

**Tartu Ülikool
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geoloogia osakond**

Ivo Sibul

**RAHIVERE TURBAMAARDLA UURINGUD
GEORADARIGA**

Magistritöö

Juhendaja: Jüri Plado, PhD, Tartu Ülikool

**TARTU
2009**

Sisukord

1	Sissejuhatus	3
1.1	Lühiülevaade Vooremaast	3
1.2	Rahivere raba asukoht ja varasem uuritus	3
1.3	Georadari tööpõhimõte	5
1.4	Interpoleerimine	9
1.5	Rasterpindade analüüs	15
1.6	Töö eesmärk	15
2	Metoodika	17
2.1	Välitööd	18
2.2	Elektromagnetlaine levikukiiruse määramine	20
2.3	Andmestiku filtreerimine ja töötlemine	25
2.4	Pindade loomine mahu arvutamiseks	26
2.5	Mahuarvutused	27
3	Tulemused	28
3.1	Puurimistulemused	28
3.2	Profileerimistulemused	28
3.3	Interpoleeritud pinnad	29
4	Arutelu	35
5	Järeldused	41
5.1	Georadari rakendatavus soode uuringutel	41
5.2	ArcGISi interpolaatorite sobivus radariandmete töötlemiseks	41
6	Kasutatud kirjandus	43
7	KOKKUVÕTE	45
8	SUMMARY	46
9	Tänu sõnad	47
10	LISAD	48

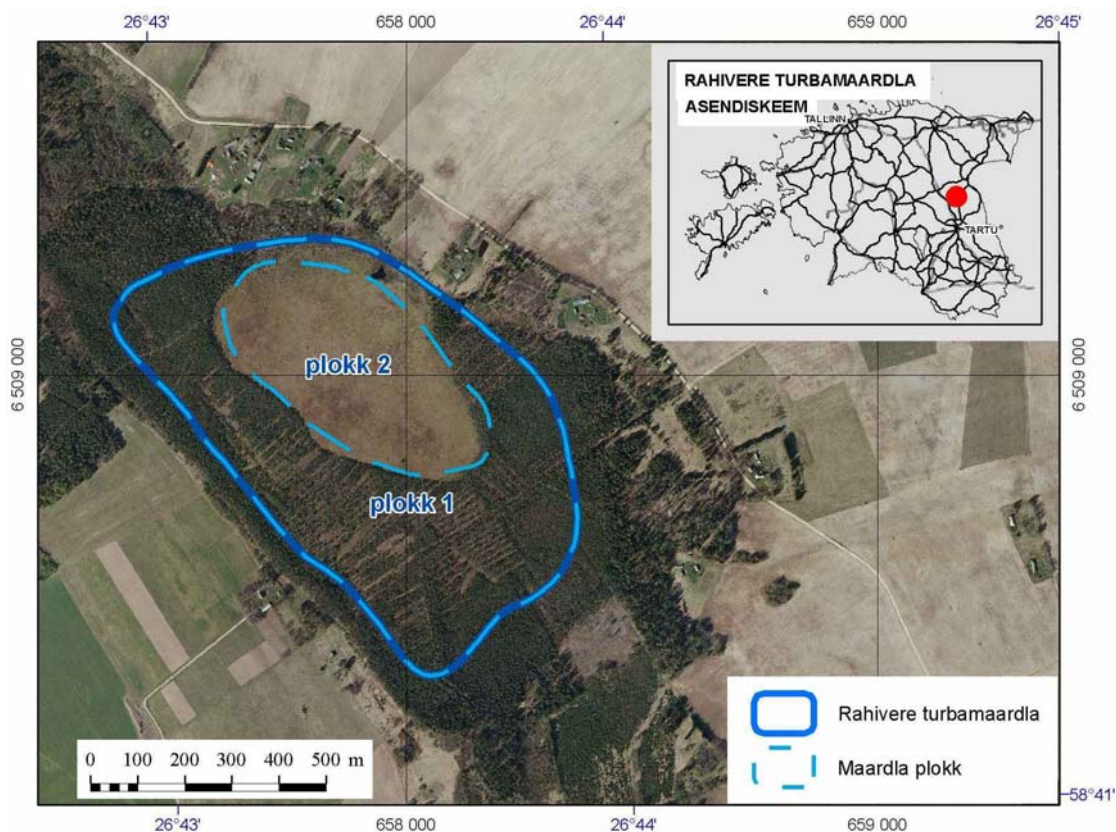
1 Sissejuhatus

1.1 Lühiülevaade Vooremaast

Vooremaaks nimetatakse Alutaguse madalikust lõunasse ja Kõrvekülast põhja poole jäävat piirkonda, kus esineb arvukalt vooi – pikliku kujuga liustikutekkelisi künkaid – ja nendevahelisi vagumusi. Pinnakate, mille lamamiks on Vooremaa põhjaosas Hilis-Ordoviitsiumi ja Alam-Siluri lubja- ja dolokivid, lõunas aga Kesk-Devoni liivakivid, on kujunenud viimase mandriliustiku taandumise käigus 13 000 - 11 000 a tagasi. Voored koosnevad peamiselt Kesk- ja Ülem-Pleistotseeni moreenist, glatsiolimnilistest ja glatsiofluviaalsetest setenditest (Rattas & Kalm, 2001), kusjuures pinnakatte paksus voortes ulatub 60 - 70 meetrini. Voorte pikitelg on loode-kagu-suunaline ning enamasti 2 – 5 km pikkuseid vooi on kokku ligikaudu 120 (Rõuk & Raukas, 1989). Suuremate voorte nõlval on täheldatud väiksemate voorte esinemist (Arold, 2005). Mõnedes voortevahelistes nõgudes asuvad järved, kuid enamasti on kunagised järved nüüdseks osaliselt või täielikult soostunud, kusjuures Holotseeni settekihtide (turvas, järvemuda ja -lubi) paksus võib ulatuda 15 meetrini (Rattas, 2004). Soostumise puhul on domineerivaks tüübiks madal soo, rabasid esineb turbakihi kuhjumisel tekkinud kohalikel veelahkmetel (Allikvee & Orru, 1979). Levinud on puu- ja puu-pillirooturvas, mille niiskusesisaldus on tavaliselt vahemikus 85-86 %, tuhasus 6-15 % ja lasundi paksus keskmiselt 2,5 m (Orru, 1997). Sood katavad 20,3 % Vooremaast (Arold, 2005).

1.2 Rahivere raba asukoht ja varasem uuritus

Rahivere raba asub Vooremaa idaosas Jõgeva maakonna Palamuse ja Saare valla territooriumil. Tartust jääb raba 40 km põhja, Saarelt 5 km loode ja Palamuselt 8 km ida suunas (joonis 1). Aastal 1977 teostas tollane Eesti NSV MN Geoloogia Valitsus Jõgeva rajoonis turbamaardlate otsingu-uuringutöid. Tööde käigus piiritleti 13 puuraugu andmete alusel Rahivere rabana 91 ha suurune ala, sellest tööstuslasundina (maardlana) 55 ha (Allikvee & Orru, 1979). Maardla kasuliku varuna kirjeldati puidulisandiga keskmiselt lagunenu madal sooturvast ja raba-segalasundi keskmiselt lagunenu siirdesooturvast (pindmises osas rabaturvast). Allikvee ja Orru (1979) hindasid Rahivere turbamaardla varudeks 96 100 t, sellest



Joonis 1. Rahivere turbamaardla asend keskkonnaregistri andmetel (Allikvee & Orru, 1979 alusel). Kaardiraamist väljaspool sinises kirjas on geograafilised koordinaadid, mustas kirjas koordinaadid L-EST97 süsteemis. Tumesinise pidevjoonega on antud maardla piir; helesinise katkendjoonega hästilagunenud turba aktiivse reservvaru ploki 1 (kattub maardla piiriga) ja vähelagunenud turba aktiivse reservvaru ploki 2 piir. Plokk 2 lasub ploki 1.

Tabel 1. Rahivere maardla näitajad (Allikvee & Orru, 1979; alusel).

Tööstuslasundi põhinäitajad	Madal soo	Raba-segalasund
Pindala (ha)	15,0	40,0
Keskmine paksus (m)	1,04	1,84
Maksimaalne paksus (m)	1,7	3,6
Lagunemisaste (%)	32	19,0
Looduslik niiskus (%)	90,0	94,2
Tuhasus (%)	5,0	4,4
Varu (t)	27 000	69 100

madal soolasundis 27 000 t ja raba-segaturbalasundis 69 100 t. Varude arvutamiseks mõõdeti nimetatud töös polaarplanimeetriga lasundite pindalad ja kihtide keskmised paksused leiti tuginedes puuraukude andmetele (tabel 1). Varude maht (Q) leiti valemi

$$Q = S \times h \times 10000 \quad (\text{m}^3) \quad (\text{Valem 1})$$

alusel, kus S = ala pindala (ha) ning h = lasundi keskmine paksus (m). Saadud mahud arvutati ümber massideks valemi

$$Q_m = Q \times P \quad (\text{t}) \qquad (\text{Valem 2})$$

alusel, kus Q_m = turba kaal tonnides, Q = toorturba maht (m^3) ja P = koefitsent (1 m^3 turba kaal tonnides 40 %lise niiskusesisalduse juures).

Kuna Rahivere raba on üks vähestest looduslikuna säilinud rabadest Vooremaal, soovitati uuringuaruandes tema säilitamist teaduslikel eesmärkidel, näiteks suhteliselt kiire soostumise põhjuste uurimiseks.

Eesti Maavarade Komisjoni 27. oktoobri 1998. a istungi protokolliga nr 98-69 kinnitati Rahivere turbamaardla pindalaga 53,63 ha ja turba aktiivse reservvaruna 97 000 t (sellest vähelagunenud turvast 5000 t ja hästilagunenud turvast 92 000 t) ning soovitati kanda maardla selliste varudega Riiklikku Maavarade Registrisse (praegune keskkonnaregistri maardlate nimistu). Eesti Maavarade Komisjon sai toleaeagselt registripidajalt, OÜ-lt Eesti Geoloogiakeskus, paber kandjal registrikaardi toimiku, mille alusel varud kinnitati. Mahu ümberhindamise otsused ja vastavad arvutused avalikult kättesaadavates dokumentides ei kajastu. Käesoleva töö koostaja ei suutnud tuvastada, miks keskkonnaregistri andmed erinevad esialgse uuringu tulemustest.

1.3 Georadari tööpõhimõte

Turba levikut Rahivere maardlas uuriti kasutades georadarit. Georadar (GPR, *ingl. ground-penetrating radar*) on seade, millega uuritakse maapinnalähedasi (<50 m) settekihte ja lahendatakse geoloogilisi (nt aluspõhja reljeefi kaardistamine), hüdrogeoloogilisi (nt põhjaveetasemete, karstivormide leviku uurimine), arheoloogilisi ja muid ülesandeid. Georadari tööpõhimõtte kohaselt tekitatakse komplekti kuuluva saate-antenni kaudu kõrge sagedusega (10 – 1000 MHz) elektromagnetilised impulsid, suunatakse need (eelistatult) pinnasesse, millest nad peegelduvad osaliselt tagasi maapinnale (Davis & Annan, 1989). Elektromagnetlainete peegeldumine toimub pinnasesiseste füüsikaliste omaduste, eelkõige magnetilise vastuvõtlikkuse, elektrijuhtivuse ja dielektrilise permittiivsuse, muutuste tõttu (Daniels, 2004). Sisuliselt määravad kaks esimest parameetrit elektromagnetilise

signaali levikusügavuse ja kolmas -kiiruse. Elektrit halvasti juhtivas (dielektrilises) materjalis hajub signaal aeglasemalt, mistõttu selle uurimissügavus on suurem kui hea elektrijuhi korral. Peegeldunud lained võetakse maapinnal vastu vastuvõtu-antenni abil, registreerides lainekuju, aja ja asukoha. Lisaks antenni(de)le kuulub georadari komplekti üldjuhul väline toiteallikas, juhtplokk ja sülearvuti profiilide salvestamiseks ja koheseks kuvamiseks.

Elektromagnetlainete levikukiirus vaakumis (c_0) on $0,3 \text{ mns}^{-1}$, setendites tavaliselt $0,01\text{-}0,17 \text{ mns}^{-1}$ (Moorman *et al.*, 2003) tulenevalt aatomite/molekulide käitumisest magnetiliste või elektriliste dipoolidena¹. Praktikas arvutatakse laine levikukiirus (v) valemiga:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} (\text{mns}^{-1}), \quad (\text{Valem 3})$$

kus ϵ_r = permitiivsus ehk keskkonna suhteline dielektriline läbitavus (Fm^{-1}). Elektromagnetlaine pikkus (λ) sõltub sagedusest (f):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{Valem 4})$$

Valemist 4 tulenevalt on tulemuse resolutsioon seda suurem, mida suuremat sagedust kasutatakse, samas aga seonduvalt hajuvusega on suuremate sageduste puhul uurimissügavus väiksem (Davis & Annan, 1989).

Kivimid ja setted sisaldavad alati teatud määral vett, mille permitiivsuse väärtus on looduses levinud keskkondadest suurim (80) tänu vee molekuli polaarsusele (tänu vesiniku aatomi positiivsele ja hapniku aatomi negatiivsele laengule). Suur permitiivsus põhjustab aga elektromagnetlaine madala levikukiiruse (valem 3). Seetõttu mõjutab mineraalse materjali dielektrilisi omadusi oluliselt nii poorsus kui ka poorivee sisaldus. Erinevate keskkondade permitiivsuste ja elektromagnetlainete kiiruste ligikaudsed arvulised väärtused on antud tabelis 2.

¹ Dipoolid on laetud otstega molekulid, mis tekivad polaarse kovalentse sideme korral. Ühine elektronpaar on suunatud suurema elektronegatiivsusega aatomi poole. Dipoolid on omavahel alati vastastikmõjus, sest erinimelised laengud tõmbuvad ja samanimelised tõukuvad.

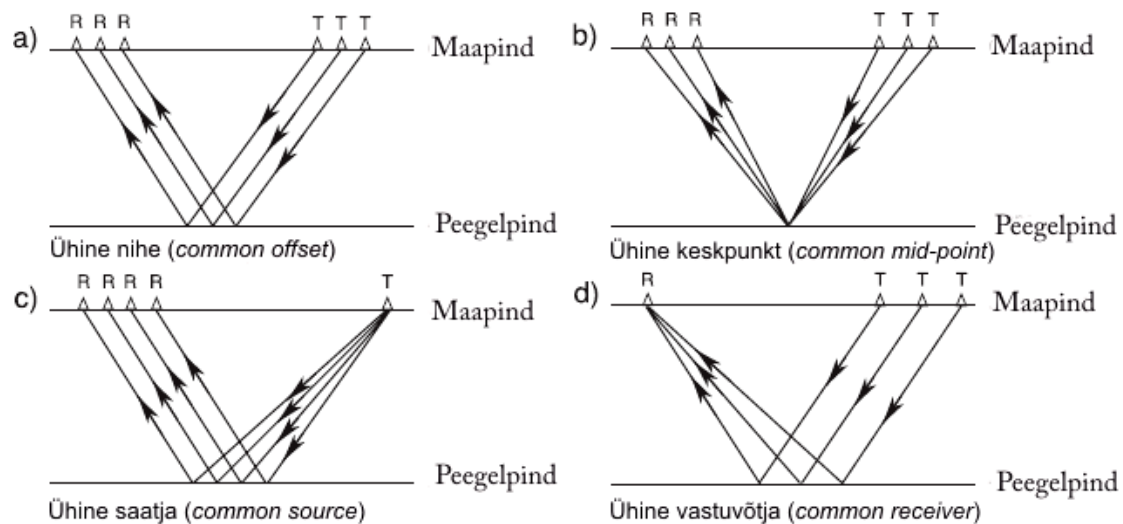
Tabel 2. Erinevate keskkondade permitiivsused (ϵ_r), elektromagnetlainete levikukiirused (v) ja läbimissügavused (δ) sageduse 100 MHz juures (Davis & Annan, 1989 alusel).

Keskkond	ϵ_r	v (mns ⁻¹)	δ (m)
Õhk	1	0,3	∞
Mage vesi	80	0,033	2,24
Jää	3-4	0,16	15,8
Kuiv liiv	3-5	0,15	50
Veega küllastunud liiv	20-30	0,06	1,58
Savi	5-40	0,06	0,05
Lubjakivi	4-8	0,12	1,18
Graniit	4-6	0,13	1,58

Tehes mõõtmisi talvistes oludes nii nagu need toimusid käesoleva magistritöö raames, peab läbilõigete interpreteerimisel arvestama ka lume ja jää dielektriliste omadustega. Jää permitiivsus erineb vee vastavast näitajast oluliselt, olles ligikaudu 20 korda väiksem (tabel 2). Sellisest käitumisest tulenevalt on georadarit edukalt kasutatud veekogude jää, liustike ja igikeltsa uuringutel (näiteks Gruber & Ludwig, 1996; Schwamborn *et al.*, 2007; Plewes & Hubbard, 2001). Lume permitiivsust mõjutavad niiskus, poorsus, kristallide kuju ja temperatuur. Tihendatud ja kuiva lume permitiivsus on võrreldav jää vastava näitajaga (Godio, 2009), kuid samas võib märja lume permitiivsus olla kordades suurem. Värskes lumes võib veesisaldus jääda alla 3 %, sula korral ületada 15 %.

Turba elektromagnetilisi omadusi mõjutavad paljuski tema koostis ja pooriveses lahustunud ionide kontsentratsioon. Reeglina saadakse georadariga selged peegeldavad signaalid kohtades, kus pinnase veesisalduses on suuremad muutused. Seetõttu saadakse väljapeetud peegeldused sageli just turba ja mineraalpinnase piirilt, kuna turba veesisaldus võib mineraalpinnase veesisaldusest olla oluliselt suurem. Lokaalselt võivad veesisalduse muutustest tulenevalt esile kerkida ka turba sisemised peegeldused (Slater & Reeve, 2002).

Georadar annab tavaliselt head tulemusi happelises, toitainetevaeses rabaturbas. Eutroofset madalsooturvast, mis sisaldab rohkem Ca²⁺, Mg²⁺ ja K⁺ ioone, läbivad radari impulsid halvemini. Suurema sügavuse (turba suurema paksuse) korral võib siis peegeldav pind radargrammil muutuda katkendlikuks (Daniels, 2004).



Joonis 2. Maapinnalt kasutatavad georadari aparatuuriskeemid, a) ühise nihke meetod, b) ühise keskpunkti meetod, c) ühise saatja meetod ning d) ühise vastuvõtja meetod. R = saateantenn; T = vastuvõtuantenn.

Elektromagnetiliste lainete levikukiiruseks turbas on saadud $0,037 \text{ mns}^{-1}$ ($\epsilon_r \text{ turbas} = 66$; Theimer *et al.*, 1994) kuni $0,040 \text{ mns}^{-1}$ ($\epsilon_r \text{ turbas} = 56$; Rosa *et al.*, 2009). Eestis on kasutatud veelgi suuremaid väärtusi (72; Selisoo; A. Jõelet, personaalne suhtlus). Olenevalt eesmärgist on turba uuringul soovitatud kasutada sagedusi 80 kuni 500 MHz. Madalamad sagedused sobivad paremini turbakihi paksuse määramiseks, kõrged seevastu eri turbatüüpide niiskusesisalduse hindamiseks (Hänninen, 2004). Turba permitiivsuse ja elektromagnetlainete levikukiiruse arvutamiseks on radariandmeid kalibreeritud puuraukudest saadud informatsiooniga (Comas *et al.*, 2005) või siis kasutades ühise saatja meetodit (joonis 2c), kus saatjana kasutatakse ühte ning vastuvõtjana teist antenni (Daniels, 2004).

Radaritööde enimkasutatava aparatuuriskeemi kohaselt (ühine nihe; joonis 2a) liigutatakse saatjat ja vastuvõtjat, mille vahekaugus on fikseeritud, piki maapinda. Permitiivsuse kindlakstegemiseks kasutatakse aga ühise keskpunkti, ühise saatja ja ühise vastuvõtja meetodit (joonis 2b-d; Neal, 2004).

Radariga töötades on oluline määratleda optimaalne vahemaa (*ingl. step size, trace*), mille läbimise järel elektromagnetlained saatjast väljastatakse. Soovitav on mitte ületada Nyquist'i intervalli ($\frac{1}{4}$ kuni $\frac{1}{2}$ laine teekonnast peegeldava pinnani). Sõltuvalt kasutatava antenni sagedusest on soovitatud intervalli 0,1 kuni 0,5 m. Kui andmepunktid paiknevad liiga hõredalt, võib osa olulist teavet, eelkõige peegeldava pinna muutliku reljeefi puhul, kaotsi minna (Jol & Bristow, 2003). Tänapäeval, GPS-

seadmeid kasutades, radariprofiilid ja selle kaudu ka võimaliku peegeldava pinna asend koordineeritakse võimaldades edasise pindade analüüsi kasutades geograafilisi infosüsteeme.

1.4 Interpoleerimine

Pindade loomiseks kasutatakse koordinaatidega varustatud punktobjekte või isojooni. Punktidest pindade loomist ja nende mahu arvutamist võimaldavad erinevad arvutiprogrammid nagu Surfer, MapInfo koos lisapaketiga Vertical Mapper, ArcGIS koos laiendusega 3D Analyst ning mitmed kolmemõõtmeliste geoloogiliste kehade modelleerimiseks loodud lahendused (Gocad, Surpac, GeoModeller jt).

Pindade loomisel võib kasutada interpoleerimist ja ekstrapoleerimist. Interpoleerimise käigus genereeritakse uued väärtused teadaolevate andmepunktide väärtuste alusel andmetega kaetud piirkonna piires. Ekstrapoleerimisel lisatakse uued punktid andmetega kaetud piirkonnast väljaspoole. Interpoleerimisalgoritme ehk interpolaatoreid grupeeritakse (Burrough & McDonnell, 1998) mitmeti: a) punkti-, joone- ja pinna interpolaatorid (vastavalt kasutatavate objektide tüübile); b) globaalsed ja lokaalsed interpolaatorid (globaalseid rakendatakse tervele uuringupiirkonnale, lokaalseid vaid teatud osale sellest); c) täpsed ja ligikaudsed interpolaatorid (täpsed arvestavad pinna loomisel kõiki andmepunkte, ligikaudsed vaid osasid neist) ning d) stohhastilised (geostatistilised) ja deterministlikud interpolaatorid (stohhastilised arvestavad juhuse ja tõenäosusega, deterministlikud mitte).

