

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Tavo Ani

**Kauru soo (Pajusi vald, Jõgevamaa) läbilõige georadari ja
puurimiste andmetel**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Jüri Plado

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2014

Sisukord

1	Sissejuhatus	3
2	Valdkonna ülevaade	4
2.1	Kauru soo ülevaade	4
2.2	Georadar	5
3	Materjal ja metoodika	7
3.1	Radaritööd soos	7
3.2	Puurimised ja proovide võtmine	9
3.3	Laboratoorsed tööd.....	11
3.4	Permiitivsuse ja elektromagnetlaine kiiruse arvutamine.....	12
4	Tulemused ja arutelu	13
4.1	Laboratoorsete tööde tulemused:	13
4.2	Puurimissügavuste võrdlus radariandmetega	17
4.3	Georadari andmed ning interpretatsioon puurimistulemustega:	18
5	Kokkuvõte ja järeldused	22
6	Tänuavaldused	23
7	Cross-section of Kauru bog (Pajusi parish, Jõgevamaa) according to ground-penetrating radar (GPR).....	24
8	Kasutatud kirjanduse loetelu	25

1 Sissejuhatus

Bakalaureusetöö käigus uuritakse ja koostatakse läbilõige Kauru soost georadari meetodil. Töö eesmärk on fikseerida selle soo praegune olukord ning võimalusel kirjeldada veerežiimi ja põhjaveetasest. Pikemas plaanis võimaldavad käesoleva töö tulemused hinnata raba arengut. Olukorra fikseerimise alla kuulub soo kirjeldamine ning arengutaseme ja turba paksuste määramine.

Kauru soo kirjeldamine eelnevates teostes on olnud vähene. Seoses projekti „Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks“ välitöödega septembrikuus, teostati Kauru soos georadari uuringud (Jüri Plado, Argo Jõelet, Tavo Ani) ja võeti kaheteistkümnest puuraugust kokku 184 proovi (Marko Kohv, Kristjan Rooni, Tavo Ani), mille põhjal määrati veesisaldused ja turba liigid. Saadud andmetele tuginedes määratakse turbaliigid, nende lagunemisaste, koostatakse läbilõige Kauru soost ja ühildatakse georadari andmed puuraukude omadega. Ühildades puuraukude andmed georadari andmestikuga, saab hinnata radari andmete täpsust. Töös eeldatakse, et georadari meetodiga on võimalik määrata turba paksus ja teha seda täpsemalt, kui suudetaks puurimisandmetele tuginedes. Varasemalt on teostatud turbamaardlate uuringuid georadariga Rahivere turbamaardlas, millest järeldus, et georadariga erinevate turbaliikide eristamine ei ole ilmne (Plado et al. 2011).

Eesti tingimustes, kus sademete hulk ületab aurumise, esinevad ideaalsed tingimused märgalade tekkeks. Eestis sajab igal aastal maha 650 kuni 750 mm sademeid, millest aurub 470-480 mm. 250-270 mm sademeid voolab ära jõgede kaudu, kuid vähese langusega veelahkmelistel aladel kogunevad sademed maapinna ebatasasuste vahele, mille tõttu muutub pinnas liigniiskeks (Valk, 1989). Eesti territooriumist moodustavad sood 22,3% - Soostumine on protsess mis võib alguse saada kas mineraalma soostumisest või veekogude kinnikasvamisest. Samuti võib toimuda veekogulise soo levimine mineraalmaale või vastupidine protsess. Liigniisketel aladel levib ka vastav taimestik, ehk levivad niiskuslembelised taimed ning samblad, põhjustades turba kogunemist ja ümbruse jätkuvat soostumist. Soomuldadele on iseloomulik väike veeläbilaskvus ja suur veemahutavus. Madalsoodes on täieliku veemahutavuse puhul turba ühe kuivainemassi osa kohta 2-10, rabamuldades aga 10-15 (30) osa vett. Filtratsioonikoefitsient on peamiselt turba lagunemisastmest, mis väheneb turbalasuundi piires alt üles. Lisaks sõltub see ka turba

liigist, näiteks rabaturba veeläbilaskvus on madalooturba omast võrdse lagunemisastme korral ligikaudu 35 korda väiksem (Arold, 2005).

2 Valdkonna ülevaade

2.1 Kauru soo ülevaade

Kauru soo kohta leidub vähe informatsiooni. See on 148 hektarilise (mõõdetuna käesoleva töö autori poolt kasutades Maa-ameti kaardirakendust), kuid varasemate (Paal jt. 1999) andmete järgi pindalaga 96,90 ha pindalaga raba mille kirdeosa ääreala on siirdesooline. Paikneb Jõgevamaal, Pajusi vallas, asudes ligikaudu kilomeeter Kauru külast lõunas. Põltsamaast asub soo 13 km kaugusel ja Jõgevast 17 km kaugusel. Selle vahetus läheduses asub Tapiku soo ja Tapiku-Lahavere vaheline soo. Aastal 1989. avaldatud teos „Eesti sood“ Kauru sood ei käsitle, kuid see-eest Tapiku sood Endla soo osana (Valk, 1988). Pinnakatte lamamiks on Siluri lademe Raikküla ladestu. Raikküla kihistu kivimiks on paekivi, mis on kohati dolomitiseerunud, samuti on need kivististe rikkad, pakkudes huvi nii paleontoloogidele kui kaevandusettevõtetele (Raukas, 1997). Läheduses asub Kalana karjäär, kus kaevandatakse ehituslubjakivi. Kauru soo on tekkinud veekogu soostumise tagajärjel, millest annab tunnistust sapropeeli, ehk järvemuda esinemine turbalasundi põhjas (vt. Peatükk 3.2). Kauru soo on väärtuslik kui osa maastiku- või kasvukohatüüpide kompleksist ning samuti on tegemist marjade kasvualaga. Kasvukoha tüübi poolest esineb seal rohusoode ning soometsade klassi taimi. Mõlemast klassist on esindatud siirdesoode tüübirühm. Selle järgi võib Kauru soos kohata siirdesoo männikut ja järgnevaid turbasambla kooslusi: alpi jänesvilla, niitja tarna, pudeltarna, tupp-villpea, raba-jänesvilla, mudatarna ja pilliroo. Soo alal on inimtegevuse mõjutused nõrgad ja vähemärgatavad. Majanduslikust poolest on soovitatav ala kasutada üksnes traditsioonilisteks tegevusteks, mille alla kuulub marjade ja ravimtaimede korjamine. Soolise mitmekesisuse poolest on tegu liigirikka alaga, kuid kaitstavaid taimeliike on seal üles märgitud vaid üks: *Calliargon stramineum* – Kollakas tõmptipp (Paal jt., 1997).

2.2 Georadar

Esimesed georadarid võeti kasutusele 1950-ndatel aastatel, kuid süsteemi vähese suutlikkuse tõttu ei leidnud meetod koheselt laialdast kasutuspiinda. 1970-ndatel aastatel olukord muutus elektroonika ja arvutite kiire arengu tõttu. Viimase 15 aasta jooksul on georadarite tehnoloogia teinud suure sammu edasi. Kuigi radari antennide tehnoloogia on jäänud samaks, on edasi arenenud registreerimis- ja salvestustehnika ning täienenud on ka andmete töötlemiseks mõeldud tarkvara. Tänu sellele on georadari kasutusvaldkond tunduvalt laienenud ja tegu on üha populaarsemaks muutuva geofüüsikalise uuringu meetodiga (Plado et al. 2011).

Georadar koosneb andmete salvestustehnikast ja kahest antennist. Saateantenniga tekitatakse lühiaegsed elektromagnetilised impulsid, mis peegelduvad pinnase sisekihtidelt tagasi maapinnale, mille registreerib vastuvõtuantenn. Uuritavalt objektist sõltuvalt kasutatakse georadari meetodil sagedusi mõnekümnest MHz kuni mõne GHz. Kõrgemad sagedused võimaldavad läbi viia detailseid uuringuid ning madalamad sagedused võimaldavad teha sügavamaid maapõue siseuuringuid, kuid väiksema resolutsiooniga. Paraku on limiteerivaks faktoriks erinevate sageduste kasutamisel antenni suurus, ehk mida madalam sagedus, seda suurem peab olema vastav antenn. Registreeritud peegeldunud lained kannavad informatsiooni keskkonna siseehituse kohta. Kui georadarist välja saadetud elektromagnetiline jõuab keskkonnas oleva heterogeensuseseni, siis laine kujul osa energiat peegeldub maapinnale tagasi, osa energiat kandub läbi keskkonna ning osa energiat hajub sõltuvalt pinna karedusest erinevatesse suundadesse. Georadari abil saab „näha“ läbi pinnase, kivi, puidu, jää ja vee. Võrreldes teiste geofüüsikaliste meetoditega on georadari kasutamine suhteliselt odav ja lubab kiireid tulemusi. See sobib pinnalähedaste objektide kuju, suuruse, ulatuse ja sügavuse määramiseks.

Elektromagnetlainete levikut, sumbumist ja peegeldumist keskkonnas mõjutavad pinnase füüsikalised omadused ning uurimiseks kasutatav elektromagnetlainete sagedus. Pinnase füüsikalisteks omadusteks on dielektriline läbitavus, elektrijuhtivus ja magnetiline vastuvõtlikkus (Takahashi et al. 2012).

