

**Tartu Ülikool**

**Loodus- ja täppisteaduste valdkond**

**Ökoloogia ja maateaduste instituut**

**Geoloogia osakond**

Kalle Kiik

Geoloogia

**SOITSJÄRVE NÕO (ULPE MAARDLA) PÕHJASETETE  
LEVIK GEORADARI JÄRGI**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: doktorant Ivo Sibul

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2017

## **Infoleht**

Soitsjärve nõos, Ulpe turbamaardla alal teostati välitööd georadariga 22.7 km pikkuses ning puuriti 7 puurauku. Profiilidelt ning puuraukudest kogutud andmete põhjal valmistati pinnamudel uuringuala sapropeeli-savi pinna kohta. Käesoleva töö ajendiks olid varasemalt Jõgevamaal Soitsjärve nõo loodeosas teostatud geoloogilised-geofüüsikalised uuringud ning seni tõestamata oletus, mille kohaselt kulgeb Soitsjärve nõo põhjas Hilis-Pleistotseenis jääsulavete poolt tekitatud uurdeorg. Profileerimistihedus oli mitmeid kordi suurem kui eelnevate uuringute ajal, seetõttu on tulemused palju detailsemad. Kirjanduses mainitud uurdeorgu ei leitud, kuid saadi palju informatsiooni nõo põhjareljeefi ja setete leviku kohta.

Soitsjärve nõgu asub voorte vahel, voorte jätked ulatuvad osaliselt nõkku, kus neid katavad hilisjääaegsed ja Holotseeni järve- ning soosetted. Esineb eri kujuga terrassilaadseid struktuure, kuid selgelt väljenduva morfoloogiaga väikevoori ei leitud. Kõige paremini oli radargrammidel jälgitav turba lamamis paikneva sapropeeli üleminek järvesaviks. Savi lamamis paikneva moreenini radari ega puurimistega ei jõutud.

Märksõnad: Georadar; Soitsjärve nõgu; Järvesetted; Voored; Ulpe turbamaardla

Keywords: Ground penetrating radar, Soitsjärve depression; Lake sediments; Drumlins; Ulpe peat deposit

## Sisukord

<b>1.Sissejuhatus</b> .....	4
<b>2. Ülevaade</b> .....	4
<b>2.1 Vooremaa</b> .....	4
<b>2.2 Soitsjärve nõgu</b> .....	5
<b>2.3 Ulpe turbamaardla</b> .....	6
<b>2.4 Georadari tööpõhimõte</b> .....	8
<b>3.Andmed ja meetodika</b> .....	10
<b>3.1 Georadari välitööd</b> .....	10
<b>3.2 Puurimine</b> .....	11
<b>3.3 Elektromagnetlaine levikukiiruse määramine</b> .....	12
<b>3.4 Andmetöötlus</b> .....	13
<b>4 Tulemused</b> .....	15
<b>4.1 Puurimine</b> .....	15
<b>4.2 Georadar</b> .....	17
<b>4.3 Pinnamudel</b> .....	17
<b>5 Arutelu ja järeldused</b> .....	18
<b>6 Tänuavaldused</b> .....	21
<b>7 Summary in English</b> .....	21
<b>8 Kirjanduse loetelu</b> .....	22
<b>9 Lisad</b> .....	24

## 1.Sissejuhatus

Jõgevamaal Vooremaal asuvas Soitsjärve nõos uuriti pinnakattesetete koostist ja levikut georadariga. Lisaks enam kui 20 km radariprofiilidele rajati alale tulemuste paremaks tõlgendamiseks käsitsi 7 puurauku. Bakalaureusetöö teema valikul oli peamiseks ajendiks varasemalt samas piirkonnas teostatud radariuuringud (Ülper, 2007). Tookord leiti Soitsjärve nõo põhjast väikeste voorte (embrüovoorte) esinemisele viitavaid tunnuseid, kuid pinnavormid jäid ebapiisava andmestiku tõttu piiritlemata. Aastatel 2010-2012 viidi Soitsjärve nõos läbi Tartu Ülikooli geoloogiatudengite praktikume, seejuures tehti mitmeid uusi georadari profiile. Saadi uut infot, kuid andmestik jäi ikkagi lünklikuks (Plado, Autori suuline vestlus, 2017). Käesoleva töö käigus tihendati oluliselt radariprofiilide võrgustikku, et tuvastada võimalike väikevoorte asukohad, kirjeldada erinevate soo- ja järvesettetüüpide paksust ning levikut. 10 aasta tagustel radariuuringutel kasutati liiga madalaid permitiivsuse väärtusi, mistõttu kihtidele omistati tegelikkusest oluliselt suuremad paksused. Käesolevas töös on permitiivsused ja neist tulenev sügavusinfo korrigeeritud. Kuna uuritud ala kattub suures osas Ulpe turbamaardlaga, saaks töö tulemusi edaspidi kasutada arvelolevate maavaravarude täpsustamiseks.

## 2. Ülevaade

### 2.1 Vooremaa

Voored on piklikud, ovaalsed kulutus-kuhjelised pinnavormid, mille pikiteljed iseloomustavad mandrijää liikumise suuda. Voorte uurimine annab teavet kunagiste liustike liikumiskiiruste kohta (Stokes jt, 2011). Eesti voorestikud kujunesid Pleistotseeni liustike pealetungide ja taandumiste käigus. Kuna liustike liikumissuund oli siin valdavalt loode-kagu suunaline, on ka voored orienteeritud samas suunas. Eesti suurim ja tuntuim voorestik on Vooremaa, mis ulatub Alutaguse madaliku lõunapiirilt Sadalast Tartu lähedale Kõrvekülani (55 km) ja ristsihis Siimustist Tormani (24 km) (Arold, 2005). Vooremaa kujunemisel mängis olulist rolli Pandivere kõrgustik, toimides mandriliustike

edasi tungimist takistava barjäärina. Liustikukeelte möödumisel Pandivere kõrgustikust hakkasid voored kujunema kagu pool (Rattas M. , 2004). Liustike edasi tungimist kiirendas liustikualune poorivee rõhk, mis deformatsioonide järgi otsustades oli suurim Vooremaa kaguosas (Rattas & Kalm, 2004).

Saadjärve voorestikus on valdavaks pinnakatte settetüübiks Kesk- ja Ülem-Pleistotseeni moreen, mille paksus ulatub mõnekümnest sentimeetrist tasandikel ja voortevahelistes nõgudes kuni 40-50 meetrini voorte keskosas ning 100 meetrini mattunud orgudes (Rattas & Kalm, 2001). Moreen lasub Vooremaa põhjaosas Ülem-Ordoviitsiumi ja Alam-Siluri lubja- ja dolokividel, lõunaosas Kesk-Devoni liivakividel (Rattas, 2004). Tõenäoliselt ulatus Devoni ladestu avamusala algselt põhja poole, kuid mandriliustike poolt põhjustatud erosiooni tulemusel nihkus liivakivide avamus lõuna suunas (Rattas & Kalm, 2001). Sügavamaid voortevahelisi vagumusi täidavad tänapäeval järved – Kuremaa, Saadjärv, Soitsjärv, Raigastvere, Elistvere, Pikkjärv, Prossa jt (Rosentau jt, 2007). Nimetatud järvedes, rabades ning arvukates voortevahelistes nõgudes esinevad kohati kuni 15 meetri paksuste lasunditena pärajääaegsed Holotseeni setted: järvemuda, järvelubi ja turvas (Rattas, 2004). Vooremaa soodes on valdavalt rohketoitelised turbalasundid keskmise paksusega 2.5 m, niiskusesisaldusega 85-86% ja lagunemisastmega 28-40% (Orru, 1997)

Voorestiku keskosas asub 1964. aastal loodud Vooremaa maastikukaitseala pindalaga 98.8 km<sup>2</sup> (Keskkonnaagentuuri ... , 2017).

## **2.2 Soitsjärve nõgu**

Soitsjärv asub Saadjärve ja Elistvere vahel, Tartu linnast 18 km põhjas, Jõgeva linnast 22 km kagus ja Tabivere alevikust 3 km kirdes. Järv paikneb kulutusvagumuses, mille tekitas suhteliselt kiire ja divergentse vooluga mandriliustik Hilis-Pleistotseenis. Liustiku aktiivne voolimistegevus leidis aset Weichseli jäätumise Haanja, osaliselt ka Otepää, staadiumis. Nõgu on ühtlaselt süvenev, lamedapõhjaline, loodest kagusse ahenev vagumus, mille kaguosas on rahutu väikekünklik põhjareljeef. Samaaegselt nõo tekkega kuhjus moreen ümbritsevateks voorteks (Pirrus & Rõuk, 1979).

Kunagine Soitsjärv oli järvesetete leviku alusel 8 km pikk ja 0.9 km lai. Tänapäevase järve mõõtmed on 4.1 km x 0.9 km, seega on järv jäänud kaks korda lühemaks. Suurimad sügavused on nõo keskosas. Piki nõgu, Raigastvere voore suunas, kulgeb ebaühtlase sügavusega kitsas uure, mille tekitasid arvatavasti survelised irdjää all voolanud jääsulamisveed (Pirrus & Rõuk, 1979).

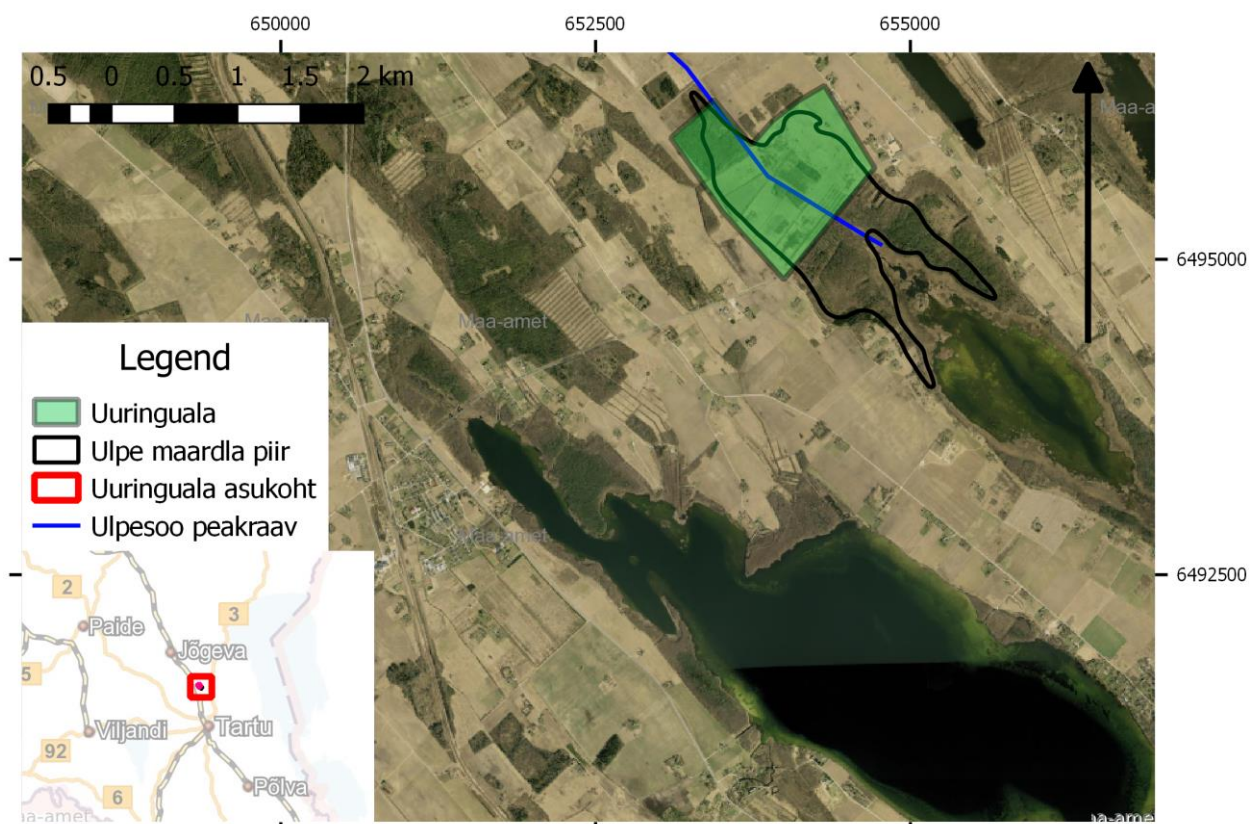
Soitsjärve nõgu on täitunud Hilis-Pleistotseeni ja Holotseeni jääjärve-, järve- ning soosetetega. Jääjärve- ja järvesetete kogupaksus küündib 14 m-ni. Hilisjääaegseteks seteteks on põhimoreenil lasuvad pruunikashalli- ja halliviirulised rütmiliselt kihitatud jääjärvelised aleuriitpeliidid ning peliitaleuriidid paksusega kuni 1.5 m. Kontakti moreeniga esineb peeneteralise liiva või aleuriitliiva õhuke vahekiht. Jääpaisjärvelised viirsetted lähevad vertikaalsuunas sujuvalt üle umbes 1 m paksusteks hallideks, kihitamata klastilisteks järveseteteks. Üleminek Hilis-Pleistotsseni setetelt Holotseeni sapropeelile ja järvelubjale on järsk (Pirrus & Rõuk, 1979).