Deterministlikke algoritme saab omakorda jaotada täpseteks ja siluvateks. Täpsel interpolatsioonil väärtused algsetes andmepunktides ei muutu. Selliste hulka kuuluvad näiteks kaalutud pöördkauguse (IDW – *ingl. inverse distance weighted*) ja loomuliku naabri (NN – *ingl. natural neighbor*) meetod. Siluvat interpolatsiooni võib kasutada järskude üleminekute vältimiseks loodavas mudelis, seejuures muutuvad väärtused ka algsete andmepunktide asukohas (ESRI, 2008). Stohhastilistest meetoditest kasutatakse sagedamini *kriging*'ut.

ArcGIS tarkvara tunneb kolme tüüpi pindasid: raster, TIN (*ingl. triangulated irregular network*) ja *terrain*. Rasterpinda võib kirjeldada ridadeks ja veergudeks jagatud regulaarse struktuuriga maatriksina, kus iga punkti (piksli) kohta on teada asukohakoordinaadid ja atribuutide väärtused. Ühe pinna moodustavad konstantse

suurusega pikslid, mida väiksemad, seda parema resolutsiooniga on vastav pind. Teisalt kulub väikeste pikslitega pinna moodustamiseks rohkem aega. TIN on andmepunktide ühendamisel loodud kolmnurkade ebaregulaarne võrgustik. *Terrain* on ArcGISile ainuomane andmetüüp, millega määratakse kindlaks TIN-pindade esitusviis. *Terrain* võib koosneda paljudest erinevas mõõtkavas TINidest, mille andmeid hoitakse geoandmebaasis (ESRI, 2008). Punktobjektidest rasterpindade tegemiseks annab ArcGIS kaheksa moodust: *IDW*, *kriging*, *spline*, *natural neighbor*, *spline with barriers*, *topo to raster*, *topo to raster by file* ja *trend*. Käesolevas magistritöös testiti neist nelja sagedamini kasutatavat (tabel 3).

Splain (*ingl. spline*) on deterministlik interpolatsioon, kus kasutatakse andmepunkte läbivaid kõveraid (Eckstein, 1989). Splaine saab kasutada näiteks tiheda ja regulaarse andmestiku alusel isojoonte tegemiseks ja suhteliselt väikese kõrgusvahega pindade (lauge reljeef, veetasemed jms) konstrueerimiseks. Probleeme võib tekkida olukorras, kus algandmed paiknevad tihedalt ja nende interpoleeritavad väärtused on väga erinevad. ArcGISi spline-funktsioon võib olla korrapärase (*ingl. regularized*) või pingutatud (*ingl. tension*). Esimene variant loob sileda, aeglaselt muutuva pinna, mis võib ulatuda etteantud andmepunktidest kaugemale. Teisel juhul on loodav pind ebaühtlasem ja piiratud algandmete koordinaatidega. Veel saab splaini jaoks muuta väljundiks oleva pinna piksli suurust (*ingl. output cell size*), kaalu (*ingl. weight*) ja uue punkti interpoleerimiseks kasutatavate andmepunktide arvu (vaikimisi12). Suurem kaal muudab korrapärase splaini pinna siledamaks ja pingutatud splaini korral kontrastsemaks.

Tabel 3. Töös kasutatud lokaalsete interpolaatorite võrdlus (Burrough & McDonnell, 1998 alusel)

Meetod	S/D	Täpne/ ligikaudne	Iseloomulikud omadused	Väljund
Splain	D	Täpne, silumise piires	Sobib kõrgusmodelite tegemiseks suhteliselt siledate alade jaoks	Rasterpind, samajooned
Kaalutud pöörkaugus	D	Vajadusel täpne	Tulemus sõltub eelnevalt määratud punktide "kaalust" ja otsinguakna suurusest.	Rasterpind
Loomulik naaber	D	Täpne	Tesselatsioon* sõltub andmepunktide ruumilisest jaotusest	Rasterpind
<i>Kriging</i>	S	Täpne	Tulemus sõltub variogrammist	Rasterpind

S = Stohhastiline; D = Deterministlik; *Tesselatsioon on pinna reeglipärane osadeks (nt kolmnurkadeks, polügoonideks) jagamine.

Kaalitud pöördkauguse (IDW) meetodi puhul arvutatakse loodava pinna pikslitele uued väärtused teadaolevate andmepunktide väärtuste keskmistamise teel. Mida lähemal on teadaoleva väärtusega punkt interpoleeritavale punktile, seda suurem mõju (kaal) talle omistatakse (ESRI, 2008).

ArcGISi IDW interpolaatori jaoks saab määrata järgmised parameetrid: piksli suurus (*ingl. output cell size*), aste (*ingl. power*), otsinguraadius (*ingl. search radius*) ja otsinguraadiust piiravad jooned (*ingl. input barrier polyline features*). Suur astmenäitaja annab rohkem kaalu lähemal asuvatele andmepunktile, samas on loodav pind ebaühtlasem kui väikese astmenäitaja puhul. Otsinguraadius võib olla fikseeritud või muudetav. Esimesel juhul kasutatakse kõiki otsinguraadiusse (vaikimisi viiekordne piksli suurus) jäävaid punkte. Ühtlasi suurendatakse otsinguraadiust, kaasamaks etteantud minimaalset punktide hulka. Muudetava otsinguraadiuse kasutamisel saab määrata punktide hulga (vaikimisi 12) ja suurima vahemaa otsitavate punktideni. Kui etteantud vahemaa järgi jääb otsinguraadiusse soovitud vähem punkte, siis kasutataksegi vaid neid. Otsinguraadiust piiravate joontega saab eirata ebasobivad andmepunkte. IDW on sobilik eelkõige ühtlaselt jaotatud andmepunktidest pindade loomiseks.

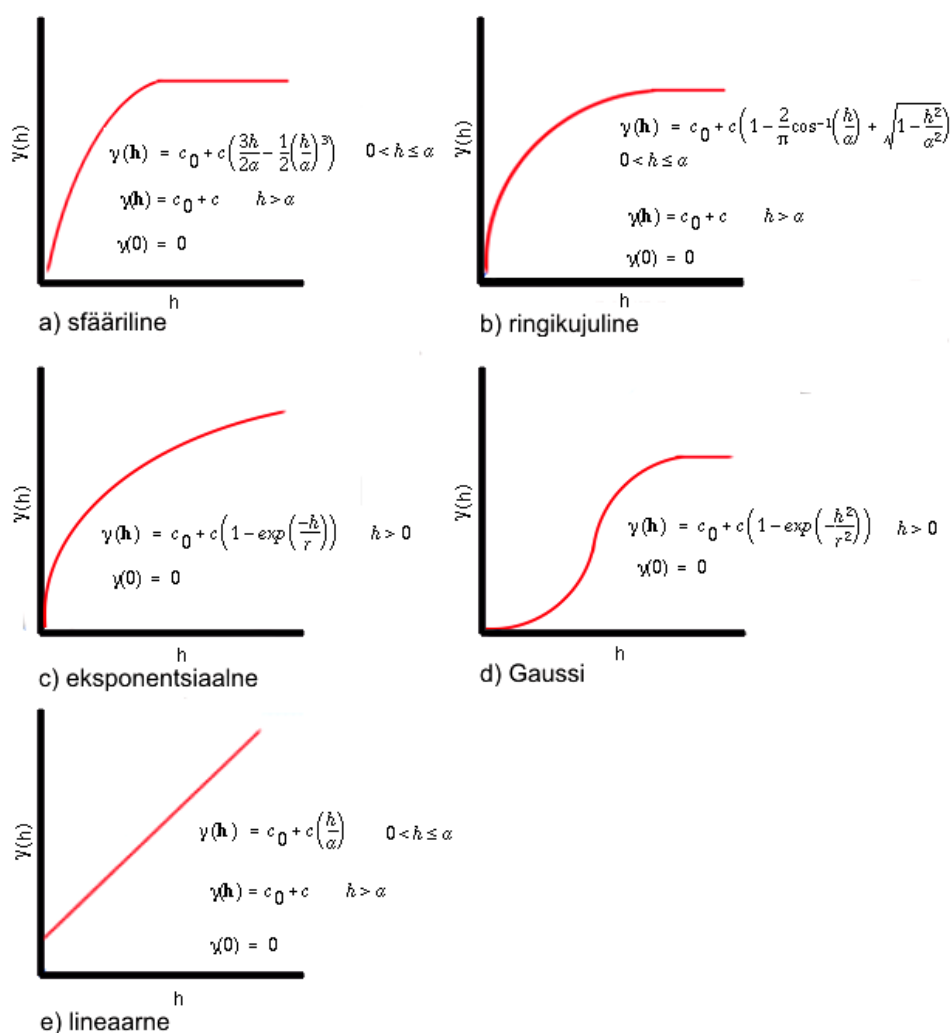
Uue punkti loomist saab kirjeldada valemiga

$$Z_{i(\text{int})} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i, \quad (\text{Valem 5})$$

kus $Z_{i(\text{int})}$ = interpoleeritud väärtus punktis i , Z_i = mõõdetud väärtus punktis i , λ_i = punktis i mõõdetud väärtusele omistatud kaal ning n = punktide arv.

Kriging-interpolatsioon, mille nimetus on tuletatud Lõuna-Aafrika kaevandusinseneri D. G. Krige nimest (Cressie, 1993), on küllaltki sarnane eelmise meetodiga. Kui IDW puhul sõltub λ_i ainult vahemaast tema eeldatavasse asukohta, siis *kriging* arvestab lisaks andmepunktide paiknemist üksteise suhtes st olemasolevaid väärtusi uue punkti eeldatavas asukohas (ESRI, 2008). *Kriging* on mitmeetapiline protsess, mis hõlmab algandmete statistilist töötlust, variogrammide ja pindade loomist ja lõpuks pindade analüüsi. ArcGISi *kriging*-funktsioon on ordinaalne või universaalne. Ordinaalsel juhtumil pole teada ühtegi valdav trendi,

universaalse *kriging*'u puhul on eelnevalt teada mõni dominant (nt maapinna kallakus), mida saab modelleerida polünoomi² abil. Ordinaalset *kriging*'ut saab teostada viie variogrammi mudeli³ järgi (joonis 3). Sfääriline mudel saavutab lävendi teatud ulatuspiirkonnas, eksponentsiaalse ja Gaussi mudeli korral koheldakse lävendit



Joonis 3. ArcGISi *kriging*'u interpolatsiooni variogrammi mudelid (ESRI, 2008, järgi) ning võrrandid. Võrrandites tähistab h laagi ehk andmepunktide vahelist kaugust, $\gamma(h)$ poolhajuvust⁴, c lävendit⁵, r ja α ulatuspiirkonda⁶.

² Polünoom on hulkliige, mille liikmeteks on naturaalarvuliste astendajatega astmed koos kordajatega.

³ Variogrammi mudeliga saab kirjeldada andmepunktide vahelisest distantist (laagist) sõltuvat varieeruvust (ruumilist korrelatsiooni) graafiku või valemiga.

⁴ Poolhajuvus (*ingl. semivariance*) on keskmine ruuthälve vaatluspaarides.

⁵ Lävend (*ingl. sill*) on poolhajuvuse amplituud. Näiteks sfäärilise variogrammi (joonis 3a) lävendiks on vahemaa horisontaalsest koordinaatteljest kohani, kus poolhajuvust tähistav punane joon muutub samuti horisontaalseks.

⁶ Ulatuspiirkond (*ingl. range*) on laagi väärtus, kus poolhajuvus jõuab lävendini. Näiteks sfäärilise variogrammi (joonis 3a) ulatuspiirkond on vahemaa vertikaalsest koordinaatteljest kohani, kus poolhajuvust tähistav punane joon muutub horisontaalseks.

asümptootiliselt⁷ ja ulatuspiirkonnaks on amplituud, kus saavutatakse 95 % lävendi väärtusest. Gaussi mudeliga, mis alguses sarnaneb paraboolile, saab paremini iseloomustada sujuvalt muutuvaid väärtusi. Sfääriline ja eksponentsiaalne mudel, mis käituvad alguses lineaarselt, sobivad suurema varieeruvuse kirjeldamiseks. Vajadusel saab kõiki variogrammi mudeleid omavahel kombineerida (Bohling, 2005).

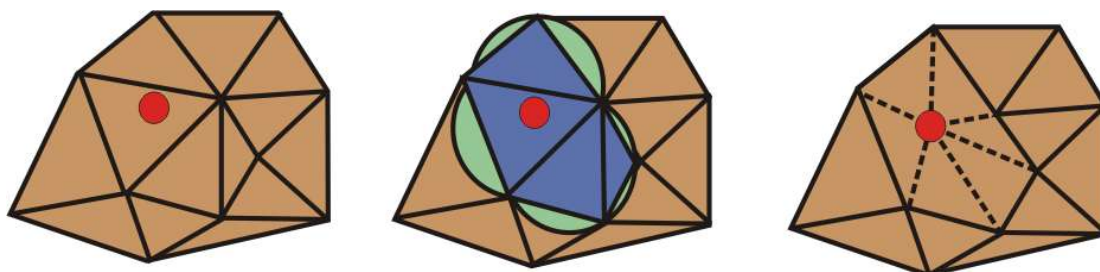
Kriging on sobiv meetod juhul, kui algandmetes on võimalik jälgida ruumiliselt korreleeruvat vahemaad, kallakut vm omadusi. Geoloogiliste andmete puhul kasutatakse seda meetodit üsna sageli. ArcGIS (ESRI, 2008) soovib sobiva *kriging*'u algoritmi leidmiseks *esmal*t arvutada vaatlus-variogrammi (*ingl. graph*), *teiseks*, leida sobiv variogrammi mudel kasutades vaatlus-variogrammi, *kolmandaks*, luua varieeruvuse isojooned (laiendustarkvara Spatial Analyst) kusjuures suure variatsiooniga piirkonnad võivad vajada rohkem andmepunkte ning *neljandaks*, proovida universaalset *kriging*'ut juhul kui andmetes on võimalik eristada ruumilist trendi.

TINe ehk ebakorrapäraseste kolmnurkade abil tekitatud pindu saab kasutatada kolmemõõtmeliste mudelite pindala ja ruumala arvutamiseks. Kolmnurkade loomiseks kasutatakse ühe variandina nn massipunktide (*ingl. mass points*) asukohainformatsiooni ja atribuudiväärtusi. Massipunktid võiksid soovitatavalt paikneda kohtades, kus pinna reljeefis on suuremad muutused. TINi algandmeteks võivad olla ka joonte või polügoonide käänupunktid. Kolmnurkade loomisel järgitakse Delaunay triangulatsiooni põhimõtteid, mille kohaselt ei tohi kolmnurga kõikide otspunktide ühendamisel tekkiv ringjoon sisaldada ühtegi andmepunkti. Uue punkti lisamisel leitakse ja kustutatakse kõik kolmnurgad, mille perimeeter seda punkti sisaldab ning ühendatakse verteksid uuesti (joonis 4). Pinna loomisel salvestatakse iga kolmnurga number, naabruses asuvate kolmnurkade numbrid, otspunktide (verteksite) X, Y, Z koordinaadid ja verteksite vahele jääva sirge tüüp (*ingl. hard/soft*).

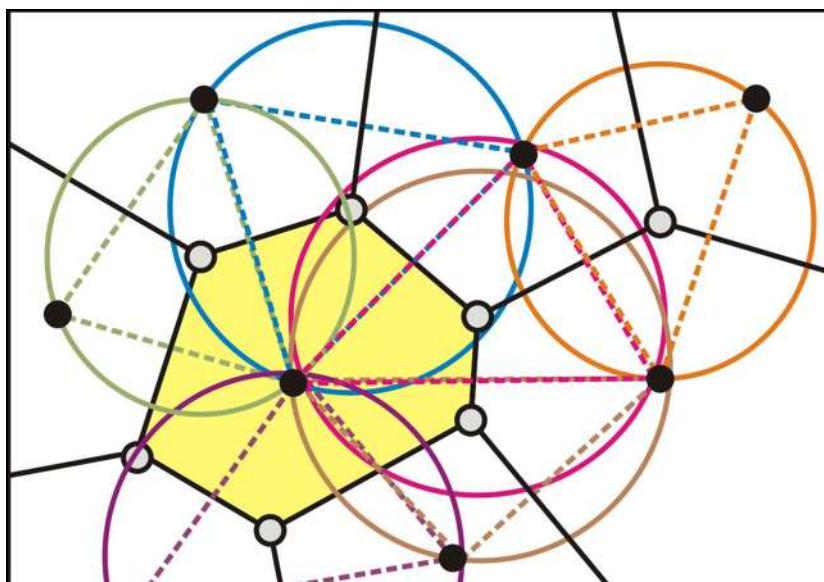
Vajadusel saab TINi morfoloogiat täpsustada joon- ja pindobjektidega. Võrreldes rasterpinnaga iseloomustab TINi tõhusam andmesalvestus ja võime muuta pinna resolutsiooni vastavalt vajadusele. Interpoleerimise tulemusel võib rasterpinnas olev piksel saada sealsamas paiknevast andmepunkist erineva väärtuse, kuid TIN-mudeli loomiseks andmepunktide väärtusi ei muudeta.

⁷ Asümptoot on sirge, millele hakkab lähenema funktsiooni graafik.

Loomuliku naabri (*ingl. natural neighbor*) interpolatsioonil luuakse Delaunay trianguatsiooni tingimusi täites andmepunktidest Voronoi (Thiesseni) polügoonid. Esmalt saadakse kõike andmepunkte kasutades nn Voronoi diagrammi, kus polügoonide verteksites on Delaunay kolmnurkade ümber olevate ringide keskpunktid (joonis 5). Iga andmepunkti ümber genereeritakse uus polügoon ja andmepunktile antakse kaal vastavalt sellele, kui suur on ülekatte esialgsete ning Loomuliku naabri (tuletatud polügoonide vahel. Erinevalt IDW ja *kriging*'u tehnikatest ei saa loomuliku naabri interpolatsioonil seadistada teisi parameetreid peale väljundiks oleva rasterpinna piksli suuruse (ESRI, 2008).



Joonis 4. Uue punkti lisamine TIN mudelisse vastavalt Delaunay triangulatsioonile (ESRI, 2008, järgi). Punkt sattus siniseid kolmnurki ümbritsevate ringide sisse, vastavad kolmnurgad asendatakse uutega (katkendjooned).



Joonis 5. Voronoi polügoon (kollane ala) ja Delaunay kolmnurgad (värvilised katkendjooned) koos verteksite (mustad punktid) ja perimeetritega (värvilised ringid). Ringide tsentrid (valged punktid) on Voronoi polügooni verteksites (Sibson, 1981 alusel).

1.5 Rasterpindade analüüs

Geostatistiliste töötluste puhul hinnatakse ruumianalüüside täpsust sageli ruutkeskmise vea (*RMSE ingl. root mean square error*) järgi (Siska & Hung, 2001):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{i(int)})^2}, \quad (\text{Valem 6})$$

kus Z_i = mõõdetud väärtus punktis i , $Z_{i(int)}$ = interpoleeritud väärtus punktis i ja n = punktide arv. Teise indikaatorina on kasutusel keskmine absoluutviga (*MAE ingl. mean absolute error*):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - Z_{i(int)}|, \quad (\text{Valem 7})$$

MAE võib anda adekvaatsema tulemuse väiksemate andmehulkade jaoks, kuna *RMSE* on tundlikum ekstreemumväärtuste suhtes (Anderson, 2002). Kehtib seaduspära $RMSE \geq MAE$. Lõpuks võib arvutada välja iga meetodi suhtelise eelise (*RI ingl. relative improvement*) teiste ees:

$$RI = \frac{100(RMSE_1 - RMSE_2)}{RMSE_1}, \quad (\text{Valem 8})$$

kus $RMSE_1$ = erinevate mudelitega saadud väikseim ruutkeskmise viga ja $RMSE_2$ = hinnatava mudeli ruutkeskmise viga (Bello-Pineda & Hernández-Stefanoni, 2007). ESRI soovib rasterpindade võrdlemiseks kasutada ArcGISi lisapaketti Geostatistical Analyst. Käesoleva töö tegemisel seda võimalust polnud, pindade analüüs teostati Spatial Analyst'i vahenditega (Raster Calculator *jt.*).