Dielektriline läbitavus, ehk permittiivsus, iseloomustab keskkonna võimet talletada ning vabastada elektromagnetilist energiat elektrilaenguna. Teisisõnu, keskkonda käsitletakse kui kondensaatorit. See mõjutab elektromagnetlainete levikut kiiruse, sisemise takistuse ja

peegeldusega. Dielektriline läbitavus on suurim elektrijuhtivuse ja magnetilise vastuvõtlikkuse mõjutaja. Seda iseloomustatakse keskkonna absoluutse läbitavuse ja vaakumi läbitavuse suhtena:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}, \quad \text{Valem 1}$$

kus ε on permiitvsus, ε_1 on keskkonna absoluutne läbitavus (F/m) ja ε_0 on dielektriline läbitavus vaakumis ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m). Permiitvsus on pöördvõrdelises seoses elektromagnetlainete kiirusega:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad \text{Valem 2}$$

kus c on absoluutkiirus (0,3 m/ns). See valem on aga lihtsustus, mis eeldab, et keskkonna magnetiline läbitavus on ligikaudu võrdne ühega.

Keskkonna elektrijuhtivus kirjeldab võimet elektrivoolu edasi kanda. Selle esmane mõju on aine läbimisel tekkiv energia kadu. Lisaks keskkonna läbimisel tekkivale energia kaole väljendab see ka keskkonnas talletunud energiat. Keskkondades, mis juhivad elektrit hästi, hajub energia soojusena ja seega elektromagnetlained ei suuda selles hästi levida. Seetõttu väheneb sellistes keskkondades ka georadari võime materjalist läbi näha. Näiteks võib tuua suure soolasisalduse või kõrge savisisaldusega kihendid. Samuti mõjutavad elektromagnetilist sumbumist kasutatav elektromagnetlainete sagedus ja vee sisaldus (Takahashi et al. 2012).

Kolmas suurem tegur on keskkonna magnetiline vastuvõtlikkus, mis eelkõige sõltub magnetiseeruvate mineraalide olemasolust. Mida suurem on magnetiline vastuvõtlikkus, seda suurem on ka magnetiline läbitavus. Sellega kaasneb suurem elektromagnetlainete sumbuvus, mida väljendab valem:

$$k = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad \text{Valem 3}$$

kus k on magnetiline vastuvõtlikkus, μ on magnetiline läbitavus ning μ_0 on magnetiline konstant. Harilikult on magnetiline vastuvõtlikkus looduslikus keskkonnas väike ning tehakse üldistus $\mu_0 = \mu$. Erandiks on mõned haruldased troopilised mullad (Takahashi et al. 2012).

Töodes georadaritega on kasutusel kolm erinevat töörežiimi, mille erinevus sõltub antennide paigutusest. Fikseeritud meetodi puhul on antennide vaheline kaugus kogu aeg ühesugune, ühise keskpunkti meetodi puhul toestatakse lainurkseid mõõtmisi, mille puhul liigutatakse vastuvõtvat, saatvat või mõlemat antenni üksteisest eemale ning radartomograafia puhul liigutatakse nii signaali saatvat kui vastuvõtvat antenni puuraukudes.

Praktikas kasutatakse enim fikseeritud meetodit, nii nagu ka selles töös. Nõnda registreeritakse maa sees asuvatelt objektide või kihipindade peegeldused teekond-aja graafikuna. Edasi, teades elektromagnetlaine liikumise kiirust uuritavas struktuuris, on võimalik konverteerida ajaskaala sügavusskaalaks. Selle meetodi abil saab kuvada uuritava piirkonna kahemõõtmelise pildina sügavusskaalal. Kui luua piisavalt tihe profiilide võrgustik, on võimalik selle meetodi abil kuvada piirkonna kolmemõõtmelist sisestruktuuri.

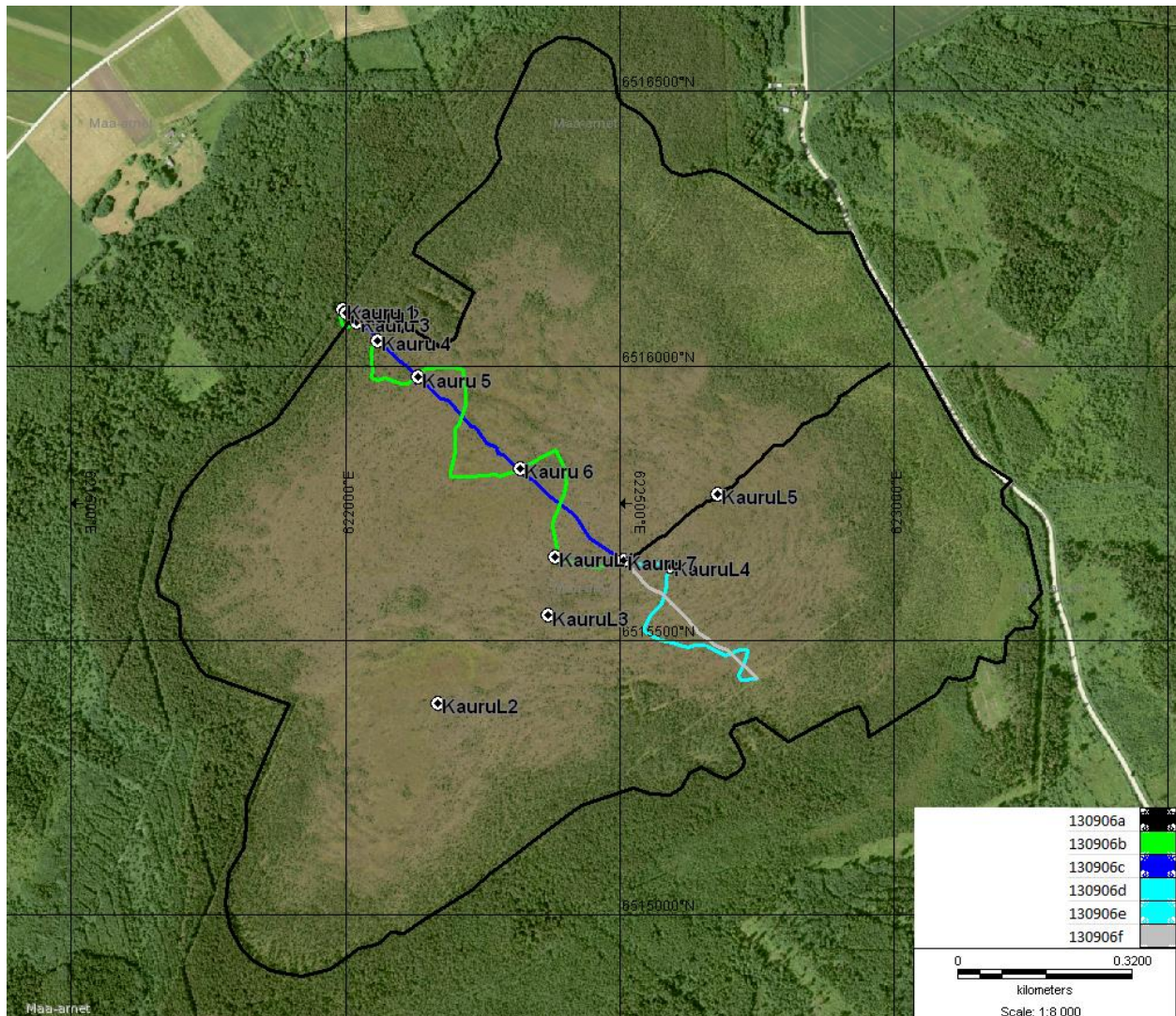
Georadar töötab kõige paremini kuivades keskkonnatingimustes, kuid samuti saab seda kasutada ka märgades ja niiskunud keskkondades. Kuigi soodes on suur veesisaldus, on tänu turbasambla mineraalaineid siduvatele omadustele (Valk, 1989) ja vihmaveetoitele turba vee mineraalainete sisaldus madal. Probleeme valmistavad suure elektrijuhtivusega keskkonnad, näiteks mineraalse koostisega veed (põhjavesi) ja tihedad savid, mis summutavad pinnasest läbi tungivad lained (Mustassaar, 2009). Soode uurimisel georadari abil saadavaid andmeid saab siduda puurtööde andmetega (Plado et al. 2011) ja täpselt määrata turbalasuundi paksust kogu radargrammi profiili ulatuses. Georadari pilt peegeldab pinnase dielektrilisi omadusi, mis on enim mõjutatud selle veesisalduse poolt.

3 Materjal ja meetoodika

3.1 Radaritööd soos

Kauru soo georadari uuringud teostati 6. septembril 2013, Radar Systems Inc valmistatud georadariga Zond 12e. Kasutati 300 MHz sagedusega antenni, mille taha oli ühendatud mõõteratas, mis võimaldas läbitud vahemaade mõõtmisi, mida omakorda korreleeriti GPS abil kogutud andmetega. Välitööde käigus koostati Kauru soost radari profiil loodest kagusse, mis koosneb viiest alamprofiilist (130906b kuni 130906f; Joonis 1). Lisaks tehti profiil (130906a) autoteest raba keskpaigani. Hiljem sai radargrammi 130906c täpsemalt kirjeldatud ja seda seoses

puurimistega (vt. Peatükk 3.2). Lisaks georadari aparatuurile oli kasutusel käsi GPS seade, mille abil orienteeruti eelsalvestatud profiili otsade koordinaatide põhjal. Mõõtmistel probleeme ei esinenud, kui välja arvata mõned üksikud juhtmete takerdumised ning laukasse vajumised. Välitööde tegemise ajal oli ilm päikeseline ning temperatuur 15° C ja 20° C vahel. Radaril kasutati 500 ns signaali salvestusaega, mis tähendab, et signaal on antud tingimustes loetav kuni 9,38 meetri sügavuseni. Kuna turbalasuundi sügavused ei ületanud 5,5 meetrit (vt allpool), siis antud konfiguratsioon sobis töödeks. Kauru soo elektromagnetlaine läbitavus, ehk permiitivsus, sai määratud puuraukude andmete ning Topp'i empiirilise meetodi abil (vt allpool). Tööks georadariga kasutati Prism v2.5 tarkara, millega salvestati ning kuvati radargrammide andmeid ja vajadusel neid töödeldi. Profiiliks 130906a oli teekond tee äärest raba keskele, millel asub ka puurauk KauL5. Suurem tähelepanu keskendati aga profiilile 130906c, mida ilmestab profiil 130906b (Joonis 1).