### **2.3 Ulpe turbamaardla**

Soitsjärve nõo loodeosas, kunagise järve pikenduse alal, asub 172.35 ha suurune Ulpe turbamaardla. Maardlat läbib edela-kirde suunaliselt Tabivere-Uhmardu tee ning loode-kagu suunaliselt Ulpesoo peakraav (Joonis 1). Maardla põhjaosas on palju kirde-edela suunalisi väiksemaid kraave, mis rajati peale II maailmasõda. 1957. a-l uuris ala Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse Teadusliku Uurimise Instituut ning 1977. a-l Eesti NSV MN Geoloogia Valitsus, kes teostas Jõgeva rajoonis turbamaardlate uuringutöid tööstuslike turbavarude hindamiseks. 33 puuraugu põhjal piiritleti 268.4 ha suurune ala, millest tööstuslasundiks määrati 173.0 ha, sellest bilansivälise varudega 79.0 ha. Turba lamamiks on kuni 1 m paksune sapropeeli (ehk järvemuda) kiht, mis lasub kuni 3.5 m paksusel järvelubjakihil. See omakorda lasub kuni 3 m paksusel savika sapropeeli kihil. Kõikide eespool nimetatud põhjasetete lamamiks on saviliiv- või liivsavimoreen (Allikvee & Orru, 1979).

2017. aastal on Ulpe maardla seitsmes plokis arvel hästilagunenud turba, järvelubja ja järvemuda varud (Tabel 1).

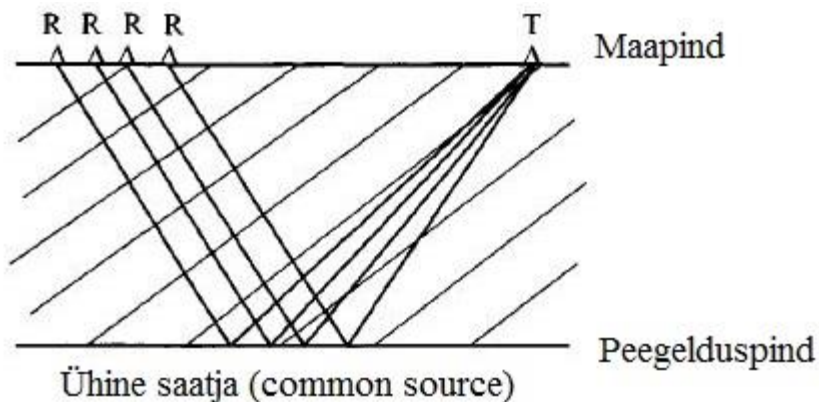
Tabel 1. Ulpe maardla detailandmed (Maa-ameti Geoportaal, 2017)							
	1 plokk	2 plokk	3 plokk	4 plokk	5 plokk	6 plokk	7 plokk
Ploki liik	Passiivne reservvaru	Passiivne reservvaru	Passiivne reservvaru	Passiivne reservvaru	Prognoosvaru	Prognoosvaru	Prognoosvaru
Kasutusala	Hästilagunenud turvas	Hästilagunenud turvas	Hästilagunenud turvas	Hästilagunenud turvas	järvelubi (järvekrit)	järvemuda põlluväetiseks	järvelubi (järvekrit)
Pindala, ha	1.48	91.17	1.61	78.09	89.36	62.15	1.29
Keskmine paksus, m	1.2	1.44	1.44	1.48	1.54	0.68	1.54
Varu, tuh.t	4	326	6	287	1376	189	20



Joonis 1. All vasakul on näidatud uuringuala asukoht Tartu ja Jõgeva linna vahel. Maa-ameti ortofotol on kujutatud Ulpe turbamaardla (must joon) ning selle loodeosas paiknev uuringuala (roheline, poolläbipaistev ala). Uuringuala läbib Soitsjärve suubuv Ulpesoo peakraav (sinine joon).

## 2.4 Georadari tööpõhimõte

Georadar (lühidalt GPR: ground penetrating radar) on geofüüsikaline meetod, mis kasutab pinnase uurimiseks elektromagnetilisi laineid. Tavaliselt on lainete sagedusvahemik 1 - 1000 MHz. Georadart rakendatakse erinevatel eesmärkidel: igikeltsa, jääkilpide, puuraukude, graniitide, lubjakivide, turba jt, settetüüpide uurimisel (Daniels, 2004), aga samuti mitmesuguste hüdrogeoloogiliste ja arheoloogiliste probleemide lahendamisel (Paz jt, 2017, Tšugai jt, 2014). Georadari abil suunatakse elektromagnetlained saateantenniga pinnasesse, osad neist peegelduvad tagasi maapinnale (vastuvõtjasse). Elektromagnetlainete leviku ja peegeldumise määravad suuresti kolm parameetrit: elektrijuhtivus, deielektriline permitiivsus ja magnetiline permitiivsus (Daniels, 2004). Elektrijuhtivus ja magnetiline permitiivsus on seotud lainete levikusügavusega. Pinnased, millel on suur elektrijuhtivus, vähendavad kiirelt laineenergiat, mistõttu piiratakse laine levikusügavust ja sellest tulenevalt georadari efektiivsust. Pinnases tõstavad elektrijuhtivust näiteks suurem soolade ja savi sisaldus. Permitiivsus väljendab elektromagnetilise laine levikukiirust pinnases (Daniels, 2004). Permitiivsuse määramiseks saab kasutada erinevaid meetodeid: (1) hüperboolid, (2) ühise saatja meetod, (3) puuraukude info. Hüperboolide meetodi puhul arvutatakse levikukiirus hüperboolse levikufunktsiooni alusel (Daniels, 2004). Ühise saatja meetodil muudetakse vastuvõtja asukohta ning teades saatja-vastuvõtja vahekaugusi, saab arvutada elektromagnetlaineid läbiva pinna permitiivsuse (Neal, 2004).



Joonis 2 Ühise saatja  
(*common source*)  
meetod

Tabel 2 Levinud geoloogiliste materjalide omadused (Neal, 2004 järgi)				
Dielektriline constant (permiitvsus K), elektrijuhtivus ( $\sigma$ ), kiirus ( $v$ ) ja sumbumine ( $\alpha$ )				
Materjal	K	$\sigma$ (mS/M)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Magevesi	80	0.5	0.033	0.1
Merevesi	80	$3 \cdot 10^3$	0.033	$10^3$
Kuiv liiv	3-5	0.01	0.15	0.01
Küllastunud liiv	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Lubjakivi	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Savid	5-40	2-1000	0.06	1-300
Muda	5-30	1-100	0.07	1-100
Jää	3-4	0.01	0.16	0.01

Georadarit rakendatakse sageli turbauuringutel ning ta on traditsioonilise soopuuri kõrval efektiivne vahend turba sügavuse, paksuse ja pinnaaluse orgaanilise/mineraalse piirpinna eristamiseks (Plado jt, 2011, Campos jt, 2016). Rabad on üldjuhul happelised, toitainevaesed keskkonnad, kus suhteliselt väike soolsus loob georadari tööks head tingimused (uuringusügavus kuni 13 m). Seevastu rohketoitelistes (eutroofsetes) madalsoodes esinev suurem katioonide ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) sisaldus võib pärssida signaali levikut juba alates 0.5 m sügavusel maapinnast (Daniels, 2004). Georadari peegeldused turbas ilmnevad peamiselt seal, kus toimub oluline muutus veesisalduses (Slater & Reeve, 2002). Pinnakatte geoloogia uurimisel kasutatakse enamasti 80-500 MHz sagedusega antenni. 500 MHz antenn sobib turba üksikute struktuursete kihtide uurimiseks, pakkudes rohkem detailsust pinnakihi ja turba sisestruktuuride kohta kui 80-120 MHz antennid. 80-120 MHz antenni on kõige sobilikum kasutada avaratel kraavideta turbaaladel ning nendega võib saada infot suurematest sügavustest kui kõrgsageduslike antennidega (Hänninen, 1992).

### 3. Andmed ja metoodika

#### 3.1 Georadari välitööd

Ulpe turbamaardla loodeossa rajati perioodil 14.02.17 - 28.03.17 54 georadari profiili kogupikkusega 22.7 km (joonis 3). 14. veebruaril ja 8. märtsil toimus profileerimine ainult 300 MHz antenniga. 28.03.17 tihendati profiilide võrgustikku 300 MHz antenniga ja 2.7 km pikkusel distantsil kasutati 100 MHz antenni, et hankida rohkem infot sügavamal lasuvate kihipindade kohta.

Välitööd teostati Tartu Ülikooli geoloogia osakonna radarikomplektiga Zond-12e, mis koosneb kaasaskantavast juhtplokist (akutoitega), sülearvutist ja antennist. Vahemaa mõõtmiseks kasutati järelveetava antenni taga mõõteratast, profiilide asukohad määrati sülearvutiga ühendatud GPS-seadme abil. Mõõtmistevaheliseks intervalliks valiti 5 cm. Töödel osales samaaegselt kaks inimest: üks vedas enda järel antenni, teine kandis ülejäänud seadmeid ja salvestas tulemusi. Välitöödel oli õhutemperatuur vahemikus  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , maapinna ülemine osa oli külmunud. Lumekate puudus või oli väga õhuke (kuni 5 cm).

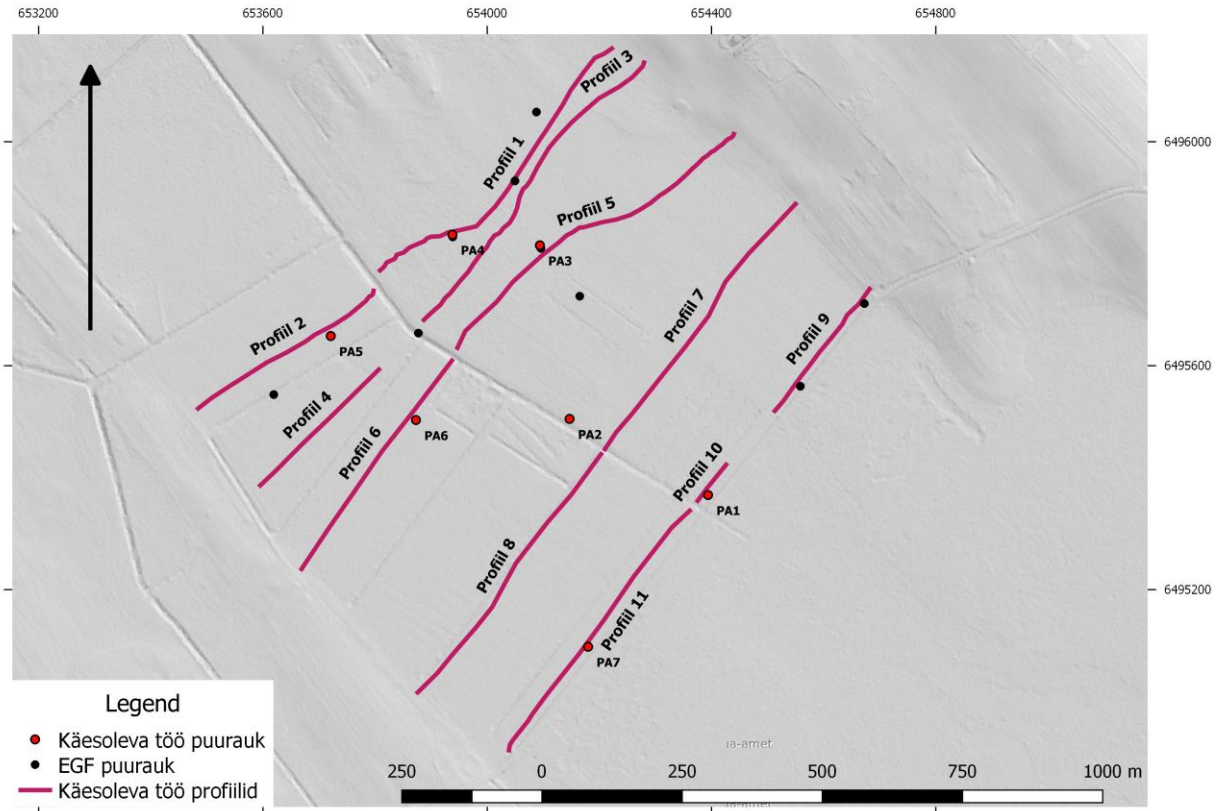


Joonis 3. 2017. a veebruaris ja märtsis tehtud georadari profiilid kogupikkusega 22.7 km. Joonisele on kantud 100 MHz (kollased jooned) ja 300 MHz (sinised jooned) antenni käigud, mis uuringuala lõunaosas kattuvad. Kaks profiili soits280317d (lilla joon) ja soits280317\_100C (oranž joon) kasutati 300 ja 100 MHz antennide võrdluses.

