alba*), paju (*Salix*), vesihalja hanemaltsa (*Chenopodium glaucum*), hariliku kirburohu (*Polygonum persicaria*), kõrvenõgese (*Urtica dioica*), hariliku konnarohu (*Alisma plantago-aquatica*), hariliku kuuskheina (*Hippuris vulgaris*) ja hariliku pilliroo (*Phragmites communis*) jäänuseid.



### 3.3 Mattunud turba vanus

Tartu Ülikooli radiosüsiniku laboris dateeriti kolm proovi (tabel 2). Saadud vanused olid sügavusskaalal loogilises järjekorras ja jäid vahemikku 9220–8250 <sup>14</sup>C aastat (kalibreeritud vanused 10399–9637 a BP). Kalibreerimiseks kasutati internetipõhist rakendust OxCal ja kalibreerimiskõverat IntCal13. Tulemused esitati 1-sigma täpsusega.

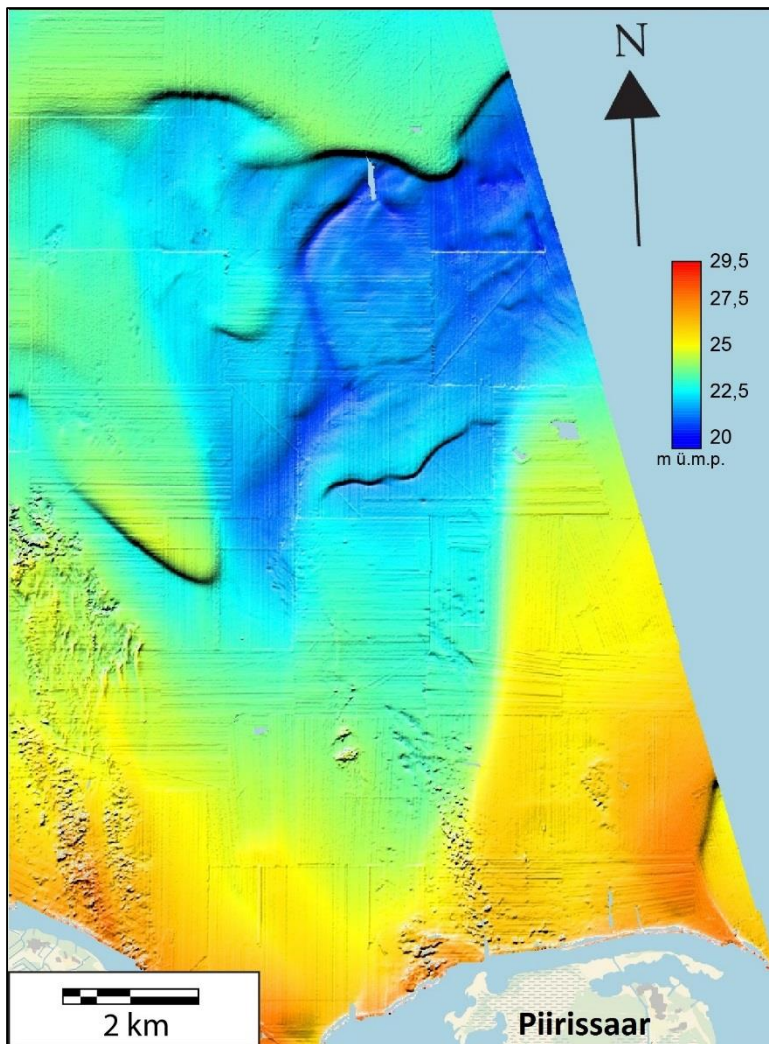
**Tabel 2.** <sup>14</sup>C proovid kalibreeritud vanustega. Sügavus esitatud m veepinnast (30 m ü.m.p.).

Proovi nr.	Sügavus m	Dateeritud materjal	<sup>14</sup> C vanus	Viga	Kalibreeritud <sup>14</sup> C vanusevahemik (BP, 1-σ)	Kalibreeritud <sup>14</sup> C mediaan (BP, 1-σ)
Ta-3069	6,34-6,39	Turvas	8250	±60	9417-9032	9228
Ta-3070	6,92-6,97	Liivane turvas	8630	±100	10115-9448	9637
Ta-3068	7,00-7,05	Puit	9220	±90	10650-10225	10399

## 4. Arutelu

Käesoleva töö planeerimisel oli Peipsi järve ühe põnevama arenguperioodi – Väike-Peipsi etapi kohta uute geoloogiliste andmete kogumise kõrval teiseks huvipakkuvaks meetodiliseks küsimuseks maaradari kasutatavus Peipsi järvele sarnase suure veekogu põhjasetete uuringul. TÜ geoloogia osakonnas sarnane kogemus varasemast puudus ja teatavaid kahtlusi uuringu õnnestumisele heitsid vee suur sügavus ning jää paksuse ja omaduste võimalik mõju radarisignaalile. Esialgne plaan teostada uuringuid Piirissaarest põhja pool, kus on varasemast teada Väike-Peipsi etappi tõestavad mattunud orgaanilised setted, jäi teostamata osaliselt just seetõttu, et huvipakkavas piirkonnas ületas veesügavus 7 m, mida peeti liialt sügavaks. Peamiseks põhjuseks aga, miks maaradariga Piirissaarest põhja pool ei töötatud, oli ebapiisav jää paksus, mis mõjutas uuringuala valikut ka Piirissaarest läänes nn. Eesti Väravate alal. Sellest tulenevalt piirduti maaradari kasutamisega Piirissaarel ja sellest lõuna poole jääval Lämmijärve osal.

Tänuväärseks nii töö planeerimisel, tulemuste interpreteerimisel kui ka edasistel Peipsi uuringutel on hiljuti Veeteede Ameti poolt läbi viidud põhjareljeefi kaardistamise andmed (joonis 9), mille suur täpsus võimaldab põhjareljeefis näha struktuure, mida varem kirjeldatud ei ole. Näiteks küündivad uuringualal üldisest põhja tasemest kõrgemale selgelt piiritletavad jäänukvormid. Suurjärve põhjas on aga varjutatud reljeefimudelil võimalik spekuloida liivade settemehhanismide üle. Veel on märkimisväärne see, et Piirissaarest põhja poole jääval alal, kus varasemalt on kirjeldatud mattunud orgaanikat (Hang et al. 2008), võib põhjareljeefis näha hargjõe või deltale sarnast orgude võrku (joonis 15).