Joonis 1: Kauru soo aerofoto, millele kuvatud Kauru soo kontuur ning radari profiilid 130906a kuni 130906f.

3.2 Puurimised ja proovide võtmine

Lisaks töödele georadariga sai järgnevatel päevadel, täpsemalt 10. ja 11. september 2013. a läbi viidud puurimistööd. Kokku tehti profiilile 130906c 7 puurauku (Kau1-Kau7; Joonis 1) ning lisaks sellest eemal paiknevad 5 täiendavat puurauku (KauL1-KauL5). Nendest KauL1 paiknes profiilil 130906b, KauL4 paiknes profiilil 130906d, KauL5 paiknes profiilil 130906a ning KauL2 ja KauL3 ei paiknenud ühelgi profiilil. Südameike Kau1, Kau4 ja Kau6 puurimisel ei

suudetud puuriga turbalasundit läbida. KauL3 puhul jäi puur puutüvele pidama ning tegelik turbalasundi paksus selles kohas jäi välja selgitamata.

Tabel 1: Lennart von Posti skaala turba lagunemisastme hindamiseks välistingimustes (TTÜ)

Lagunemisaste (von Posti skaala)	Kokkusurumisel väljatuleva vee iseloomustus	Turba osakaal sõrmede vahel kokkusurumisel	Turba fragmentide iseloomustus	Turba lagunemisastme hinnang
H1	Selge, värvusetu	Puudub	Taimestruktuur muutumata; kiuline, elastne	Lagunemata
H2	Peaaegu selge, kollakaspruun	Puudub	Taimestruktuur muutumata	Peaaegu lagunemata
H3	Kergelt hägune	Puudub	Taimestruktuur selge, enamik jääke identifitseeritavad	Väga nõrgalt lagunenud
H4	Tugevalt hägune, pruun	Puudub	Taimestruktuur peaaegu selge; enamik jääke identifitseeritavad	Kergelt lagunenud
H5	Sisaldab suspensioonis veidike turvast	Väga vähe	Taimestruktuur on muutunud selgemaks; enamik jääke ei ole identifitseeritavad	Mõõdukalt lagunenud
H6	Mudane, suspensioonis palju turvast	1/3	Taimestruktuur ebaselge, enamik jääke ei ole identifitseeritavad	Küllaltki hästi lagunenud
H7	Tugevalt mudane	1/2	Taimestruktuur ebaselge; kuid äratuntav; mõned jäägid identifitseeritavad	Tugevalt lagunenud
H8	Paks muda, vähe vaba vett	2/3	Taimestruktuur ebaselge; ainult vastupidavad jäägid, nagu juurekiud ja puit, identifitseeritavad	Väga tugevalt lagunenud
H9	Vaba vesi puudub	Peaaegu kõik	Turbastruktuur peaaegu äratundmatu, praktiliselt puuduvad identifitseeritavad jäägid	Peaaegu täielikult lagunenud
H10	Vaba vesi puudub	Kõik lagunened	Taimestruktuur ei ole äratuntav, täielikult amorfne	Täielikult lagunenud

Kohapeal said määratud puurimistel turbasügavused, turbaliigid, lagunemisastmed (Lennart von Posti määramismeetodil; Tabel 1), soo arengu piirid ja põlengukihid Marko Kohvi poolt. Teises osas töödeldi 184 proovi laboratoorses tingimustes ning tulemusi analüüsiti. Iga proov oli umbkaudse ruumalaga 33,35 cm³.

Puurimiste eesmärk oli leida sarnasusi turba profiili läbilõikes ja radari andmestikus ning korreleerida radari elektromagnetlainete kiiruse andmeid. Proovid võeti puurkannu proovist 3 cm lõikudena ning pakendati hermeetiliselt suletavatesse kottidesse. Standardiks oli koguda proovid igast puuraugust 0,15 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ja 0,9 m sügavuselt. Sügavamast puursüdamikust said proovid võetud paksematest kihidest. Erandiks on puurauk KauL2, mille puhul sai esimesed proovid võtta alles 3,15 m sügavuselt, kuna tegu oli laukaga kus pinnale lähemal polnud võimalik turbaproove võtta.

3.3 Laboratoorsed tööd

Laboratoorsed tööd said sooritatud järgmise kuu jooksul ning vahepeal säilitati proove külmikus, et veesisaldus neis jääks muutumatuks. Proovikannu proovi standardruumalaks oli algselt nimetatud 29,4375 cm³. Kuid kuna andmete töötlemisel kuumutamise tagajärjel kaotati 53-l korral 184-st üle 30 g (~30cm³) vett, sai proovi keskmise ruumala Marko Kohvi poolt üle mõõdetud. Arvutusteks kasutati MS Office Excel tarkvara. Laboris läbi viidud mõõtmistel (vt Lisa 1) ilmnis, et proovi ruumala varieeruvus on suur proovikannu enda raames ning lisaks sõltub ka proovitava turba liigist. Varieeruvus jäi 26,75 cm³ ning 37,22 cm³ vahele, andes keskmiseks väärtuseks 33,35 cm³ ning standardhälbeks 2,59 cm³. Usaldusnivool 95% jääb proovi ruumala vahemikku 27,93 cm³ kuni 38,77 cm³. Standardviga leiti valemiga (Jakobson, 2010):

$$\Delta X = t_{\beta} * \sigma, \quad \text{Valem 4}$$

kus $\beta = 0,95$ ning $t_{0,95} = 2,09$ on student'i kordaja, mida kasutatakse 95% tõenäosuse leidmiseks 19 mõõtmise korral ning σ on standardhälve.

Laine leviku kiiruse määramiseks proovid kaaluti ning pärast 90 kraadi juures töötlemist kuivkaaluti, millest tulenesid proovide veesisaldused. Kuigi iga üksiku proovi reaalne maht ei ole teada, on siiski võimalik proovide tulemusi kasutada statistilise väärtusena.

3.4 Permittiivsuse ja elektromagnetlaine kiiruse arvutamine

Tervikuna kasutades on võimalik kasutada töödeldud proovide andmestikku permittiivsuse määramiseks Topp'i empiirilise valemi (Sumner, 2000).

$$\theta = -5.3 * 10^{-2} + 2.92 * 10^{-3} * \varepsilon_b - 5.5 * 10^{-4} * \varepsilon_b^2 + 4.3 * 10^{-6} \varepsilon_b^3, \quad \text{Valem 5}$$

abil, kus

$$\theta = \frac{V_W}{V_T}. \quad \text{Valem 6}$$

Sealjuures θ tähistab mahulist veesisaldust, ehk vee ruumala (V_W) suhet kogu ruumalasse (V_T), ning ε_b tähistab dielektrilist permittiivsust.

Vastavalt sellele valemile saame tuletada laine leviku kiiruse Valem 2 alusel. Laine levikiiruse arvutustel ei kasutatud kogu andmestikku, vaid andmed võeti selektiivselt. Kuna pealmine kiht on võrreldes ülejäänud profiiliga paremini dokumenteeritud, madalama permittiivsusega ning selle tähtsus üldises läbilõikes on väike, siis kasutati andmeid, mis pärinevad sügavamalt kui 0,3 m. Lisaks ei arvestatud puuraukude Kau1 ning KauL2 andmetega. Kau1 asub Kauru soo siirdesoolises äärealas ning seega ei sobi rabastunud põhiosa defineerimiseks. KauL2 asub aga älves, mistõttu selle orgaaniline osa on vähese veesiduvusega ning veekadu proovide võtmisel oli liialt suur. Seda tõendavad lisaks proovide võrdlemisi väiksele veesisaldusele ka permittiivsuse arvutused Topp'i meetodil.

Permittiivsuse suhtes sai teostatud ka statistiline analüüs. Kuna maht on piisavalt suur, sai oletatud et valim allub normaaljaotusele ning leiti 95% usaldusnivool standardviga (Jakobson, 2010), kasutades valemit:

$$\Delta X = t_\beta * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad \text{Valem 7}$$

kus $\beta = 0,95$ ning $t_{0,95} = 1,98$ on studenti kordaja, mida kasutatakse 95% tõenäosuse leidmiseks 153 mõõtmise (n) korral.