1.6 Töö eesmärk

Eesti turbamaardlate varude hindamisel lähtutakse keskkonnaministri 26. mai 2005. a määrusest nr 44 "Üldgeoloogilise uurimistöo ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord" (RTL, 07.06.2005, 60, 866). Turbalasundid jaotatakse seal neljaks: a)

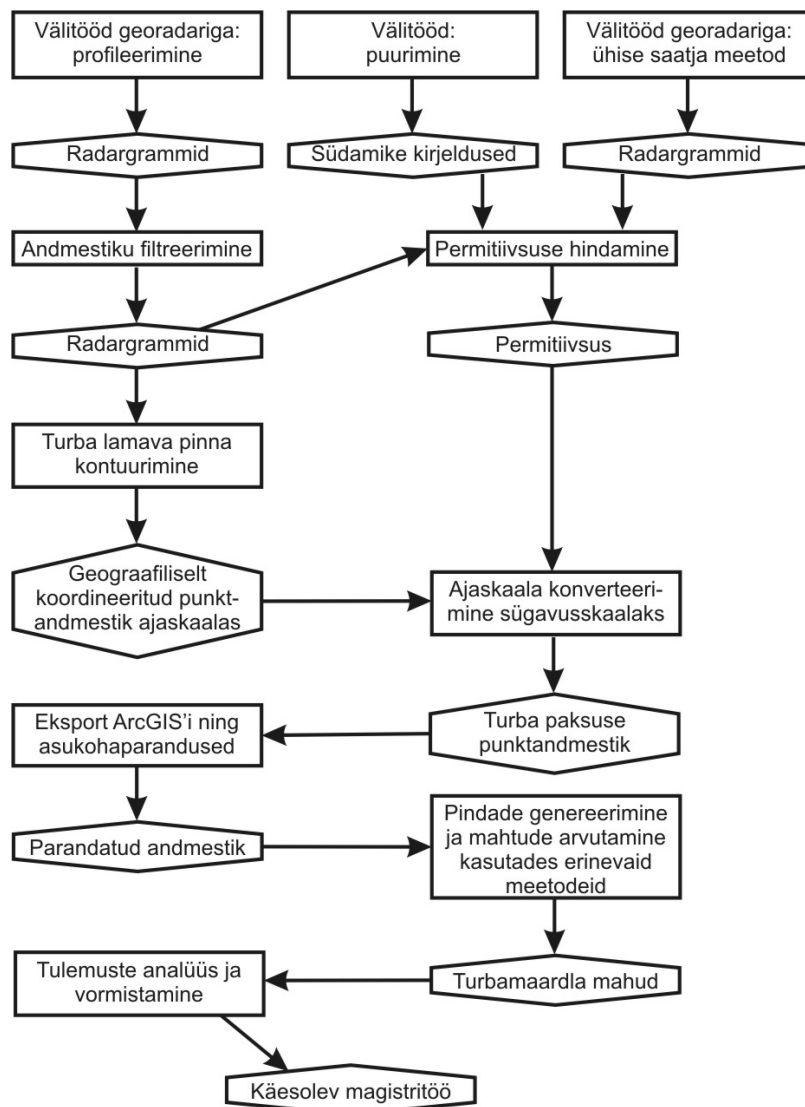
madalsoo-, b) siirdesoo-, c) rabasega- ja d) rabalasund. Lagunemisastme järgi eristatakse a) vähelagunenud turvast (sh raba- ja siirdesooturvas lagunemisastmega alla 25 % ja madalsooturvas lagunemisastmega alla 15 %) ning b) hästilagunenud turvast. Määruse kohaselt peab sõltuvalt uuringuala pindalast ning maardla geoloogilisest ehitusest, uuringuvõrgu tihedus tarbevaru määramisel olema 100 × 100 või 200 × 200 meetrit. Turbalasundit sondeeritakse käsipuuriga vastava võrgustiku alusel, mõõdetakse lasundi kogupaksus, vähelagunenud turba kihi paksus ning järvemudalasuendi paksus täpsusega 0,05 m ja iseloomustatakse turba lamamiks olevat mineraalpinnast. Varu arvutamiseks kasutatakse plokkide meetodit ja paksusväärtuste interpoleerimist. Vähe- ja hästilagunenud turbakihtide maht arvutatakse eraldi 1000 m³ täpsusega. Lõpuks teisendatakse varu tuhandetesse tonnidesse mainitud määruse lisas 2 toodud koefitsientide abil.

Magistritöös otsitakse turbakihi paksuse määramiseks ning maavara koguse väljaselgitamiseks alternatiivset lahendust kasutades georadarit. Uuringute teostamisel eeldati, et georadariga on võimalik lokaliseerida turbalasundi lamava pinna asend (määrata turba paksus) ning seda täpsemalt kui tuginedes vaid puurimisandmetele. Turbalasundi lamamiks olevalt mineraalpinnaselt tekkivatele elektromagnetlainete peegeldustele viitavad uurimused Eestist (Selisoo; A. Jõelet, personaalne suhtlus) aga ka mujalt (Holden *et al.*, 2002; Comas *et al.*, 2005; Rosa *et al.*, 2009) seonduvalt turba ja mineraalpinnase erinevustele nende elektrilistes omadustes. Töö käigus otsustati keskenduda turba kogumahu arvutamisele, sest radargrammidel ei ilmnenud selget piiri vähe- ja hästilagunenud turba eristamiseks.

Tööde kaugemaks eesmärgiks oli püüda leida optimaalseim profileerimisintervall ning, kasutades ArcGIS tarkvarapaketi sisalduvaid pindade genereerimise tööriistu, selgitada välja georadari andmestiku alusel saadud turba paksuste töötlemiseks (mahtude arvutamiseks) sobivaim meetod.

2 Metoodika

Georadariga töötamine hõlmab tavaliselt andmete kogumist ehk välitööd ning hilisemat tulemuste interpreteerimist ja analüüsimist. Vastavalt eesmärkidele ja võimalustele on võimalik kummagi tööetapi puhul kasutada erinevaid vahendeid (Neal, 2004). Käesoleva töö metoodilise lahenduse skeem (teostusvoog) on näidatud joonisel 6.



Joonis 6. Rahivere turbamaardla uuringutööde skeem (teostusvoog), kus tegevused on toodud ristkülikute ning tulemused hulktahtukate abil. Üksikute etappide ning tulemuste detailsemad kirjeldused on toodud tekstis.

2.1 Välitööd

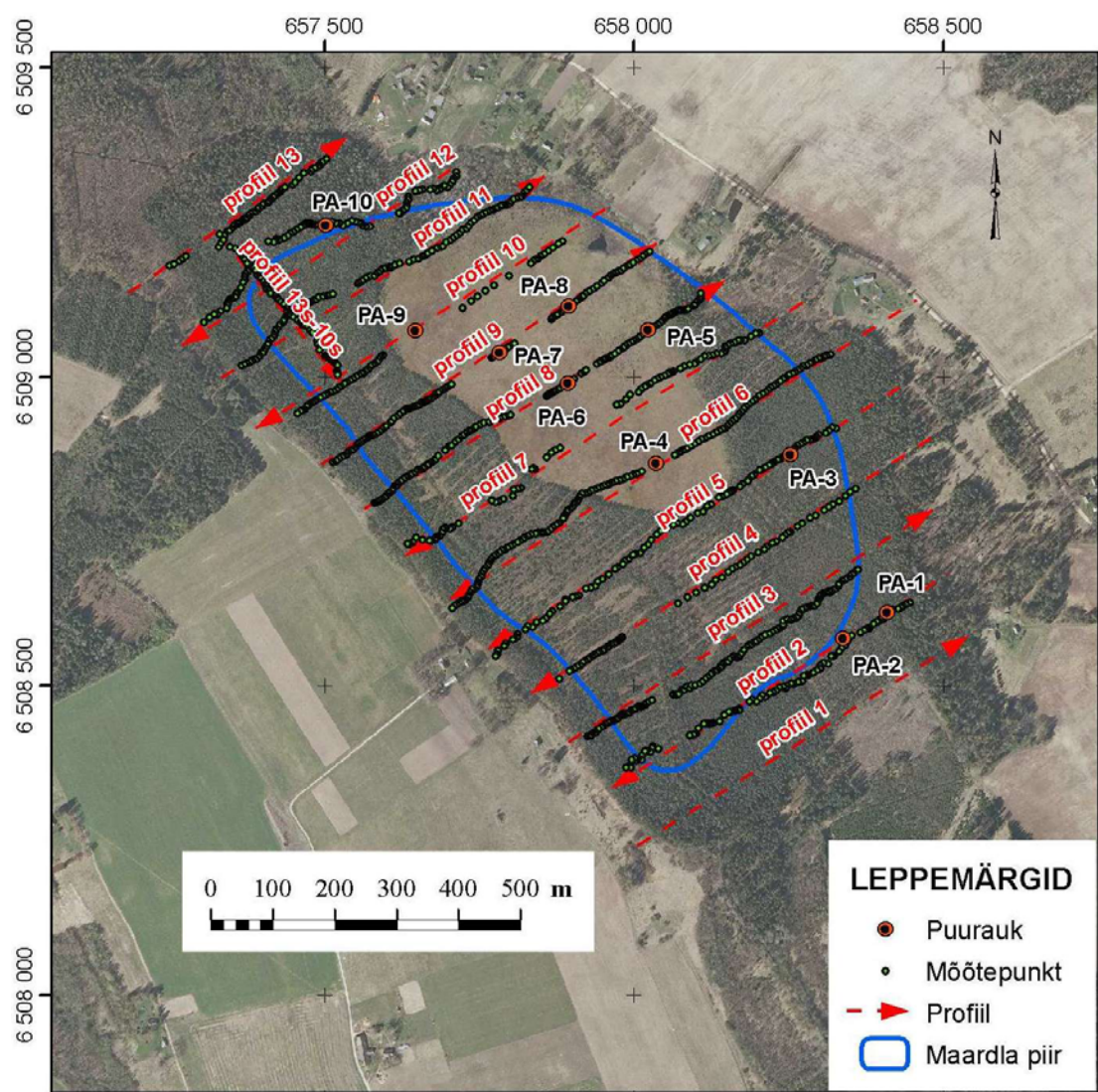
Pärast rekognostseerivaid radaritöid Rahivere rabal 17. veebruaril 2009. a otsustati sinna rajada 13 kirde-edela suunalist voortevahelise nõoga ehk maardla väljavenitatuse suunaga ristuvat radari-profiiili omavahelise kaugusega ~100 m (vastavuses keskkonnaministri 26. mai 2005. a määrusega nr 44). Profiilid kulgesid voore nõlvalt teisele nõlvale; profiilide pikkus jäi vahemikku 300 kuni 900 m. Orienteerumiseks kasutati käsi-GPS seadet, kuhu eelnevalt sisestati profiilide otspunktide koordinaadid. Profileerimine ühise nihke meetodil toimus 19. ja 23. veebruaril 2009. a kasutades Tartu Ülikooli geoloogia osakonna kasutuses olevat georadari-komplekti Zond-12e sagedusel 300 MHz. Kuna Rahivere maardla on osaliselt metsastunud, polnud madalama võimaliku sageduse kasutamine (ja seekaudu suurema sügavuse iseloomustamine) seonduvalt antennide suurte mõõtmega füüsiliselt mõeldav. Kummalgi uurimispäeval kasutati identseid seadeid (tabel 4), nii nagu leiti olevat parim rekognostseeriva käigu tulemusel. Radaritööd ühise saatja meetodil ning puurimised (vt allpool) toimusid 27. veebruaril 2009. a.

Vahemaade mõõtmiseks ning impulsi lähtestamiseks kasutati uuringutel antenniga ühendatud mõõteratast, mis kindlustab andmete kogumise võrdsete vahemaade tagant. Mõõtmispunktidega seostatakse radari-tarkvara (Prism v.2.5) abil komplektiga ühendatud GPS-seadme kaudu geograafilised koordinaadid. Välitööde- aegne ilm oli radariga töötamiseks soodne, õhutemperatuur oli umbes -5°C juures (va 27. veebruar 2009. a kui termomeeter näitas üksikuid plusskraade) ja lume paksus 10-15 cm. Lume all oli rabapinnas ~10 cm paksuselt külmunud ning kohati isegi jäätunud. Enamasti läks profileerimine plaanipäraselt, kuid esines ka aparatuuri ja inimese vahelisi lahkkelisid. Näiteks, profiili nr 4 (profiilide asukohad on näidatud joonisel 7) jaoks ei leidnud radariga ühendatud GPS teekonna koordinaate.

Tabel 4. Rahivere rabal toimunud georadari-uuringute seaded.

Parameeter	Seaded
Liidetud impulsside arv (ingl. <i>stacking</i>)	8
Sondeerimine	Pidev
Sagedus	300 MHz (varjestatud antenn)
Salvestusaeg	300-500 ns
Filter	Ei rakendatud
Impulsi viibeaeg	671 ns
Mõõtmiste samm	5 cm
Positsioneerimine	Mõõteratas ja GPS

Andmepunktide asukohad täpsustati hiljem, kõrvutades radargrammile salvestatud markerpunkte (kraavide ristumiskohad profiiliga) põhikaardi ja ortofotoga. Profiil nr 6 läbiti kolmel korral – esimesel korral kalduti metsas käsi-GPSiga orienteerudes profiililt liialt kõrvale, teisel korral tuli arvuti küljest märkamatu lahti ühenduskaabel ning radargrammi ei saadud. Profiil nr 9 läbiti kahel korral. Esimesel korral salvestatud radargrammil võis profiili keskosas märgata peegeldava pinna laskumist vaateväljast allapoole, mistõttu muudeti radargrammi salvestusaeg suuremaks, (300 ns



Joonis 7. Profiilide ja puuraukude asukohad Rahivere rabas. Punase punktiirnoolega on näidatud soovitud profiil ehk väikseim vahemaa käsi-GPSi sisestatud profiilide otspunktide vahel, kusjuures nool osutab liikumissuunale. Andmepunktid viitavad tegelikule liikumisteedele (osade metsas paiknenud punktide asukohta on käsitsi korrigeeritud). Punktid on toodud vaid neis kohtades, milles turbalasuundi lamav pind oli identifitseeritav. Nii näiteks ei leitud turvast profiilil 1; suuremad lüngad profiilidel 7 kuni 10 seostuvad turbakihi suure paksusega, mille tõttu peegeldust ei registreeritud (vt lisad).

asemel 500 ns) ja teostati kordusprofileerimine. Viimaseid profiile (nr 10-13) läbides oli “akna” laius 400 ns. Profiilide 13 ja 10 vahele rajati mööda metsasihti loode-kagu suunaline ristiprofiil (profiil 13s-10s).

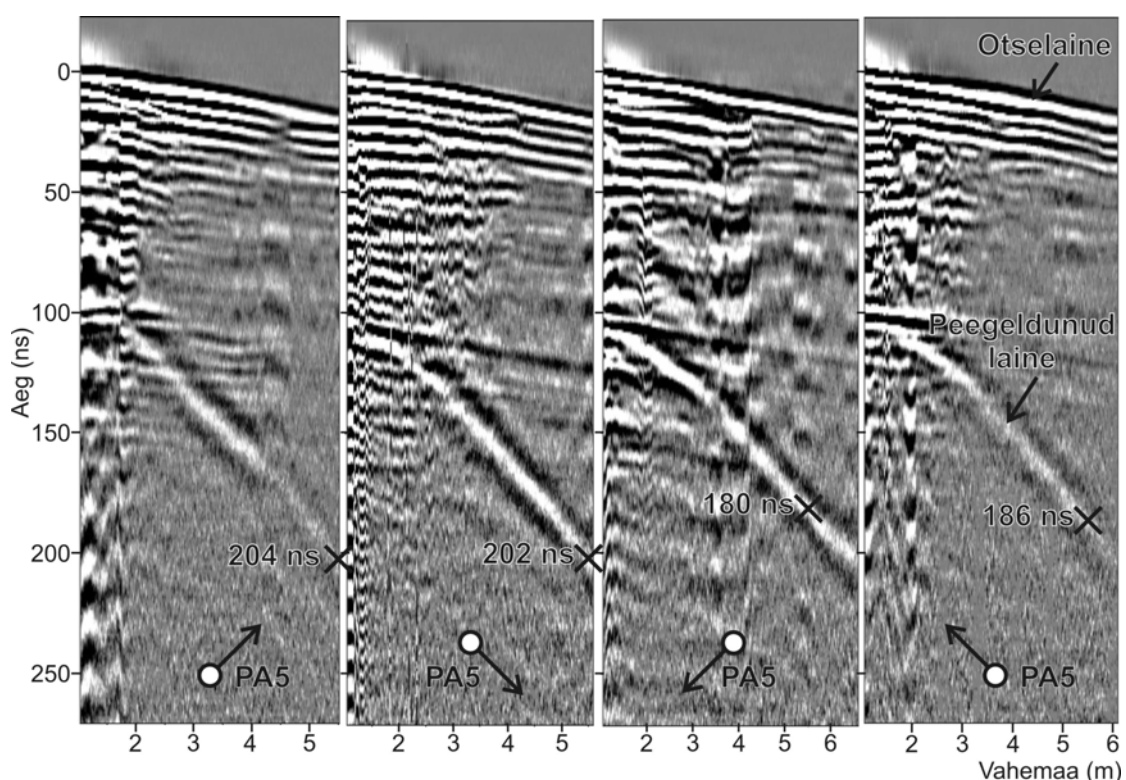
Alati ei leia georadar kõikidele küsimustele ümberlökkamatuid vastuseid. Keerulise geoloogilise situatsiooni ja mitmeti tõlgendatava radargrammi korral on otstarbekas otsida tulemustele kinnitust paljanditest ning puuraukudest (Jol & Bristow, 2003). Radargrammidel ilmnenu peegelduste sidumiseks, turbalasundi paksuse kontrollimiseks ning elektromagnetlainete levikukiiruste määramiseks puuriti maardla piiresse ning lähiümbrusesse turbapuuriga 10 auku ning kirjeldati nende läbilõiked. Puuraukude asukohad (joonis 7) valiti eelnevalt mõõdetud profiilide alusel, iseloomustamaks võimalikult erinevaid situatsioone. Puuraukude positsioneerimiseks kasutati käsi-GPSi, mille täpsus avatud maastikul (puuraugud 3 - 9) on mõni meeter, kuid rabametsas on viga oluliselt suurem. Samas oli võimalik puuraukude paigutamine täpselt radariprofiilidele, kuna viimased olid puurimise hetkel lumes jälgitavad. Puurimistulemused on toodud tabelis 5 ning lihtsustatud tulbad on kantud ka radargrammidele (lisad 1 - 15).

2.2 Elektromagnetlainete levikukiiruste määramine

Elektromagnetlainete levikukiiruste määramiseks viidi 27. veebruaril 2009. a läbi eksperiment **ühise saatja meetodil**, mille puhul kasutati saatjana antenni sagedusega 300 MHz ning vastuvõtjana antenni sagedusega 500 MHz. Sulailma ja märja lume tõttu ei õnnestunud signaali salvestamine kasutades radarikomplektis olevat 20 m pikkust ühenduskaablit. Probleemi algpõhjus peitus suure tõenäosusega märja lume heas elektrijuhtivuses. Küll aga õnnestus signaali salvestamine, kasutades kahte 3 m pikkust kaablit. Eksperiment teostati kolmes punktis (kattuvalt puuraukudega 5, 6 ja 7, vt asukohad joonis 7) ja seda neljas üksteisega ristivas suunas, jättes saatja-antenni puuraugu kohale ning liigutades vastuvõtuantenni piki profiili ühes ja teises suunas ning risti profiiliga ühes ja teises suunas keskpunkti (puuraugust) eemale. Lühikese kaabli ning märja lume tõttu õnnestus eksperiment ainult puuraugu 5 kohal, kus võrreldes ülejäänutega oli turba paksus suhteliselt väike (1,95 m, tabel 5).

Eksperimendi käigus saadi joonisel 8 illustreeritud radargrammid, millel ilmnes **otselaine** kiirusega $\sim 0,23$ m/ns (permiitivsus $\sim 1,7$; mis viitab laine levikule

osaliselt õhu ning osaliselt lume kaudu, võimalik on ka peegeldumine mingilt pinnaselähedaselt pinnalt, näiteks lume ja jää või lume ja õhu piirilt) ja **peegeldunud laine**. Radargramme analüüsid selgus, et peegeldunud lainete saabumisaegad erinevates suundades pole identsed, vihjates peegeldava pinna (milleks on turbakihi ja mineraalpinnase vaheline pind; vt. selgitusi allpool) kallutatusele ning võimalikule konarlikkusele. Nii kulus elektromagnetlaine tekitamisest peegeldumise ja registreerimiseni antennide 5,5 meetrise eraldatuse juures erinevate suundade puhul 180 kuni 204 ns (joonis 8). Mõnevõrra ootamatult oli saabumisaeg kõige pikem kirde- (raba servale osundavas) suunas ning kõige lühem edela- (raba keskmeele osundavas) erinevates suundades pole identsed, vihjates peegeldava pinnsuunas viidates PA 5 lähiümbruse (ring läbimõõduga 5,5 m) turba lamava pinna kirdesuumalisele lokaalsele kallutatusele.



Joonis 8. Neli radargrammi, mis on koostatud kasutades fikseeritud saatja meetodit erinevates suundades (vasakult paremale vastavalt kirde-, kagu-, edela- ja loodesuunas; suunad on viidatud radargrammide allosas paiknevate noolte abil). Meetodi rakendamisel paiknes saatja-antenn (300 MHz) puurauk 5 (asukoht joonisel 7) kohal ning 500 MHz antenni liigutati puuraugust eemale. Parempoolsel radargrammil on vihjatud signaalide (otse- ning peegeldunud laine) päritolule. Peegeldunud laine signaalil paiknevad ristid ja kirjed vihjavad saabumisaegadele momendil kui saatja- ning vatuvõtuantenni vaheline kaugus oli 5,5 m.

Permittiivsuse hindamiseks leiti nelja mainitud radargrammi andmete alusel keskmine ajavahemik (193 ns), mis elektromagnetlainel kulus jõudmaks peegeldumise kaudu saatja-antennist 5,5 m kaugusel paikneva vastuvõtu-antennini. Eeldades, et peegeldav pind on horisontaalne ning paiknes 2,05 m sügavusel (vt PA 5 läbilõike tabelis 5) oli teekonna pikkuseks 6,86 m, mis teeb elektromagnetlaine keskmiseks kiiruseks $0,036 \text{ mns}^{-1}$ ($\epsilon = 71$).