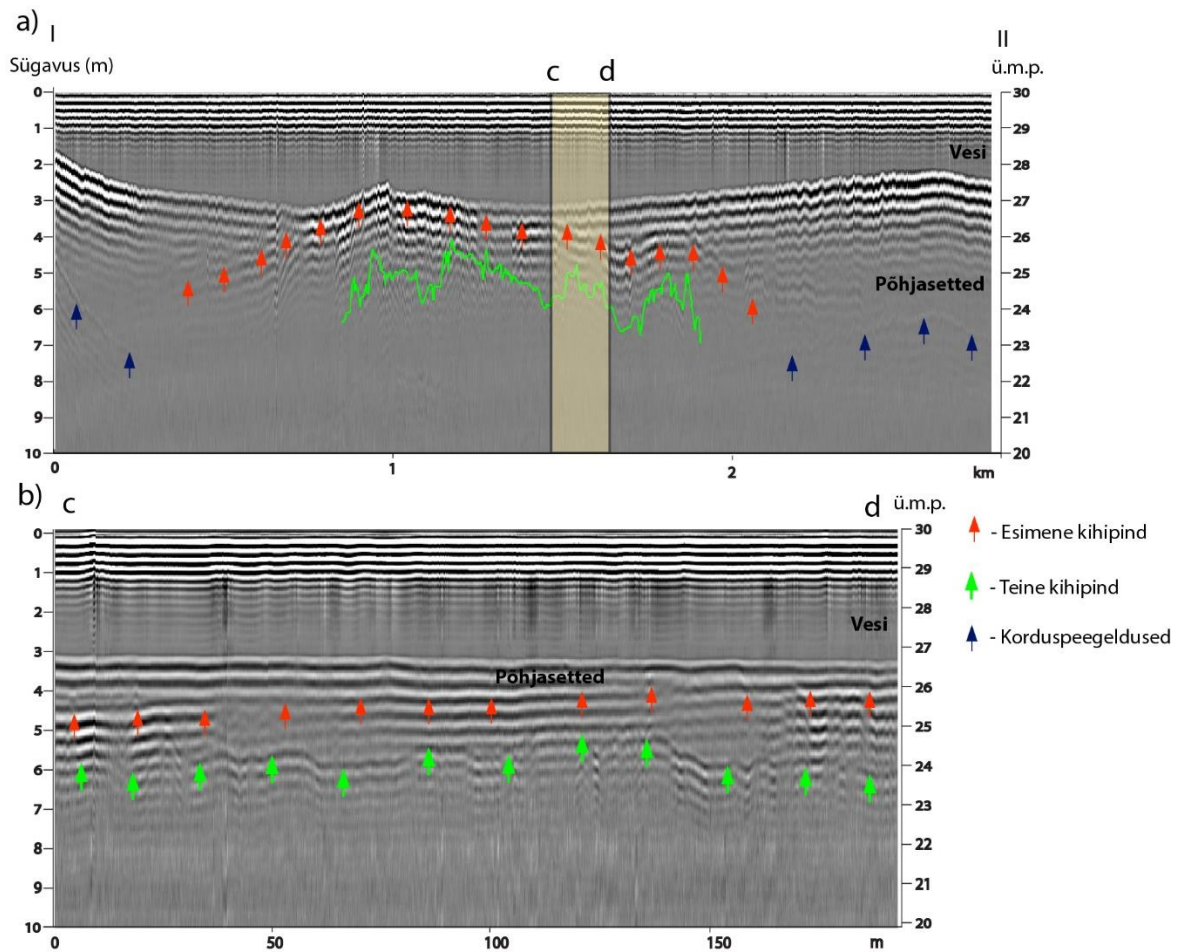
**Joonis 15.** Suurjärve põhjareljeefis kajastuvad hargjõe või deltale sarnanev struktuur Piirissaarest põhja suunas, (Veeteede Amet).

Piirissaarel tehtud välitööde eesmärgiks oli saada lisainformatsiooni saare pinnakatte geoloogia kohta. Maaradariga tehtud tööd piirdusid vaid saare kirdeosaga, kuna ülejäänud saar kujutab endast kõrgete tarnamätastega madalsood, kus radari kasutamine on takistatud (katseprofiilid näitasid signaali kiiret sumbumist). Profiilidel esineva mustris iseloomu alusel võib oletada kõikidel profiilidel liiva esinemist ja ülalmainitud seljandiku koosnemist ühtlasest liivast. Sarnaselt järve akvatooriumil tehtud uuringule sumbus ka saarel signaal suhteliselt kiiresti ulatudes maksimaalselt kõrgusele 25 m ü.m.p., kusjuures madalamal absoluutkõrgusel oli ka signaali ulatus väiksem (joonis 12) See võib olla seletatav poorivee koostise muutustega. Kõrgema reljeefiga liivpinnastega aladel ulatub sademetoiteline magevesi suurema sügavuseni võrreldes kaldalähedaste madalamate aladega, kus mõnevõrra soolasem järvevesi põhjustab signaali suhteliselt kiiremat sumbumist. Profiilidel kuni 7 m sügavuseni ulatuvad peegelduspinnad olid muutlikud, kuid ei viidanud liivast erinevate (savi, moreen) omadustega setete võimalikule esinemisele, kuna radarisignaal läbis ka

järgnevaid settekihte. Hoolimata sellest, et saarel puudub asjakohane puurandmestik, võib kogemustele tuginedes väita, et Piirissaarel tehtud radariprofiilidelt kajastuvad valdavalt rannikuvööndit iseloomustavad liivased setted. Saare geoloogilise ehituse detailsemaks kirjeldamiseks oleks vaja läbi viia puurimisi.

Lämmijärvel teostatud välitööde ala (joonis 9) jäi kohati esineva ebapiisava jää paksuse tõttu planeeritust väiksemaks. Mõõdistamisi ei olnud võimalik teha Piirissaarest läänes, Eesti Väravates ning Suurjärve lõunaosas. Seal, kus profileerimine oli võimalik, osutus suurimaks segavaks teguriks paiguti liiga tüse, u. 30 cm paksune jääkiht, mis muutis impulss-signaali võngete seeriaks varjutades profiilil setteid iseloomustavat olulist infot. Radargrammi kvaliteeti ja signaali iseloomu mõjutas ka veesügavus. Nii toimus sügavamas vees signaali sumbumine ja seeläbi peegelduspindade nõrgenemine radargrammil. Samuti sõltus radaripilt kirjeldatavast settest. Selged peegelduspinnad olid loetavad turba ja orgu täitva järvemuda piirpindadelt. Raskem oli eristada omavahel erinevaid liivasisid ja sügavamal paiknevat moreeni, samuti ei olnud tuvastatavad üleminekulised piirid. Parimate tingimuste juures oli uuringusügavus põhjasetetes kuni 3 m (joonis 16), mille puhul oli võimalik tuvastada pealmise settekihi lamamit. Siiski kattus radariprofiilidelt kajastuv info hästi puurimisandmetega, millest tulenevalt võib soovitada georadari puurimiseelset kasutamist järgnevates madala ja mageveeliste järvede põhjasetete uuringutes, et efektiivsemalt planeerida kulukaid ja raskeid välitöid.

Töö käigus pakkus huvi Lämmijärve põhjareljeefis kõrgemale küündivad selgete piirjoontega positiivsed vormid (joonis 16). Ühe näitena on joonisel 16 esitatud umbes 1 m kõrgune vall, mille pealispinna reflektor sukeldub ümbritsevate, ilmselt nooremate setete alla. Peegelduse suhteliselt halb kvaliteet ei luba valli moodustavate setete täpsemat interpreteerimist. Seetõttu vähendati esitatud profiili ülekõrgendust, mis võib varjutada pinnavormi siseehitust kirjeldava signaali. Väiksema ülekõrgenduse juures ilmnes valli kohal kaks peegelduspinda (joonis 16), millest ülemine on siledam peegeldades rahulikes tingimustes veekeskkonnas kujunenud setteid. Seevastu alumine sakiline peegelduspind viitab vahepeal maismaalisele erosioonile allunud settepinna. Puurimine nimetatud valli kohal (joonis 9, lisa 2, PA 7-15) näitas, et ülemine peegeldus iseloomustab järvemuda ja liiva piirpinda ning alumine järsku üleminekut helebeezile peeneteralisele ja orgaanikavabale liivale. Viimane, ilmselt jääjärvelist päritolu liiv moodustabki kõnealuse valli tuuma, mille 26 m ü.m.p. paiknev lagi on suure tõenäosusega ulatunud järve madala veeseisu ajal ka veetasemest kõrgemale