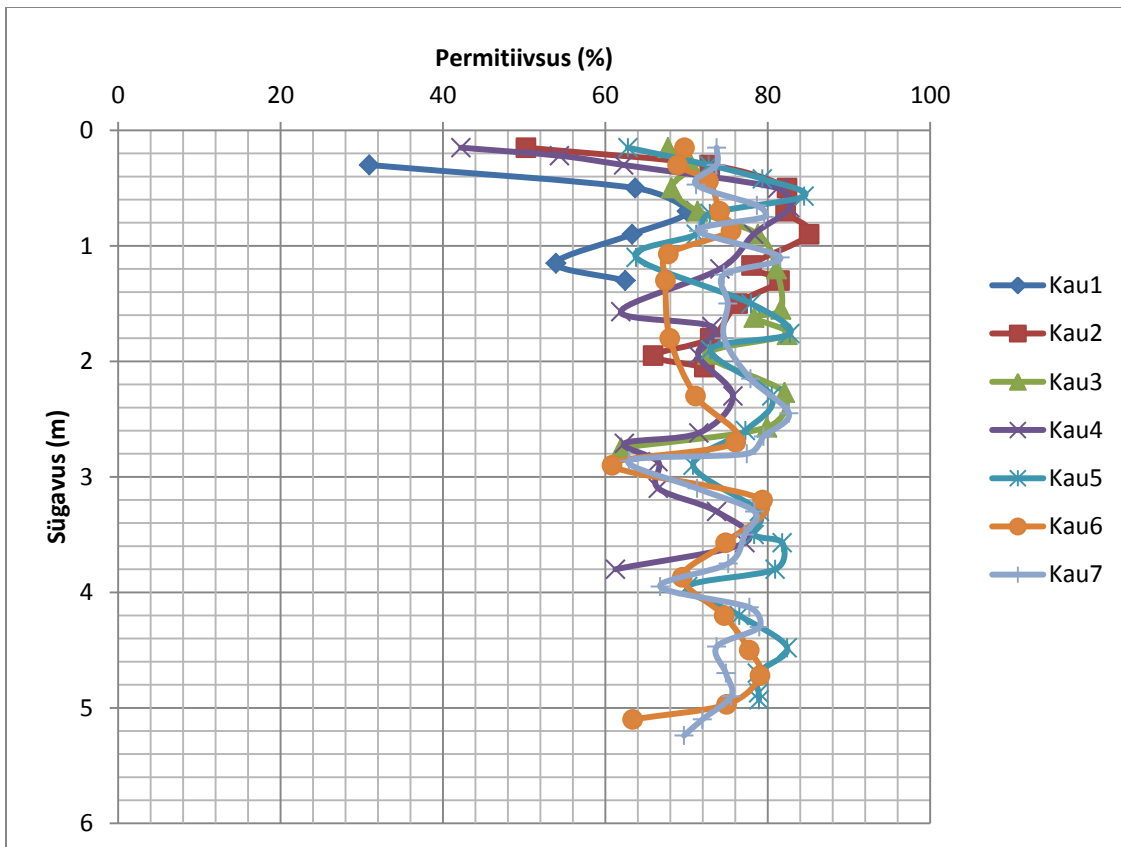
Nende andmete põhjal on keskmine permitiivsus $72,9\% \pm 1,04\%$ usaldusnivool 95%, ning keskmine kiirus 0,35 m/ns.

4 Tulemused ja arutelu

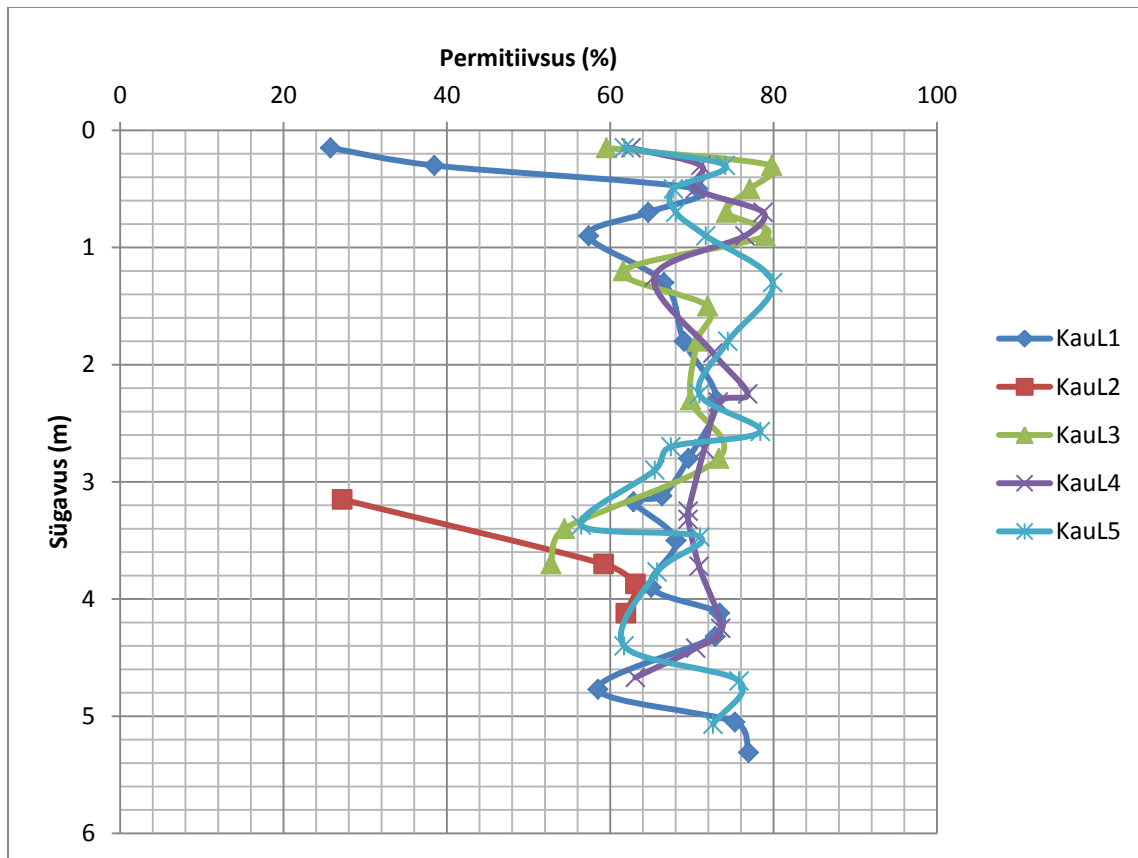
4.1 Laboratoorsete tööde tulemused:

Laboratoorsete tööde käigus ilmnis koheselt probleem. Turbaproovide võtmise viisil tulenev mahu mõõtemääramatus on piisavalt suur, et kaotada üksiku proovi mõõtmiste usaldusväärsus. Proovi mahu uuringud näitasid, et üksiku proovi maht jääb 95% tõenäosusega $27,93 \text{ cm}^3$ ning $38,77 \text{ cm}^3$ piiresse, omades keskväärtust $33,35 \text{ cm}^3$. Kuna arvestatud sai keskväärtusega, siis sellest tingituna varieerusid erinevate proovide Topp'i meetodil arvatud permitiivsused ning elektromagnetlaine kiirused tohutult nii üksikute tulemuste (Joonis 2 ja joonis 3) kui ka puuraukude raames (Joonis 4). Topp'i meetodi rakendamise mõttekust tõestas nii statistiline analüüs, mille põhjal osutus standardveaks $\Delta\varepsilon = \pm 1,04$ kui ka puuraukude ja georadari läbilõigetele loodud paksuste sarnasused (Joonis 5). Joonis 5-st lähtuvalt võib aga näida, et Kau6 puuraugu sügavus ei sobi teiste puuraukude sügavustega võrreldes väga täpselt georadari omadega, kuid see on petlik kuna Kau6 puurimine ei ulatunud põhjani (vt 3.2). Siit järeldub ka georadari üks kasutuseeliseid, ehk georadar ulatub sinna, kus puurimistel võivad ilmneda füüsilised takistused.

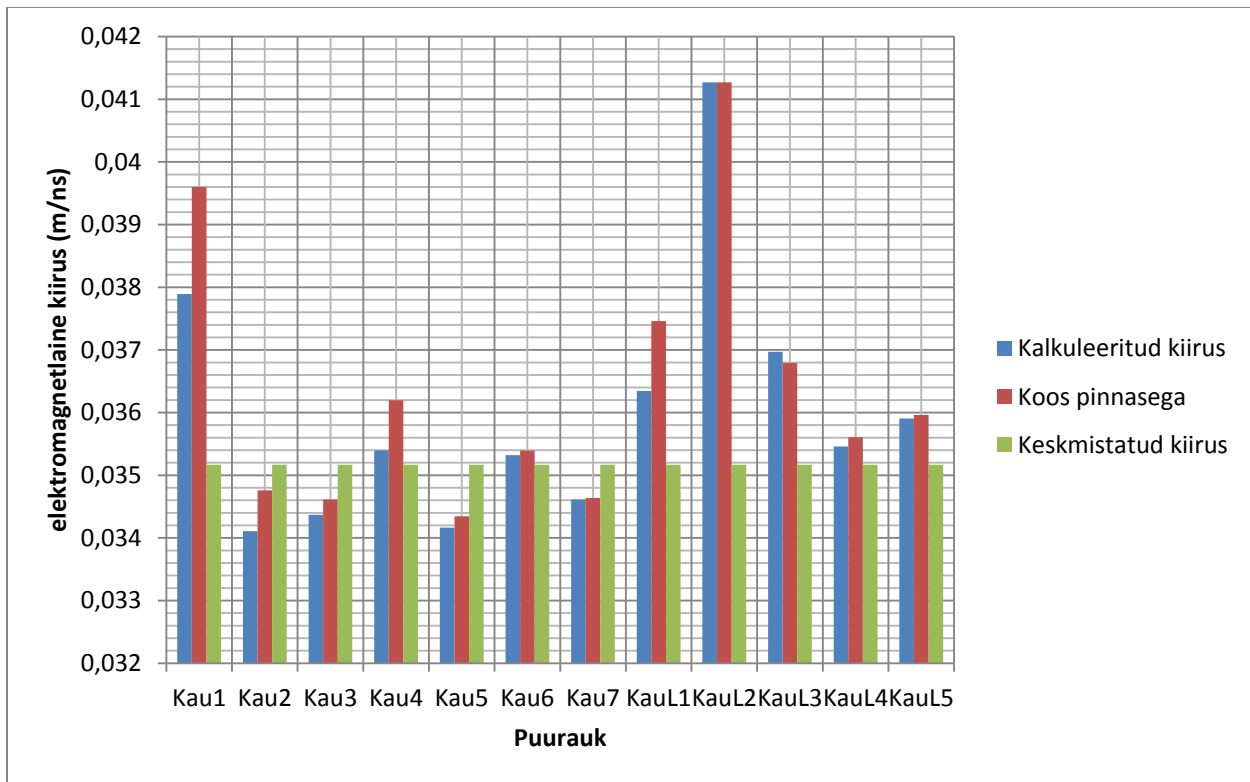
Puurimistel oli turbakihi lamamiks jüttja, aleuriit ning raba äärealadel õnnestus ka moreeni leida. Seda arvestades on Kauru soo näol tegu järvetekkelise rabaga.