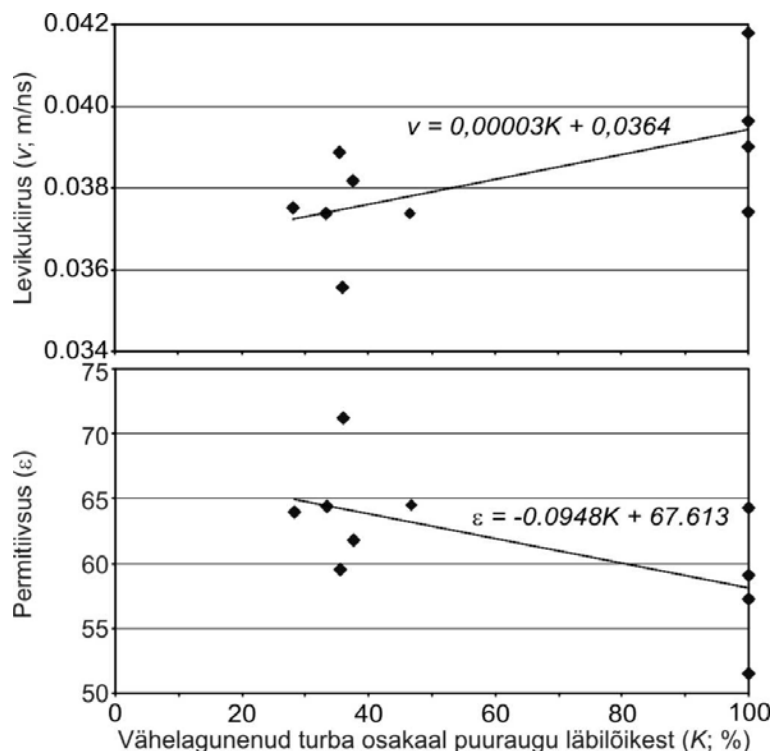
Elektromagnetlainete levikukiiruseid hinnati lisaks eelnevale võrreldes omavahel puurimisandmeid ja radargrammidelt puurimiskohtades saadud väärtuseid. Rahivere turba lamamiseks on puurimiste andmetel (tabel 5) kas (a) peeneteraline liiv või aleuriit valdavalt maardla voortepoolsetel servaaladel või siis (b) tõenäoliselt järvelise päritoluga hallikas-rohekas-sinakas savi valdavalt nõo keskosas. Võimalik on sapropeeli esinemine. Turbalasundi ülemise osa moodustab vähelagunenud pruun turvas paksusega kuni 2 m (puurimise andmetel); selle all paikneb hästilagunenud mustjas ning veerikas turvas.

Kuna radariläbilõiked ei näidanud piiri vähe- ja hästilagunenud turba vahel (küll võib aga lagunemisastmele viidata radargrammi muster, st peegelduste esinemine (vähelagunenud) või puudumine (hästilagunenud)), eeldati permittiivsuse arvutamisel et turbalasund on elektromagnetlainete levikukiiruse suhtes homogeenne. Tegelikuses eksisteerib erinevate turbatüüpide vahel mõningane erinevus nii nagu on illustreeritud joonise 9 abil. Nimelt on lainete levikukiirus vähelagunenud turbas mõnevõrra suurem kui hästilagunenud turbas. Asjaolu seondub hästilagunenud turba suurema veeküllastatusega. Mainitud sõltuvuste arvutamiseks ja joonise koostamiseks leiti esmalt aeg, mis kulus puuraugu asukohas radarilainel jõudmaks mineraalpinnaseni ja tagasi. Teades mineraalpinnase sügavust arvutati laine levikukiirus (keskmine $0,038 \text{ mns}^{-1}$). Kiiruse alusel arvutati suhteline permittiivsus (Valem 3; keskmine 61,4). Samas, arvutatud permittiivsused on seonduvalt talviste mõõtmistega mõnevõrra alahinnatud (kiirused ülehinnatud), sest arvutustesse on kaasatud pinnast kattev lumi ning jääkiht, milles laine levikukiirused on oluliselt suuremad.

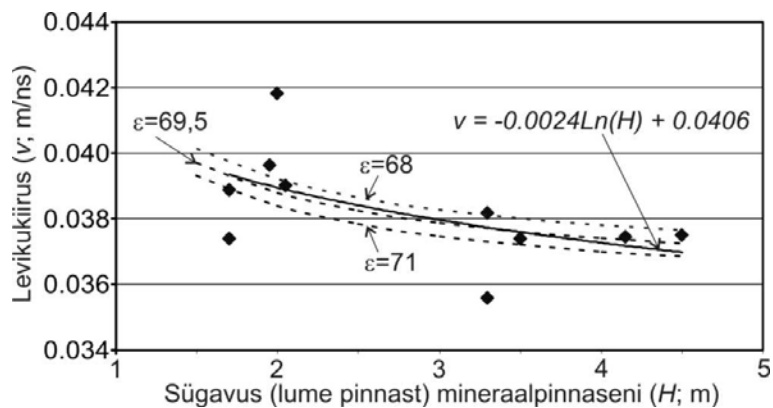
Külmumiseefekti lahutamiseks ning turba permittiivsuse arvutamiseks leiti turbakihi ja lume kogupaksuse (puurimiste andmetel) ning elektromagnetlaine keskmise kiiruse (koos lume ja külmunud turbaga) omavaheline seos (joonis 10).

Tabel 5. Puuraukude asukoha koordinaadid ja kirjeldused (asukohad vt joonisel 7).

Puurauk	L-EST 97 koordinaadid	Sügavus (m)	Kirjeldus
PA-1	X: 6508618 Y: 658409	0,00 – 0,20	Lumi
		0,20 – 0,90	Vähelagunenud pruun turvas
		0,90 – 1,70	Hästilagunenud must turvas
		1,70 – 1,75+	Peeneteraline pruunikas liiv
PA-2	X: 6508576 Y: 658337	0,00 – 0,15	Lumi
		0,15 – 0,70	Vähelagunenud pruun turvas
		0,70 – 1,70	Hästilagunenud must turvas
		1,70 – 1,75+	Peeneteraline pruunikas liiv
PA-3	X: 6508874 Y: 658252	0,00 – 0,20	Lumi
		0,20 – 2,00	Vähelagunenud pruun turvas
		2,00 – 2,05+	Peeneteraline pruunikas liiv
PA-4	X: 6508859 Y: 658036	0,00 – 0,15	Lumi
		0,15 – 0,25	Jää
		0,25 – 1,45	Vähelagunenud turvas
		1,45 – 4,10	Hästilagunenud must turvas
		4,10 – 4,50	Hästilagunenud rohekashall turvas
		4,50 – 5,00+	Rohekashall savi (sisaldab järvekarpide fossiile)
PA-5	X: 6509076 Y: 658022	0,00 – 0,10	Lumi
		0,10 – 2,05	Vähelagunenud turvas
		2,05 – 2,10+	Rohekashall aleuriit
PA-6	X: 6508989 Y: 657893	0,00 – 0,15	Lumi
		0,15 – 1,30	Vähelagunenud turvas
		1,30 – 3,30	Hästilagunenud must turvas
		3,30 – 3,50	Hästilagunenud rohekashall turvas
		3,50 – 5,20+	Sinakashall savi
PA-7	X: 6509039 Y: 657783	0,00 – 0,10	Lumi
		0,10 – 1,30	Vähelagunenud turvas
		1,30 – 3,30	Hästilagunenud turvas
		3,30 – 5,50+	Sinakasroheline savi
PA-8	X: 6509114 Y: 657895	0,00 – 0,10	Lumi
		0,10 – 1,25	Vähelagunenud turvas
		1,25 – 3,00	Hästilagunenud must turvas
		3,00 – 3,30	Hästilagunenud rohekaspruun turvas
		3,30 – 5,00+	Savi
PA-9	X: 6509074 Y: 657647	0,00 – 0,15	Lumi
		0,15 – 1,80	Vähelagunenud turvas
		1,80 – 4,15	Hästilagunenud turvas
		4,15 – 4,50+	Sinakasroheline savi
PA-10	X: 6509244 Y: 657502	0,00 – 0,15	Lumi
		0,15 – 1,30	Turbamuld
		1,30 – 1,95	Vähelagunenud turvas
		1,95 – 2,10+	Rohekashall savi vähese aleuriidiga



Joonis 9. Vähelagunenud turba osakaal puuraugu läbilõikest (100 % = kogu läbilõike moodustab vähelagunenud turvas) versus elektromagnetlainete levikukiirus (ülemine) ja permittiivsus (alumine) Rahivere soo puurimiste ning radargrammide alusel. Joonistelt järeldub, et elektromagnetlainete levikukiirus hästilagunenud turbas on mõnevõrra väiksem ning permittiivsus suurem.



Joonis 10. Sügavus (lume pinnast) mineraalpinnaseni (puurimiste andmetel) versus elektromagnetlainete levikukiirus koos logaritmilise trendiga (pidevjoon). Arvutatud trendiga seostub kõige paremini joon (keskmine punktiirjoon), mille puhul turba permittiivsus on 69,5. Detailid on kirjeldatud tekstis.

Seosele sobitati erineva turbakihile vastava permittiivsusega graafikuid mille puhul arvestati lumekihi (0,1 m arvestusega, et mõõtmiste ajal kohev lumi suruti radariantenni poolt osaliselt kokku) ning jäätunud turba (kohati lausjää) keskmise

paksusega (0,1 m). Lume ja jää permittiivsusena kasutati vastavalt väärtusi 2 ja 4 (Davis & Annan, 1989). Parim sobivus leiti kasutades turba permittiivsusena väärtust 69,5 (joonis 10), mis on ligilähedane ühise saatja meetodil saadud tulemusele, ning millele vastavat kiiruse väärtust ($0,036 \text{ mns}^{-1}$) kasutati radargrammide ajaskaala konverteerimisel sügavusskaalaks.

2.3 Andmestiku filtreerimine ja töötlemine

Radargrammil kuvatakse läbilõige settekihtide dielektrilistest omadustest, mida iseloomustab elektromagnetlaine kahekordne teekond – aeg, mis kulus tema liikumisest saatjast vastuvõtjani ja tagasi (Woodward *et al.*, 2003). Georadariga kogutud andmete interpreteerimist saab hõlpsamini teostada radargrammi segavate signaalide (müra) eemaldamise ja sobivate elektromagnetiliste signaalide võimendamise kaudu. Arvestada tuleb sellega, et kõige kiiremini läbib laine teekonna saatjast vastuvõtjani õhus sirgjooneliselt, seejärel võimalikult otse uuritava keskkonna kaudu (ingl. *direct ground wave*, Jol & Bristow, 2003). Seetõttu ei saa radargrammi ülalt esimest signaali pidada maapinnalt lähtuvaks peegelduseks.

Radargrammid filtreeriti programmiga Prism v.2.5 ning võimalusel lisatakse neile eeldatav turbakihi lamav pind (koostatakse nn annotatsioonid). Annotatsioonidest moodustatakse programmiga ArcGIS X, Y, Z-koordinaatidega punktobjektid. Ebatäpselt positsioneeritud andmepunktide asukohtad korrigeeritakse radargrammide ja topografilise situatsiooni alusel. Andmepunktidest interpoleeritakse ArcGISi tarkvara kasutades pinnad, arvutatakse nende mahud. Tulemusi võrreldakse omavahel ja hinnatakse nende kokkulangevust keskkonnaregistris esitatud Rahivere maardla informatsiooniga.

Iga Rahivere rabas mõõdetud radargrammi filtreeriti (kasutades programmi Prism v2.5) Ormsby bandpass filtriga (65-125-830-850 MHz), eemaldades täielikult madalsageduslikku (<65 MHz) ja juhuslikku kõrgsageduslikku (>850 MHz) müra. Sügavamate peegelduste esiletoomiseks võimendati läbilõike sügavamad osa. Turba lamav pind, seal kus identifitseeritav, klikiti käsitsi (~5 m sammuga looduses) üle; informatsioon punktide X, Y ja Z (edasi-tagasi aeg) koordinaatidest salvestati ASCII tekstifailidesse ning koondati tabelisse. Elektromagnetiliste lainete liikumisaegadesse viidi sisse parandused (neile liideti kokku 3,282 ns ja tulemus jagati kahega, saamaks laine ühekordse teekonna läbimiseks kulunud aega) ning lähtuvalt eelmises peatükis

arvutatud lainete levikukiirusest turba sees ($0,036 \text{ mns}^{-1}$) leiti iga punkti jaoks uus turbakihi paksus (korrigeeritud laine liikumisaeg korrutati tema levikukiirusega). Parandus 3,282 ns moodustus (i) lahutati 10 cm paksuse lume läbimiseks kulunud edasi-tagasi aeg (0,943 ns permitiivsuse 2 juures) ning (ii) liideti edasi-tagasi aeg (4,224 ns), parandamaks efekti mille võrra 10 cm paksune külmunud pinnas/jää permitiivsuse väärtuse 4 juures elektromagnetlaineid kiiremini juhib. Algsed geograafilised koordinaadid teisendati L-EST süsteemi. Lõpuks moodustati andmetest ArcGISi punktobjektide klass, millest asuti pindkujutisi genereerima.

2.4 Pindade loomine mahu arvutamiseks

Radargrammide annoteerimise tulemusel saadi 1121 andmepunkti (joonis 7), nendest 803 maardla (keskkonnaregistri maardlate nimistu ruumikuju) piires ning ülejäänud Rahivere maardla piiridest väljaspool. Turbalasundi visualiseerimiseks ning ruumala arvutamiseks kasutati nelja erinevat ArcGIS 3D Analyst laienduspaketis sisalduvat rasterpindade interpolaatorit (splain, loomulik naaber, kaalutud pöördkaugus, *kriging*) ja TIN-meetodit. Interpolatsiooni atribuudiks valiti korrigeeritud turbakihi paksus andmepunktides. Töötlusi tehti erinevate sisendparameetritega ning peatükis 1.5 kirjeldatud vea hindamise meetodikat kasutades valiti välja üks tulemus interpolaatori kohta. Töö üheks eesmärgiks oli võrrelda originaalse (vahega 100 m) ja kaks ning kolm korda vähendatud profileerimistiheduse juures saadud pindasid. Selleks selekteeriti esmalt punktid profiilidelt 2; 4; 6; 8; 10 ja 12 (534 tk; kaasates puurimiste tulemusel saadud punktid) ning interpoleeriti neist uued pinnad. Interpolaatorite konfiguratsioon jäeti selliseks nagu oli sobivamaks osutunud pindadel kõiki punkte kasutades. Viimase etapina valiti välja punktid profiilidelt 2; 5; 8 ja 11 (393 tk) ning koostati nende alusel pinnad, arvutamaks maardla turba kogust juhaks kui profiilide vahekaugus oleks olnud 300 m.

Pindade kuvamisel klassifitseeriti interpoleeritud paksuse väärtused 0,5 m kaupa värvidega kollasest tumepruunini (mida suurem väärtus, seda tumedam toon) ja lisati samapaksusjooned 1 meetrise intervalliga.

2.5 Mahuarvutused

Pärast eelnevas peatükis kirjeldatud pindade loomist arvutati nende mahud. Kuna interpolatsioonil osalesid ka väljaspool Rahivere turbamaardlat paiknevad andmepunktid, saadi maardlast suuremad pinnad. Nende lõikamiseks kasutati keskkonnaregistrist saadud maardla ruumikuju. Üks lihtsamaid vahendeid mahtude arvutamiseks on ArcGIS 3D Analyst laienduspaketis sisalduv tööriist Area and Volume Statistics, kus loodud rasterpind paigutatakse tasapinna (ingl. *reference plane*) kohale või tema alla. Käesolevas töös kasutati kõikide pindade mahu arvutamiseks ühesuguseid, programmi poolt etteantud parameetreid. Loodud pind asetati tasapinna kohale, mille kõrgust (ingl. *input height range*) piirasid interpoleeritud pinna miinimum- ja maksimumväärtused. Kõrguse kordaja (ingl. *Z factor*), millega saab vajadusel viia pinna kõrgusinfo (z-koordinaadid) vastavusse planaarse (x, y) koordinaatidega, oli alati sama (1).

3 Tulemused

3.1 Puurimistulemused

Välitööde käigus puuriti 10 puurauku, neist 7 Rahivere maardla piiresse ja 3 tema lähedusse (joonis 7). Tulemused (kihtide sügavused ja kirjeldused) on toodud tabelis 5. Suurimad turba paksused registreeriti puuraukudes PA-4 (4,25 m) ja PA-9 (4 m) olles võrreldavad uuringuaruandes (Allikvee & Orru, 1979) kirjeldatud maksimaalsete paksustega (iseloostatud kui olevat vahemikus 4,0 kuni 4,4 m). Keskkonnaregistri maardlate nimistus on Rahivere turbamaardla vähelagunenud turba 2. plokki keskmiseks paksuseks antud 0,54 m. Käesoleva töö puuraukude andmetel on vähelagunenud turba paksus 0,55 kuni 1,95 m. Hästilagunenud turba plokki (1) keskmine paksus on keskkonnaregistri andmetel 1,46 m; käesoleva töö puurimiste kohaselt jääb paksus vahemikku 0,8 kuni 3,05 m. Puurimisandmed viitavad üsna selgelt nõos eksisteerinud järvele ja selle hilisemale soostumisele kuna turbakihi lamamiseks maardla keskosas on limnilise tekkega savilasund (läbiti kuni 2,2 m ulatuses). Maardla servades savilasund puudub ning mineraalpinnas on esindatud aleuroliidi ja liivaga.

3.2 Profileerimistulemused

Profileerimistulemused on illustreeritud 15 radargrammi abil, mis on toodud ja lühidalt kirjeldatud käesoleva magistr töö lisades (1-15). Profiil 13 on kirjeldatud kahel radargrammil (lisad 13 ja 14). Kõiki radargramme (välja arvatud profiil 1 lisas 1) on kirjeldatud kahe joonise abil: (i) ülemisel on näidatud tulemus pärast filtreerimist ja võimendamist, (ii) alumisel on eelnevale lisatud (a) autori töö poolt tehtud interpretatsioon kirjeldamiseks turba lamava pinna asendit ning (b) puurimisandmestik lihtsustatud tulpade näol. Siinjuures tuleb märkida, et kohati ei olnud võimalik peegeldavat pinda signaali kadumise (pinna suure sügavuse) või muude segavate asjaolude (näiteks kraavide, mille mõju keskkonna veesisalduse kaudu elektromagnetilise kiirusele illustreerib eriti hästi profiil 2 (lisa 2)) tõttu välja eraldada. Radargrammi vertikaaltelg lisade ülemistel joonistel iseloomustab elektromagnetilise laine liikumise kahekordset aega (saatjast vastuvõtjani ja tagasi) nanosekundites. Alumistel joonistel on vertikaalteljel toodud sügavused. Horisontaalteljel on antud georadariga läbitud vahemaa profiilil. Radargrammid on

esitatud liikumise suunas: profiilid 2, 4, 5, 6, 7, 10 ja 12 läbiti kirde-edela-suunaliselt ning profiilid 1, 3, 8, 9, 11 ja 13 edela-kirde-suunaliselt (vastav ilmakaarele viitav märged on toodud ka radargrammide otste juures (lisa 1-15)).

Profiilil 1 (lisa 1) ei olnud võimalik elektromagnetilisi laineid peegeldavat pinda kontuurida, kuna mineraalpinnast (mineraalpinnase sellel profiilil moodustab moreen) kattev kiht on liiga õhuke. Profiilil 2 (lisa 2) on peegeldus selgelt eristatav tänu turba ja tema lamami mitmekordsele permittiivsuse erinevusele: puuraukude alusel lasub peeneteralisel liival hästilagunenud turba kiht. Järgnevad profiilid (lisad 3-6) kinnitavad turba paksuse suurenemist loode suunas. Profiilil 6 (lisa 6) muutub turba paksus juba sedavõrd suureks (puurauk 4 järgi üle 4 meetri; tabel 5), et peegeldava pinna eristamisega tekib raskusi. Profiilidelt 7 ja 8 (lisad 7-8) ilmneb, et paksema turbaga vagumus laieneb loode suunas ning selle sügavaimat osa radargramm ei valgusta. Profiili 9 (lisa 9) andmestiku alusel on nõo põhi suhteliselt lainjas ning et selle sügavama (laiusega ~150 m) osa keskel paikneb omakorda kõrgem osa (arvatavasti järgib järvelise päritoluga savi lasuv pind aluseks oleva moreeni panda viidates mikrovoorele). Nimetatud positiivsesse vormi puuritud augus (PA-7) mõõdeti turba paksuseks 3,2 meetrit (tabel 5) ning turba lamav pind laskub sellest puuraugust kirde kui kagu suunas. Turba paksus, mis profiilil 10 (lisa 10) ulatub veel 4 meetrini (PA-9; tabel 5), hakkab loode suunas vähenema. Kõige loodepoolsemal profiilil (lisad 13 ja 14) on turbakiht napilt 1 meetri paksune.

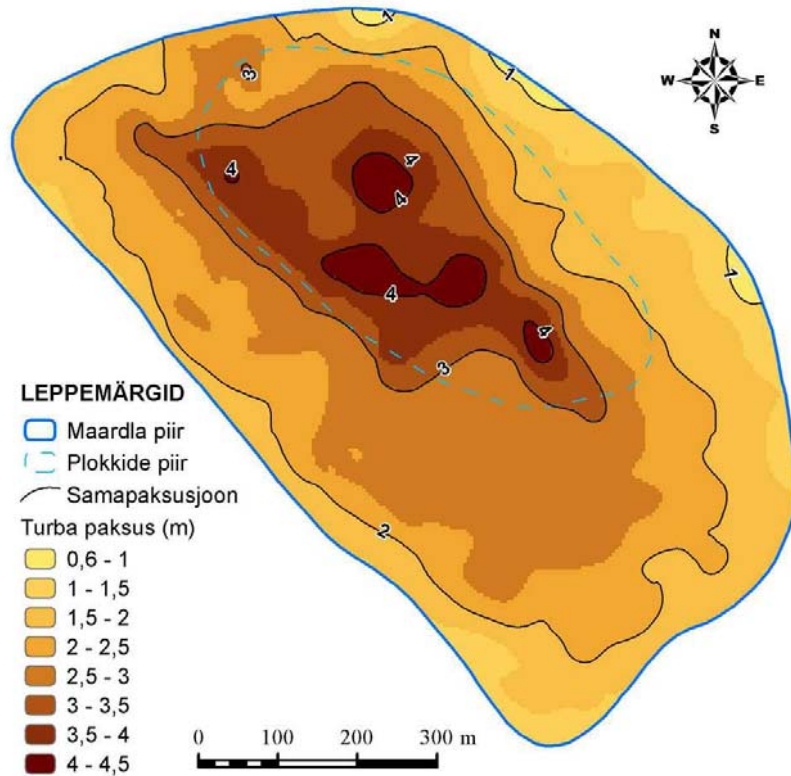
3.3 Interpoleeritud pinnad

Splain-interpolatsioonil koostati neli pinda (tabel 6): a) regulaarne Splain 1 vaikimisi määratud andmepunktide arvu (12), väljundrastri piksli suuruse (4,23) ja kaaluga (0,1); b) pingutatud Splain 2 samade parameetritega; c) Splain 3 vähendatud interpoleerimispunktide arvuga ja d) Splain 4 suurendatud kaaluga. Regulaarse splain-i korral omistati interpoleeritud punktidele ebaloomulikult väikesed või suured paksuse väärtused (-2,40 kuni 7,74 m), mistõttu arvutatud turba maht ja ruutkeskmine viga olid kõige suuremad. Väikseima ruutkeskmise vea (RMSE = 0,027) saanud pingutatud splaini (Splain 4; joonis 11) konfiguratsiooni kasutati seejärel loomaks pindu hõrendatud algandmete alusel.