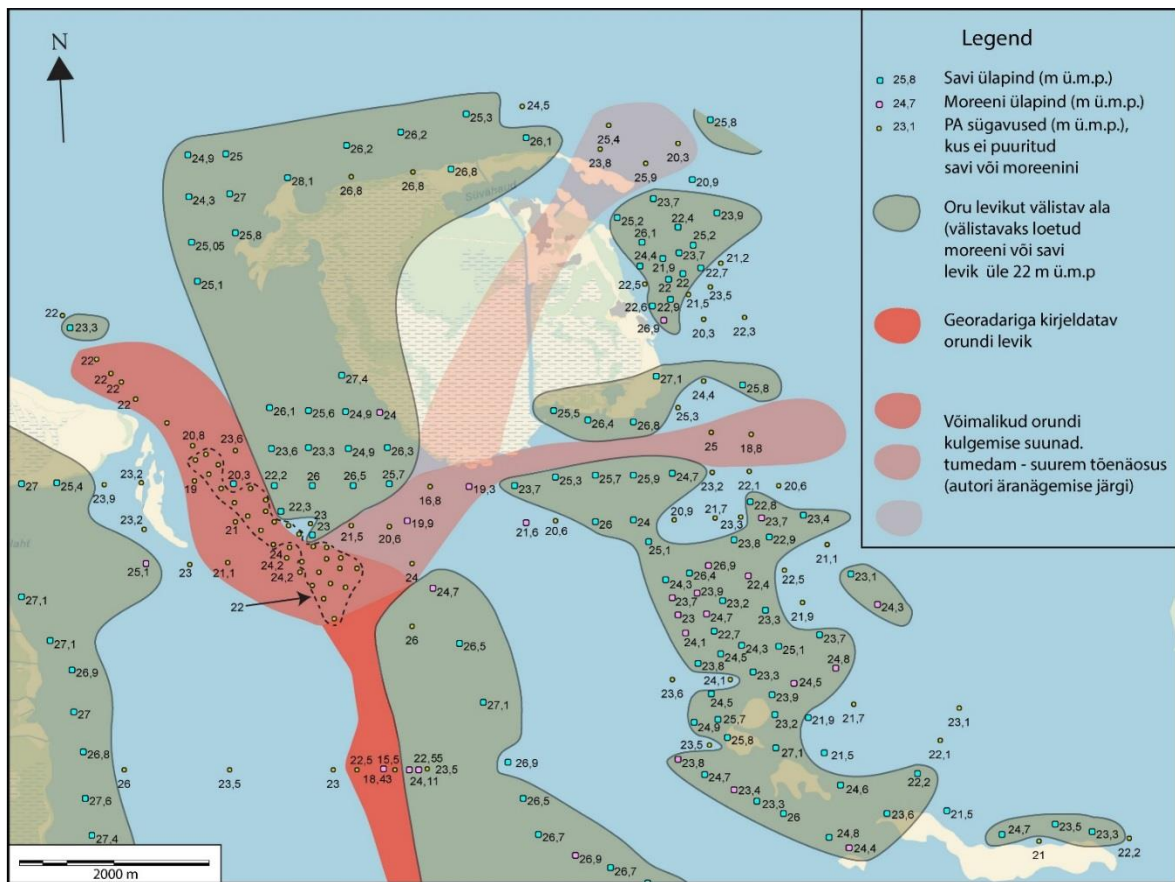
**Joonis 16.** Ida-lääne sihiline radariprofiil (joonis 6) põhjareljeefis eristuvast vormist (a) ning selle siseehitusest (b).

Uuringus pakkus enim huvi Lämmijärve lõunaosas kirjeldatud (Kimmel, 1994) ja suure tõenäosusega ka uuringualal jätkuv, kuid põhjareljeefis mitte eriti selgelt esile tulev põhjalõuna sihiline ning põhjasetetega täidetud vagumus. Kuuel paralleelsel ida-läänesuunalisel profiilil, seega u. 2,5 km ulatuses ilmeski peegelduspindade järsk sügavnemine järve keskosas (joonis 14) kaldast umbes 3 km kaugusel (joonis 17). Sarnane peegelduspind ilmus taas profiilidele, sõltuvalt asukohast u. 300-600 m ida pool, piiritledes seega nooremate setetega täitunud vagumuse. Paraku aga signaali kiire sumbumise tõttu orundi sügavust kaardistada ei õnnestunud. Samuti ei olnud võimalik täpsustada selle kulgemist Piirissaare lõunaranniku lähedal kuna seal varjutasid võimaliku oru Eesti Väravate ümbruses toimuva intensiivse settekandega seotud liivad.

Üldiselt kinnitasid puurimised radariandmete interpretatsioone, kuid oli ka erinevusi, eelkõige settepindade sügavuses. See võib olla tingitud settekihi sees toimuvast dielektriliste omaduste muutusest, mis ei pruugi olla välitingimustes kirjeldades nähtav või asjaolust, et

radariprofiilide töötlemisel kasutatud suhteline dielektriline läbitavus määrati kõikidel settekihtidel ühiseks. Detailselt uuritud profiilil (joonis 14) on näha, et puurimine kinnitas sügava oru olemasolu liustiku- või hilisjäaaegsetes setetes. Kahjuks ei õnnestunud ka käsipuurimisega oru sügavust selgitada. Selle laius on jälgitaval alal 300–600 m ja sügavus järve põhjast vähemalt 10,5 m (15,5 m ü.m.p.). Org on täitunud Holotseense järvemudaga. Nõlvadel on järvemuda lamamiks hilisjäaaegne peeneteraline liiv või moreen. Oru perve lähedal lasub puurimisandmetel kuni 0,7 m paksuse kihina keskmiselt lagunenu tihe puupillirooturvas, mis pervest eemaldudes kiildub välja ja mida ka oru keskosas puurimistel ei tuvastatud. Turvas on omakorda kaetud järvemuda või Holotseense kõrge orgaanikasisaldusega peenliivaga.

Lämmijärves kirjeldatud vagumusest ei ole seni vooluveesetteid leitud ning Lämmijärves jälgitavad selged orundi piirid ei ole Piirissaare ümbruses enam nähtavad. Antud töös püüti siiski kirjeldada varjatud orundi jätkuvuse võimalusi Piirissaare ümbruses (joonis 17), arvestades mahukat puurandmestikku ning radariprofiile. Orundi paiknemise kirjeldamisel välistati esmalt alad, kus savi või moreeni ülemine pind ulatus puuraukudes üle 22 m ü.m.p., kuna oruline ühendus sai eksisteerida vaid selleaegsest järve veetasemest (22 m) (Hang et al. 2008) allpool ning pidi seega sügavamale lõikuma. (Lisaks moreeni ja savi kirjeldavatele puuraukudele kasutati ka neid, mille puurimisel ei jõutud savi ega moreenini. Viimaste põhjal ei saa orundi levikut välistada, kuid võib viidata selle võimalikule paiknemisele. Samal viisil kasutati Piirissaarel tehtud radariuuringute tulemusi, kus profiilidelt ei tulnud välja orund, ega seda välistavad moreeni või savi pind.