### 3.2 Puurimine

Uuringualal käidi soopuuriga 13.04.2017. Rajati 7 kuni 6 m sügavust puurauku (joonis 4), puurkannu sisu vaadeldes kirjeldati nende geoloogilised läbilõiked (tabel 3). Puuraukude asukohad valiti varasemate puurimiste (Allikvee & Orru, 1979) ja eelnevate profiilide alusel, eesmärgiga kontrollida varasemaid andmeid, seostada need

radargrammidega ja määrata elektromagnetlainete levikukiirused. Puuraukude asukoha koordinaadid määrati käsi-GPSi (Garmin eTrex 20) abil.



Joonis 4. Georadari profiilide ja puuraukude asukohad uuritud alal. Lillaga on näidatud ala iseloomustamiseks valitud profiilid Punasega on toodud käesoleva töö puuraukud koos nende märgistega. Mustad punktid tähistavad Allikvee & Orru aruande puuraukude asukohti.

### 3.3 Elektromagnetlaine levikukiiruse määramine

Georadar mõõdab elektromagnetilise impulsi liikumiskiirust alates saatmise hetkest vastuvõtuni, seetõttu on peegelduspinna sügavuse arvutamiseks vaja teada elektromagnetlaine levikukiirust pinnases. Kiirus saadakse valemi 1 alusel. (v) leitakse suhtelise dielektrilise läbitavuse läbi.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Valem 1. Levikukiirus ( $v$ ), suhteline dielektriline läbivus ( $\epsilon_r$ ),  $c$  = elektromagnetlaineline levikukiirus vaakumis.

Enne georadariga profileerimist määrati pinnase permitiivsuseks 64 (Prism tarkvara poolt vaikumisi pakutud turbapinnase *Saturated peat* permitiivsuse). Elektromagnetlainete levikukiiruste kontrollimiseks kasutati puuraukude andmeid: puurauke PA-2, PA-3, PA-4, PA-5, PA-7. Parima kokkulangevuse radargrammidel jälgitavate pindade ja puuraukude kirjelduste puhul andis permitiivsuse 59. Profiilidel leidis ka üksikud hüperboole, kuid puuraukude andmestik osutus permitiivsuse hindamisel hüperboolidest usaldusväärsemaks.

### 3.4 Andmetöötlus

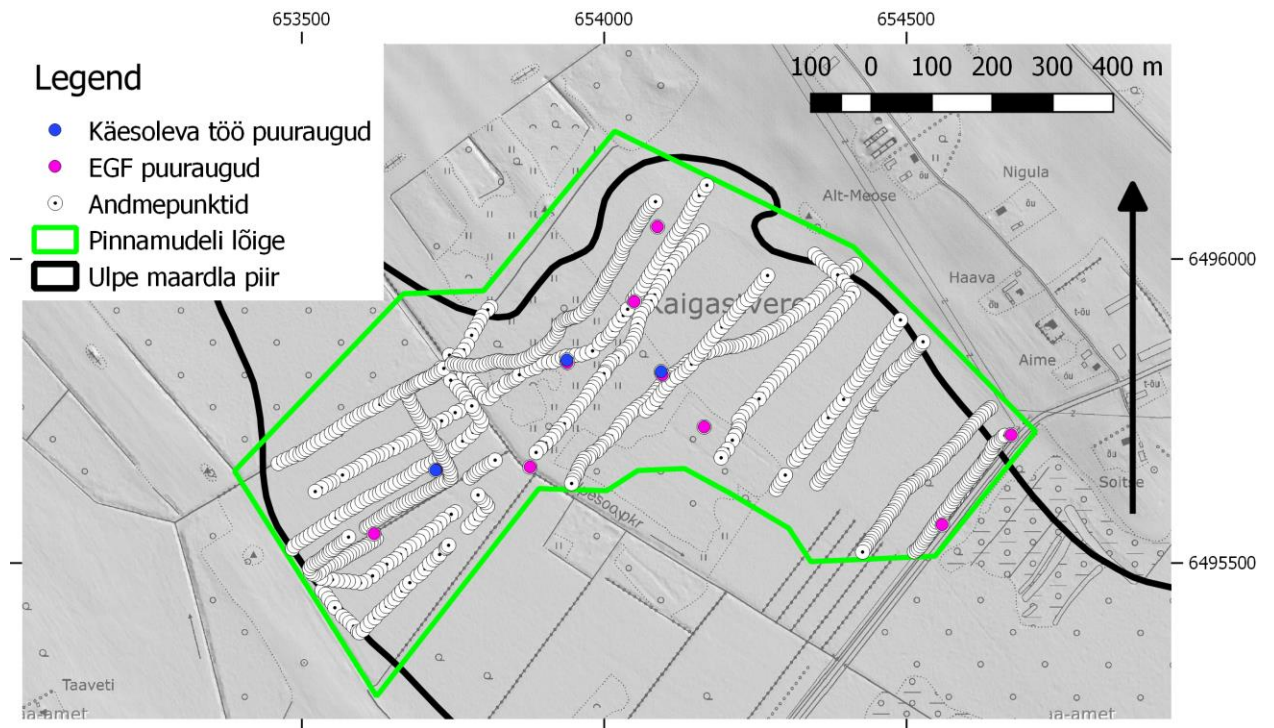
Ulpe maardla plaan (Allikvee & Orru, 1979) georefereeriti ja plaanile kantud puuraukude asukohad digitaliseeriti, et nende kirjeldusi oleks võimalik võrrelda käesoleva töö käigus kogutud andmetega.

Georadari andmete järeltöötlus teostati tarkvaraga „Prism2“ (v2.60.02). *Ormsby bandbass* filtri abil eemaldati mittevajalik madalsageduslik (<65 Mhz) ja kõrgsageduslik (>850 Mhz) müra, vajadusel võimendati *Gain* funktsiooni abil peegelduste intensiivsust. Sügavuste korrigeerimiseks määrati kõikidel radargrammidel permitiivsuseks 59 vastavalt puuraukude kirjeldustele (pt 4.1). Jooniste tegemisel (Lisad 1-11) pöörati osad radargrammid ringi (tööriistaga *Reverse*), et kõik läbilõiked kulgeksid samas suunas (kirdest edelasse).

Radargrammile lisati annotatsioonid – keskmiselt iga 5 m tagant märgiti läbilõigetele peegelduspindade (1) sapropeel-savi ja (2) turvas-sapropeel asukohad, mis salvestati tekstifailidesse. Edasine andmetöötlus toimus QGIS keskkonnas. Tekstifailidest imporditi annotatsioonid L-EST 97 koordinaatidega punktobjektideks, mille üheks atribuudiks sai kihi sügavus maapinnast.

Q-GISi lisati ka Ulpe maardla uuringu (Allikvee & Orru, 1979) ja käesoleva töö käigus rajatud puuraukude vastava kihipinna sügavusandmed (joonis 5). Seejärel interpoleeriti georadari ja puuraukude andmetest pinnad, kasutades *Thin plate spline (tin)* funktsiooni (SAGA-GIS moodul). Trianguleerimisel kasutatakse seal esmalt sisendandmepunkte, ühtlasema tulemuse saamiseks hakatakse pinda siluma. Parameetriga *Regularisation* saab mõjutada pinna sujuvust, *Neighbourhood* määratleb punktide arvu, mida kasutatakse splineide (andmepunkte läbivate kõverjoonte) loomiseks. Tasemetega *level 1* ja *level 2* kaasatakse pinna loomisesse järjest rohkem naabruses asuvaid punkte. Mida kõrgem tase valitakse, seda sujuvamaks muutub tulemus, kuid seejuures suureneb arvutusteks kuluv aeg (Donato & Belongie, 2002). Vastavalt vajadusele määratletakse pinna resolutsioon (*cellsize*) Antud töös kasutati järgmisi parameetreid : *Regularisation* = 0.0001, *Neighbourhood* = level 2, *Cellsize* = 2.0. Erinevused tulemuseks saadud pinna ning puuraukude kirjelduste vahel jäid vahemikku  $\pm 0.4$  m

Saadud pind siluti Majority filtriga ning lõigati väiksemaks punktandmestikku ümbritseva polügooniga. Pinnamudelist jäeti välja georadariga uuritud ala edelaosa, sest sealne sügavusandmestik on väga lünklik. Interpoleeritud pinna alusel loodi tööriistaga *Contour* samasügavusjooned 0.5 m intervalliga.



Joonis 5. Interpoleerimisel kasutatud sügavusandmed (valged punktid), käesoleva töö raames rajatud puuraugud (sinised punktid) ning Ulpe maardla plaanilt (Allikvee & Orru, 1979) digitaliseeritud puuraugud (roosad punktid). Punktid asuvad pinnamudeli lõikamiseks kasutatud polügooni (roheline ala) sees.

## 4 Tulemused

### 4.1 Puurimine

Puurimise tulemused on toodud tabelis 3. Suurimad turbapaksused mõõdeti puuraukudes PA-6 (2.05 m) ja PA-7 (2.20 m). Turba paksused on samas suurusjärgus maardla aruandes (Allikvee & Orru, 1979) aruandes kirjeldatud maksimaalsete paksustega (2.4 – 2.5 m).

Turvas lasub heledal sapropeelil. Sapropeeli kihi paksus uuringuala puuraukudes on 0.25–1.40 m, mis on võrreldav, kuid natuke suurem kui 1979. a aruande keskmine 0.68 m. Puuraukude järgi suureneb sapropeeli kihi paksus loodest kagu suunas.

Sapropeeli lamamiks on järvesavi või liiv, mille ilmutussügavus on suurim uuringuala lõunapoolsel alal. Sapropeelis leidub teokarpe ning järvesavi on kohati liivakas, sisaldades kivide fragmente. Käesolevas töös on kirjeldatud helelda sapropeelina kogu turba ning järvesavi vahele jäävat lasundit. Allikvee & Orru kirjeldavad 1 m paksust sapropeelikihti, mis lasub kuni 3.5 m järvelubjakihil, mis omakorda lasub järvesavil. Antud töös ei eristatud järvelubja ja sapropeeli kihipind.

Tabel 3. Puuraukude asukoha koordinaadid ja kirjeldused			
Puurauk	L-EST 97 koordinaadid	Sügavus (m)	Kirjeldus
PA-1	X:6495369 Y:654394	0.00 – 0.30	Turbamuld
		0.30 – 1.70	Hästilagunenud turvas (puidutükkidega)
		1.70 – 2.80	Hele sapropeel (molluskifossilidega)
		2.80 – 5.70	Järvesavi (alumises osas liiva ja kruusa)
PA-2	X: 6495505 Y: 654147	0.00 – 0.25	Turbamuld
		0.25 – 1.40	Hästilagunenud mineraliseerunud turvas
		1.40 – 2.50	Hele sapropeel (molluskifossiilidega)
		2.50 – 4.05	Järvesavi (allpool fossiilid kaovad, savi tihedam)
PA-3	X: 6495815 Y: 654094	0.00 – 0.25	Turbamuld
		0.25 – 1.65	Hästilagunenud mineraliseerunud turvas
		1.65 – 2.25	Hele sapropeel (molluskifossiilidega)
		2.25 – 2.45	Liiv
PA-4	X: 6495834 Y: 653938	0.00 – 0.20	Turbamuld
		0.20 – 1.60	Hästilagunenud turvas
		1.60 – 1.85	Hele sapropeel
		1.85 – 2.45	Liivakas järvesavi
PA-5	X: 6495653 Y: 653721	0.00 – 0.60	Turbamuld
		0.60 – 2.05	Hästilagunenud turvas
		2.05 – 2.75	Hele sapropeel
		2.75 – 4.40	Järvesavi (ülal liivakas, all tihe)
PA-6	X: 6495503 Y: 653873	0.00 – 0.20	Turbamuld
		0.20 – 2.25	Hästilagunenud turvas
		2.25 – 3.35	Hele sapropeel (molluskifossiilidega)
		3.35 – 6.00+	Järvesavi (allpool kivi fragmendid)