Tabel 6. Splain-iga interpoleerimiseks kasutatud sisendparameetrid, tulemuseks saadud rasterpindade ruutkeskmine viga (*RMSE*), keskmine absoluutviga (*MAE*) ja suhteline eelis (*RI*) ning Rahivere maardla jaoks arvatud turba paksus ja maht.

Interpolatsiooni-meetod (kasutatud profiilid)	SP			Vea hinnangud			Maardla piires					
	R /P	K	IP	RMSE	MAE	RI	Turba paksus (m)					Maht (m ³)
							Min	Max	Kesk	hälve	St.	
Splain 1 (kõik)	R	0,1	12	0,060	0,00008	-163,7	-2,4	7,74	2,48	1,064	2652208	
Splain 2 (kõik)	P	0,1	12	0,029	0,00067	-24,9	0,55	4,55	2,44	0,750	1019786	
Splain 3 (kõik)	P	0,1	6	0,029	0,00068	-27,5	0,38	4,64	2,44	0,755	1109868	
Splain 4 (kõik)	P	1	12	0,027	0,00070	-18,9	0,63	4,46	2,43	0,741	977562	
Splain 4 (2-4-6-8-10-12)	P	1	12	0,023	0,00052	0,0	0,64	4,46	2,43	0,720	964737	
Splain 4 (2-5-8-11)	P	1	12	0,027	0,00074	-20,1	0,30	4,46	2,35	0,790	1104412	

SP = sisendparameetrid (R = regulaarne; P = pingutatud; K = kaal; IP = interpretatsiooni-punktide arv)

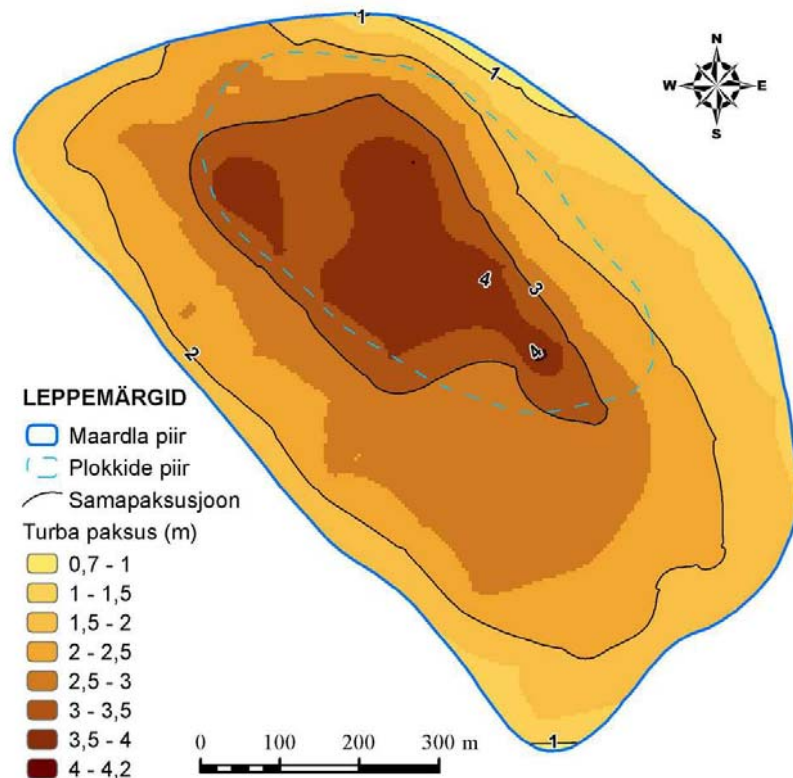


Joonis 11. Splainiga interpoleerides saadud rasterpind (Splain 4) Rahivere maardla jaoks. Algandmetena kasutati kõiki radargrammide annoteerimisel saadud andmepunkte.

Loomuliku naabri (NN) interpolatsioonil ei saa seadistada teisi parameetreid peale väljundiks oleva rasterpinna piksli suuruse, mille puhul kasutati programmi poolt etteantud väärtust (4,23). Tulemused on toodud joonisel 12 ja tabelis 7, millest nähtub, et turba maht on võrdelises seoses algandmete hulga. Väikseim ruutkeskmine viga arvutati kaks korda vähendatud profileerimistiheduse korral.

Tabel 7. Loomuliku naabri (NN) interpolatsioonil saadud rasterpindade ruutkeskmine viga (*RMSE*), keskmine absoluutviga (*MAE*) ja suhteline eelis (*RI*) ning Rahivere maardla jaoks arvutatud turba paksus ja maht.

Interpolatsiooni-meetod (kasutatud profiilid)	Vea hinnangud			Maardla piires				Maht (m ³)
	RMSE	MAE	RI	Turba paksus (m)			St. hälve	
				Min	Max	Kesk		
NN (kõik)	0,039	0,00139	-3,4	0,67	4,15	2,41	0,698	942129
NN (2-4-6-8-10-12)	0,038	0,00169	0,0	0,87	4,16	2,39	0,645	825686
NN (2-5-8-11)	0,060	0,00310	-56,6	0,86	3,97	2,24	0,610	745928



Joonis 12. Loomuliku naabri interpolatsioonil saadud rasterpind Rahivere maardla jaoks. Algandmetena kasutati kõiki radargrammide annoteerimisel saadud andmepunkte.

Kaalutud pöördkauguse (IDW) meetodi puhul kasutati ArcGISi poolt soovitatud varieeruvat otsinguraadiust (soovitatud juhul kui andmepunktid paiknevad ebaühtlaselt) ja vaikimisi määratud 12 lähimat andmepunkti. Töötlused tehti erinevate astmenäitajatega (tabel 8), kusjuures väikseima ruutkeskmise vea ($RMSE = 0,019$) saanud konfiguratsiooni (IDW 4) kasutati pindade loomiseks vähendatud profiilide arvu puhuks.

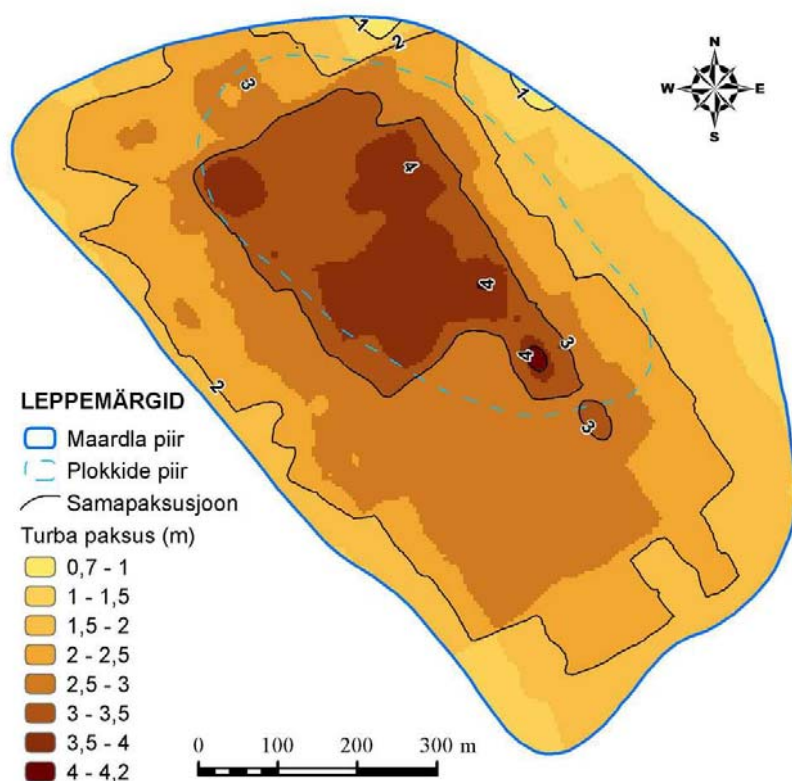
Kriging-interpolatsioon on rohkete võimalustega, näiteks pindade loomiseks ordinaalsel meetodil saab kasutada viit variogrammi mudelit (pt 1.4). Käesolevas töös eelistati ordinaalset *kriging*'ut, kuna selget trendi (turba paksuse suurenemist või

vähennemist kindlas suunas) algandmetes ei täheldatud. Esmalt loodi ühesuguste sisendparameetritega kõikide variogrammi mudelite järgi rasterpinnad, mille hulgast valiti välja väikseima ruutkeskmise veaga tulemus (eksponentsiaalne variogramm; tabel 9). Samade seadetega genereeriti pinnad kahe- ja kolmekordselt vähendatud profiilide arvu tarbeks.

Tabel 8. Kaalutud pöördkaugusega interpoleerimisel kasutatud sisendparameetrid, tulemuseks saadud rasterpindade ruutkeskmise viga (*RMSE*), keskmine absoluutviga (*MAE*) ja suhteline eelis (*RI*) ning Rahivere maardla jaoks arvatud turba paksus ja maht.

Interpolatsiooni-meetod (kasutatud profiilid)	SP		Vea hinnangud			Maardla piires				Maht (m ³)
	AN	IP	RMSE	MAE	RI	Turba paksus (m)			St. hälve	
						Min	Max	Kesk		
IDW 1 (kõik)	1	12	0,059	0,00072	-344,1	0,89	3,96	2,37	0,635	801268
IDW 2 (kõik)	2	12	0,026	0,00015	-93,2	0,73	4,21	2,38	0,652	894950
IDW 3 (kõik)	3	12	0,020	0,00035	-53,9	0,69	4,25	2,39	0,665	922050
IDW 4 (kõik)	4	12	0,019	0,00030	-46,0	0,67	4,25	2,40	0,674	933261
(2-4-6-8-10-12)	4	12	0,013	0,00024	0,0	1,13	4,25	2,39	0,663	685895
(2-5-8-11)	4	12	0,024	0,00038	-80,6	0,89	3,95	2,31	0,685	766120

SP = sisendparameetrid (AN = astmenäitaja; IP = interpretatsioonipunktide arv)

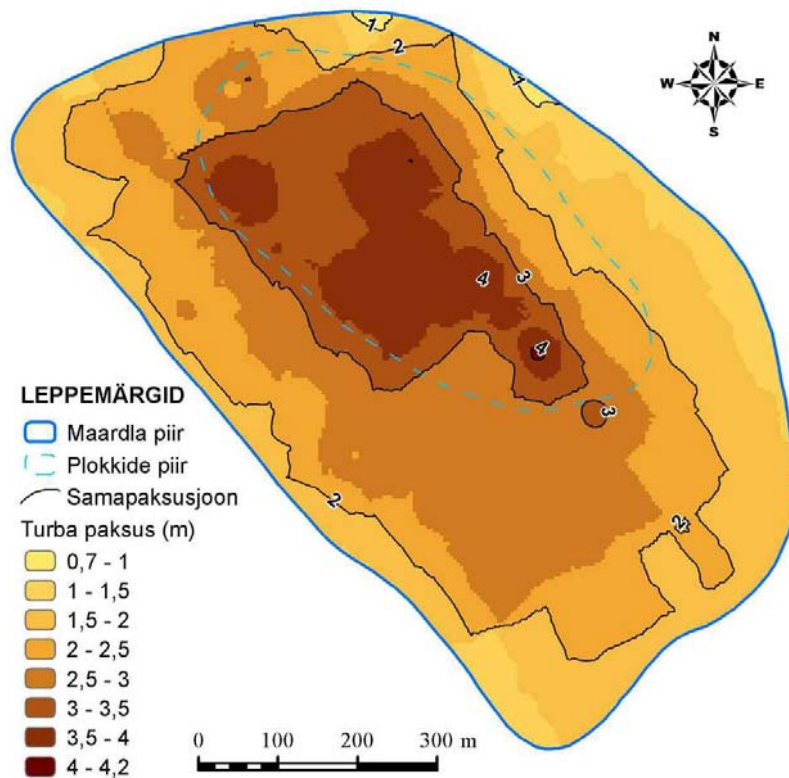


Joonis 13. Kaalutud pöördkauguse interpolatsioonil saadud rasterpind (IDW 4) Rahivere maardla jaoks. Algandmetena kasutati kõiki radargrammide annoteerimisel saadud andmepunkte.

Tabel 9. *Kriging*-interpolatsioonil kasutatud sisendparameetrid, tulemuseks saadud rasterpindade ruutkeskmine viga (*RMSE*), keskmine absoluutviga (*MAE*) ja suhteline eelis (*RI*) ning Rahivere maardla jaoks arvutatud turba paksus ja maht.

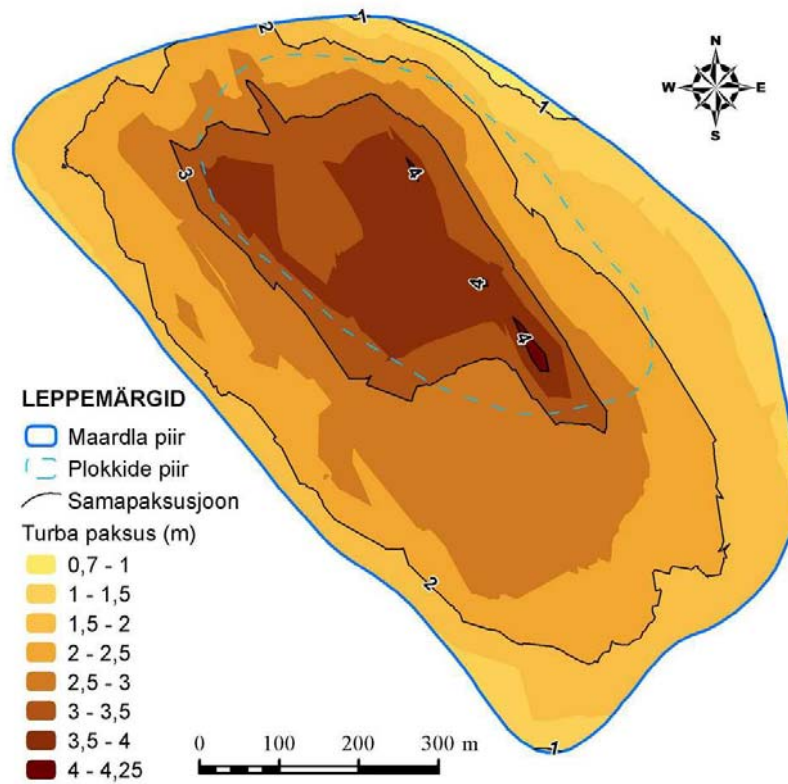
Interpolatsiooni-meetod (kasutatud profiilid)	SP		Vea hinnangud			Maardla piires				Maht (m ³)
	OV	IP	RMSE	MAE	RI	Turba paksus (m)				
						Min	Max	Kesk	St. hälve	
Kriging 1 (kõik)	sfääriline	12	0,151	0,00086	-598,1	1,07	3,77	2,36	0,620	701828
Kriging 2 (kõik)	ringikujuline	12	0,151	0,00084	-595,7	1,07	3,77	2,36	0,620	702196
Kriging 3 (kõik)	Gaussi	12	0,094	0,00002	-334,9	0,74	4,23	2,4	0,677	896545
Kriging 4 (kõik)	lineaarne	12	0,151	0,00082	-597,3	1,07	3,77	2,36	0,620	702138
Kriging 5 (kõik)	eksponent.	12	0,025	0,00090	-16,1	0,72	4,19	2,41	0,685	913652
(2-4-6-8-10-12)	eksponent.	12	0,022	0,00051	0,0	1,14	4,19	2,41	0,676	685430
(2-5-8-11)	eksponent.	12	0,025	0,00063	-15,6	0,87	3,98	2,31	0,692	777778

SP = sisendparameetrid (OV = ordinaalne variogramm; IP = interpretatsioonipunktide arv)



Joonis 14. *Kriging*-interpolatsioonil saadud rasterpind Rahivere maardla jaoks. Algandmetena kasutati kõiki radargrammide annoteerimisel saadud andmepunkte.

TIN-pinna tegemiseks kasutati ArcGIS 3D Analyst tööriistu Create TIN ja Edit TIN. Töötlus kõikide andmepunktidega andis maardla turba mahuks 980769 m³, kaks korda vähema profiilide arvu korral 992796 m³ ja 3 korda vähema profiilide arvu korral 913736 m³.



Joonis 15. Ebakorrapäraste kolmnurkade võrgustiku (TINi) abil saadud rasterpind Rahivere maardla jaoks. Alandmetena kasutati kõiki radargrammide annoteerimisel saadud andmepunkte.

4 Arutelu

Eestis on georadarit turba uuringutel edukalt rakendatud (Selisoo; A. Jõelett, personaalne suhtlus), kuid turba mahu arvutusi radargrammide alusel pole seni tehtud. Välitööd Rahiveres langesid soodsale ajale – külmunud ja lumisel pinnasel oli suhteliselt kerge liikuda. Teisest küljest olid lumi ja jää mõneti segavateks teguriteks, kuna elektromagnetiliste lainete levikukiiruses ja turba permittiivsuses tuli nende tõttu korrektiive teha. Asjaolul, et suurt osa uuritud alast katab mets, oli antenni valikul kaalukas roll. Ilmselt oleks väiksema sagedusega antenni (nt 100 MHz) kasutades saadud paremad tulemused suure turba paksusega (üle 4 m) piirkondades. Kuid mõõtmetelt oluliselt suurema antenniga metsa läbimine oleks olnud keeruline. Võimalust pruukida 100 MHz antenni ainult lagedal alal, profiilide keskosas, valitud profileerimismetoodika (pidevprofiilid risti maardla väljavenitatus suunale) tõttu ei kasutatud.

Enne pindade loomist võis eeldada, et suurem andmepunktide arv annab mahu arvutamisel täpsema tulemuse ja pinna maht väheneb seoses väiksema andmehulgaga kaasneva silumisega. Üldjoontes leidis see hüpotees kinnitust; eriti selgelt on mahu vähenemine jälgitav loomuliku naabri interpolatsioonil (tabel 7). Samas oli spline-meetodit kasutades mahtude erinevus erineva andmehulga puhul üsna väike (tabel 6), kusjuures 300 meetrise profiilide vahega loodud pinnast arvatatud maht ületas väärtust, mis saadi kasutades arvutustes üle ühe profiili.

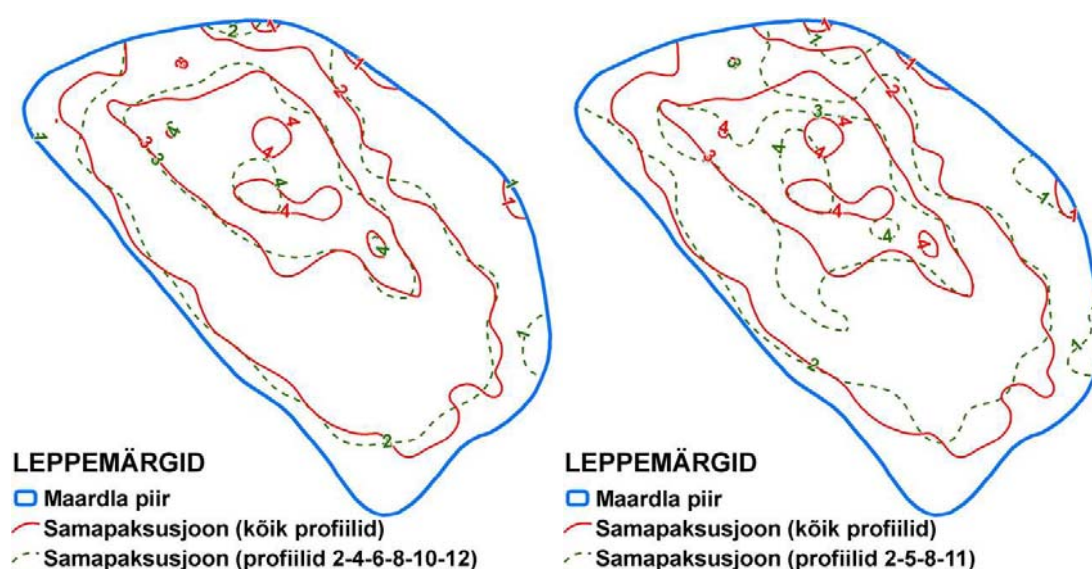
Kõikide andmepunktidega loodud spline-pind (joonis 11) on mitu suhteliselt suurt ala, kus turba paksus ületab nelja meetrit. Algandmetes on vähemalt neljameetrise paksusväärtusega andmepunkte 4, splinei rasterpinnas on selliseid punkte (piksleid) 837, loomuliku naabri pinnas 13, kaalutud pöördkauguse pinnas 57, *kriging*-pinnas 17 ja TIN-pinnas 12. Splinei 4 m samapaksusjoon korreleerub hästi profiilide andmepunktide jadas esinevate lünkadega, mis tekkisid sellest, et radargrammidel (lisad 1-15) ei suudetud turba suurema paksuse tõttu tema peegeldavat pinda eristada.