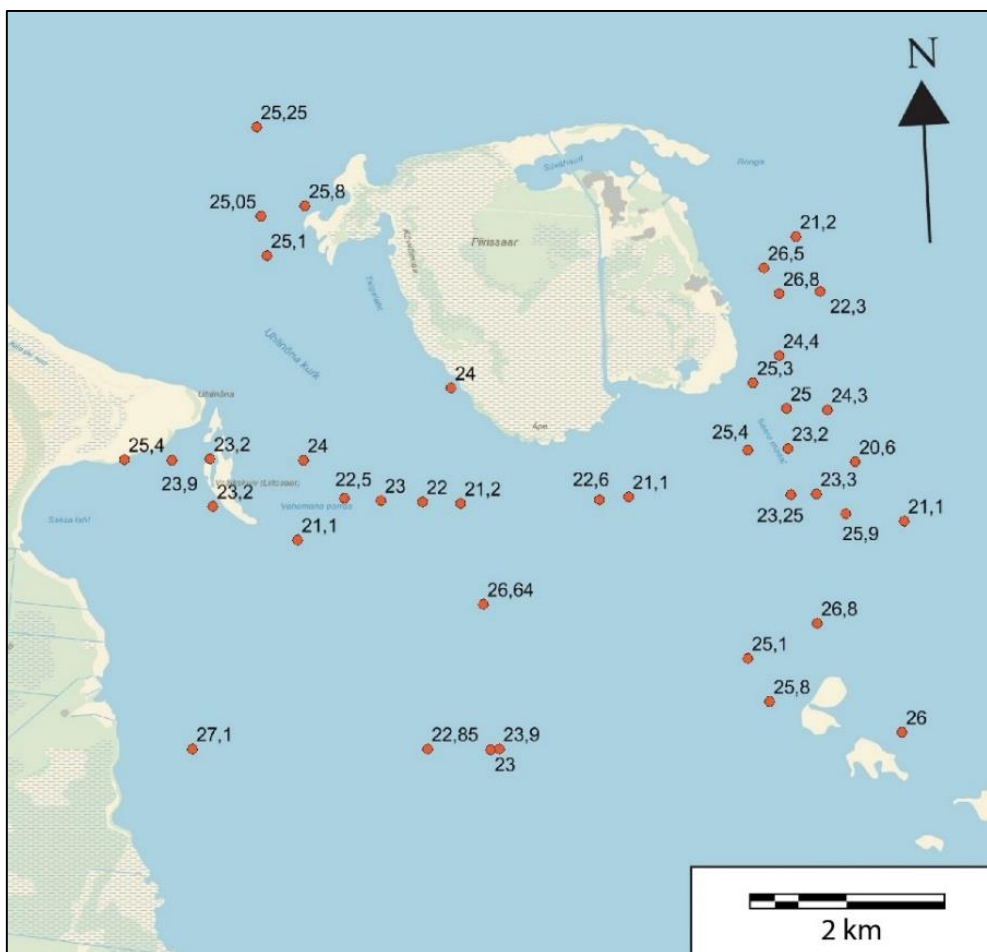
**Joonis 17.** Kaardistatud orund Lämmijärves ja selle võimalik jätkumine Piiressaare ümbruses lähtuvalt geoloogilistest ja geofüüsikalistest andmetest.

Toetudes Piiressaare ümbruse puurimisandmetele ei selgunud ühte kindlat oru paiknemise võimalust. Oru levikut välistav 22 m ü.m.p. ulatuva savi ja/või moreeni pealispinna kõrgus esineb küllaltki suurel alal, kuid mitte ühtlaselt. Kõige tõenäolisemaks peeti oru kulgemist Piiressaarest lääne poolt, Eesti Väravate alal. Teise, enne Piiressaart itta pöörava versiooni poolt kõnelevad saarest vahetult lõunas Holotseenetes setetes 16,8 m ü.m.p. ja kirdes 18,8 m ü.m.p. ulatuvad puuraugud. Piiressaarest läbi kulgeva võimaliku oru kohta on kõige vähem tõendeid, kuid Piiressaarel tehtud radariuringud ei välistanud oru võimalikku paiknemist saart moodustavate liivade all.

Lisaks sügavale lõikunud ja nooremate setetega täitunud orule Lämmijärve keskel, annavad Väike-Peipsi etapi kohta infot ka põhjasetetes kirjeldatud turbad (joonis 18). Turba akumulatsioon eeldab liigniiskeid tingimusi ning turba paiknemine kaasaegselt veetasemest madalamal, viitab kunagisele oluliselt madalamale veetasemele. Varasemates uuringutes on 0,08 m – 3 m tüsedusega turvast Piiressaare ümbruses kirjeldatud üksikutes puuraukudes vahemikus 27,1–20,6 m ü.m.p. Suur sügavusvahemik ning juhuslikud leiud



lubavad oletada, et tegemist ei ole siiski ühtse turba kihiga vaid lainetuse poolt ümber seotitud üksikute turbamätaste või pangastega.



**Joonis 18.** Uuringualal tehtud puurimistel (Valt, 1976) kirjeldatud mattunud turba levik ning selle alumise pinna absoluutkõrgus.

Käesolevas töös mitmes järjestikku paiknevas puuraugus kirjeldatud järve kalda suunas aeglaselt õhenev ja lõpuks välja kiilduv taimejäänuste analüüsi põhjal sarnaseid taimejäänuseid sisaldav puu-pillirooturvas moodustab aga autori arvates ühtse kuni 0,7 m paksuse turbakihi. Selle paiknemine 23-24 m absoluutkõrgusel viitab kunagisele vähemalt 6-7 m tänapäevasest madalamale veetasemele Lämmijärves. Kuna aga järve keskel oleva vagumuse kohal turvast ei leitud ja vagumus on täitunud kogu ulatuses järvemudaga, võib järeldada väiksema, vaid orgu täitva järve eksisteerimist ka madala veeseisu ajal ning samaaegseid madalsootimusi oruga piirneval alal.

Turba vanusemäärangud (tabel 2) paigutavad turba tekkimise ajavahemikku 9220 – 8250 <sup>14</sup>C (10399–9228 *cal yr BP*) a.t.. Sarnase vanusega (9600–9100 <sup>14</sup>C (10620 *cal yr BP*) a.t.) on ka Suurjärvest 20–21 m ü.m.p. kõrgusel leitud mattunud orgaanika ning Väraska lahest



23,29–23,34 m ü.m.p. kõrgusel leiduv turvas  $9670 \pm 200$   $^{14}\text{C}$ -aastat (11015 *cal yr BP*) (Moora jt. 2005). Veelgi enam, Emajõe suudmes on 23 m (ü.m.p.) kõrgusel paikneva järvemuda vanuseks saadud  $10200 \pm 90$  a.t. (Sarv ja Ilves, 1975) ning Optjoki jõe suudmes 29,6 m (ü.m.p.) kõrgusel paikneval turbal  $10050 \pm 120$  a.t. (Miidel et al. 1994) Sarnane vanus ja paiknemise kõrgus ei jäta kahtlust, et tegemist on samaaegsete setetega mis tähistavad madalat veeseisu kogu Peipsi nõos ja on seostatavad Väike Peipsi arenguetapiga.

Veetaseme täpsemaks hindamiseks järvenõo eri osades tuleb aga kindlasti arvestada ka glatsioisostaasiast tingitud maakerke erinevusi järve eri osades. Seda on hinnatud samaaegsete rannamoodustiste või jõeterrasside tänapäevase absoluutkõrguse erinevuste abil. Suurimaks gradiendiks, mis peegeldab järvenõo põhja- ja lõunaosa kerkimise erinevust on Raukas ja Rähni (1969) pakkunud  $55 \text{ cm km}^{-1}$ , samal ajal kui Liblik (1969) on mõõtnud maakerke suuruseks vaid  $4\text{--}9 \text{ cm km}^{-1}$  mida toetab ka jõeterrasside andmestik (Hang ja Miidel, 1999c). Väiksemat tõusugradienti ( $5 \text{ cm km}^{-1}$ ) arvestades paigutub ka käesolevas töös välja pakutud 6-7 m madalam veetase Lämmijärves hästi süsteemi Optjoki ja Emajõe suudmes kirjeldatud veetasemetega.