PA-7	X: 6495098	0.00 – 0.40	Turbamuld
	Y: 654180	0.40 – 2.60	Hästilagunenud turvas
		2.60 – 4.00	Hele sapropeel (molluskifossiilidega)
		4.00 – 6.00	Järvesavi

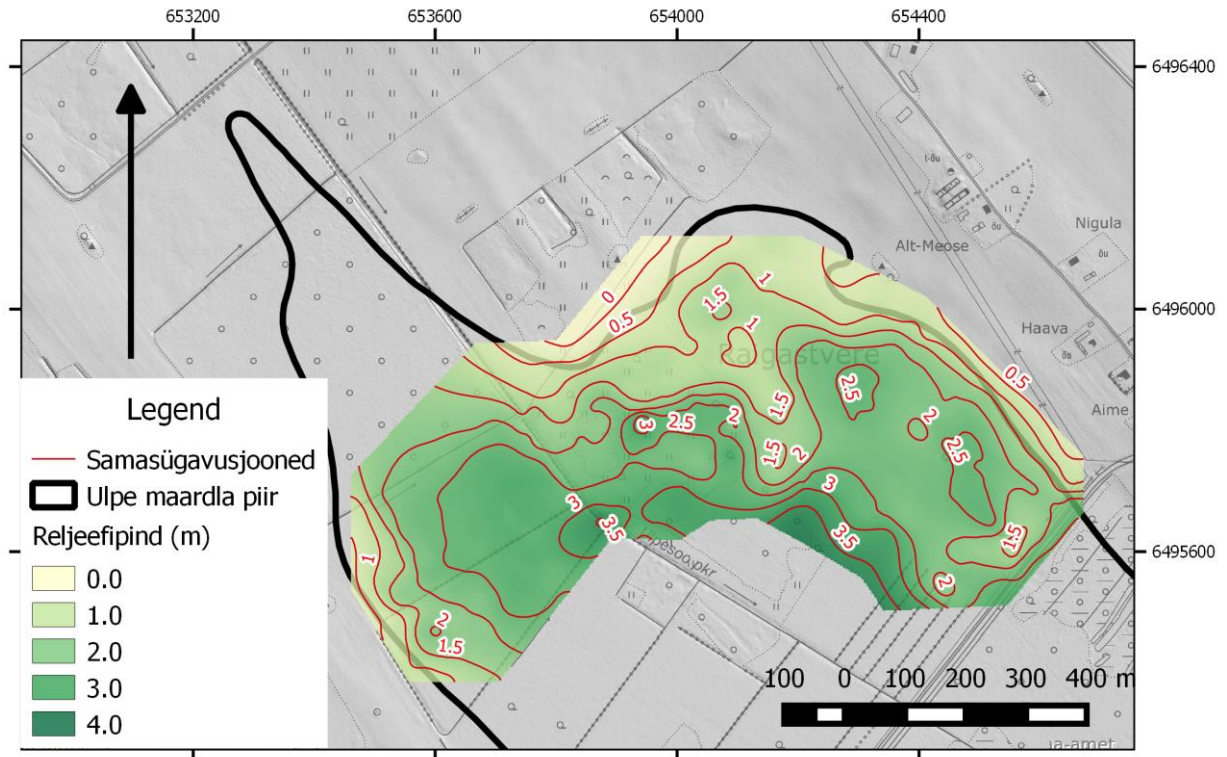
## 4.2 Georadar

Sotsjärve nõo pikitelje ja Ulpesoo peakraaviga ristuvate profiilide asukohad on näidatud joonisel 4. Kuna üle kraavi ei olnud võimalik profileerida, asuvad osad profiilid (1,3,5,7,9,10) sellest kirdes ning ülejäänud (2,4,8,11) edelas. Profileerimistulemused on näidatud 11 radargrammil (lisad 1-11). Kõiki radargramme on kirjeldatud kahe joonise abil: esimesel on näidatud tulemus pärast filtreerimist ning võimendamist, teisele on lisatud autori poolt annotatsiooni jooned (peegelduspinnad). Kõige sagedamini suudeti piiritleda sapropeeli – järvesavi vaheline kontakt (ca 2000 punktis). Lõunapoolsete profiilide üksikutel lõikudel suudeti 100 Mhz antenniga kontuurida ka madalsooturba lamav pind (ca 300 punktis). Interpretatsiooniga radargrammidele on lisatud ka profiilidel või nende ligiduses asuvate puuraukude kirjeldused tulpadena.

Loode-kirde suunas levib profiilidel 1,3,5 sapropeeli-savi kontaktpind suhteliselt lainjalt ning tasandub profiilil 7. Varasem liigestatud reljeefipind asendub tasasega, mis süveneb järsult Ulpesoo peakraavi juures. Samas suunas levib profiilidel 2,4 sapropeel–savi pind tasaselt. Profiilil 6 ei ole ta eristatav, muutudes profiilil 8, 11 taas künklikuks. Sama morfoloogiat järgib üldjoontes ka turba lamav pind.

## 4.3 Pinnamudel

Pinnamudeli põhjaosas on näha 200 m pikkust loode-kagu suunalist seljandikku sügavusel 1-1.5 m, mis sügavneb võrdlemisi järsult 3-3.5 m-le. Lääne-lõunaosas toimub ühtlane sügavnemine 3.5 m-le, sügavnemistrendiga Ulpesoo peakraavi suunas. Idaosas on sügavused vahemikus 1-2.5 m.



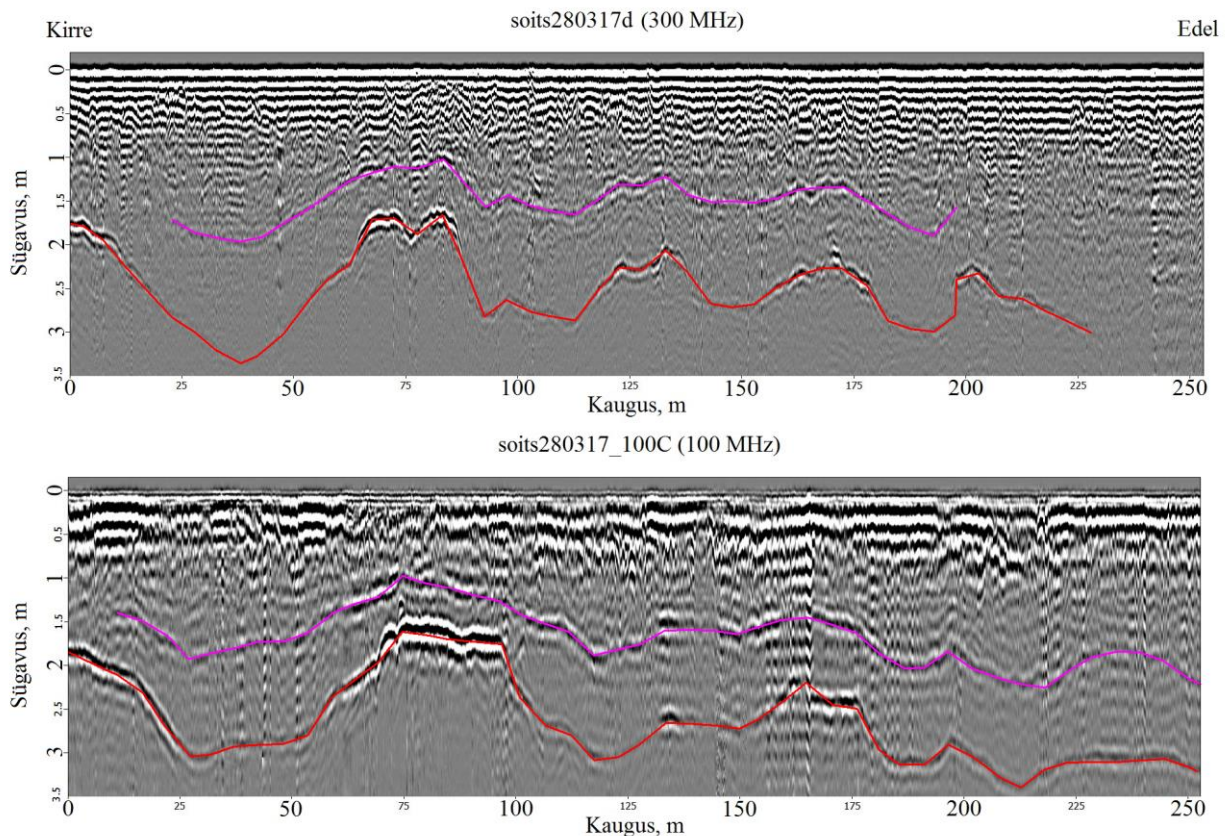
Joonis 6. Ebakorrapäraste kolmnurkade võrgustiku (*Thin plate spline (tin)*) abil interpoleeritud sapropeeli-järvesavireljeedipind. Algandmeteks kasutati joonisel 5. kujutatud andmepunkte.

## 5 Arutelu ja järeldused

Käesoleva töö käigus saadi aru, et Soitsjärve nõos ei iseloomusta georadari elektromagnetiliste lainete peegeldused moreeni pealispinda, vaid moreenil lasuva glatsiolimnilise päritoluga savi ja selle peal paikneva sapropeelilasundi kontakti. Allikvee ja Orru (1979) puuraukudes on kirjeldatud ainult moreenil lasuvaid settekihte, ka käesoleva töö käigus ei jõutud puurimise käigus moreenikihini. Pirruse ja Rõugu (1979) andmetel on litoloogiline üleminek Hilis-Pleistotseeni setetelt Holotseeni sapropeelile ja järvelubjale järsk. Arvatavasti seesama muutus väljendubki radargrammidel kõige paremini eristuva peegelduspinnana. Kuna madalsooturba üleminekul sapropeeliks ei ole keskkondade füüsikalistes omadustes nii suurt kontrasti, ei suudetud 300 MHz antenniga saadud radargrammidel turba lamavat pinda üldjuhul eristada. Siiski on uuringuala lõunaosas

kohati jälgitavad kaks peegelduspinda: turvas-sapropeel ja sapropeel-savi (joonis 7). 100 MHz antenniga saadud lainepeegeldused on üldiselt intensiivsemad kui 300 MHz antenni korral, pindade kulgemist on võimalik jälgida kaugemale ja sügavamale. Ehkki 100 MHz antenniga saavutati suurem uuringusügavus, ilmnesid mitmed 100 MHz antenni puudused:

- (1) keerulisem profileerida (komplektis on 2 omavahel rihmadega ühendatavat antenni, mis on rasked ning takistuste nagu kraavi ületamisel vajalik arvuti ja üksteise küljest eemaldada),
- (2) rohkem müra radargrammidel (mida on siiski teatud piirini võimalik eemaldada),
- (3) Peegeldustelt on raske eristada detailsemaid sisestruktuure.



Joonis 7. Radariprofileid soits280317d (300MHz) ja soits280317\_100C (100MHz) Asukoht joonisel 3.

Kaks profiili soits280317\_100C (100 MHz) ning soits280317d (300 MHz) on tehtud üksteisest kraavi vastaskaldal ning mõlemal joonistusid turba kui ka järvesetete piirjooned

välja. Radargrammidel jälgitav sapropeeli ja savi kontaktpind pole ühtlane. Uuringuala põhjaosas (lisad 1,3,5) eristuvad kõrgendikud ja nõod, pind on tasasem ida pool (lisad 7,9). Teistsugune on olukord Ulpesoo peakraavist edelas. Lisadel 2,4 on jälgitav tasane reljeef, mis on uuringuala lõunaosas (lisad 8,10) rohkem liigestatud. Seega sapropeeli-savi reljeefipind Ulpesoo peakraavist kirdes ning edelas on justkui peegelpildis. Nii kirde kui edelapoolsetel radargrammidel on jälgitavad terrassilaadsed vormid (lisad 2,3,5,6,7,9), kuid need ei ole selgepiirilised, välja arvatud uuringuala ida/kirde osas. Terrasside absoluutkõrgused jäävad enamasti vahemikku 2–3 m. Ülper (2007) arvas nende tekkepõhjuseks toleleagel Soitsjärve veetasemel mõjuvat lainetustegevust. Siiski jääb kahtlus nende olemusest, tegu võib olla nõlvadega, mille morfoloogia on tingitud liustiku ebaühtlasest sulamisest. Selle täpsemaks mõistmiseks tuleks uurida detailsemalt terrasside levikut ning ühtivust piki nõgu. Pirrus ja Rõuk (1979) on märkinud nõgu täitvate setete vanuselisel liigestamisel, et veetasemetele osutavaid kaldamoodustisi ja selgeid astanguid esineb Soitsjärve ümbruses tagasihoidlikult.

Järvesavi ja sapropeeli kõrval esines ka puuraugus 3 liiva. Liiva täheldati ka praktikumide töödes. Liiva esineb võrdlemisi väikese kihina 0.05-0.20+ m. Liiva sissekanne võib olla seotud jäävaheaegade või jääaja järgse liustiku sulamisega.