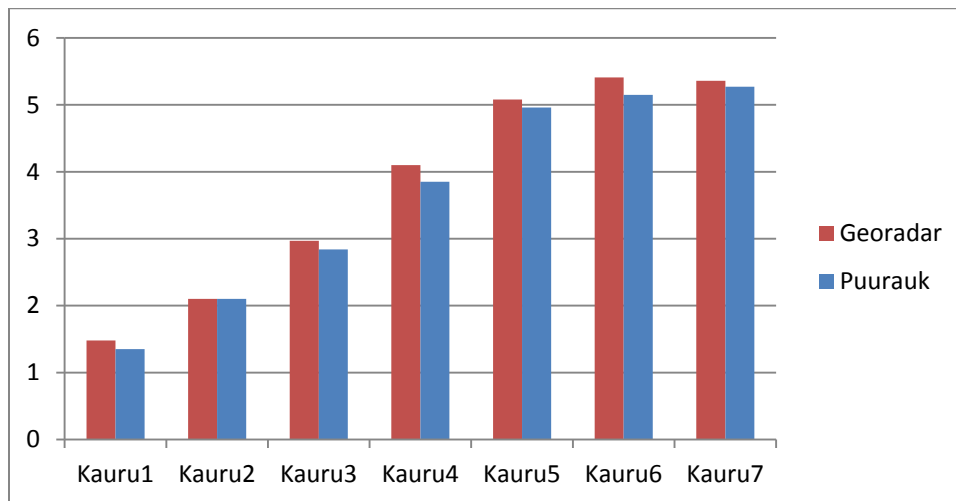
Joonis 2: Profiilil 130906c paiknevate puuraukude permeatiivsused erinevatel sügavustel vastavalt Topp'i empiirilisele valemile. Graafikud näitavad suurt varieeruvust, mis on peamiselt tingitud ebatäpsest proovi ruumalast.



Joonis 3: Profili 130906c väliselt võetud lisapunktide permiivsususte suhestumine sügavusse. Permiivsus samuti leidud Topp'i empiirilise valemi abil. Näha on, et KauL1 algus ning KauL2 permiivsus on ülimalt madal, mille põhjuseks saab olla proovi ebaõnnestunud võtmine või vead töötlemises.



Joonis 4: Teoreetilised elektromagnetlaine kiirused erinevates puuraukudes, Topp'i meetodi alusel. „Kalkuleeritud kiiruse“ näol on tegu kiirusega, mida kasutati reaalses arvutustes. Nende puhul pole arvestatud vähem kui 0,3 meetri sügavusel olevate proovidega. „Koos pinnasega“ tulp näitab kiirust, kus on arvestatud ka 0,3 m sügavusest kõrgemate proovide tulemustega. Tulp „keskmistatud kiirus“ näitab, kuidas iga puuraugu tulemustest saadud tulemus suhestub sellesse. „Keskmitatud kiiruse puhul pole arvestatud ei 0,3 m sügavusest kõrgemate proovidega, ega puuraukude Kau1 ning KauL2 proovidega.



Joonis 5: Kujutatud on puuraukude sügavuste võrdlust radargrammil saadud sügavustesse, juhul kui $\epsilon=72,9$.

4.2 Puurimissügavuste võrdlus radariandmetega

Tuginedes puurimise ning georadari andmetele, sai koostatud tabel (Tabel 2) georadari sügavusprofiiliga kattuvast puurandmestikust. Määratud sai sügavused mõlemate järgi ning nende vaheline erinevus.

Tabel 2: Kauru soo turba paksus puuraukude ja georadari andmete alusel.

		Sügavusandmete võrdlus (m)		Erinevus (%)	Puuraukude märkused
		Puurauk	Georadar		
130906c	Kauru1	1,35	1,48	8,78	Ei ulatunud põhjani
130906c	Kauru2	2,1	2,1	0,00	
130906c	Kauru3	2,84	2,97	4,38	
130906c	Kauru4	3,85	4,1	6,10	Ei ulatunud põhjani
130906c	Kauru5	4,96	5,08	2,36	
130906c	Kauru6	5,15	5,41	4,81	Ei ulatunud põhjani
130906c	Kauru7	5,27	5,36	1,68	
130906b	KauruL1	5,36	5,5	2,55	
130906b	KauruL4	4,72	4,8	1,67	
130906a	KauruL5	5,11	5,04	1,39	
				Standardhälve (%)	2,64
				N	10
				Studenti kordaja	2,23
				Standardviga (%)	5,87

Georadari täpsus sõltub sügavusest, seetõttu andmete omavaheline sobivus määrati puurimiste ning georadari erinevuse baasil. Standardhälve on 2,64% ning standardveaks 95% usaldusnivool 5,88%, kasutades selleks Valem 4, kus $\beta = 0,95$ ning $t_{0,95} = 2,23$ on studenti kordaja, mida kasutatakse 95% tõenäosuse leidmiseks 10 mõõtmise korral. Seega, võib öelda et usalduspiirid jäävad antud mõõtmistes kuni 5,5 meetrise sügavuse puhul 95% tõenäosusega $\pm 0,32$ meetri piiresse. Kuigi georadari andmed pole kordagi väiksemat tulemust näidanud kui puurimiste andmed, on permiitivsuse arvutused piisavalt korrektsed, et neid andmeid saab kasutada andmetöötluks. Kui hinnata keskmist permiitivsust puuraukude sügavuse profiili järgi, ning leida selle standardviga, järeldub, et usaldusnivool 95%, $\epsilon = 77,5 \pm 10,9$. Topp'i meetodil permiitivsuse leidmisel aga $\epsilon = 72,9 \pm 1,0$. Kuna Topp'i meetodi tulemused jäävad puuraukude tulemuste piirkonda, võib öelda, et puudub põhjus senises meetodis kahtlemiseks. Põhjuseks on suuresti valimi maht. Kui Topp'i meetodit kasutades on iga proov (kokku 184 proovi) osa

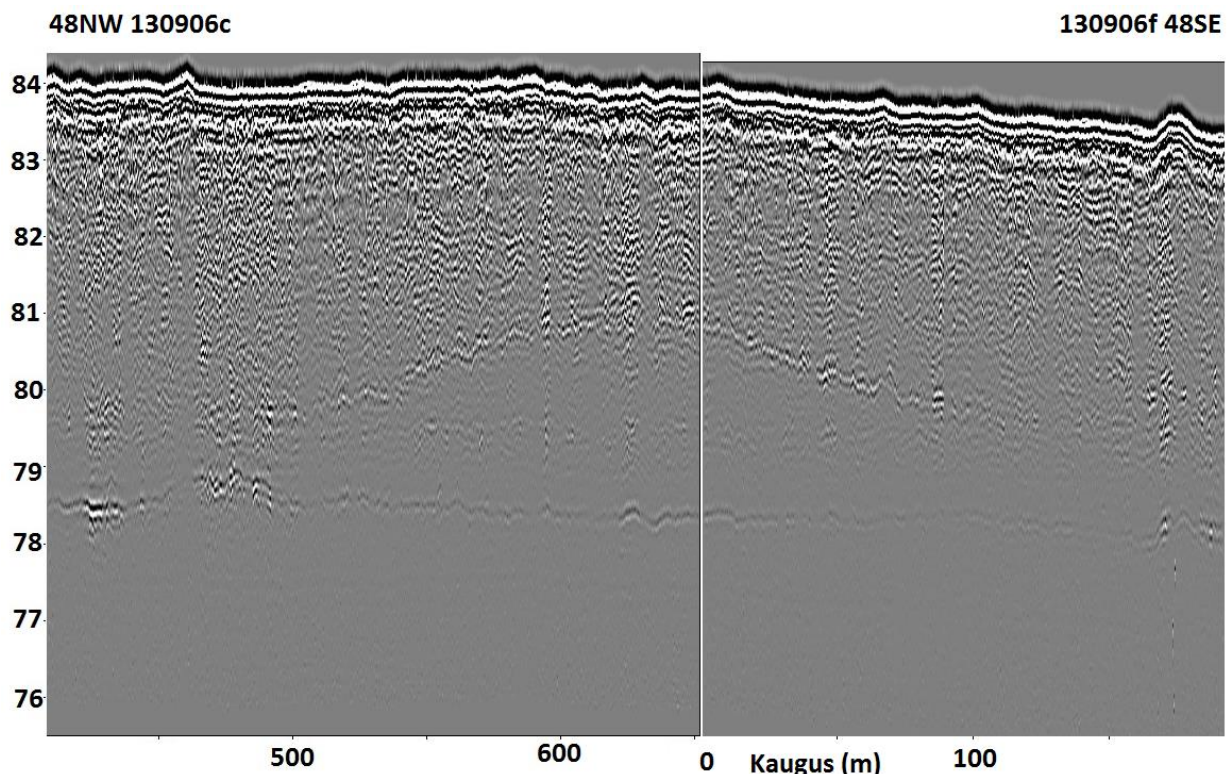
andmestikust, siis puurauke, mida korreleerida georadari andmetega on 10. Lisaks on võimalik suurema andmehulga puhul selgelt eristuvad, ehk anomaalsed näidud kõrvale jätta, mis andiski valimiks 153 proovi. Kuigi teame, et nende proovide tulemused on suure veaga määratud, määrab nende hulk aga suure täpsuse. Teisisõnu on võimalik kasutada kahte erinevat meetodit – hinnanguline ja empiiriline. Eelistada võiks hinnangulist, kuid väikese valimi tõttu on selle meetodi kasutamine andestamatu. Empiiriline meetod annab aga valimi mahu tõttu ligi kümme korda väiksema standardvea samal usaldusnivool.