Olles veendunud, et Väike-Peipsi etapi ajal oli veetase tänapäevasest oluliselt madalam ning Lämmijärve madalamas osas oli veekogu asemel liigniiske ala, on endiselt lahtine Lämmijärves kulgeva orundi olemus ja seos Väike-Peipsiga. Tegemist võis olla nii ühtse madalaveelise veekogu, mitme isoleeritud järve (Davõdova ja Kimmel, 1991) või vooluveekoguga, mis suubus madala veetasemega Väike-Peipsisse ja uuristas kirjeldatud sügava ja tänaseks setetega täitunud oru Lämmijärve põhja. Sellele küsimusele vastamiseks oleks vaja teada ulatuslikumalt oru paiknemist ja sügavust, et hinnata võimalikku erosioonibaasi kõrgust. Käesoleva töö ja varasemate uuringute (Kimmel, 1994; Raukas ja Rähni, 1981; Hang ja Miidel, 2008) käigus kogutud andmed tõestavad sügava mattunud oru esinemist Lämmijärve põhjas. Samas puuduvad andmed sarnase oru eksisteerimise kohta Pihkva järve põhjas, mis võiks toetada nn. Ürg-Velikaja hüpoteesi. Selgete tõendite puudumisel jääb endiselt küsitavaks oru olemasolu Piirissaarest idas ja läänes. Maaradari ja geoloogilistele andmetele tuginedes on mattunud org jälgitav veel Piirissaare lõunaranniku lähedal. Teadaolevad batümeetria ja mõned geoloogilised andmed näitavad seal rohkem kui 10,6 m (16,8 m ü.m.p.) sügavuse vagumuse esinemist. Ehitusliiva otsingu andmed viitavad väga liigestatud moreeni pinna esinemisele Piirissaare ümbruses, millest Hang ja Miidel (1999d) on järeldanud hoopis võimaliku künkliku moreenreljeefi esinemist ning seadnud kahtluse alla erosioonilise oru jätkumise Piirissaarest põhja poole ja sealt tulenevalt ka Ürg-

Velikaja eksisteerimise. Selgust aitaks tuua Piirissaarest põhja pool Suurjärve põhjareljeefis esiletuleva hargjõe või deltale iseloomuliku struktuuri (joonis 15) täiendavad uuringud. Kuid ka siis võib endiselt jääda lahtiseks küsimus, kas need orud peegeldavad Ürg-Velikaja või hoopis kunagise Emajõe suudme asukohta.

## 5. Järeldused

Uurimistöo olulisemad järeldused on:

1. Piirissaare kirdeosas paiknev loode-kagu sihiline laugete nõlvadega seljandik koosneb erinevatest rannikuvööndi liivasetetest, mis ulatuvad vähemalt 25 m (ü.m.p.) tasemeni.
2. Lämmijärve liigestatud põhjareljeefiga põhjaosas esineb liustiku- või hilisjäaaegse tekkega jäänukvorme, mille mattunud pealispind viitab ilmselt Väike-Peipsi aegsele maismaalisele erosioonipinnale.
3. Lämmijärves tuvastatud järvemudaga täitunud orgu oli võimalik nii georadari abil kui ka puurides jälgida peaaegu Piirissaareni. Oru maksimaalset sügavust kaardistada ei õnnestunud ja endiselt jääb selgusetuks oru võimalik jätkumine Suurjärve suunas.
4. Põhjasetetest leitud turvas toetab madala veetaseme hüpoteesi Peipsi arengus, mil veetase Lämmijärves oli 6-7 m madalam kaasaegsest järve tasemest.
5. Turba vanus  $9220 \pm 90$   $^{14}\text{C}$  a.t. toetab varasemaid dateeringuid ja kinnitab Väike-Peipsi eksisteerimist veel vara-Holotseenis.
6. Antud töös kirjeldatud võimalik Väike-Peipsi aegne veetase Lämmijärves toetab Peipsi järve lõunaosa glatsioisostaatilise maakerke iseloomustamiseks kasutatud gradienti (u.  $5 \text{ cm km}^{-1}$ ).
7. Georadar ehk maaradar sobib Lämmijärvele sarnaste suhteliselt madalate mageveekogude uurimiseks, andes sobilike tingimuste juures hea ülevaate nii põhjareljeefist kui ka setetest ja nende paksusest, olles sellega heaks teejuhiks kulukatele ja aeganõudvatele puurimistöodele.

## Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli koguda täiendavaid andmeid Lämmijärve põhjarejeefi ja põhjasetete kohta ning kinnitada mattunud turba esinemist ja kaardistada selle levikut Lämmijärves Piirissaarega piirneval alal. Lisaks püüda kogutud andmeid kasutades seletada Väike-Peipsi aegset veetaset ja hüdrograafiat. Metoodika seisukohalt seati sihiks selgitada maaradari kasutatavust ja efektiivsust järve põhjasetete uurimisel talviselt jäält.

Töö käigus tehti Piirissaarel ja Lämmijärvel mahukad uuringud georadariga. Lisaks viidi läbi puurimistöid, millest leitud orgaanika vanusemäärangud tehti töö autori poolt. Eelneva uuringualast pärineva ning antud töös saadud andmete põhjal kirjeldati erinevate põhjasetete levikut ning sealt tulenevalt ka setetes esinevate struktuuride iseloomu.

Piirissaarel georadariga tehtud tööde põhjal selgus, et saare kirdeosas loode-kagu sihiliselt asetsev seljandik koosneb erinevatest rannavööndile omastest liivadest, mis ulatuvad maapinnast kuni 25 m ü.m.p. Lämmijärves järve jäält mõõdistatud radariprofiilidel kajastusid hästi ka põhjareljeefis esinevad vormid, mille kujunemine on seotud jää- või hilisjäajal toimunud setteprotsessidega. Lämmijärve keskosas tuvastati põhjalõunasihiliselt kulgev vagumus, mis võib olla seotud Väike-Peipsi perioodil arenenud jõgedevõrguga. Nii georadari abil kui ka puurides oli võimalik seda järvemudaga täitunud orgu jälgida peaaegu Piirissaareni. Oru edasisi võimalikke kulgemisteid tänase Suurjärve suunas kirjeldati tuginedes radari- ja puurandmestikule.

Põhjasetetest leitud turvas toetas madalaveelist perioodi Peipsi järve arengus ja sellest tehtud vanusemäärang langes kokku eelnevalt kirjeldatud Peipsi järve Väike-Peipsi etappi iseloomustavate dateeringutega. Samuti toetas antud töös kirjeldatud orgaanika ja selle vanus Peipsi järve lõunaosa glatsioisostaatilise maakerke iseloomustamiseks kasutatud gradienti ( $5 \text{ cm km}^{-1}$ ).

Radariprofiile puurimisandmetega võrreldes, selgus, et georadar sobib hästi Lämmijärvele sarnaste suhteliselt madalate mageveekogude uurimiseks, kuna annab sobilike tingimuste juures hea ülevaate nii põhjareljeefist kui ka setetest ja nende paksusest, olles sellega heaks teejuhiks kulukatele ja aeganõudvatele puurimistöedele.

Käesolevas töös kogutud andmete põhjal ei ole võimalik kindlalt Lämmijärve piirkonnas toimuvat kirjeldada, küll aga lisandus kogu Väike-Peipsi arenguloosse oluline informatsioon, mis aitab kindlasti tulevastel uuringutel tõsiseltvõetavate järeldusteni jõuda.