Pirrus ja Rõuk (1979) kirjeldavad piki Soitsjärve nõgu Raigastvere voore poole kulgevat ebaühtlase sügavusega kitsast vagumust. Kõrgemate ja sügavamate piirkondade vaheldumise järgi eeldavad nad, et tegemist on surveliste jääsulavete poolt tekitatud uurdeoruga, mille laius on 80 m ning sügavus kõrgemas kirdeservas 12 m. Radargrammidel on Raigastvere voore pool jälgitavad kõrgemate ning sügavamate peegelduste vaheldumine lisal 1, kagu pool (lisa 5) on need veelgi silmatorkavamad.

Lisaga 7 sarnase tulemuse sai ka Ülper (2007), kuid tema töös on kasutatud oluliselt väiksemaid permitiivsuse väärtusi (11-23) kui käesoleva töö autori poolt (59).

Nii 2007. a kui 2017. a radargrammidel on kujutatud sama peegelduspinda: terrassilaadset struktuuri, mis süveneb Ulpesoo peakraavi kõrval 100 m laiuseks ja kuni 4 m sügavuseks vagumuseks. Pinnamudel (joonis 6) osundab piki nõgu kulgevale loode-kagu suunalisele seljandikule, mille Raigastvere poolsel küljel asub süvenev org. Org tasandub suuremaks terrassilaadseks struktuuriks. Turba ja sapropeelikihtide all eristuv seljandik on tõenäoliselt

loodest Soitsjärve nõkku siseneva voore jätk. Radargrammidel ja pinnamudelil eristub küll org, kuid mitte Pirruse ja Rõugu (1979) poolt kirjeldatud ulatuses.

## **6 Tänuavaldused**

Soovin tänada oma juhendajat Ivo Sibulat ning Jüri Pladot, kes aitasid mind igati nõuga töö kirjutamisel ning jõuga välitööde käigus. Hea tuju püsis isegi siis, kui soppa taevast alla sadas.

## **7 Summary in English**

In Soitsjärve depression, area of Ulpe peat deposit fieldwork was conducted with the ground penetrating radar, 22.7 km in length, and 7 boreholes were made. Data collected from profiles and boreholes was used to produce a area model of the survey areas sapropel-clay surface. Incentive for this study was older works which focused on the north-west area of Soitsjärve depression posed a hypothesis of a possible groove made by Late Pleistocene ice meltwater. Density of radar profiling was many times greater than previous works, which provides detailed data for the depressions groundrelief.

Soitsjärve depression is situated between drumlins with extensions which extend into the depression, where they are covered by the Late Glacial and Holocene lake- and bog sediments. There appear terrace like structures but clear microdrumlins were not distinguishable. On profiles best observed was the sapropel-clay surface. In this study moraines were not reached by ground penetrating radar nor boreholes.

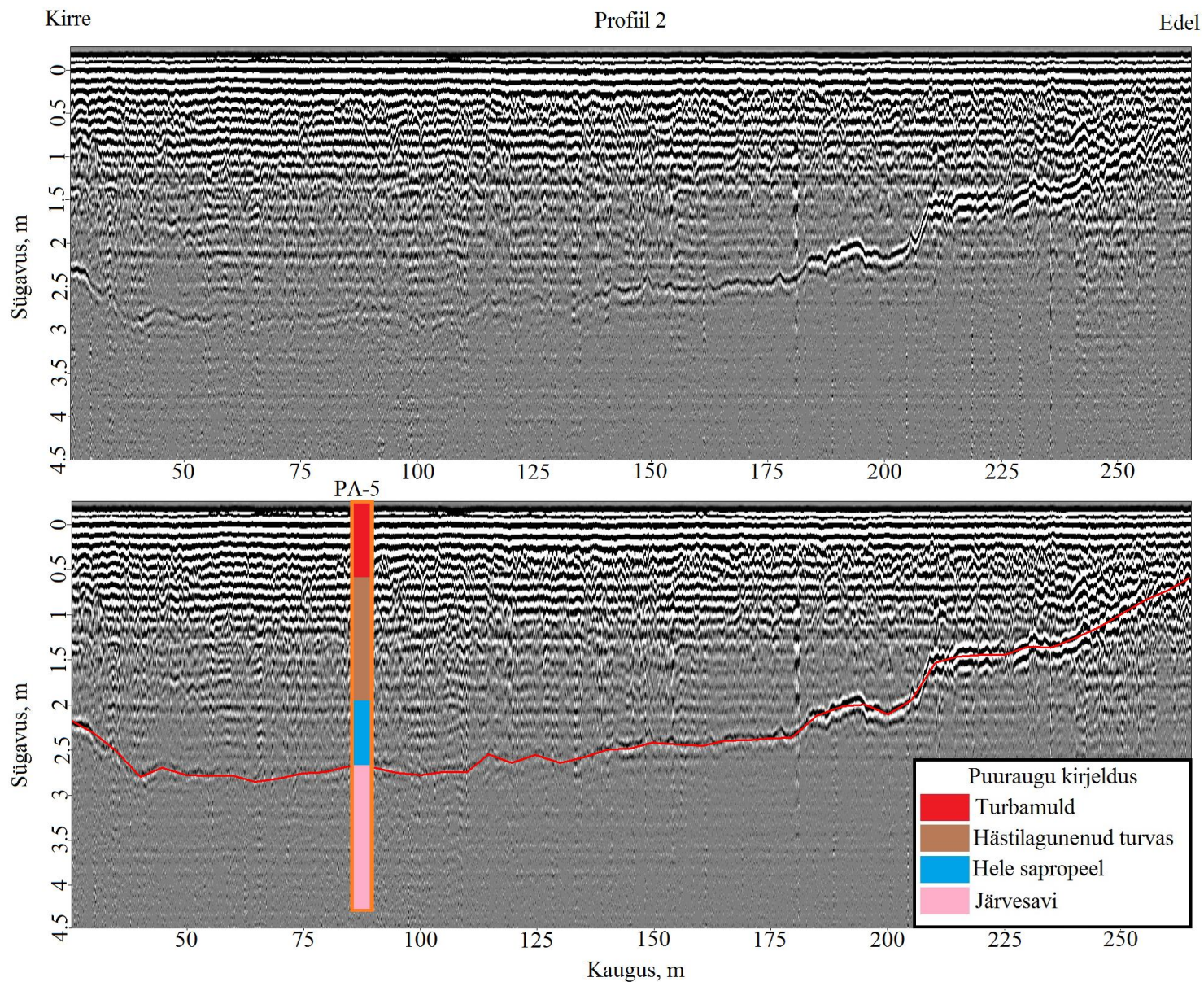
## 8 Kirjanduse loetelu

- Allikvee, H., & Orru, M. (1979). *Jõgeva rajooni turbamaardlate otsingulis-uuringuliste tööde aruanne*. Tallinn: Geoloogia Valitsus.
- Arold, I. (2005). *Eesti Maastikud*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Campos, J., Silva, A., Slater, L., Nanni, M., & Vidal-Torrado, P. (2016). Stratigraphic control and chronology of peat bog deposition in the Serra do Espinhaço Meridional, Brazil. *CATENA*, 143, 167-173.
- Daniels, D. (2004). *Ground Penetrating Radar (2nd edition)*. London: The Institution of Electrical Engineers.
- Donato, G., & Belongie, S. (2002). Approximation Methods for Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps. Redwood City: G.Donato: Digital Persona,INC.
- Hänninen, P. (1992). *Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations*. Geologian Tutkimuskeskus.
- Keskkonnaagentuuri kodulehekülg*. (Kasutatud 07.05.2017).  
[http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?state=4;-1158249072;est;eelisand;;&comp=objresult=ala&obj\\_id=1136442694](http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?state=4;-1158249072;est;eelisand;;&comp=objresult=ala&obj_id=1136442694).
- Maa-ameti Geoportaal*. (12. Mai 2017. a.). Allikas:  
[http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGIS?app\\_id=UU213&user\\_id=at&bbox=651641.090902914,6493625.317,657291.139097086,6496684.213&setlegend=UUKAT2\\_213=0,SALUS\\_PK\\_213=0,SALUS\\_RELJEEF\\_213=1&LANG=1](http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGIS?app_id=UU213&user_id=at&bbox=651641.090902914,6493625.317,657291.139097086,6496684.213&setlegend=UUKAT2_213=0,SALUS_PK_213=0,SALUS_RELJEEF_213=1&LANG=1)
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66, 261-330.
- Orru, M. (1997). Peat. In *Geology and Mineral Resources of Estonia* (Raukas, A., Teedumäe, A., eds). *Estonian Academy Publishers*, 337-346.
- Paz, A., Alcalá, F., Carvalho, J., & Ribeiro, L. (2017). Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research. *Science of The Total Environment*, 595, 868-885.
- Pirrus, R., & Rõuk, A. M. (1979). Uusi andmeid Soitsjärve nõo geoloogias. rmt: A. Raukas, *Eesti NSV saarkõrgustike ja järvenõgude kujunemine*. (lk 118-144). Tallinn: Valgus.
- Plado, J. (2017). *Autori suuline vestlus*. Tartu.
- Plado, J., Sibul, I., Mustasaar, M., & Jõeleht, A. (2011). Ground-penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 31-42.
- Rattas, M. (2004). *SUBGLACIAL ENVIRONMENTS IN THE FORMATION OF DRUMLINS - The case of the Saadjärve Drumlin Field, Estonia*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

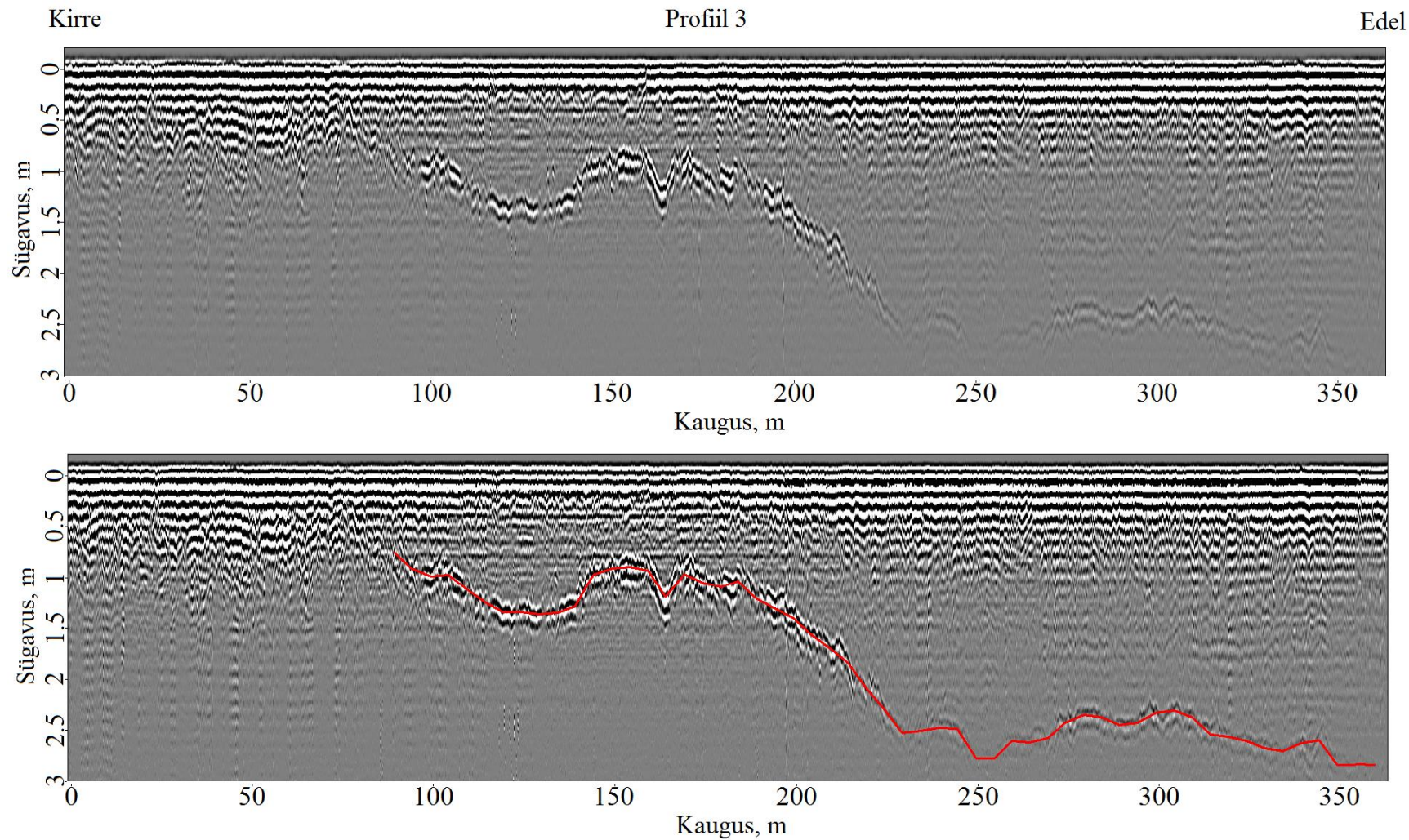
- Rattas, M., & Kalm, V. (2001). *LITHOSTRATIGRAPHY AND DISTRIBUTION OF TILLS IN THE SAADJÄRVE DRUMLIN FIELD, EAST-CENTRAL ESTONIA*. Tartu: Institute of Geology, University of Tartu.
- Rattas, M., & Kalm, V. (2004). Glaciotectonic deformation patterns in Estonia. *Geological Quarterly*, 15-22.
- Rosentau, A., Hang, T., & Kalm, V. (2007). Water-level changes and palaeogeography of proglacial lakes in eastern. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 85-100.
- Slater, L. D., & Reeve, A. (2002). Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Society of Exploration Geophysicists*, 365-378.
- Stokes, C., Spagnolo, M., & Clark, C. D. (2011). The composition and internal structure of drumlins: complexity, commonality and implications for a unifying theory of their formation. *Earth Science Reviews*, 107, 398-422.
- Tšugai, A., Plado, J., Jõelet, A., Kriiska, A., Mustasaar, M., Raig, H., . . . Rosentau, A. (2014). Ground-penetrating Radar and Geological Study of the Kudruküla Stone Age Archaeological Site, Northeast Estonia. *Archaeological Prospection*, 21, 225-234.
- Ülper, L. (2007). SOITSJÄRVE NÕO LÄBILÕIGE GEORADARI UURINGUTE ALUSEL. *Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geoloogia Instituut*.