4.3 Georadari andmed ning interpretatsioon puurimistulemustega:

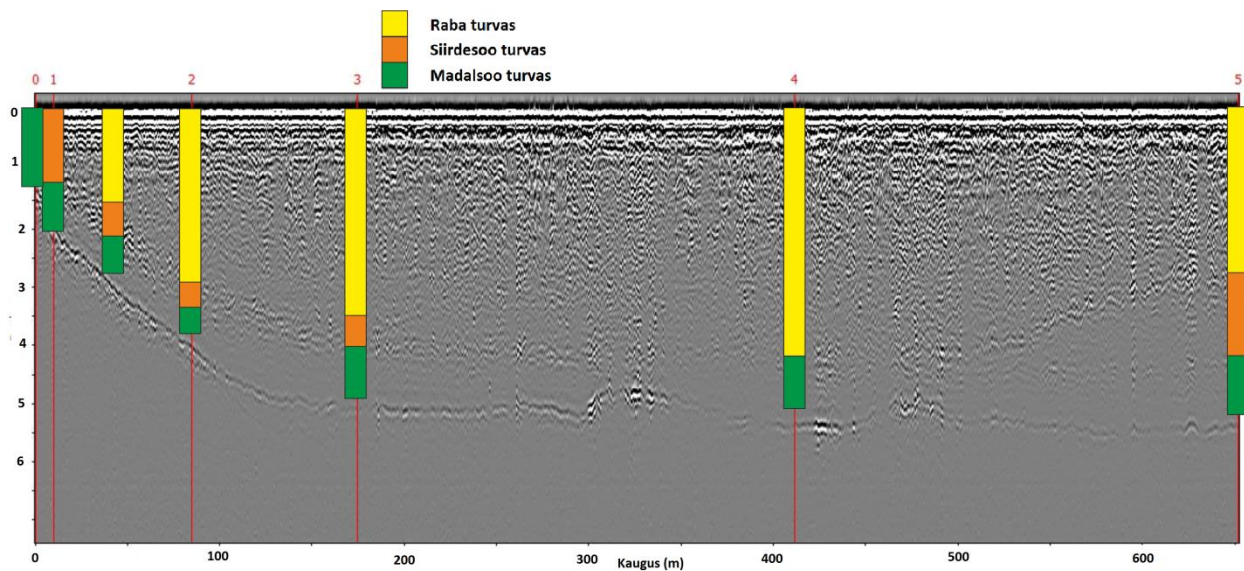
Radargrammidelt (Joonis 6 ja Lisa 2) on võimalik välja lugeda mõningaid sisestruktuuri erinevusi ning turbalasundi all paikneva aluspõhja sügavuse. Saab välja lugeda kohti, kus aluspõhja reljeefis leidub järskke astakuid. Nendel astakutel võib olla mitmeid põhjuseid. Need võivad olla põhjustatud rakendatud kõrgusandmete ebatasasusest, mis juhul täpselt samasugused astakud korduvad ka ülemises reljeefi pinnas. Astakuid võib põhjustada ka järsk muutus keskkonna permitiivsuses, kuid vahest võivad need olla ka tingitud aluspõhja reljeefi konarustest. Permitiivsuse erinevusi võivad põhjustada muutused veesisalduses. Kui veesisaldus suureneb, suureneb ka permitiivsus ja see põhjustab elektromagnetlainete kiiruse vähenemise. Selline koht lisab radargrammil näiliselt sügavust juurde. Rabas pole põhjust arvata, et veeküllastusaste oleks mõnes üksikus piirkonnas ülejäänust kardinaalselt erinev välja arvata sügavate laugaste ning älvete kohal. Küll võib kohata permitiivsuse erinevusi raba äärealadel (vt. Lisa 2, profiili 130906a algus).

Huvi pakkus muuhulgas ka raba keskel asetsev aluspinna reljeefist kõrgemal seisev „kuppel“ (Joonis 8), mille sisemuses leidub ka horisontaalne kihind. „Kupli“ alune mineraalpinnas on kuplist loodes, kirdes ja kagus kõrgem kuni 0,5 m kõrgem. Struktuuri läbimõõt on radarriandmestiku alusel hinnanguliselt 260 meetrit kuid tegelik laius võib olla suurem (edelasuunal radariandmed puuduvad).

„Kupli“ teke tähistab madalsoo eutroofse faasi üleminekut mesotroofsesse, siirdesoo faasi (Valk, 1988). Seda tõendab puurimisandmestik, kus lehtsambla turbad asenduvad puidu ja tarna turbaga. Kuplist kõrgemal levivad aga juba peamiselt sfagnum-tüüpi, ehk raba turba tüübid, mis korreleeruvad ka hästi georadari pildiga (Joonis 9). Puuraugus Kau6 puuduvad siirdesoolise päritoluga turbad ning puuduvad need ka radargrammil. Radargrammilt 130906a (vt Lisa 2), mis paikneb risti läbilõiketega 130906c ja 130906f nende kontaktpunktis, on näha, kuidas edela-kirde suunal on siirdesoolise kihindi paksus ühtlasem, kuid see kihind pole kõigil radargrammidel läbiv. Näiteks 130906c (Joonis 6) puhul võib täheldada, et kaugusel 350-420 meetrit, on sellele omane peegeldus nõrgem.



Joonis 8: Raba keskpaigas asuv selge piirjoonega „kuppel“.