Joonisel 16 on võrreldud spline-pindade alusel genereeritud turba samapaksusjooni. Tulemus, mis toodeti kasutades iga teise profiili andmestikku langeb küllaltki hästi kokku tulemusega mis saadi kõiki andmeid kasutades. Iga kolmanda profiili andmestikku kaasates loodud pind toob aga esile tunduvalt

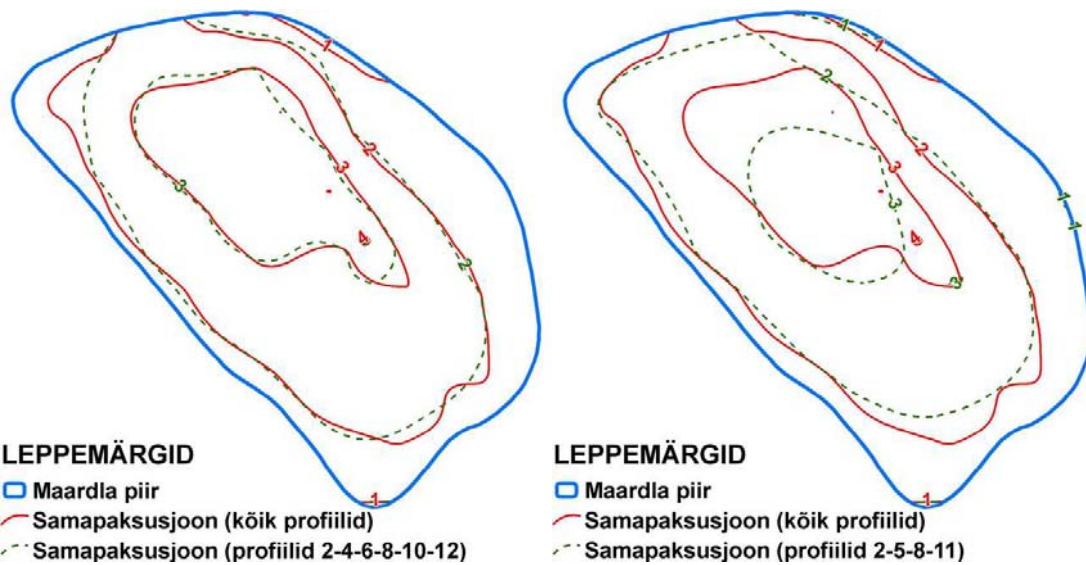
suuremad variatsioonid, seda eriti maardla keskosas. Nagu eelnevalt näidatud (tabel 6) on intervalli 200 m puhul arvatud turba maht vaid 1,3 % väiksem kui maht kasutades kõikide profiilide andmeid. Tähelepanu väärib asjaolu, et ka väikseim ruutkeskmine viga ja keskmine absoluutviga saadi splain-pinna jaoks, mille algandmetes oli profiilide-vaheliseks intervalliks 200 m (tabel 6).

Sama tendents mis splain-meetodi kasutamise juures – väikseim ruutkeskmine viga ainult iga teise profiili andmestiku kasutamisel – tuleb esile ka kõikide ülejäänud rasterpindade puhul. Joonisel 17 on näidatud loomuliku naabri interpolatsioonipindade isojooned. Selle meetodi puhul võib neljast meetrist suuremat turba paksust täheldada ainult üksikutes punktides maardla keskel, mistõttu selle pinna alusel arvutatud turba maht on väiksem kui splaini kasutades. Andmestiku (profiilide) vahekauguse 200 ja 100 m korral saadud isojooned on üsna sarnase kujuga. Hõredama intervalli (300 m) puhul muutub suurema turba paksusega ala maardla keskel (vt 3 m samapaksusjoon) tublisti väiksemaks, mistõttu väheneb ka pinna alusel arvutatud maht. Kui 200 meetrise profiilide vahe juures on loomuliku naabri pindade mahu erinevus 12 %, siis 300 meetrise vahe juures juba 21 %.

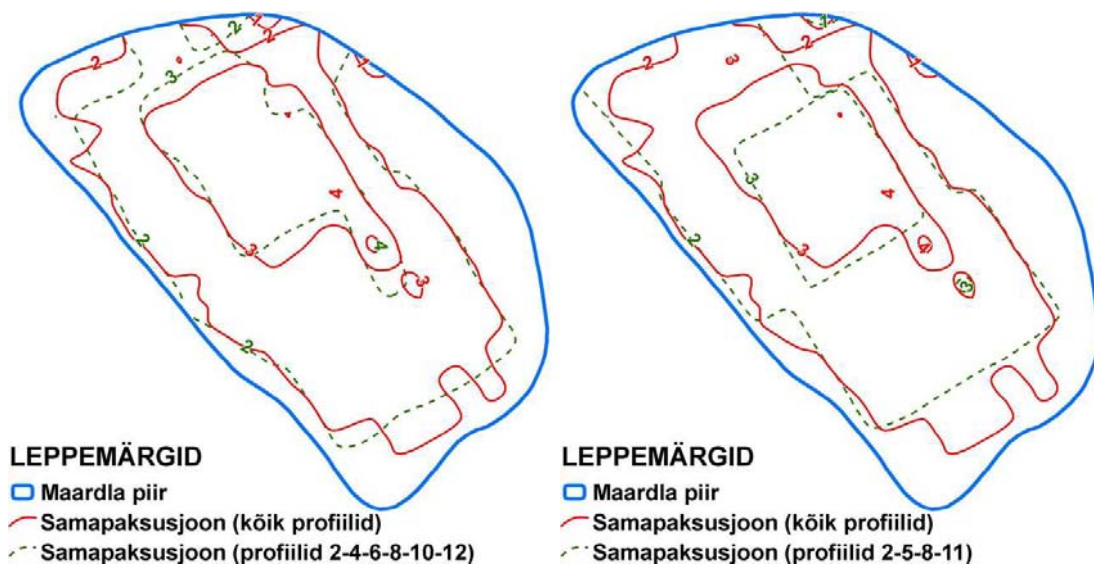
Kaalutud pöördkauguse pindade isojooned (joonis 18) on eelnevatega võrreldes rohkem liigestatud ning “kandilisemad”. Põhjuseks on ilmselt



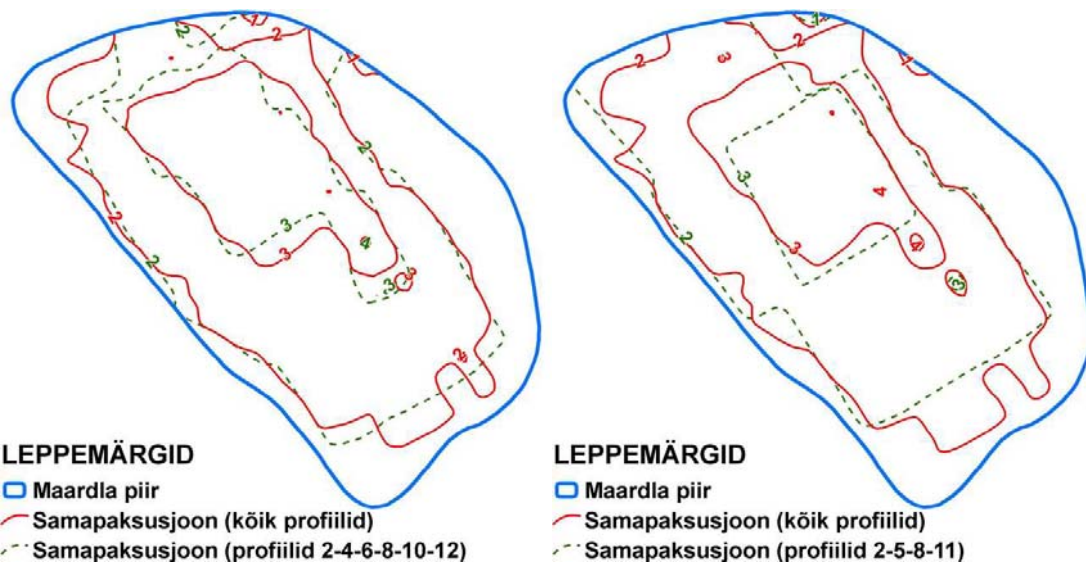
Joonis 16. Rasteriseeritud splain-pindade põhjal loodud turba samapaksusjooned Rahivere maardla jaoks. Samapaksusjooni, mille aluseks on kõikide profiilide andmestik, on võrreldud samapaksusjoontega, mille aluseks on andmestik igalt teiselt profiililt (profiilide vahekaugus 200 m (vasakul) ning igalt kolmandalt profiililt (profiilide vahekaugus 300 m; paremal).



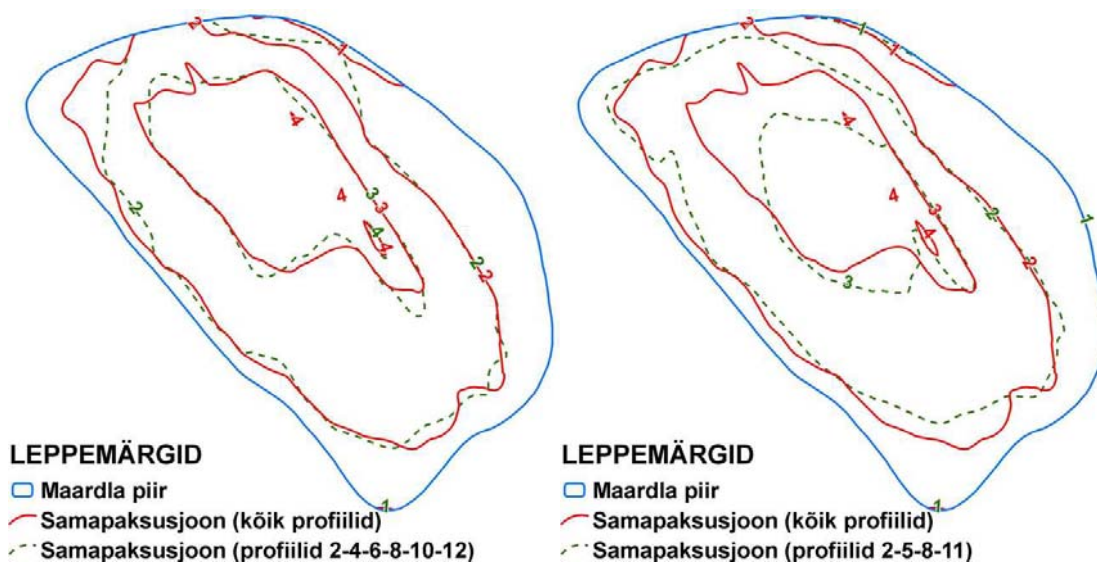
Joonis 17. Rasteriseeritud loomuliku naabri pindade põhjal loodud turba samapaksusjooned Rahivere maardla jaoks. Samapaksusjooni, mille aluseks on kõikide profiilide andmestik, on võrreldud samapaksusjoontega, mille aluseks on andmestik igalt teiselt profiililt (profiilide vahekaugus 200 m (vasakul) ning igalt kolmandalt profiililt (profiilide vahekaugus 300 m; paremal).



Joonis 18. Rasteriseeritud kaalutud pöördkauguse (IDW) pindade põhjal loodud turba samapaksusjooned Rahivere maardla jaoks. Samapaksusjooni, mille aluseks on kõikide profiilide andmestik, on võrreldud samapaksusjoontega, mille aluseks on andmestik igalt teiselt profiililt (profiilide vahekaugus 200 m (vasakul) ning igalt kolmandalt profiililt (profiilide vahekaugus 300 m; paremal).



Joonis 19. Rasteriseeritud *kriging*-pindade põhjal loodud turba samapaksusjooned Rahivere maardla jaoks. Samapaksusjooni, mille aluseks on kõikide profiilide andmestik, on võrreldud samapaksusjoontega, mille aluseks on andmestik igalt teiselt profiililt (profiilide vahekaugus 200 m (vasakul) ning igalt kolmandalt profiililt (profiilide vahekaugus 300 m; paremal).



Joonis 20. TIN-pindade põhjal loodud turba samapaksusjooned Rahivere maardla jaoks. Samapaksusjooni, mille aluseks on kõikide profiilide andmestik, on võrreldud samapaksusjoontega, mille aluseks on andmestik igalt teiselt profiililt (profiilide vahekaugus 200 m (vasakul) ning igalt kolmandalt profiililt (profiilide vahekaugus 300 m; paremal).

interpoleerimisel kasutatud suur astmenäitaja⁸ (4), mille tõttu interpoleeritava punkti lähedal paiknevad andmepunktid saavad suhteliselt suure kaalu ja algandmete vähenedes muutub pind ebaühtlaseks. Kasutades mahtude arvutamisel informatsiooni

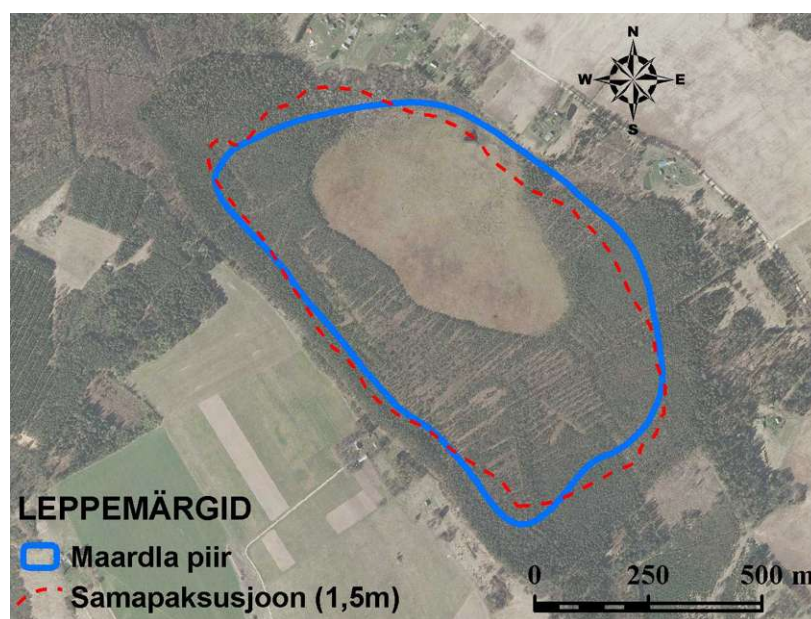
⁸ Astmenäitaja valiti lähtuvalt pindade väikseimast ruutkeskmise vea väärtusest, vt tabelit 8.

üle ühe profiili saadi maardla maht 27 % ja profile 2; 5; 8; 11 kasutades 18 % väiksem kui arvutustes, mille aluseks olid kõik olemasolevad andmed.

Kriging-interpolatsiooniga loodud samapaksusjooned on väga sarnased kaalutud pöördkauguse omadega (joonis 19), mistõttu omavaheline mahtude võrdlus ei too esile märkimisväärseid erinevusi. Interpoleerimisel kasutati eksponentsiaalset variogrammi, sest ta andis tulemuseks väikseima ruutkeskmise vea (tabel 9).

Tabel 10. Rahivere maardla plokkide olulisemad näitajad (keskkonnaregistri maardlate nimistu järgi) ja nende alusel arvatud maardla maht (rasvases kirjas real Maardla varu). Võrdluseks on antud interpoleerimisel saadud mahud kasutades andmestikku 100, 200 ja 300 meetrise profiilide vahe korral.

Näitaja	Plokk 1	Plokk 2	100 m	200 m	300 m
Niiskus (%)	94,2	96,2			
Lagunemisaste (%)	35	5			
Koefitsent	0,102	0,065			
Varu (tuhat t)	92	5			
Maardla varu (tuhat m ³)	902	77	979		
Splain-pind (tuhat m ³)			978	965	1104
Loomuliku naabri pind (tuhat m ³)			942	826	746
Kaalutud pöördkauguse pind (tuhat m ³)			933	686	766
<i>Kriging</i> -pind (tuhat m ³)			914	685	778
TIN-pind (tuhat m ³)			981	993	914



Joonis 21. TIN-pinna (profileerimisintervall 100 m) põhjal loodud turba 1,5 meetri samapaksusjoon võrrelduna keskkonnaregistrist pärineva Rahivere maardla ruumikujuga.

Ebakorrapäraste kolmnurkade (TIN) meetodil loodud pinnad langevad suhteliselt hästi kokku (joonis 20) juhul kui võrrelda pindasid mis on loodud kasutades kõiki andmeid ning üle ühe profiili vähendatud andmeid. Andmehulga suurema vähendamise puhul on erinevus oluliselt suurem, kuid siiski mitte nii silmatorkav kui näiteks splain-pinnal. Kaks korda vähendatud andmehulka kasutades loodud TIN-pinna alusel arvatud turbamaardla maht on 1 % suurem ja kolm korda vähendatud andmehulka kasutades 7 % väiksem kui kõik andmeid aluseks võttes.

Keskkonnaregistri maardlate nimistus on Rahivere turbamaardla varud antud plokkide kaupa tuhandetes tonnides 40 %lise tingniiskuse juures. Interpoleeritud pindadele arvatud mahtude võrdlemiseks keskkonnaregistri andmetega oli tarvis pindade mahud teisendada massiks või, vastupidi, plokkide mass arvutada ümber mahuks. Kuna keskkonnaregistris on maardla plokkide turba niiskusesisalduse ja lagunemisastme andmed olemas, otsustati nende abil arvutada plokkide maht. Tulemuste (plokkide) summeerides saadi turba maht kogu maardla jaoks, milleks on 979 000 m³. Selgub, et tulemus on küllaltki sarnane interpoleerimisel saadud mahtudega (tabel 10). Rahivere maardla piirjoon paikneb suhteliselt lähedal turba 1,5 meetri samapaksusjoonele (joonis 21).

5 Järeldused

5.1 Georadari rakendatavus soode uuringutel

Magistritöö tegemisel tulid esile nii georadari eelised kui kitsaskohad soisel pinnasel. Arvatavasti on talv kõige parem aastaaeg rabas mõõtmiste läbiviimiseks. Muul ajal vesine ja raskelt läbitav ala on siis kaetud jää ja lumega. Mõõdukate külmakraadide ja vähese lume korral on tingimused välitöödeks suurepärased. Enamasti oligi ilm ajavahemikul 19-27.02.2009 ideaalilähedane. Vaid 27. veebruaril kui teostati puurimistöid ja testiti ühise saatja meetodit, oli soojem. Ilmselt võib põhjuse, miks georadari tulemused polnud tol päeval ootuspärased, kirjutada suures osas märja lume arvele.

Georadar on abiks puurtööde mahu vähendamisel; teda saab kasutada enne puurimist, et täpsustada tulevaste puuraukude asukohti või peale puurimist, et saada infot kihtide lateraalse leviku kohta. Käesolevas töös oli puuraukude ülesandeks toetada turba permittiivsuse määramist ning ühtlasi testida georadariga saadud turba paksuse väärtusi. Tulemused näitavad, et georadariga saadud paksused on heas kooskõlas puuraukude informatsiooniga.

Enne välitööde tegemist puudusid kogemused selles osas, kui tihedalt peaks turbamaardlat georadariga profileerima, saamaks realistlikke turbamahu hinnanguid. Aluseks võeti keskkonnaministri 26. mai 2005. a määrus nr 44, kus tarbevaru arvutamisel on nõutav 100 või 200 meetrine uuringuvõrgu tihedus. Rahivere rabas rajatigi profiilid 100 meetriste vahedega. Hilisemal interpolatsioonipindade ning nende mahtude analüüsil selgus ootuspäraselt, et kõige detailsema resultaadi annab tihedaim profileerimisintervall. Samas võib optimaalseimaks võib pidada 200 meetrist profiilide vahet, mis annab kaks korda väiksema andmehulga ja ajakulu juures samaväärse tulemuse.

5.2 ArcGISi interpolaatorite sobivus radariandmete töötlemiseks

ArcGISi tarkvara pakub punktandmetest rasterpindade interpoleerimiseks mitmeid võimalusi. Magistritöös testiti nendest nelja kõige sagedamini kasutatavat, hindamaks georadari tulemuste alusel Rahivere maardlas sisalduva turba mahtu. Samal eesmärgil loodi georadari andmepunktide abil TIN-pinnad. Kõikide profiilide

informatsiooni kasutades on erinevused pindadele arvutatud mahtudes suhteliselt väikesed (<7 %, tabel 10). Kaks ja kolm korda väiksema profileerimistiheduse juures tulevad vahed märksa selgemalt esile. Parema ülevaate interpolaatori käitumisest annab erineva algandmestikuga toodetud turba samapaksusjoonte võrdlus. Kahesaja-meetrise profiilide vahega saadud samapaksusjooned langevad üldjoontes kokku isojoontega, mis loodi kaks korda tihedama (algse) andmepunktide hulgaga. Mahtude võrdluses (tabel 10) ilmneb, et väiksemad muutused on toimunud splain- ja TIN-pinnas. Samapaksusjooni kõrvutades (joonis 16) tuleb tõdeda, et 300 meetrine profiilide vahe on splainiga hea tulemuse saamiseks liiga suur. Seevastu TIN-pinnast genereeritud samapaksusjooned (joonis 20) on loogilisema paigutusega. Kolme mahu (profiilide vahe 100, 200 ja 300 m korral) väikseim standardhälve on TINil (43), rasterpindade arvestuses on see näitaja kõige parem splainil (77). Kuna keskkonnaregistri maardlate nimistu andmete alusel arvutatud Rahivere maardla maht on üsna sarnane TIN- ja splain-pinna mahule, võib tulemusi pidada realistlikeks ning järeldada, et georadari andmestikku saab ArcGISi vahenditega edukalt töödelda.