## **9 Lisad**

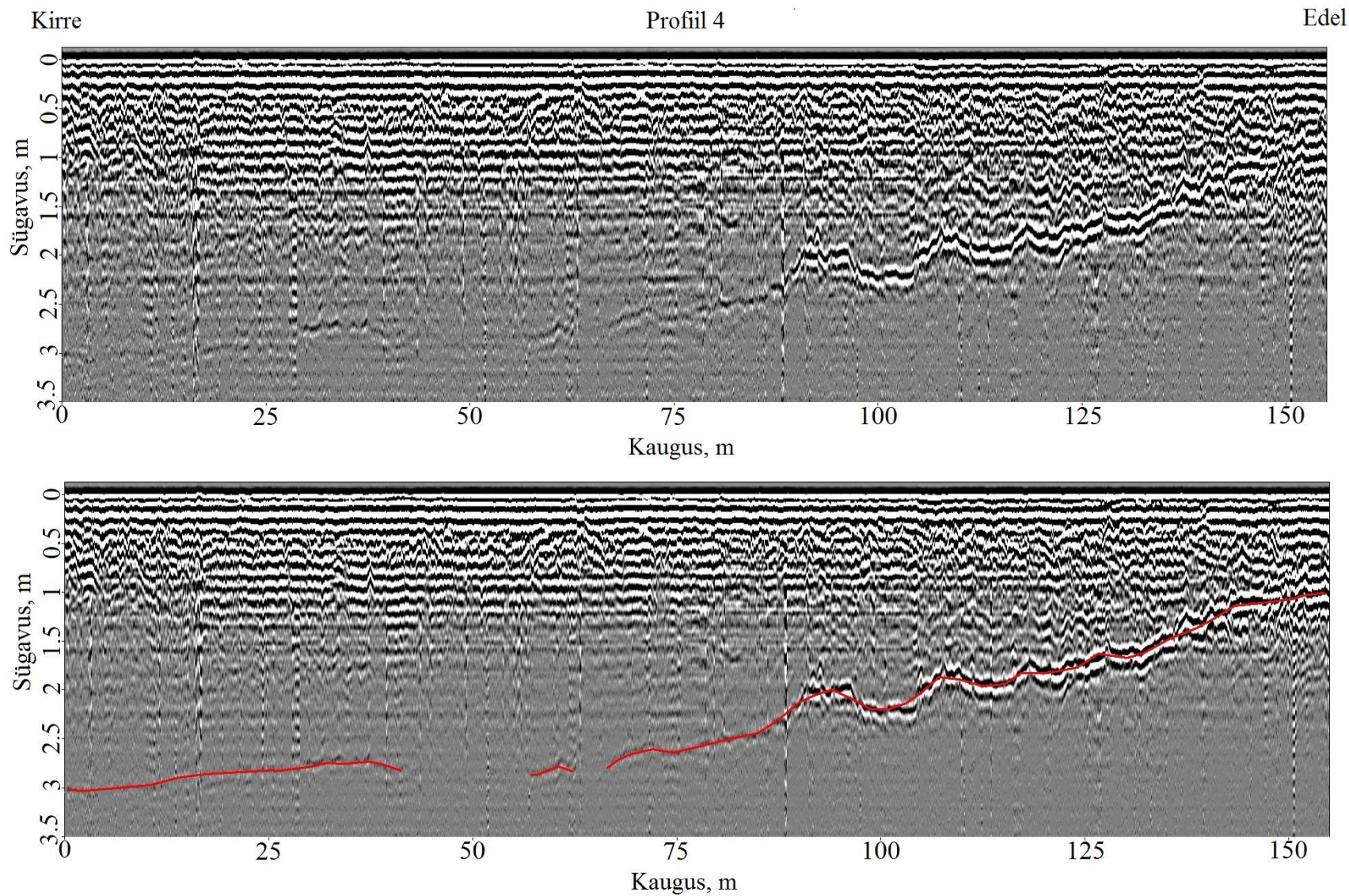




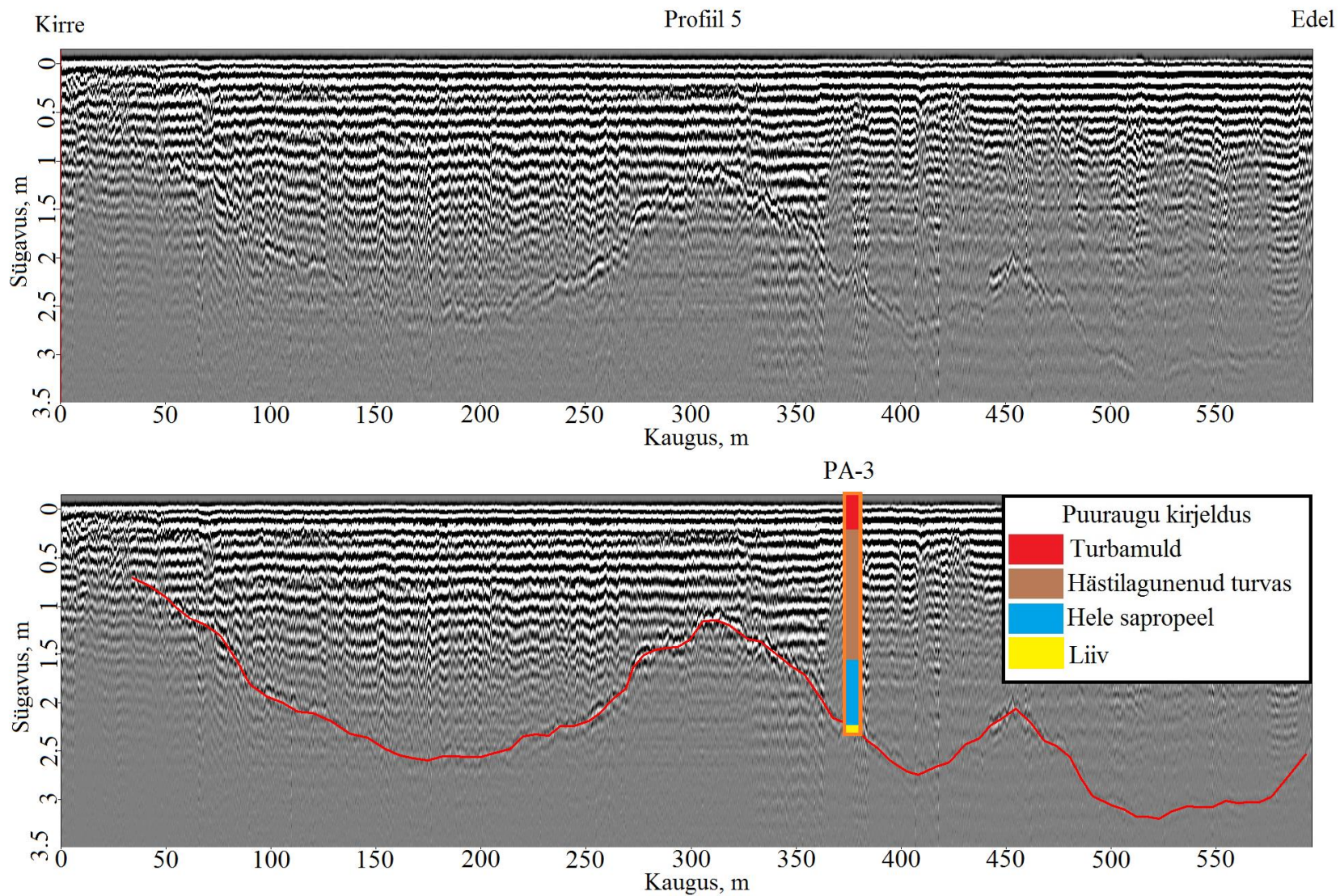
Lisa 2..  
 Radargramm piki  
 profiili 2 (asend vt  
 joonis 2) on  
 radargrammi 1  
 (Lisa1) jätk  
 Ulpesoo peakraavist  
 edela suunas.  
 Alumisele joonisele  
 on lisatud autori  
 interpretatsioon  
 (sapropeeli-savi  
 kontaktpind, mida  
 on kujutatud punase  
 joonega) ja  
 profiilile rajatud  
 puuraug PA-5.  
 Sapropeeli-savi  
 pind tõuseb  
 ühtlaselt edela  
 suunas, ligikaudu  
 200 m profiili  
 algusest paikneb  
 väike vagumus ja  
 0.5 m kõrgune  
 terrass.



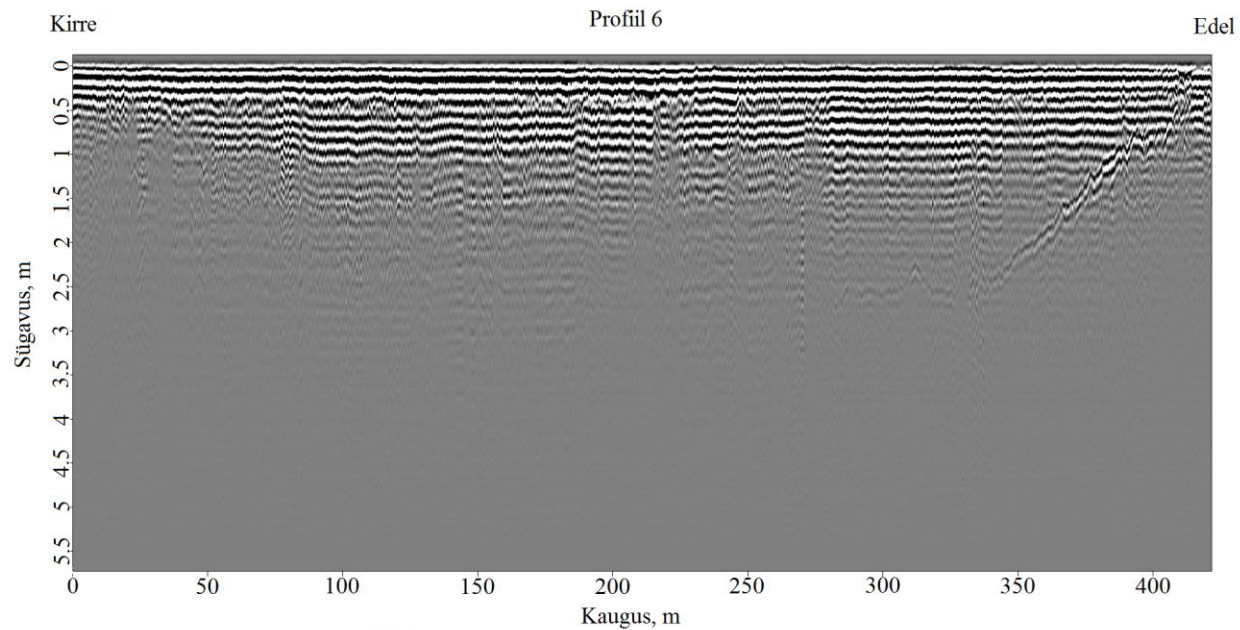
Lisa 3. Radargramm piki profiili 3 (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega). Sarnaselt radargrammile 1 (Lisa 1) langeb peegelduspind üldiselt edela suunas, vahemikes 140-220 ja 270-320 eristuvad kaks kõrgemat piirkonda.