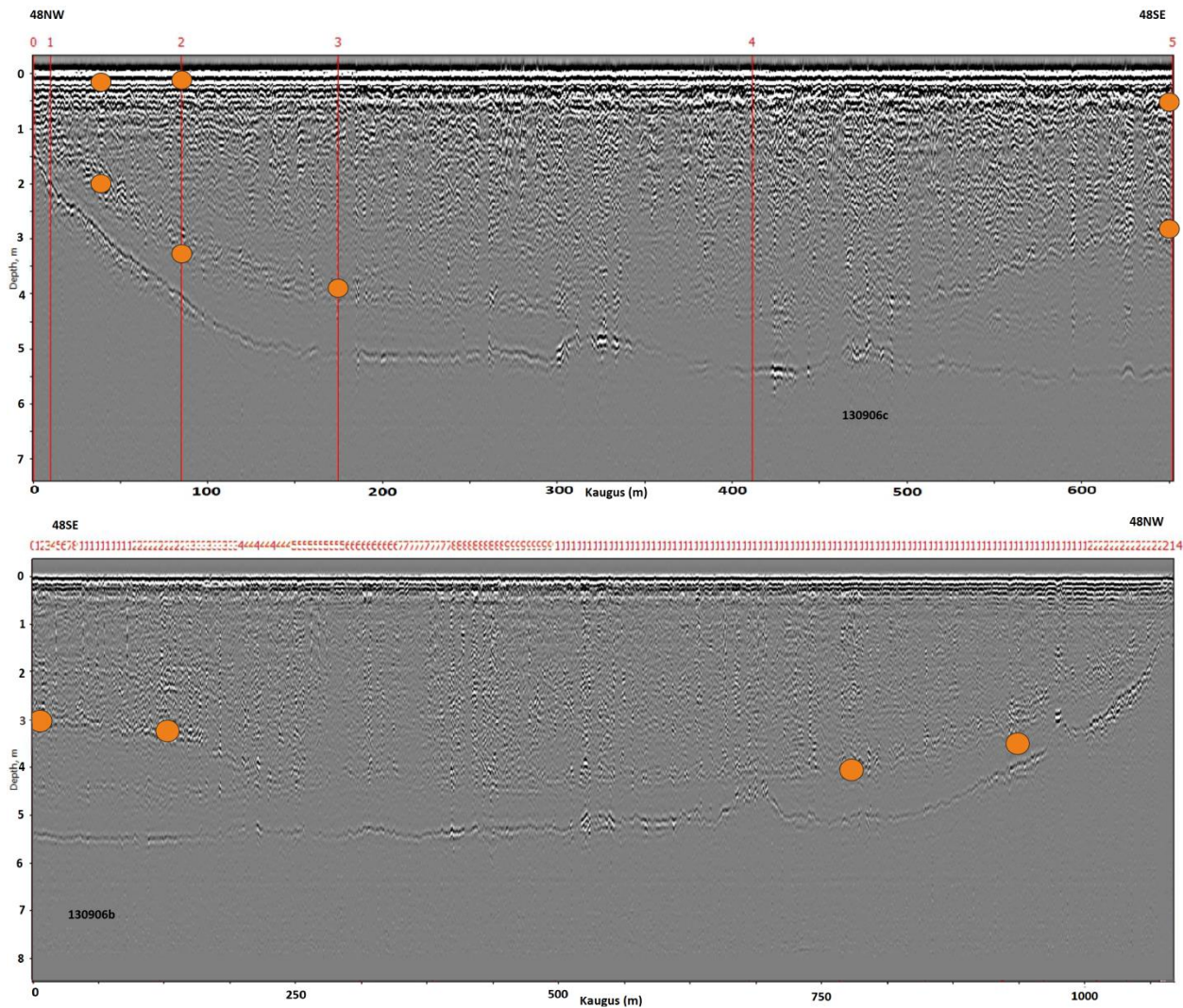


Joonis 9: Radargrammile 130906c paigutatud soo erinevas arenguastmes tekkinud turbaliigid.

Võrdlusel puursüdamike andmetega ilmnes, et siirdesoolise faasi peegeldumisteguri põhjus radargrammidel võib põhineda ka muul, kui turba tüübil. Puuraukudes Kau3, Kau4, Kau5 Kau7, KauL1 ka KauL4, esinesid põlengukihid (Tabel 3), mille sügavused sobitusid hästi antud tagasipeegeldusele (Joonis 10). Esines kaks põlengukihti, millest üks, ulatuslikum, esines 2-4 meetri sügavusel, ning teine kiht, mis esines 0,2-0,3 meetri sügavusel turbalasundi ülemisest osast. Radariandmetega teist, kõrgemal asuvat kihti ei suudetud tuvastada, ilmselt kuna pinnalähedaseid peegeldusi on rohkem ning seetõttu on pilt mürarikkam. Puuraugu KauL4 kohal radaritõid ei teostatud.

Tabel 3: põlengukihtide sügavused puuraukudes.

Radar gramm	Puurauk	Põlengukihi sügavus	
130906c	Kau3	2,07	0,23
	Kau4	3,35	0,2
	Kau5	3,96	
	Kau7	2,9	0,6
130906b	KauL1	3,15	
	Kau4	3,35	
	Kau5	3,96	
	Kau7	2,9	
	KauL4	2,38	
		3,31	



Joonis 10: Puursüdamikes kirjeldatud põlengukihtide sügavused, mis on asetatud radargrammidele 130906c (ülemine) ja 130906b(alumine).

5 Kokkuvõte ja järeldused

Kauru soos sai läbi viidud mõõtmised georadariga ning puurimistööd, millest saadud andmeid omavahel korreleeriti. Tööde käigus teostati georadariga läbilõiked, millele rajati 10 puurauku ning 2 puurauku, mis ei asunud radari läbilõigetel. Neist 7 puurauku asusid profiilil 130906c, mistõttu osutus just see profiil informatsiooni rohkeimaks. Lisaks puuraukude kirjeldustele sai võetud ka proove. Proovid pidid olema standardse mahuga, kuid proovi võtmisel tekkinud mõõtemääramatus oli piisavalt suur, et üksikute mõõtmistulemustega poleks võimalik arvestada. See-eest oli võimalik statistilistel meetoditel leida antud tulemusi kasutades elektromagnetlainet

leviku kiirus turbas, kasutades selleks Topp'i empiirilist meetodit. Proovide alusel arvutati Topp'i meetodil välja turbasoo keskmine permitiivsus ning määrati selle usaldusväärsus 95% nivool, $\varepsilon=72,9\pm 1,0$. Leides permitiivsust puuraukude sügavuste järgi, on samadel kriteeriumidel $\varepsilon=77,5\pm 10,9$. Topp'i meetodi abil leitud permitiivsusega jääb antud töös maksimaalne georadari sügavuse viga $\pm 0,32$ meetri sisse.

Puurimistel leiti rabas kaks võimalikku põlengukihti, millest ühte õnnestus tuvastada ka georadari pildis. See-eest georadariga oli võimalik tuvastada põlengukihi mastaapsus, mis peegeldus kõigil radargrammidel peaaegu püsivalt. Teine, kõrgemal asetsev põlengukiht oli aga liialt ligidal pinnale, et radar oleks suutnud seda tuvastada jäädes radari nn varjualasse. Puurandmete ja radari andmete võrdlusel paistis välja, et suurema lagunemisastmega turbad olid ka suurema permitiivsusega, jättes seetõttu radargrammile tugevamaid jälgi. Ilmnes, et georadari pildilt on võimalik välja lugeda ka soarengus toimunud erinevaid etappe, ehk madal soo, siirdesoo ning raba faaside vaheldumist tänu eutroofse, mesotroofse ja oligotroofse staadiumi jälgedele raba keskel.

Kui oleks piiratud vaid georadari töödega, või ainult puurimistel, oleks saadud andmed olnud märgatavalt informatsiooni vaesemad. Näiteks, piirdudes puurimistega, oleks jäänud teadmata raba täpsem sisestruktuur ning lateraalsed muutused. Vaid georadari andmeid kasutades oleks jäänud määramata sisestruktuuris leiduvad peegeldused. Märjalade uurimisel täiendavad georadari meetod ja puurimised teineteist hästi.

6 Tänuavaldused

Tahan tänada oma juhendajat, Jüri Plado, kes võttis vaevaks minu ohtratele küsimustele vastata ka puhkepäevadel ning kes ka viimastel minutitel ei kaotanud usku sellesse töösse. Suured tänud Marko Kohvile, kes aitas jooksvaid küsimusi lahendada ning kes määras kõik tööks vajalikud lagunemisastmed, turbaliigid ja oli kohal alati kui puurimistel puurkann oli tarvis välja tõmmata või sisse lükata. Tänan ka Argo Jõelete, kes tarkvara käsitlemist õpetas ja viitsis Kauru andmetega jännata. See töö oleks palju vaesem, kui poleks olnud Sassi, kes Kauru proovide jaoks mõõdetopsisid vabastas.

Loomulikult tahan tänada ka kõiki teisi, kes abistasid jõuga, nõuga või olid moraalseks toeks. Aitäh!

7 Cross-section of Kauru bog (Pajusi parish, Jõgevamaa) according to ground-penetrating radar (GPR)

Kauru soo with area of 148 hectares is a bog situated in Pajusi parish, Jõgevamaa, Estonia. It lies on Silurian Raikküla Formation limestones and dolomitic rocks.

In this thesis, Kauru bog was studied using ground-penetrating radar. It was also drilled for samples and bogs cross-section was described. Altogether, 12 boreholes were made and 184 samples collected, of which 10 boreholes were made on tracks of GPR.

Peat samples were weighed and dry-weighed to determine their water content. Data collected from samples was processed and permittivity was assigned using Topp's empirical method, which was used to correlate GPR data. Permittivity (ϵ) was also calculated using borehole data, but because of few samples the results had great standard error. According to Topp's method with confidence level of 95%, $\epsilon=72,9\pm 1,0$ and with borehole data $\epsilon=77,5\pm 10,9$.

Borehole data showed two burnt layers and later dimensions of the lower layer was described using GPR data. The upper burnt layer was too close to the ground for GPR to register it. Also, due to the lower burnt layer, formal shape of Kauru was determined on radargrams. Using GPR data, dome-like structure was identified which lied in a craven with depth of about 0,5 meters and diameter of 260 meters or more. „Dome“ represents a trophic change of bog but why it lies only in center, is unknown. In correlation between radar and borehole data, it was conceivable that radar could detect different phases in bog development.

Without GPR data bog's lateral changes would have been less known and for example the scope of burnt layer would have been undescribed. Without the boreholes the exact permittivity wouldn't been corrected and it may have ended with wrong depths.

8 Kasutatud kirjanduse loetelu

Arold, I. 2005. Eesti maastikud. Tartu Ülikooli kirjastus, 115-124

Comas, X., Slater, L., Reeve, a., 2005. Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground-penetrating radar (GPR). *Journal of Hydrology*, 315, 40-51

Davis, J. L., Annan, A. P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, 37, 531-551

Jakobson, E., 2010. Mõõtmised ja mõõtemääramatused, Tartu, 1-119.

Mustassaar, M., 2009. Georadari peegelduste korreleerimine kivimi füüsikaliste omadustega ning radari kasutusvõimalustest pinnakatte paksuse uuringutel. Võhmuta lubjakivimaardla. Magistritöö. Tartu, 1-70. Käsikiri TÜ geoloogia instituudi raamatukogus.