# Bottom deposits of the Lake Lämmijärv as indicators of the lake evolution

Siim Nirgi

## Summary

The aim of current study was firstly to collect additional data on bathymetry and bottom deposits of the Lake Lämmijärv, eastern Estonia, to determine the presence of peat in bottom deposits and to map its distribution near the Piirissaar Island. Secondly to contribute to the understanding of the water level and hydrography during the Small Peipsi stage in the development of the Lake Peipsi. From a methodological point of view the goal to describe usage and efficiency of ground penetrating radar (GPR) when studying lake deposits from the lake ice was set.

GPR studies and coring were carried out during the fieldwork. Peat discovered and sampled during the coring campaign was dated by the author in the Radiocarbon lab of the Tartu University. Distribution of lake sediments and therefore notable structures buried in the bottom of the lake were inspected and described using previous data from the study area together with data collected.

GPR data indicates that the NW-SE directed positive landform in the NE part of the Piirissaar Island consists entirely of sand reworked by coastal processes. Likely relict landforms in the bottom of Lake Lämmijärv consist of glaciolacustrine fine sand covered by gyttja. Erosional surface at the interface of above sediments points to the temporary emergence of the landforms during the low water-level stage. In the central part on the lake N-S directed buried valley was discovered while its depth was not possible to measure. It was possible to map it on GPR profiles almost to the southern coast of the island of Piirissaar, unfortunately its further positioning was speculated based only on earlier geological data.

Buried peat, which was found from the lake deposits confirm the 6-7 m lower water-level (23-24 m a.s.l.) in Lake Lämmijärv during the Small Peipsi stage. Currently determined age (10399 *cal yr BP*) correlates well with earlier dates of Small Peipsi deposits and confirms the Early-Holocene low water-level stage in Lake Peipsi. The altitude of peat supports the rather low gradient (5 cm km<sup>-1</sup>) of glacioisostatic uplift in Lake Peipsi depression during the Holocene.

When GPR profiles were compared to coring data it turned out that ground penetrating radar is well suited for describing relatively shallow, fresh water lakes such as Lake Lämmijärv. By giving a detailed overview of bathymetry and bottom deposits with their thicknesses, turns the GPR to a useful tool in designing the expensive and time-consuming coring campaigns on large lakes.

Data collected with this study is unfortunately not comprehensive enough to describe situation in the study area during the Small Peipsi stage for certain. Nevertheless notable amount of information was gathered which hopefully will contribute to further understanding of this exceptionally low water-level stage in the development of the fourth largest lake in Europe.

## **Tänuõnad**

Täna kõiki, kes käesoleva töö valmimisele kaasa aitasid, eriti täna oma juhendajaid Tiit Hangu ja Argo Jõehte, kes jagasid head nõu ja leidsid aega minu küsimustele vastamiseks. Samuti täna Peeter Välingut Veeteede Ametist ja Kersti Kihnot, kes tegi biostratigraafilised analüüsid.

## Kirjandusloend

- Бер, К. М. 1852. Исследования для разрешения вопроса: уменьшается ли количество рыбы в Чудском озере. *Журнал Министерства Государственных имуществ* 43: 248-302.
- Бер К. М. 1860. Рыболовство в Чудском и Псковском озерах и в Балтийском море. В кн.: *Исследования о состоянии рыболовства в России*, 1-96.
- Cook, G. T., Dugmore, A. J., Shore, J. S. 1998. The influence of pretreatment on humic acid yield and  $^{14}\text{C}$  age of Carex peat. *Radiocarbon*, 40, 21-27.
- Davis, J. L., Annan, A. P. 1989. Ground-penetrating Radar for High-resolution mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. 37 (5), 531-551.
- Давыдова, Н., Киммел, К. 1991. К палеогеографии Псковско-Чудского озера по материалам биостратиграфического изучения донных отложений. *Известия Эстонской Академии Наук, Геология* 40 (1), 16-23.
- Grewingk, C. 1879. Erläuterungen zur zweiten Ausgabe der geognostischen Karte Liv-, Est- und Kurlands. Arch. Naturk. Liv-, Ehst- und Kurl., Ser. 1, 8, 343–466.
- Haldna, M., Milius, A., Laugaste, R., Kangur, K. 2008. Nutrients and phytoplankton in Lake Peipsi during two periods that differed in water level and temperature. *Hydrobiologia*, 599, 3-11.
- Hang, E., Liblik, T., Linkrus, E. 1964. On the relations between Estonian valley terraces and lake and sea levels in the Late-Glacial and Holocene periods. *Transactions of the Tartu State University* 156, *Publications on Geography* IV, 29-42.
- Hang, T. 1995. Kagu-Eesti jõeorud. Ainsaar, L., Kirsimäe, K. (toim.), *Liivimaa geoloogia. Ekskursioonijuht*, 30-32.
- Hang, T., Miidel, A., Pirrus, R. 1995. Late Weichselian and Holocene water-level changes of Lake Peipsi, eastern Estonia. *PACT* 50, 121-131.
- Hang T., Miidel, A. 1999a. Bedrock topography. Miidel, A., Raukas, A. (eds.), *Lake Peipsi: Geology*, 27-29.
- Hang T., Miidel, A. 1999b. Holocene history of the lake. Miidel, A., Raukas, A. (eds.), *Lake Peipsi: Geology*, 131-135.