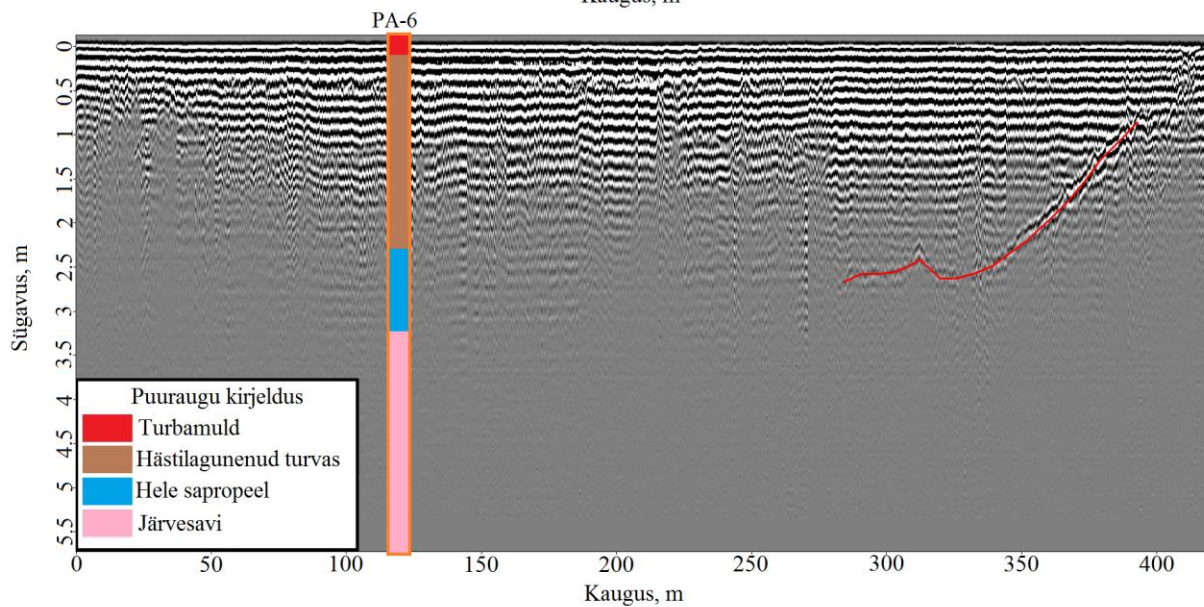
Lisa 4. Radargramm piki profiiki 4 (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega). Sarnaselt radargrammile 2 (Lisa 2) tõuseb peegelduspind ühtlaselt edela suunas.

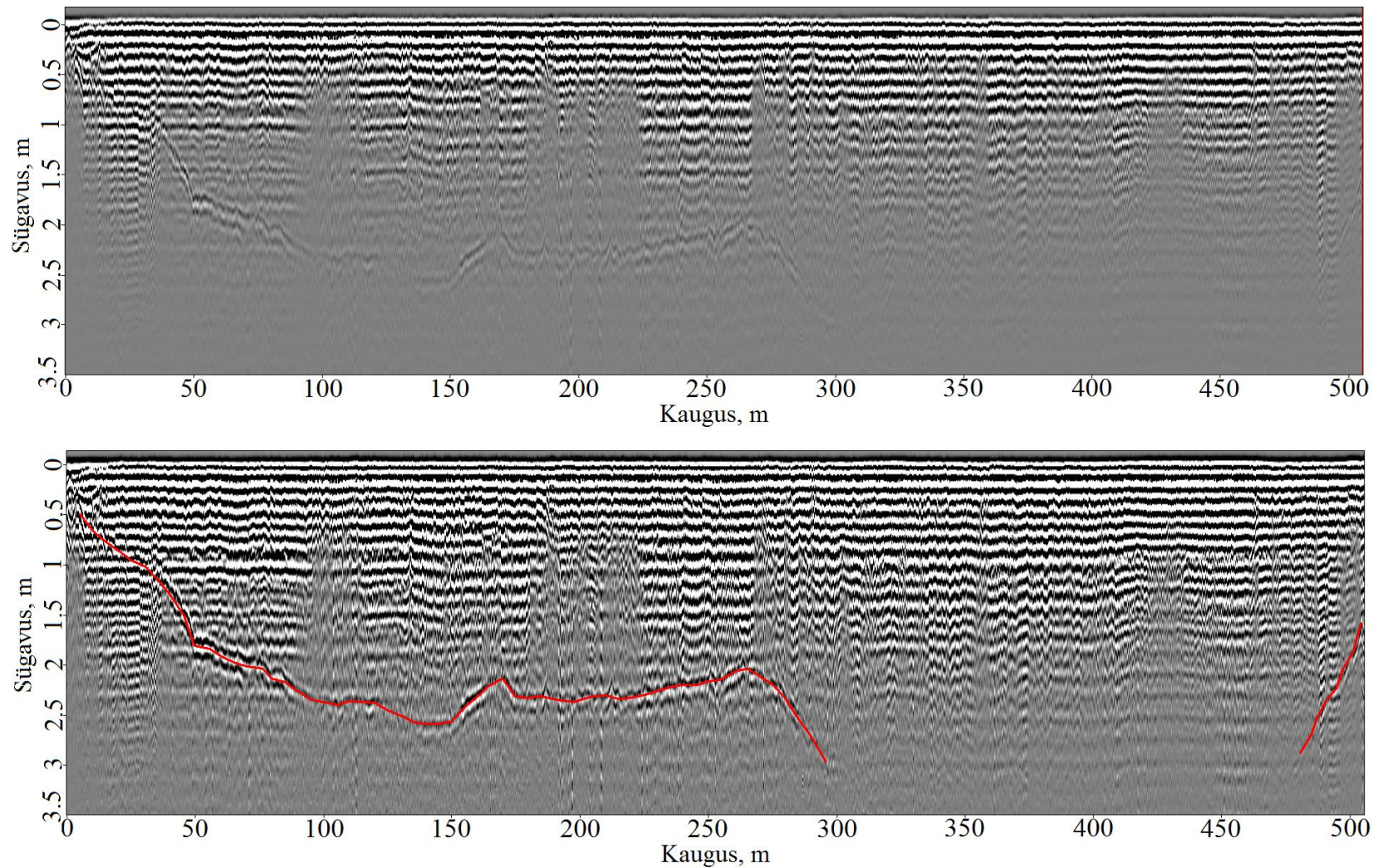


Lisa 5. Radargramm piki profiili 5 (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega) ja profiilile rajatud puurauk PA-3. Samaselt radargrammile 3 (Lisa 3) jätkuvad kaks seljandikku, kirdepoolsema suhteline kõrgus on ligikaudu 1.5 m.

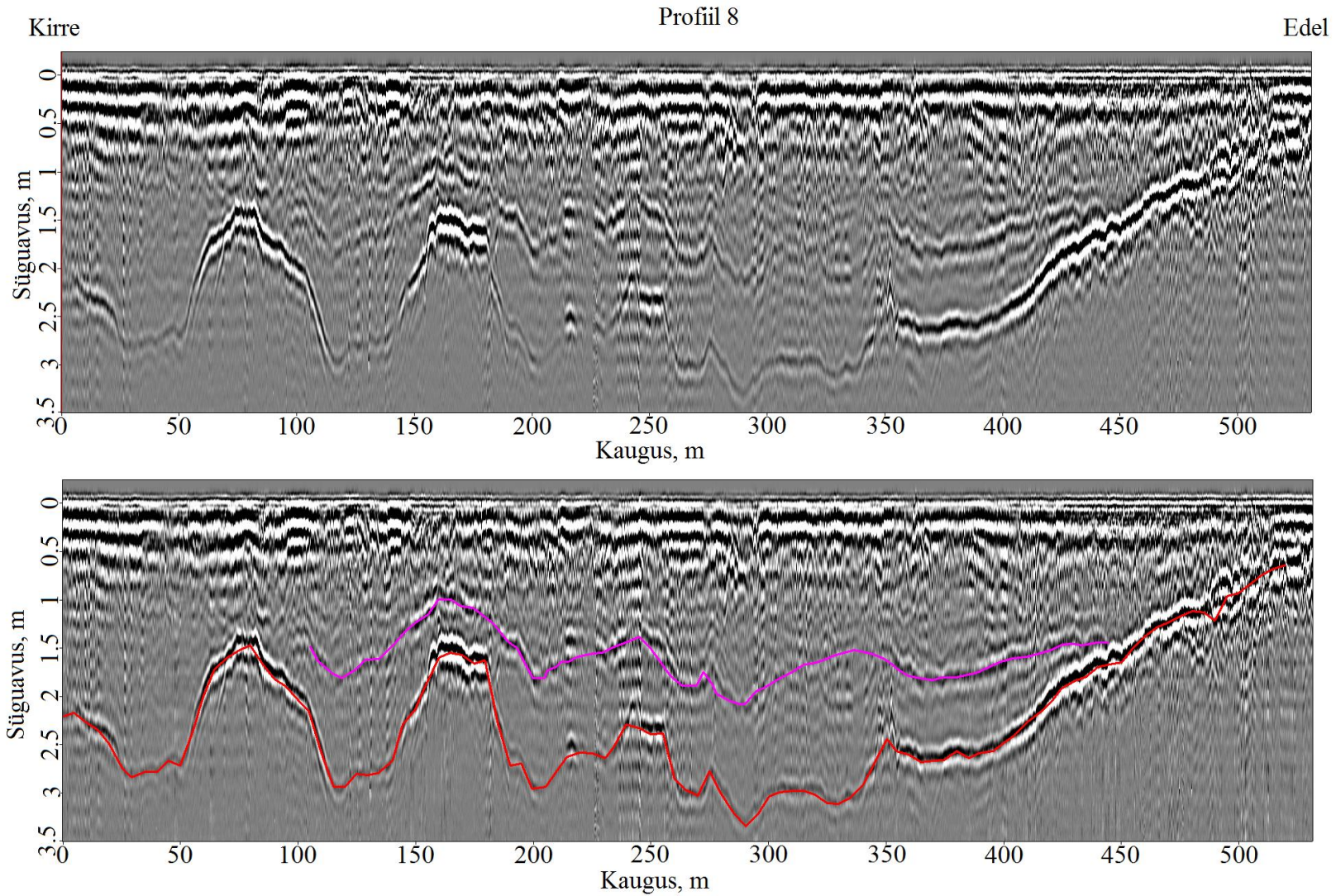


Lisa 6. Radargramm piki profiili 6, mis asub profiilist 4 kagus (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega) ja profiilile rajatud puuraug PA-6. Sapropeeli - savi pind pole sügavamal kui 2.7 m eristatav. Puuraugus PA-6 paikneb kontaktpind 3.35 m sügavusel (Tabel 2).