6 Kasutatud kirjandus

- Allikvee, H. & Orru, M., 1979. *Jõgeva rajooni turbamaardlate otsingulis-uuringuliste tööde aruanne*. Geoloogia Valitsus, Tallinn, 446 lk (EGF 5182).
- Anderson S., 2002. *An Evaluation of Spatial Interpolation Methods on Air Temperature in Phoenix*. Research paper. Department of Geography, Arizona State University.
- Arold, I., 2005. *Eesti maastikud*. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu, 453 lk.
- Bello-Pineda, J. & Hernández-Stefanoni, J.L., 2007. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* **2**, 247-254.
- Bohling, G., 2005. Introduction to geostatistics and variogram analysis. C&PE 940, 17 October 2005. Kansas Geological Survey, 20 pp.
URL: <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Variograms.pdf>
- Burrough, P.A. & McDonnell, R.A., 1988. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. New York, 326 pp.
- 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.
- Cressie, N.A.C., 1993. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York, 900 pp.
- Daniels, D.J., 2004. *Ground Penetrating Radar (2nd Edition)*. IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15. The Institution of Electrical Engineers, London, 726 pp.
- Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* **37**, 531-551.
- Eckstein, B.A., 1989. Evaluation of spline and weighted average interpolation algorithms. *Computers & Geosciences* **15**, 79-94.
- ESRI, 2008. *ArcGIS Desktop Help*. Environmental Research Institute 1999-2008.
- Godio, A., 2009. Georadar Measurements for the Snow Cover Density. *American Journal of Applied Sciences* **6**, 414-423.
- Gruber, S. & Ludwig, F., 1996. *Application of ground penetrating radar in glaciology and permafrost prospecting*. Study Paper, Arctic Centre, Rovaniemi, 22 pp.
- Holden, J., Burt, T.P. & Vilas, M., 2002. Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. *Earth Surface Processes and Landforms* **27**, 235-249.
- Hänninen, P., 2004. Peatland Investigations. In Daniels, D.J. *Ground Penetrating Radar*. IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15. The Institution of Electrical Engineers, London, 464-465.
- Jol, H.M. & Bristow, C.S., 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In Bristow, C.S. and Jol, H. (eds) *Ground Penetrating Radar: Applications in Sedimentology*. Geological Society of London Special Publication **211**, 9-27.
- Moorman, B.J., Robinson, S.D. & Burgess, M.M., 2003. Imaging Periglacial Conditions with Groundpenetrating Radar. *Permafrost and Periglacial Processes* **14**, 319 – 329.
- 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 Raukas, A. & Teedumäe, A. (eds) *Geology and Mineral Resources of Estonia*, Estonian Academy Publishers, Tallinn, 337–346.
- Plewes, L.A. & Hubbard, B., 2001. A review of the use of radio-echo sounding in glaciology. *Progress in Physical Geography* **25**, 203-236.
- Rattas, M., 2004. Subglacial environments in the formation of drumlins – The case of the Saadjärve Drumlin Field, Estonia. *Dissertationes Geologicae Universitatis Tartuensis* **14**, Tartu University Press, Tartu, 117 pp.
- Rattas, M. & Kalm, V., 2001. Lithostratigraphy and distribution of tills in the Saadjärve drumlin field, East-Central Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy Of Sciences. Geology* **50**, 24–42.
- Rosa, E., Larocque, M., Pellerin, S., Gagné, S. & Fournier, B., 2009. Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar. *Earth Surface Processes and Landforms* **34**, 377-383.
- Rõuk, A.-M. & Raukas, A., 1989. Drumlins of Estonia. *Sedimentary Geology* **62**, 371-384.
- Schwaborn, G., Heinzl, J. & Schirmer, L., 2007. Internal characteristics of ice-marginal sediments deduced from georadar profiling and sediment properties (Brøgger Peninsula, Svalbard). *Geomorphology* **95**, 74-83.
- Sibson, R., 1981. A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In *Interpolating multivariate data*. John Wiley & Sons, New York, 21-36.
- Siska, P.P. & Hung, I-K., 2001. Assessment of kriging accuracy in the GIS environment. Proceedings of the ESRI Users conference 2001.
URL: http://www.faculty.sfasu.edu/hungikua/pdf/research/ESRI_CONF2001.PDF
- Slater, L.D. & Reeve, A., 2002. Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics* **67**, 365–378.
- Theimer, B.D., Nobes, D.C. & Warner B.G., 1994. A study of the geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying. *Geophysical Prospecting* **42**, 179-209.
- Woodward, J., Ashworth, P.J., Best, J.L., Sambrook Smith, G. & Simpson C., 2003. The use and application of ground-penetrating radar (GPR) in sandy fluvial environments: methodological considerations. In Bristow, C.S. & Jol, H. (eds), *Ground Penetrating Radar: Applications in Sedimentology*, Geological Society of London Special Publication **211**, 127-142.

7 KOKKUVÕTE

Rahivere turbamaardla uuringud georadariga

Ivo Sibul

Magistritöö käsitleb 2009. a veebruaris Vooremaa idaossa jäävas Rahivere turbamaardlas teostatud georadari uuringuid. Rahivere turbamaardla paikneb voortevahelises nõos ning tema pindala on 53,63 ha ja aktiivseks reservvaruks 97 000 tonni. Maardlale ja selle vahetusse ümbrusesse rajati keskmiselt 100 meetriste intervallide tagant 13 kirde-edelasuunalist radariprofiili ja üks loode-kagu suunaline profiil kogupikkusega 9 km. Mõõtmisteks kasutati Läti päritolu georadarit „Zond 12e“ sagedusel 300 MHz. Radargrammidel eristub turbakihi lamam valdavalt pideva ja selge peegeldusena, mis paikneb võrreldes servadega nõo keskosas oluliselt sügavamal (üle 4 m).

Radargrammide alusel määratud turba paksuse ning elektromagnetlainete levikukiiruse kontrollimiseks puuriti maardla piiresse erinevatele profiilidele käsipuuriga kokku 10 auku. Maardla leiti koosnevast vähelagunenud (ülal) ja hästilagunenud (all) turbast. Turba lamamiks on liiv ja aleuroliit (nõo servaaladel) ning limnilise tekkega savi (nõo keskosas). Radargrammid interpreteeriti kasutades turba permittiivsusena väärtust 69,5 ning saadud andmepunktide alusel loodi arvutiprogrammiga ArcGIS turba levikut kirjeldavad pinnad ja arvutati turba mahud. Pinna genereerimiseks sobivaima meetodi leidmiseks katsetati erinevaid interpolatsioonitehnikaid. Lisaks erinevate meetodite võrdlemisele analüüsiti pinnale arvutatud mahu seost tema tegemiseks kasutatud informatsiooni hulgaga. Selleks tehti iga meetodiga 3 pinda: *esiteks* kõikide profiilide andmepunktidega (14 profiili), *teiseks* iga teise profiili andmepunktidega (6 profiili) ning *kolmandaks* iga kolmanda profiili andmetega (4 profiili).

Sobivaimaks vahendiks pinna loomisel võib pidada andmepunktide triangulatsiooni (ArcGISi TIN). Leiti, et optimaalseks georadari profiilide vahekauguseks maardla turbamahu leidmiseks on 200 meetrit.

Märksõnad: Georadar, radargramm, ArcGIS, interpoleerimine

8 SUMMARY

Investigations of the Rahivere peat deposit by ground-penetrating radar

Ivo Sibul

Rahivere peat deposit lies in the eastern part of Vooremaa drumlin field. According to the Estonian records of mineral resources of the Environmental Registry it has an area of 53,63 hectares and reserves of 97 thousand tons. Calculation of these reserves is based solely on borehole data. Current study proposes an alternative method for peat volume calculation.

Fourteen georadar profiles were created in Rahivere peat bog, covering the area of peat deposit and its nearest vicinity. Thirteen of the profiles were NE-SW-oriented and juxtaposed approximately 100 meters from each other; one profile connects 4 profiles perpendicularly. Latvian „Zond 12e” ground-penetrating radar at the frequency of 300 MHz and common offset method was utilized during field work. Additionally, common mid-point technique (antennae 300 & 500 MHz) provided some information for estimating the dielectrical permittivity of peat (69,5). Radargrams reveal that thickness of the peat deposits extends four meters in the centre of the valley. In order to verify the radargrams' interpretation as well as the evaluated velocity of electromagnetic waves in peat, ten boreholes (depth from 1,75 to 5,5 m) were drilled manually upon the profiles. According to the borehole data, minerotrophic peat, where present, is covered by the ombrotrophic one. Mineral soil consists of silt and sand in the peripheral areas of the valley and limnoglacial clay in the central part.

Peat thickness data were introduced as a point feature class into ArcGIS geodatabase. These spatially coordinated points were source data for some well-known interpolation methods (spline, natural neighbor, IDW, kriging, TIN). The aim of generating raster and TIN surfaces was peat volume calculation. At first, all the georadar information was used. Then, data points were reduced by eliminating 8 of the profiles and finally, only 4 of them attended in the processing. Distance between the profiles was 100, 200 and 300 meters, respectively. Calculated peat volumes correspond well with official information. TIN method is given the preference after comparing the isolines of the surfaces. 200 m step is suggested as the optimum for georadar profiling in peat deposits.

9 Tänuõnad

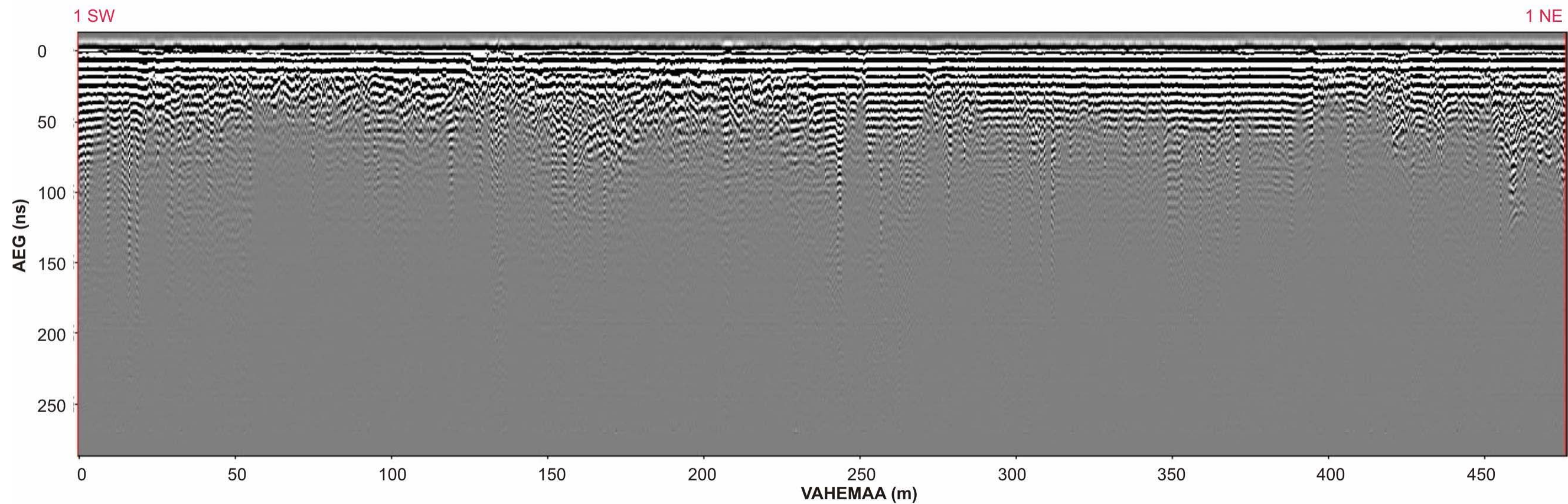
Käesolev magistritöö on koostatud paljuski tänu juhendajale Jüri Pladole, kes pakkus välja huvitava teema, osales kõikidel välitöödel ja korrigeeris vääramatult terve rea möödalaskmisi, mida autor meelega või kogemata töösse kirjutada üritas. Välitöödel osutatud abi eest eest suur aitäh Alina Tšugaile, kes oli nõus Rahivere rabas külmetavate varvastega ringi müttama. Tänuväärt on ka Argo Jõehehe ennastohverdav sukeldumine prügikonteinerisse, kus ta arvas paiknevat georadari mõõteratta (jälitustöö tulemusel õnnestuski tal see, siiski teisest kohast, üles leida ja välitööd said jätkuda).

Laiemalt võttes on kogu ökoloogia ja maateaduste instituudi geoloogia osakonna kollektiiv eesotsas endiste ja praeguste juhendajatega autorilt suure kummarduse ära teeninud.

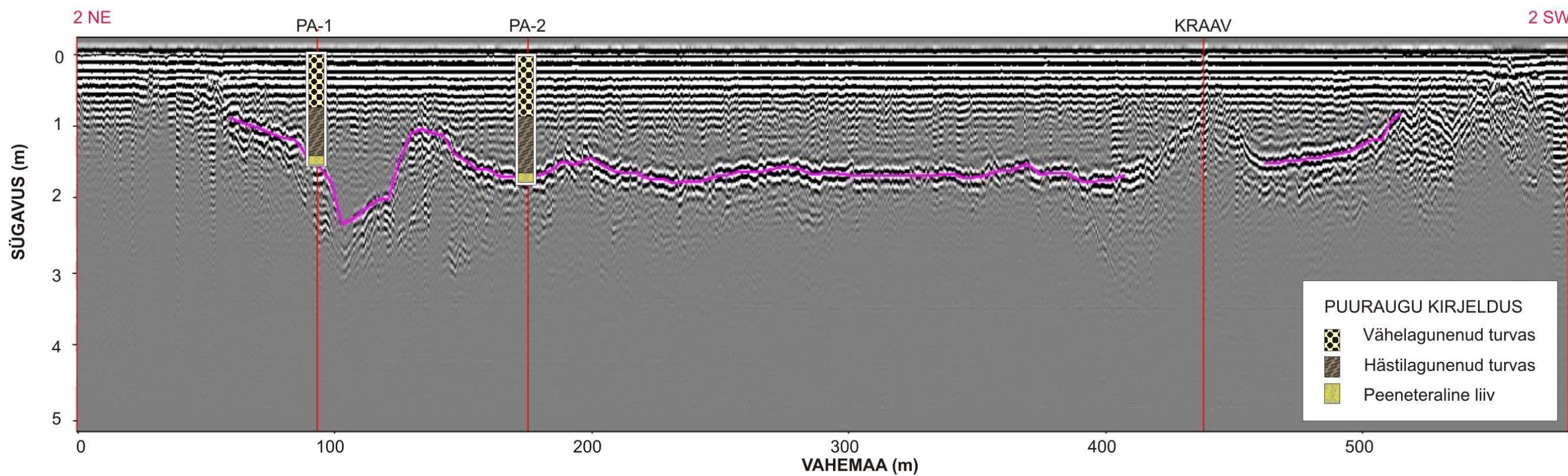
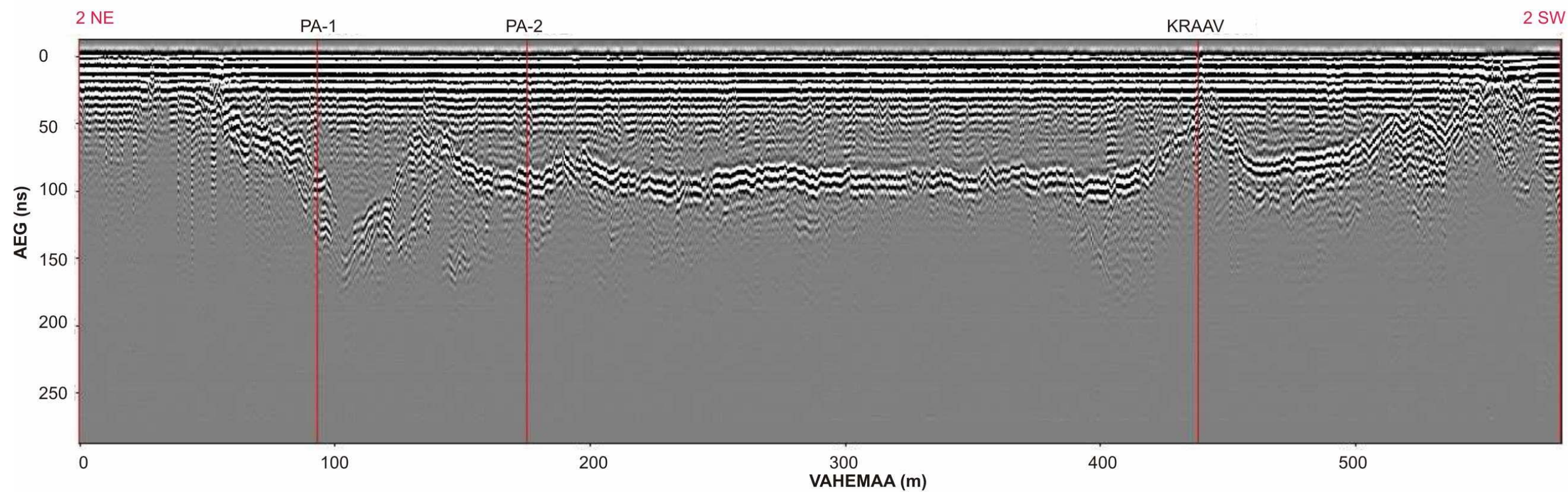
Magistritöö poleks eelnevalt seatud tähtjaks valminud ilma töökaaslaste toetuseta. Eriline tänu Reet Roosalu ja Ott Pruulmann Maa-ameti geoloogia osakonnast asjakohaste kommentaaride ja selgituste eest.

Viimaks tahan tänada oma elukaaslast Kai Rausalut ning pisikest Merlit, kes vajalikel hetkedel süstisid minusse ohtralt eneseusku, jõudmaks pikaleveninud magistritöö saagaga võidukalt finišisse.

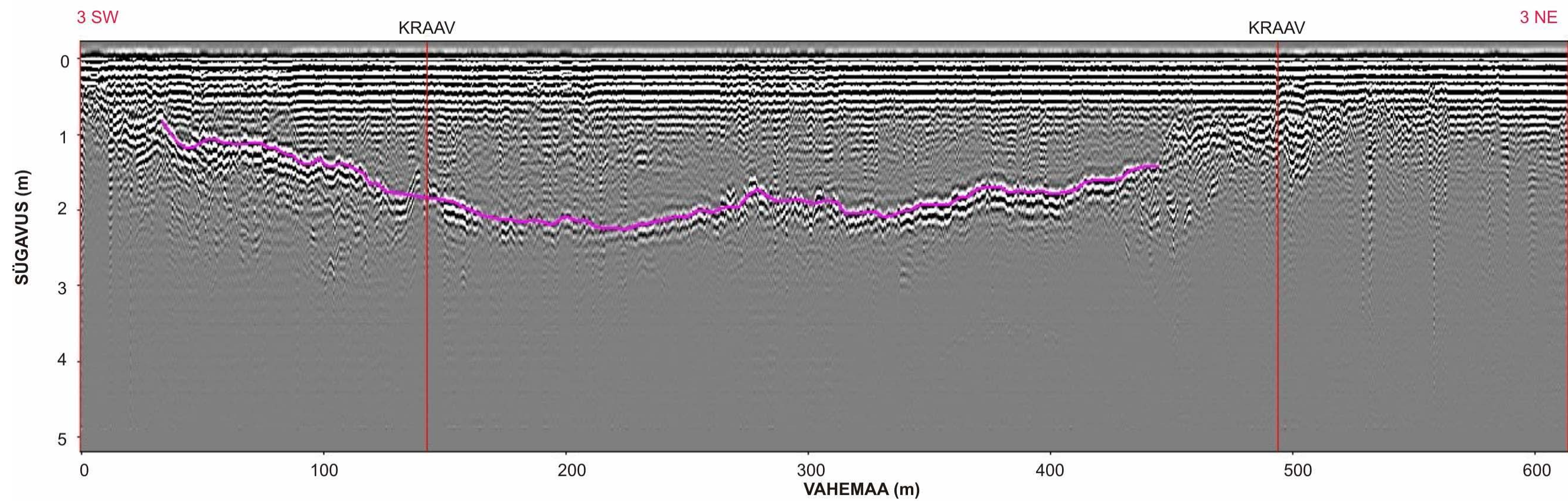
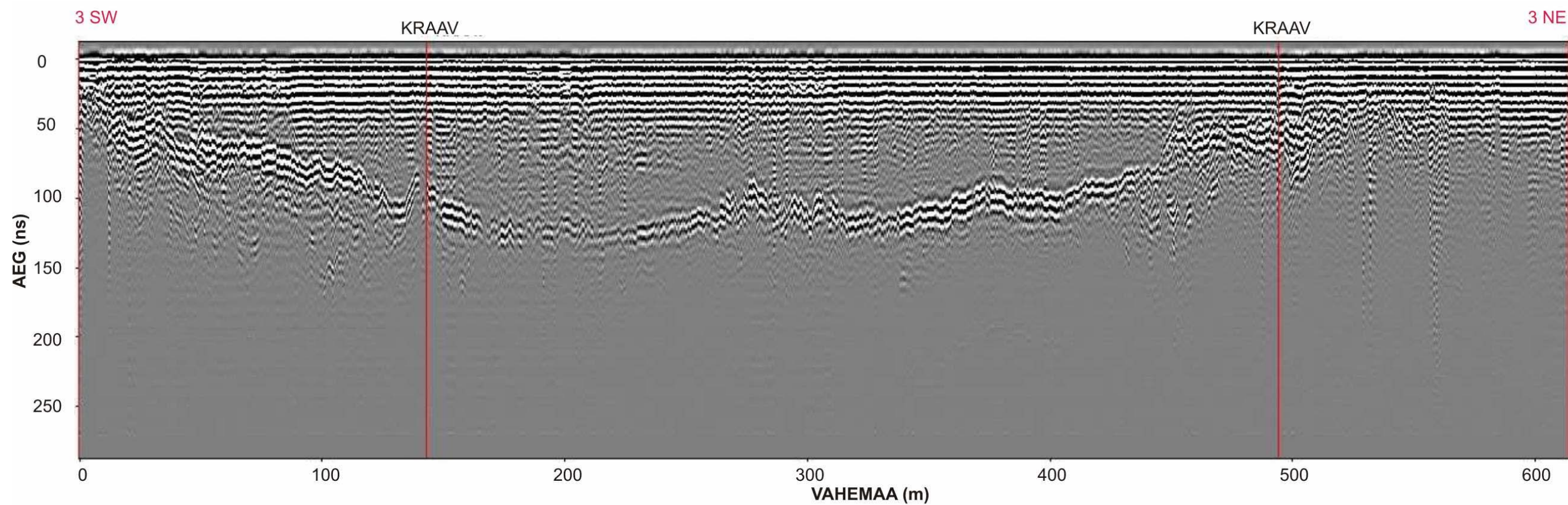
10 LISAD