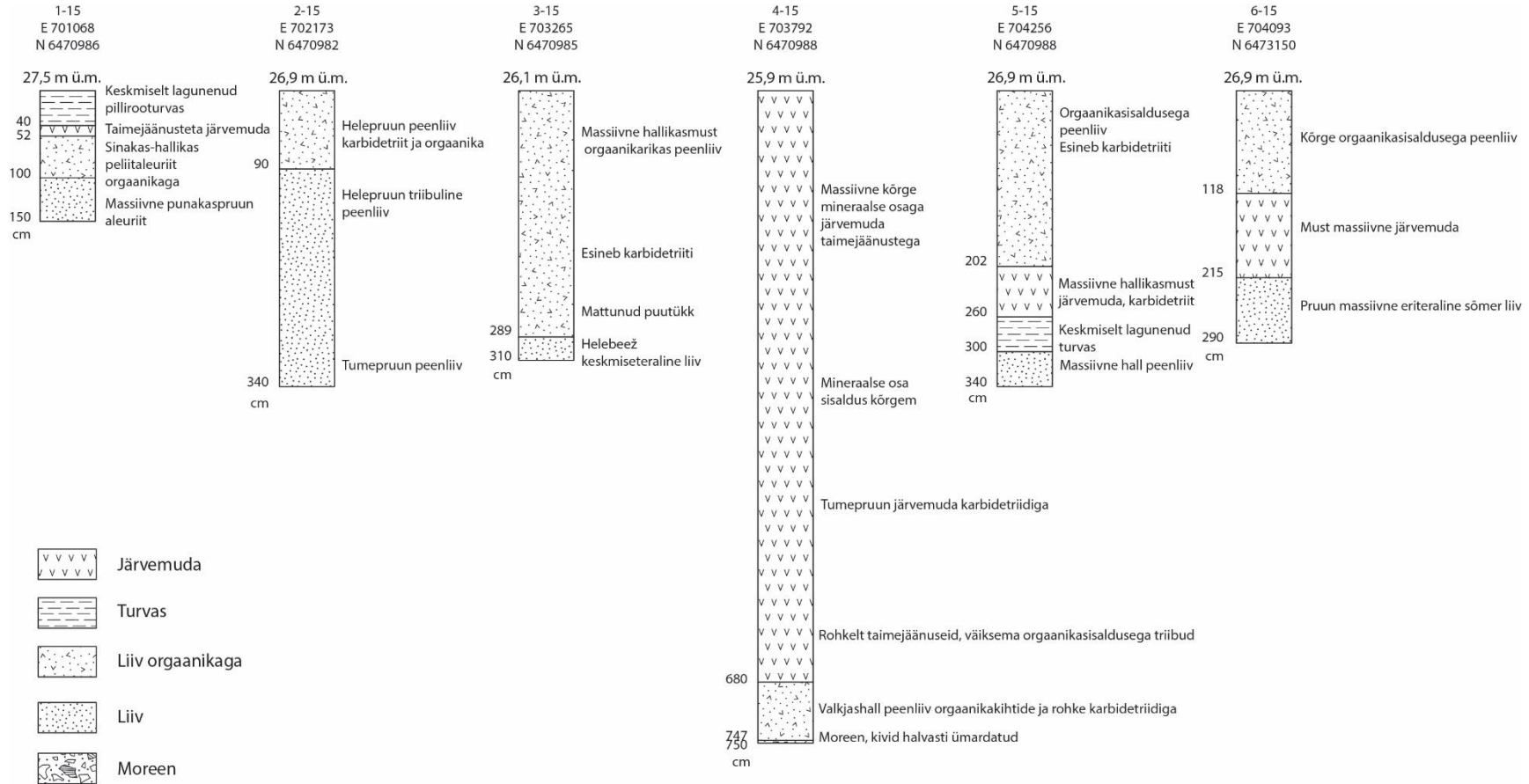
- Hang T., Miidel, A. 1999c. Late- and postglacial crustal movements. Miidel, A., Raukas, A. (eds.), *Lake Peipsi: Geology*, 52-56.
- Hang T., Miidel, A. 1999d. Recent lake: Thickness and structure. Miidel, A., Raukas, A. (eds.), *Lake Peipsi: Geology*, 59-61.
- Hang, T., Miidel, A., Kalm, V., Kimmel, K. 2001. New data on the distribution and stratigraphy of the bottom deposits of Lake Peipsi. *Proceedings of the Estonian Acad. Sci. Geol.*, 50 (4), 233-253.
- Hang, T., Miidel, A., Kalm, V. 2002. Soopuuriga Peipsil. *Eesti Loodus*, 7/8, 34-38.
- Hang, T., Kalm, V., Kihno, K., Milkevičius, M. 2008. Pollen, diatom and plant macrofossil assemblages indicate a low water level phase of Lake Peipsi at the beginning of the Holocene. *Hydrobiologia*, 599, 13-21.
- Hang, T., Miidel, A. 2008a. Peipsi valgla jõeorgude kujunemine ja areng. Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 73-82.
- Hang, T., Miidel, A. 2008b. Peipsi järve areng hilisjäajal ja pärast jääaega. Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 57-62.
- Isaac, H., MacCulloch, Greg. 2004. Adventures with GPR experiments through ice. *CSEG Recorder*, 29 (2).
- Jaani, A. 1973. Suurjärv + Lämmijärv + Pihkva järv. *Eesti Loodus*, 12, 706-708.
- Jaani, A., Raukas, A. 1999. Lake Peipsi and its catchment area. Miidel, A., Raukas, A. (toim.), *Lake Peipsi: Geology*, 9-14.
- Jaanits, L., Moora, T., 1999. Peipsimaast, selle kujunemis- ja asustusloost. Pihu, E., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 182-197.
- Kajak, K. 1964. Peipsi nõo geoloogiast ja geomorfoloogiast. *Eesti Geograafia Setsi Aastaraamat*, 20-33.
- Kimmel, K. 1994. Holotseeni setete stratigraafia ja taimkatte arengu seaduspärasused Peipsi nõo edelaosas. *Magistritöö (käsikiri)*, 1-60.
- Kvasov, D. D. 1979. The Late-Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe. *Annales Avademiae Scientiarum Fennivae, Ser. A III, Geology-Geography* 127, 1-71.

- Lepland, A. 1991. Piusa oru arengust Pleistotseeni lõpul. Saarse, L.(toim.), Inimene ja geograafiline keskkond. *Vabariikliku geograafia-alase nõupidamise materjalid Tallinnas*, 78-83.
- Miidel, A., Hang, T., Pirrus, R., Liiva, A. 1994. On the development of the southern part of Lake Peipsi in the Holocene. *Proc. Stonian Acad. Sci. Geol*, 44 (1), 33-44.
- Miidel, A., Raukas, A. 1999. Peipsi nõgu ja selle arengulugu. Pihu, E., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 5-10.
- Miidel, A., Noormets, R., Hang, T., Floden, T., Bjerkeus, M. 2001. Bedrock geology and topography of the Lake Peipsi depression, eastern Estonia. *GFF*, 123, 15-22.
- Miidel, A., Hang, T. 2002. Tuntud ja tundmata Peipsi põhi. *Eesti Loodus*, 6, 14-17.
- Muraki, Y., Kocharov, G. 1998. The New Nagoya radiocarbon laboratory. *Radiocarbon*, 40 (1), 177-182.
- Moora, T., Kihno K., Hiie, S. 2005. Lisandeid Peipsimaa arengu. Ja asustusloole. Uurimusi Setumaa loodusest, ajaloost ja folkloristikast. *Setumaa kogumik*, 3, 17-43.
- Neal, A. 2004. Ground-penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth Science Reviews*, 66, 261-330.
- Niinemets, E., 1999. Ostracods. Miidel, A., Raukas, A. (eds.), *Lake Peipsi*, 90-97.
- Noormets, R., Hang, T., Miidel, A., Floden, T., Bjerkeus, M. 1998. Seismic stratigraphy of Quaternary deposits in Lake Peipsi, eastern Estonia. *GFF* 120(1), 47-52.
- Nõges, T. 2001. Lake Peipsi: Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry. 1-163.
- Orviku, K. 1958. Литологическое исследование морены последнего оледенения Эстонии количественными методами. Тр. Ин-та геол. АН ЭССР, 3, 213–252.
- Orviku, K. 1960. Geomorfologiya. Orviku, K. (toim.) *Geologiya SSSR, Tom 28, Estonskaya SSR*, 209-230.
- Orviku, K., 2007. Geoloogia ja rannaprotsessid. *Eesti Värava Süvendamise KMH*.
- Pihu, E., Haberman, J. 2001. Lake Peipsi: Flora and Fauna. 100-111