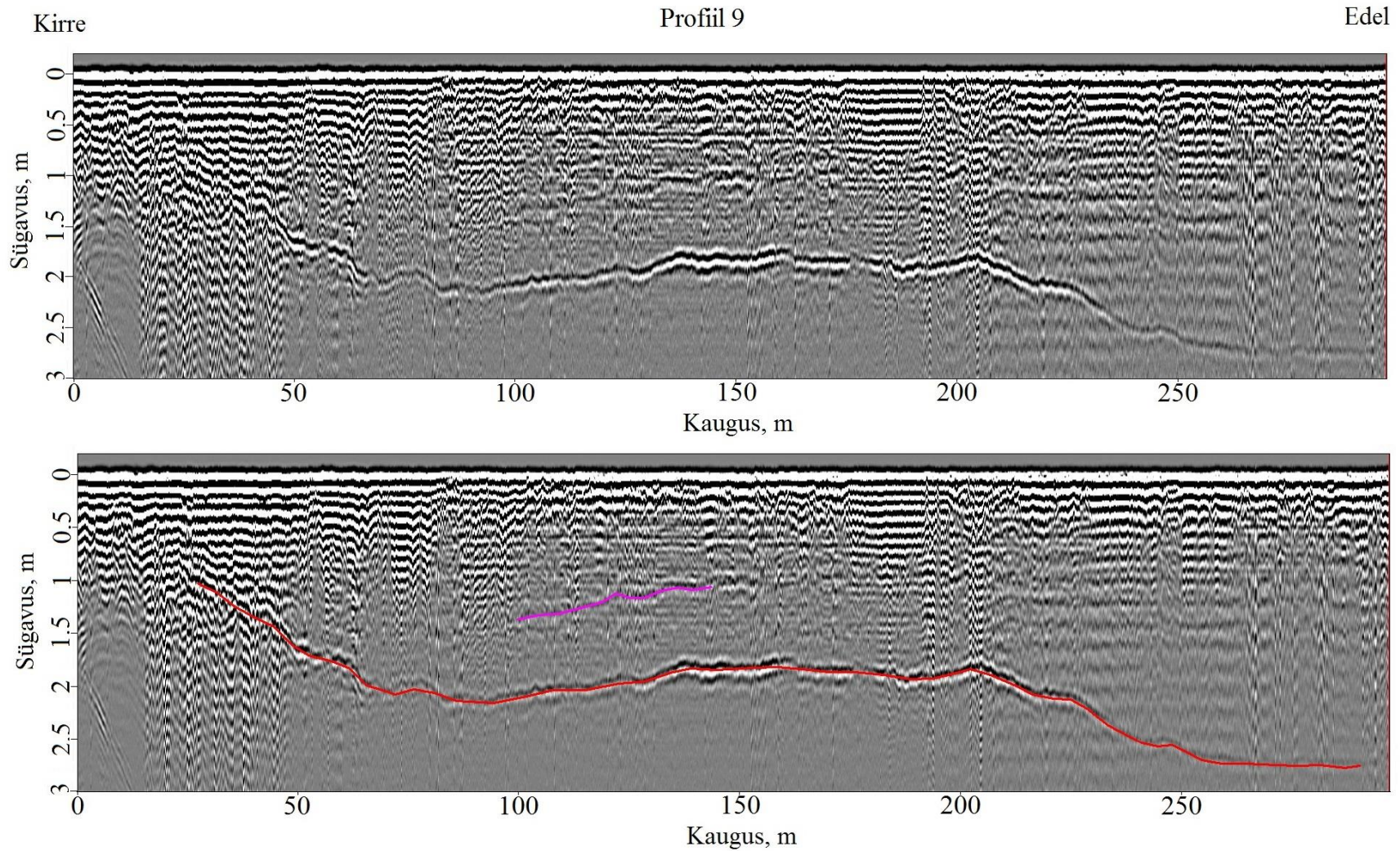




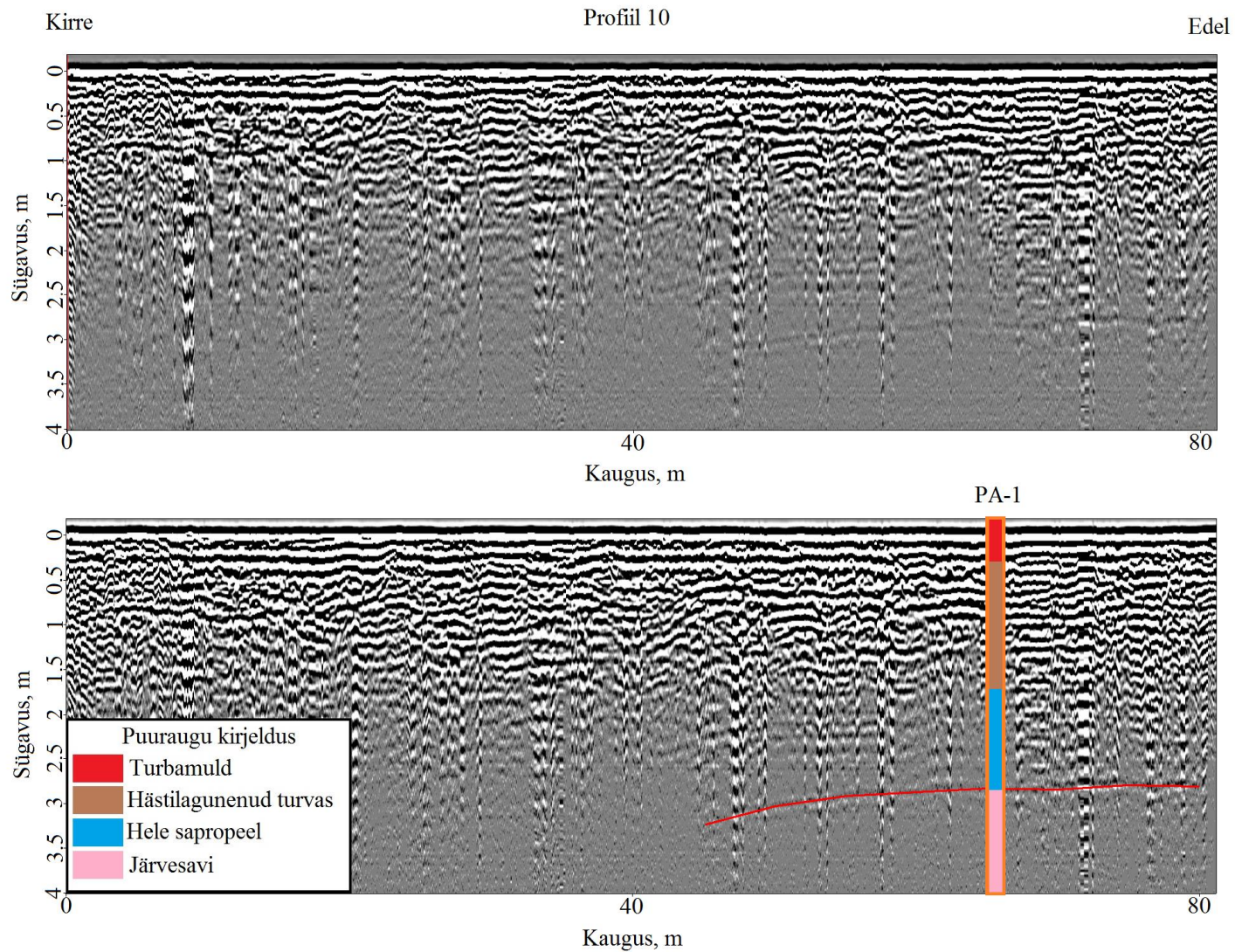
Lisa 7. Radargramm piki profiili 7, mis asub profiilist 5 kagus (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega). Radargrammidel 1, 3 ja 5 (Lisad 1, 3 ja 5) jälgitavad seljandikud on asendunud tasasema reljefiga, alates 300 profiili algusest (sügavusest 3 m) pole sapropeeli-savi kontaktpind enam eristatav.



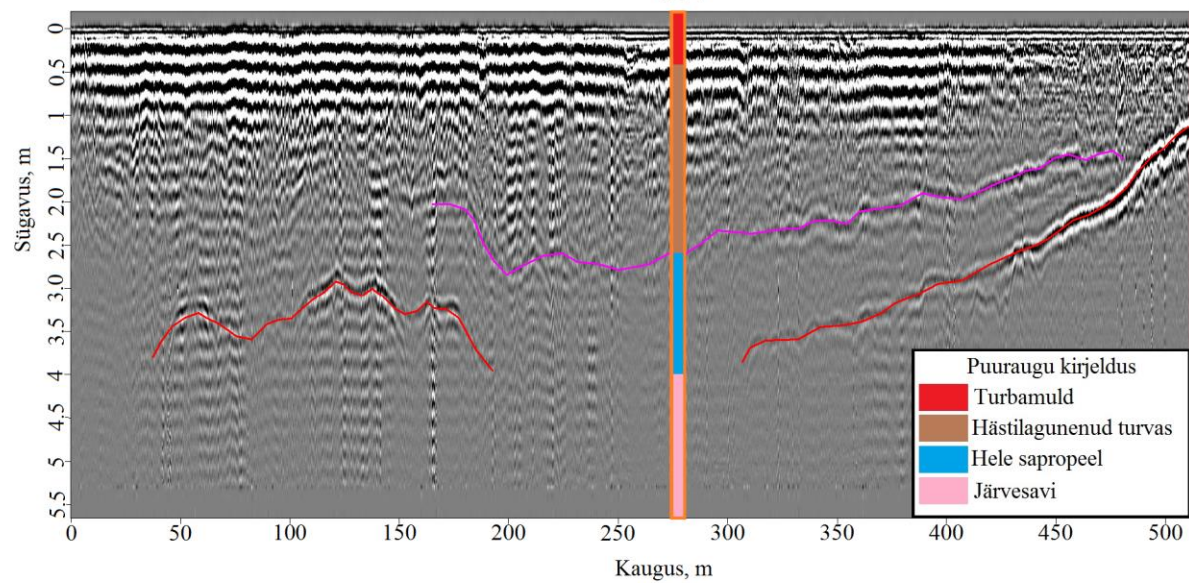
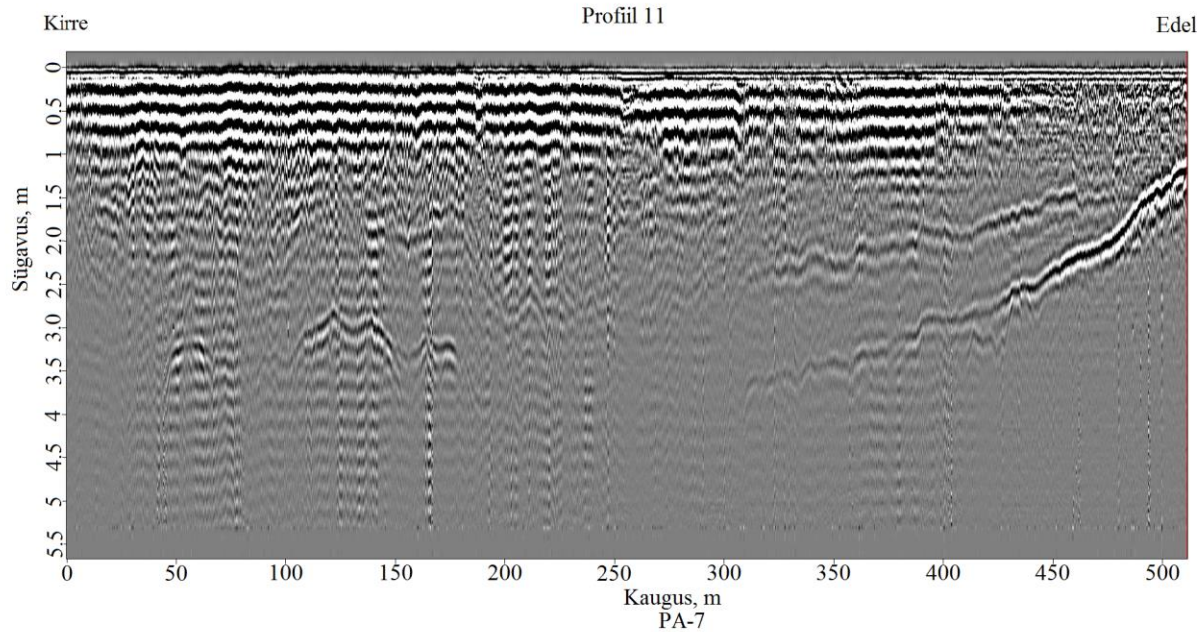
Lisa 8. Radargramm piki profiili 8 (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega ja turba-sapropeeli pind lilla joonega). Sapropeeli -savi pind on liigestatud mitme seljandikuga, neist suuremate suhteline kõrgus on 1.5 m. Turba lamav pind järgib üldjoontes sapropeeli lamavat pinda, olles siiski tunduvalt tasasem.



Lisa 9. Radargramm piki profiili 9, mis kulgeb kraavide vahel profiilist 7 ligikaudu 200 m kagus (asend vt joonis 2). Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega ja turba-sapropeeli pind lilla joonega). Üldjoontes laskub sapropeeli-savi kontaktpind edela suunas, olles tasasem vahemikus 80-200 m. Turba lamav pind, mis eristub vahemikus 125-180 m järgib sapropeeli-savi pinna reljeefi.



Lisa 10. Radargramm piki profiili 10 (asend vt joonis 2)  
 Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega) ja profiilile rajatud puurauk PA-1. Jätkub radargrammil 9 (Lisa 9) jälgitava pinna aeglane laskumine edela suunas.



Lisa 11. Radargramm piki profiili 10 (asend vt joonis 2) Alumisele joonisele on lisatud autori interpretatsioon (sapropeeli-savi kontaktpind, mida on kujutatud punase joonega ja turba-sapropeeli pind lilla joonega) ja profiilile rajatud puuraug PA-7. Sapropeeli-savi pinnal on seljandikm suhtelise kõrgusega 1 m. Turba lamav pind järgib üldjoontes sapropeeli lamavat pind.

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

Mina, Kalle Kiik

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

Soitsjärve nõo (Ulpe maardla) põhjasetete levik georadari järgi

mille juhendaja on Ivo Sibul

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 **19.05.2017**