Paal, J., Ilomets, M., Fremstad, E., Moen, A., Børset, E., Kuusemets, V., Truus, L., Leibak, E., 1999. Eesti märgalade inverteerimine 1997. a. Projekti „Eesti märgalade kaitse ja majadamise strateegia“ aruanne. Eesti Loodusfoto, Tartu, 166 +xxviii lk. 112-114, 121-127, 165

Plado, J., Sibul, I., Mustassaar, M., Jõelet, A., 2011. Ground-penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia. *Estonian Journal on Earth Sciences*, 60, 1, 31-42

Raukas, A., Teedumäe, A., 1997. Geology and mineral resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 436pp

Sumner, M. E., 2000. Handbook of Soil Sciences. CRC Press LLC. Google Books. A54-A64

Takahashi, K., Igel, J., Preetz, H., Kuroda, S., 2012. Basics and applications of ground-penetrating radar as a tool for monitoring irrigation process. *InTech*, 8, 155-180

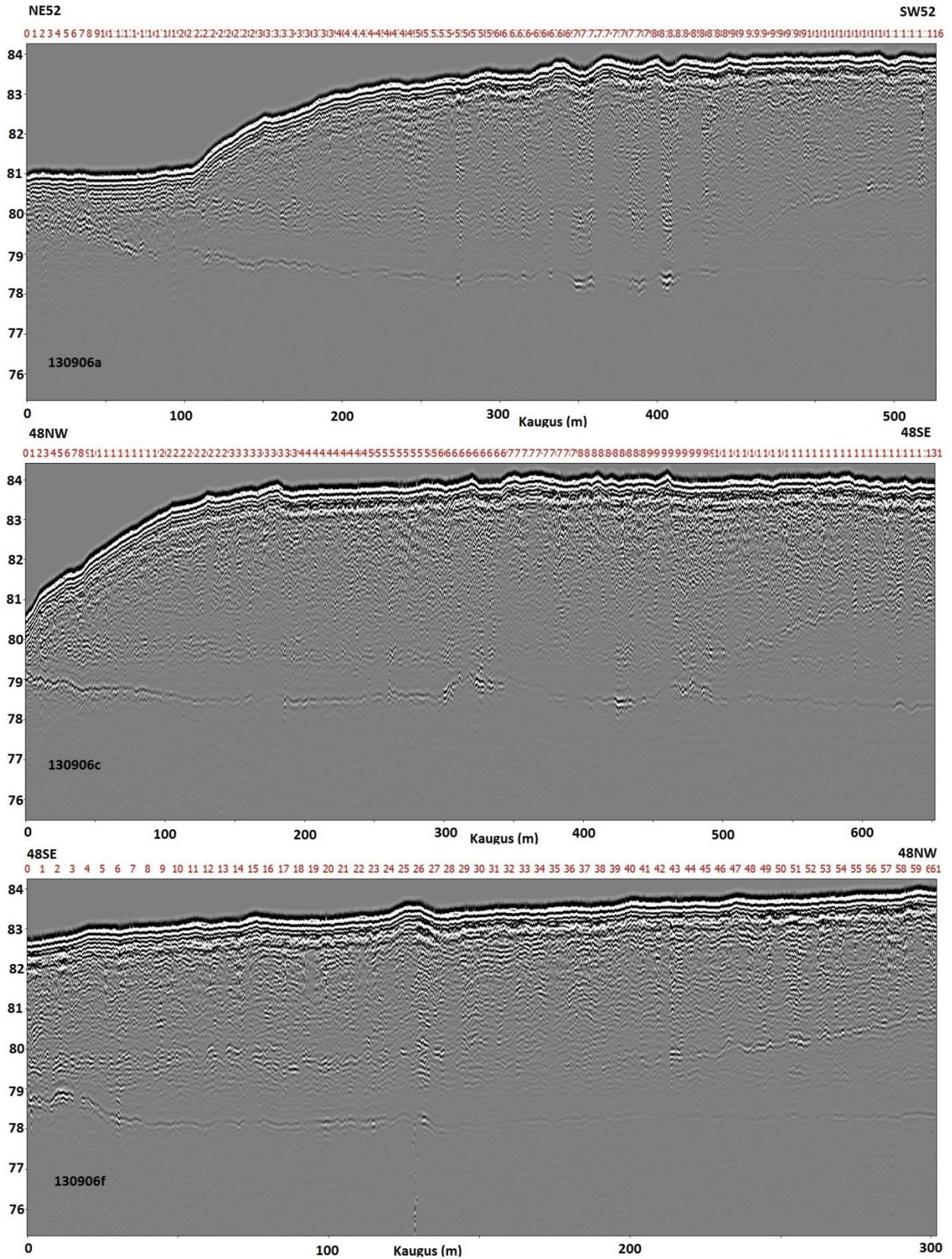
Valk, U. 1988. Eesti sood. Valgus, 7-84, 288-300

Eesti Teadusportaal. Projekt SLOOM12006. Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või

leevendamiseks. [<https://www.etis.ee/portaal/projektiAndmed.aspx?VID=f4c96824-c59e-49e9-abe6-d4d95bb5345e&PersonVID=99&lang=&FromUrl0=isikuProjektid.aspx>] 28.10.2013

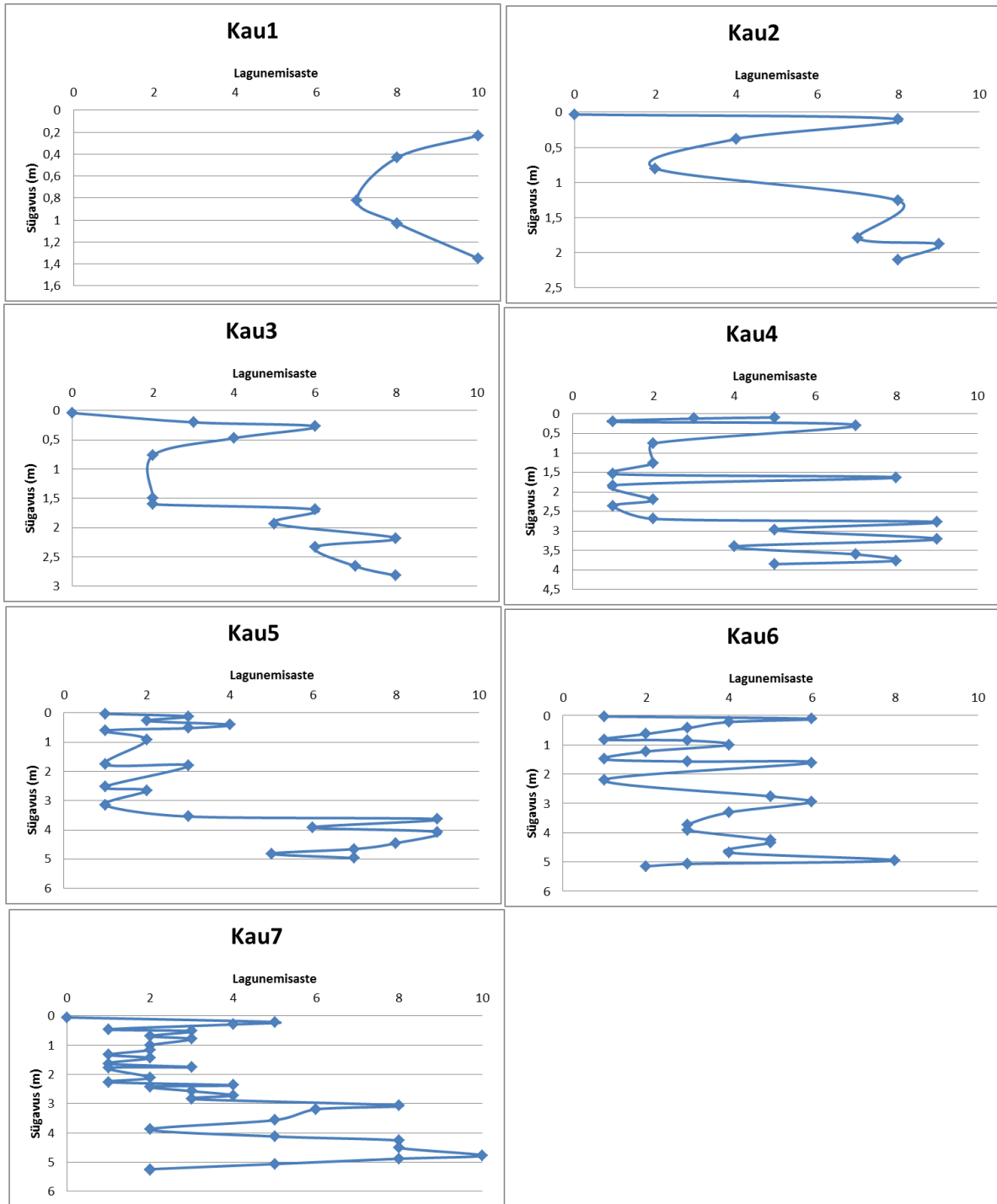
Keskkonnaamet. Otisaare ja otisaare II lubjakivikarjäärade korrastamisega kaasneva keskkonnamõju hindamise aruanne. töö nr 12-004 [http://www.keskkonnaamet.ee/public/KMH/JT_region/dokid/Otisaare_ja_Otissaare_II_lubjaki_vikarjaaride_korrastamisega_kaasneva_KMH_aruanne.pdf] 28.10.2013

TTÜ, 3. Turvas. [http://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/3._Turvas.pdf] 23.05.2014



Lisa 2: Kauru soo transektide 130906a, 130906c ja 130906f radargrammid, mis on kohandatud

vastama reljееfile.



Lisa 3: Radargrammile 130906c jäävate puuraukude lagunemisastmed suhestudes sügavusse.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tavo Ani

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Kauru soo (Pajusi vald, Jõgevamaa) läbilõige georadari ja puurimiste andmetel

mille juhendaja on Jüri Plado

- 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, **26.05.2014**