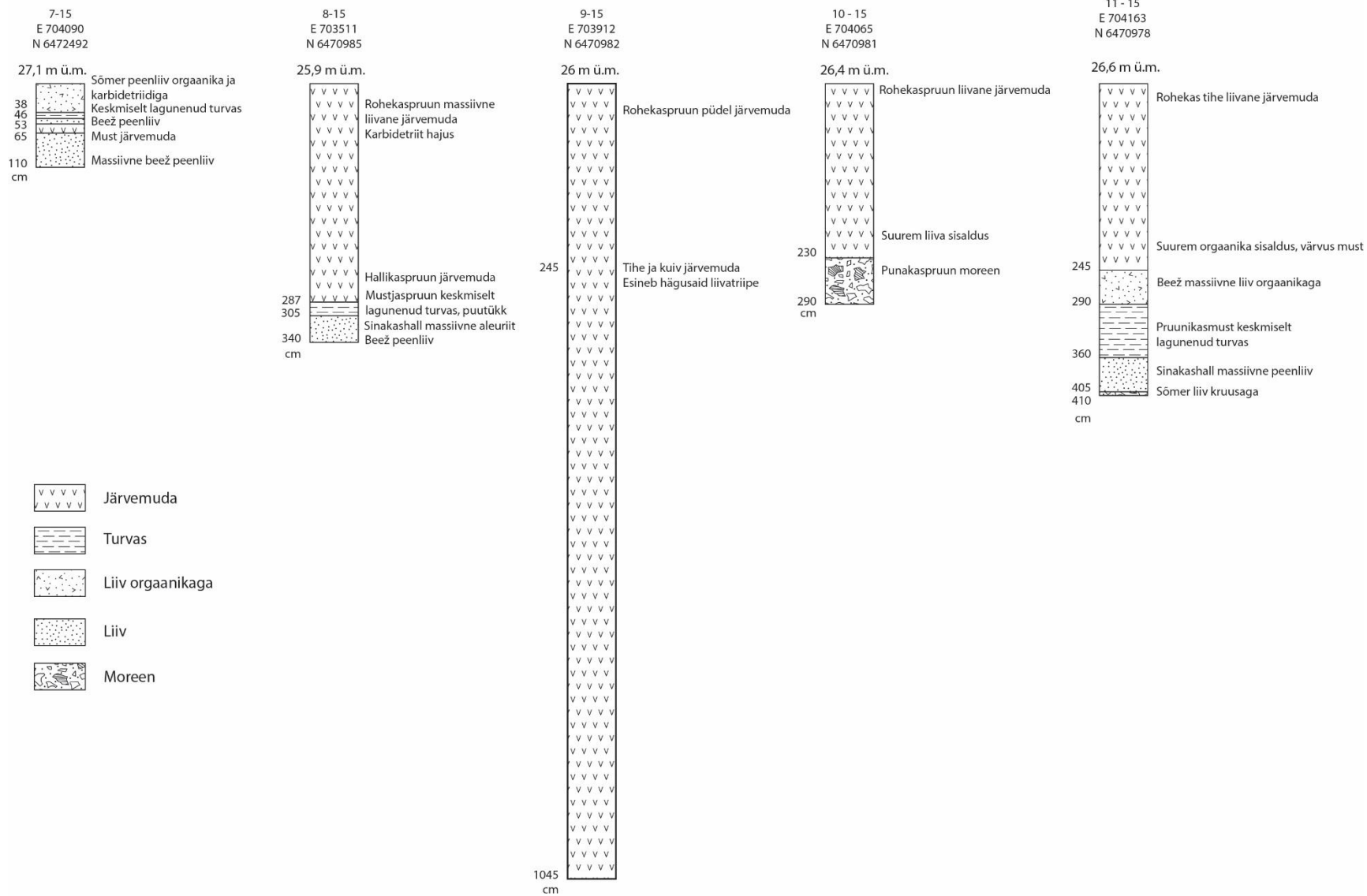
- Pirrus, R. 1981. Особенности формирования спорово-пыльцевых спектров поверхностного слоя донных отложений Псковско-Чудского озера. А. Раукас (ред.) *Донные отложения Псковско-Чудского озера*, 42-45.
- Pirrus, R., Tassa, V. 1981. Геология месторождения сапропеля в заливе Вярска. А. Раукас (ред.) *Донные отложения Псковско-Чудского озера*, 82–93.
- Punning, J. M., Koff, T., Kadastik, E., Mikomägi, A. 2005. Holocene lake level fluctuations recorded in the sediment composition of Lake Juusa, southeastern Estonia. *Journal of Paleolimnology*, 34, 377-390.
- Raukas, A. 1978. Плейстоценовые отложения Эстонской ССР, 1–310.
- Raukas, A., 2008a. Peipsi nõo pinnakatte koostisest ja setete vanusest. Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 33-41.
- Raukas, A., 2008b. Peipsi põhjasetete koostis ja kujunemine. Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 93-99.
- Raukas, A., Rähni, E. 1969. О геологическом развитии впадины и бассейнов Чудского и Псковского озер. *Изв. АН ЭССР. Хим. Геол.*, 18 (2), 113–127.
- Raukas, A., Rähni, E. 1981. Pihkva-Peipsi järve põhjasetete struktuuritüübid ja nende kujunemise iseärasused. Raukas, A. (toim.), *Donnye otlozhenya Pskovsko-Chudskogo ozera*. 7–22.
- Raukas, A., Vaher, R., 2008. Maavarad. Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 43-49.
- Rosentau, A. 2006. Development of proglacial lakes in Estonia. 113 lk
- Rosentau, A., Hang, T., Miidel, A. 2004. Simulation of the shorelines of glacial Lake Peipsi in Eastern Estonia during the Late Weichselian. *Geological Quarterly*, 48(4): 299-307.
- Rosentau, A., Vassiljev, J., Hang, T., Saarse, L., Kalm, V. 2009. Development of the Baltic Ice Lake in the eastern Baltic. *Quaternary International*, 206, 16-23.
- Rähni, E. 1973. Peipsi nõo ja järve arengulugu. *Eesti Loodus*, 12, 716-721.
- Saarse, L., Vassiljev, J., Rosentau, A., Miidel, A. 2007. Reconstructed Late Glacial shore displacement in Estonia. *Baltica*, 20, 35-45.

- Sarv, A., Ilves, E. 1975. О возрасте голоценовых отложений приустья реки Эмайыги (по материалам изучения разреза Савику). *Изв. АН ЭССР. Хим. Геол.*, 24 (1) 64–69.
- Schmidt, F. 1883. Предварительный отчет об исследованиях, произведенных летом 1882 г. по поручению Геологического комитета. *Изв. Геол. ком.*, 2 (5), 107–122.
- Zur Mühlen, L. 1918. Zur Geologie und Hydrologie des Wirzjerv-Sees. *Der Kgl. Preuss. Geol. Landesanstalt und Bergen-Akademie zu Berlin*, 83, 14-92.
- Tassa, V. 1976. Väraska lahe sapropeelide uuring ravi tarbeks ja põllumajanduses, 1-33.
- Tavast, E. 2008. Peipsi rannad. Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), *Peipsi*, 101-111.
- Tavast, E., Raukas, A. 1982. Рельеф коренных пород Эстонии. 1–194.
- Terasmaa, J., Raukas, A., Vaasma, Tiit., Tavast, Elvi. 2013. Sedimentation dynamics in the littoral zone of Lake Peipsi. *Baltica*, 26(1), 95 - 104.
- Timm, T., Nõges, T. 1996. Special issue: Biology of Lake Peipsi. *Hydrobiologia*, 338 (1-3), 1-199.
- Valt, E. 1976. Aruanne liiva ja kruusa otsimistöõde tulemustest Peipsi järve piirkonnas.
- Varep, E. 1964. Maastike kaitsest ja planeerimisest Eesti NSV-s. 1-156.
- Varep, E. 1995. Geograafilise uurimise ajalugu. *Vanimad teated Eesti kohta. Feodaalse killustatuse periood*, Raukas, A. (toim.), *Eesti Loodus*, 17-25.

# Lisad



Lisa 1. Puuraukude 1-15 – 6-15 läbilõiked.



**Lisa 2.** Puuraukude 7-15 – 11-15 läbilõiked.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Siim Nirgi,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Lämmijärve põhjasetted järve arengu peegeldajatena,

mille juhendajad on Tiit Hang ja Argo Jõelett

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 lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **21.05.2015**