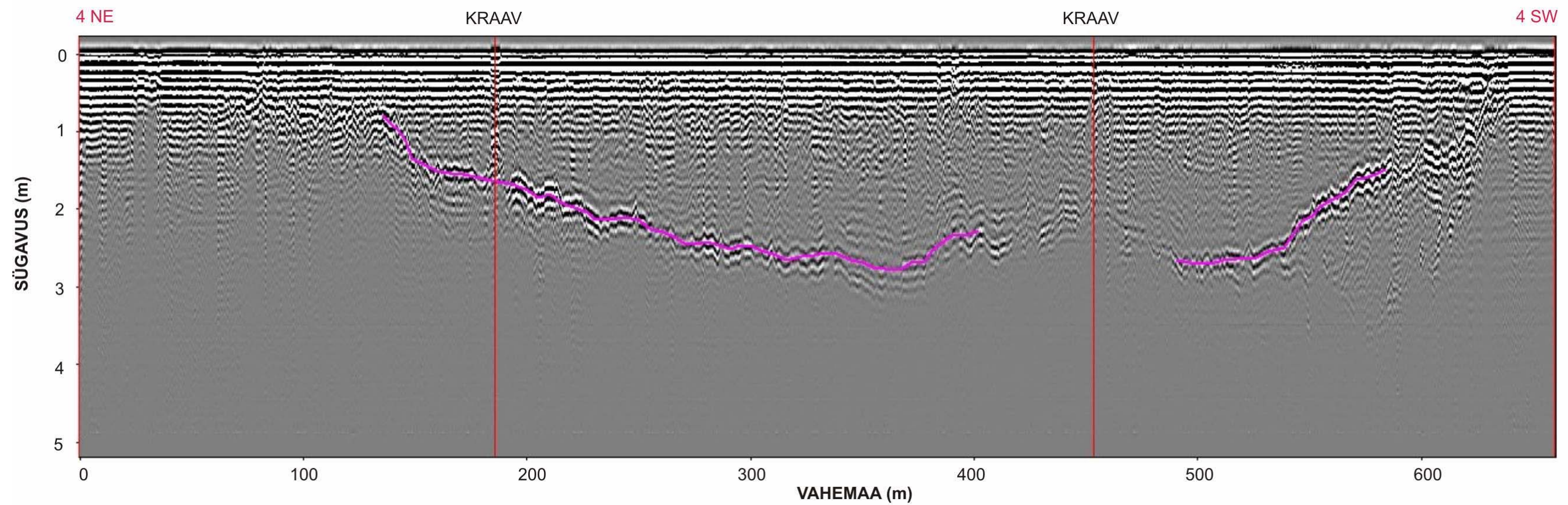
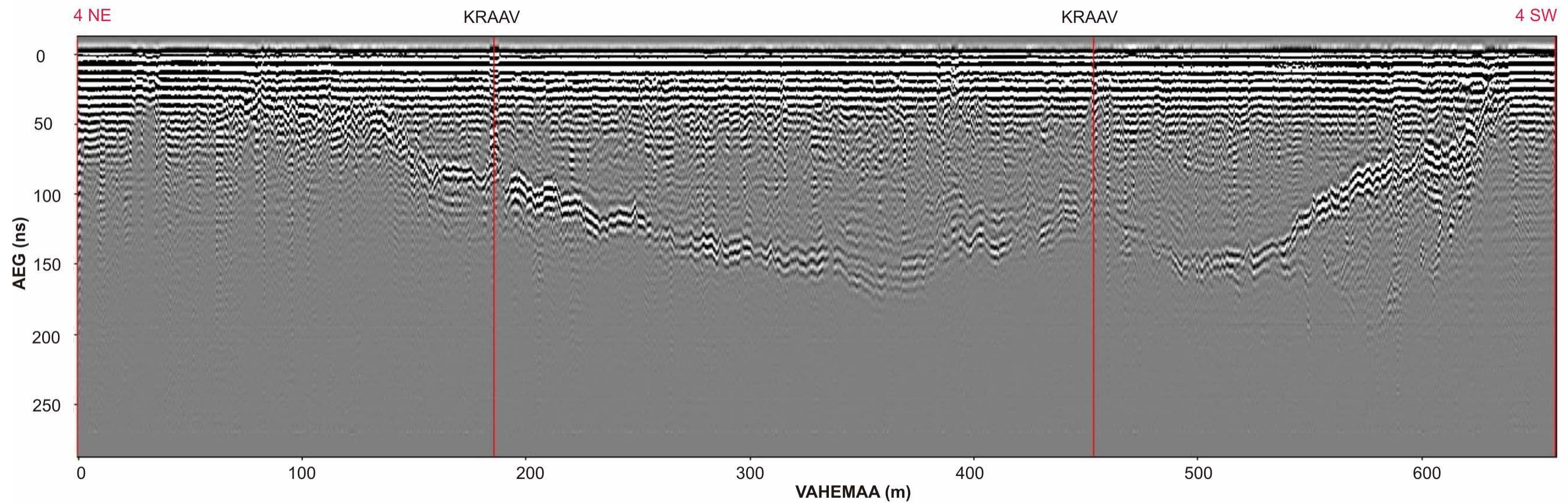
Lisa 1. Radargramm piki profiili 1 (asend vt joonis 7) paikneb täielikult Rahivere turbamaardla piiridest väljaspool, tihedas metsas. Profiili koostamise eesmärgiks oli kontrollida, kas turbalasundi levikut saab jälgida maardlast lõuna suunas. Kuna radargrammil pole võimalik eristada ühtegi selgelt eristuvat peegeldust, mis võiks viidata turba lamava pinna asukohale, ei lisatud profiilile 1 annotatsioon ning teda ei kasutatud pindade loomisel.



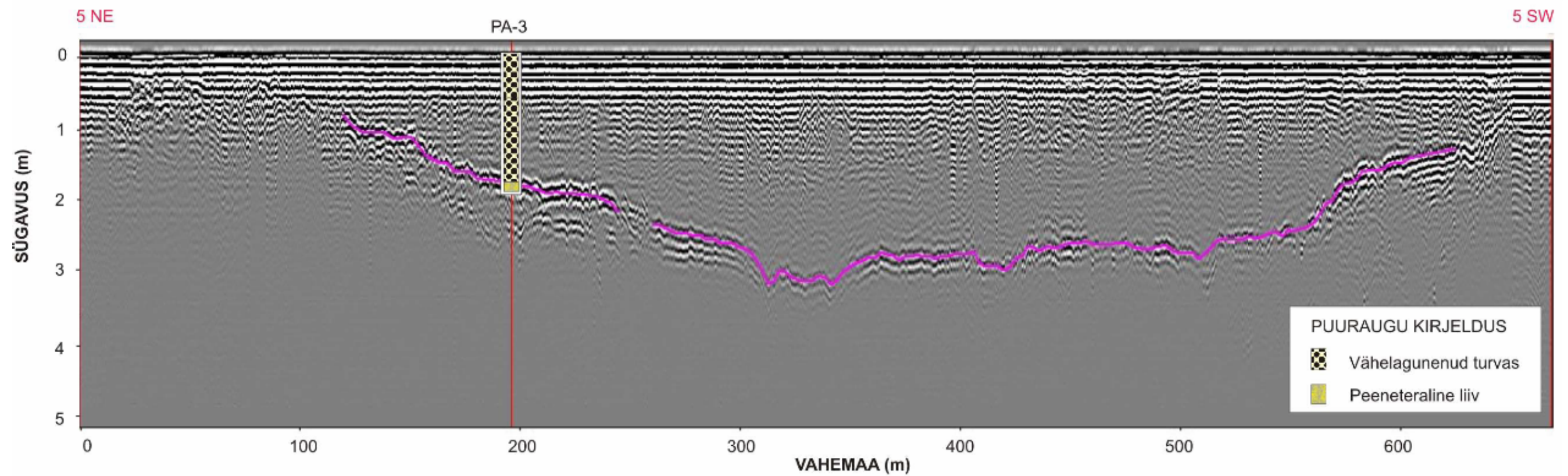
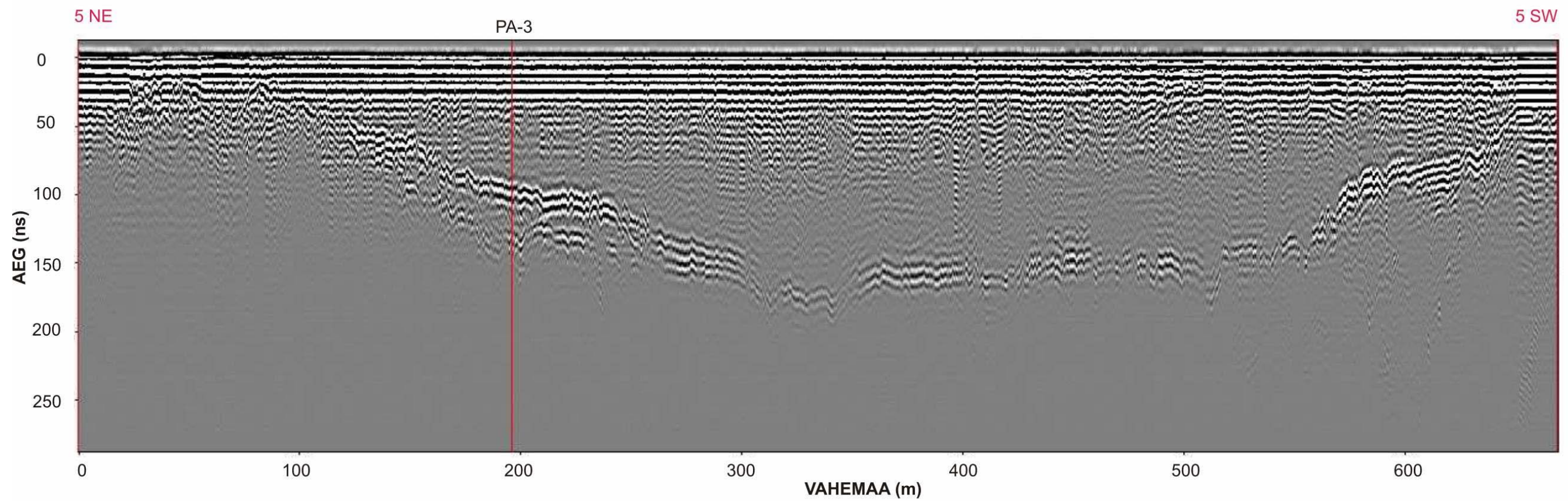
Lisa 2. Radargrammi piki profiili 2 (asend vt joonis 7) kirdeosa (vasakul) kulgeb maardlast pisut väljas-, edelaosa (paremal) seespool. Selgesti tuleb esile peegeldus ~50-150 ns tasemel. Profiilile tehti hiljem 2 puurauku, kus turbakihi paksuseks mõõdeti 1,5 m (PA-1) ja 1,55 m (PA-2). Valdavalt horisontaalset pinda liigestavad puuraukude vahel väike kõrgendik ja sügavast kuivenduskraavist tingitud häired (peegeldava pinna näiv kerge) profiili 400-460 meetril.



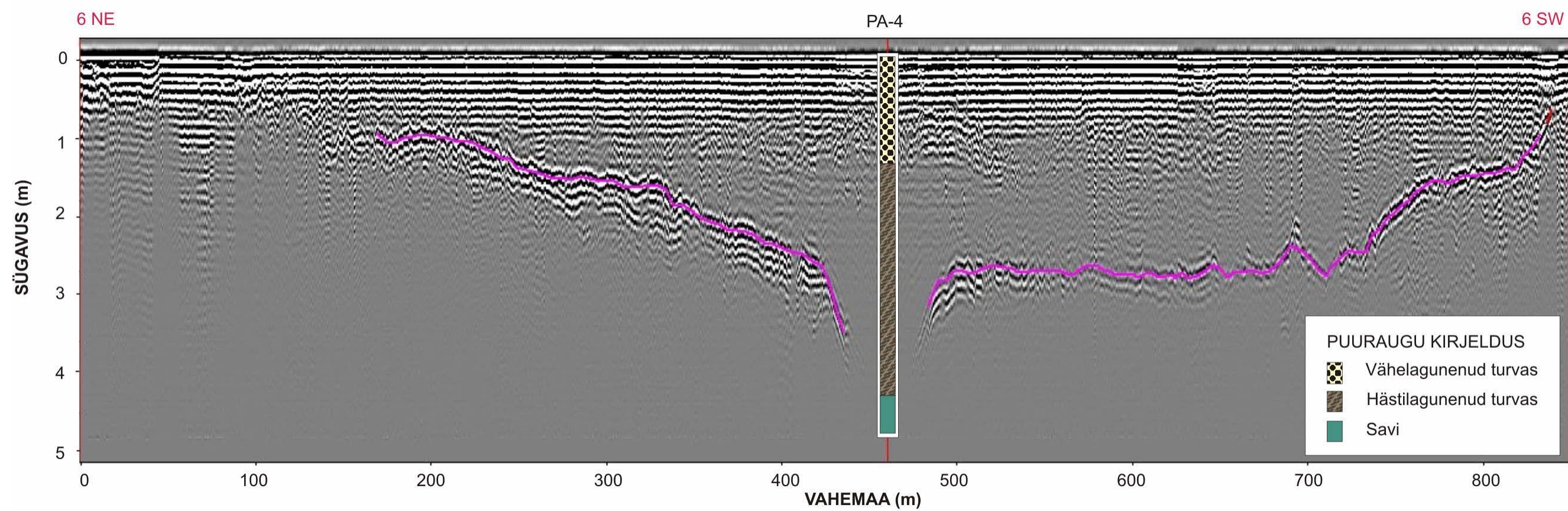
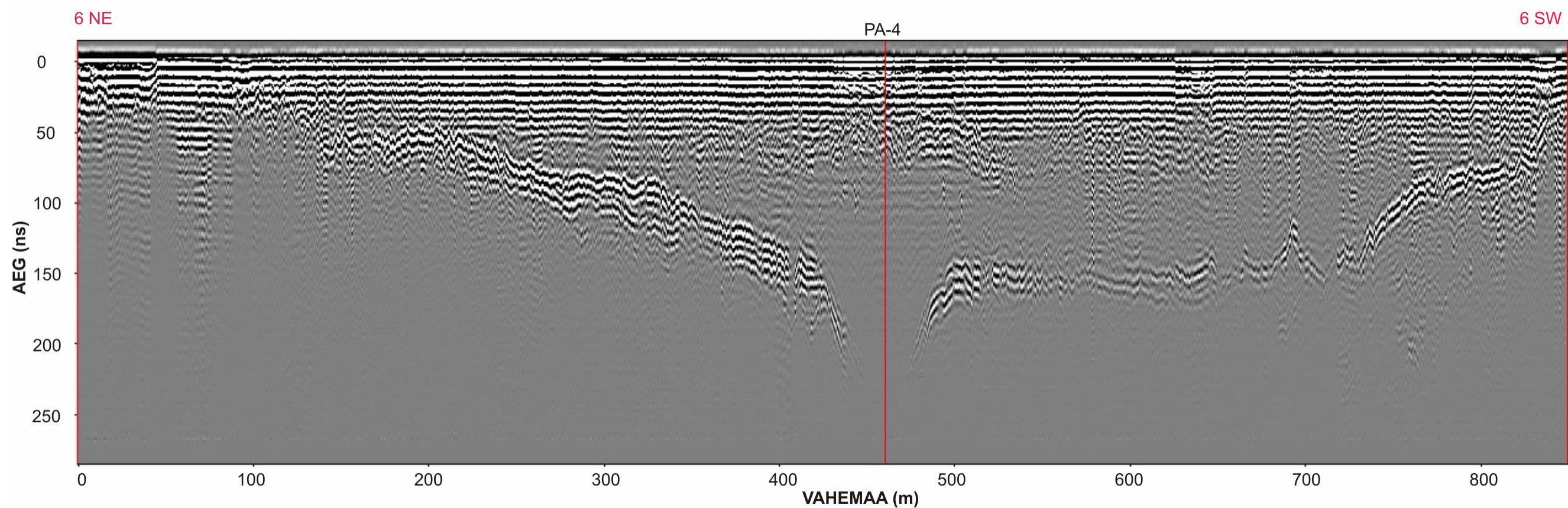
Lisa 3. Radargrammil piki profiili 3 (asend vt joonis 7) võib eelmisega võrreldes täheldada turbakihi paksuse suurenemist 2 meetrini.



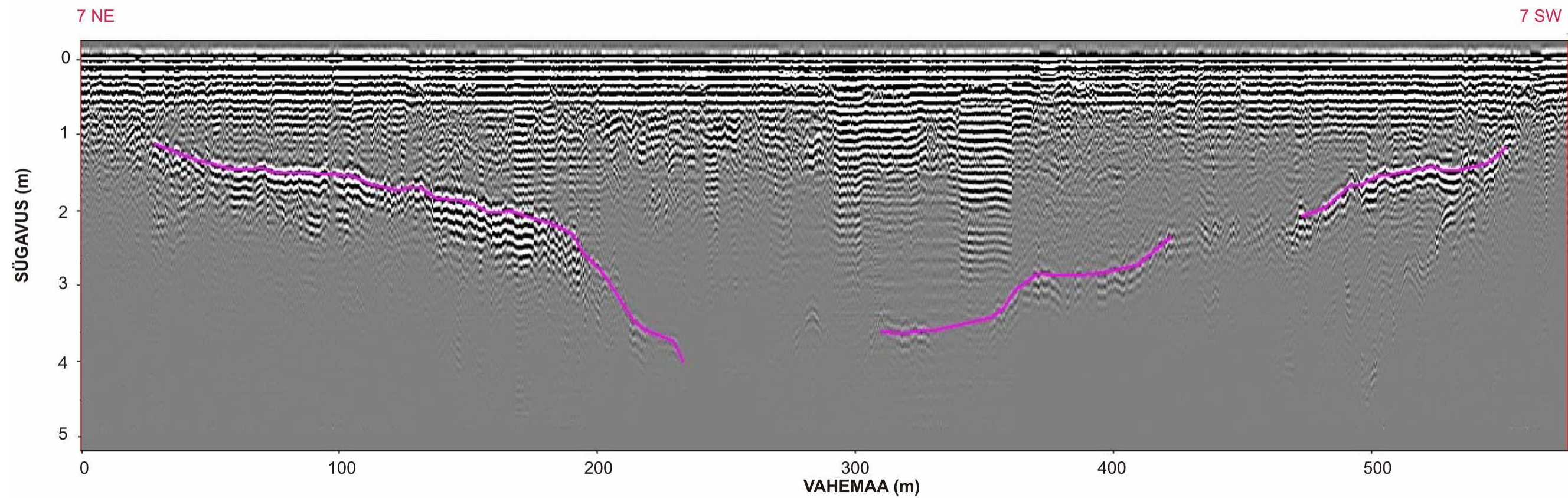
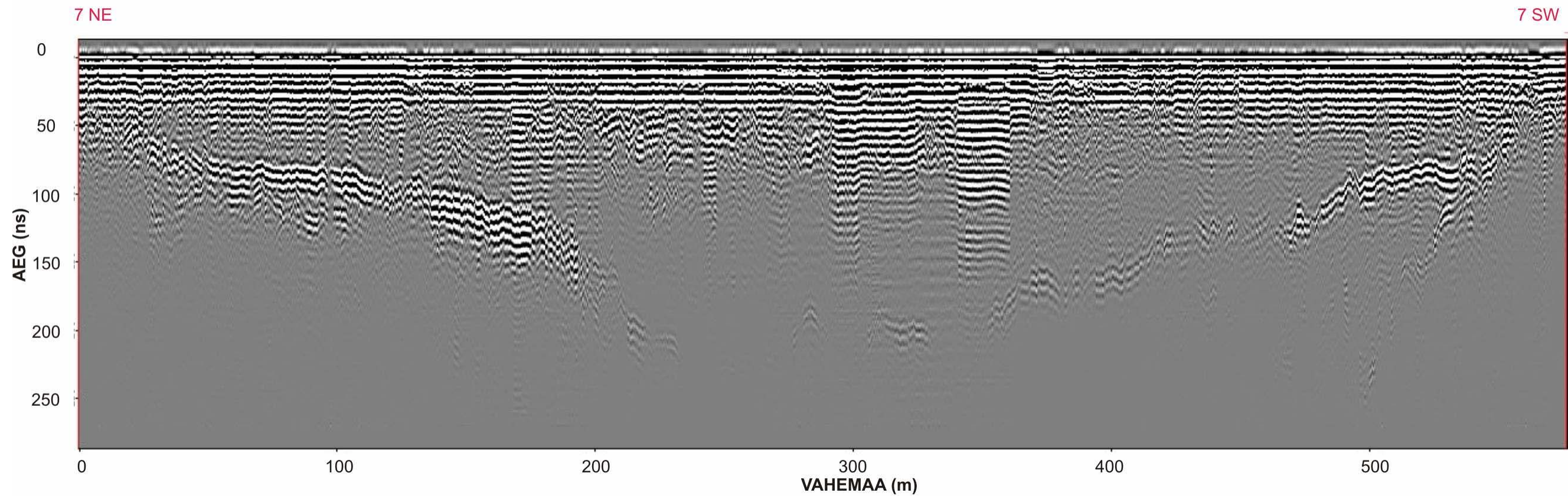
Lisa 4. Radargramm piki profiili 4 (asend vt joonis 7). Profiil 4 kulges suures osas paralleelselt sohu rajatud kraaviga. Ligikaudu 450 m kaugusel on ristumine kraaviga, mis annab tugevaid häireid lainete peegelduses. Võimalik, et turba paksus seal tõepoolest väheneb nagu võiks esmapilgul oletada, aga samas võib anomaalia põhjuseks olla kuivenduskraav, mis vähendas ümbruskonna turba veesisaldust ja sellest tulenevalt suurendas elektromagnetlainete levikukiirust. Komplitseeritud piirkonnas otsustati jätta annotatsioonid koostamata. Nõo edelapoolne nõlv on tunduvalt järsem kui alguses.



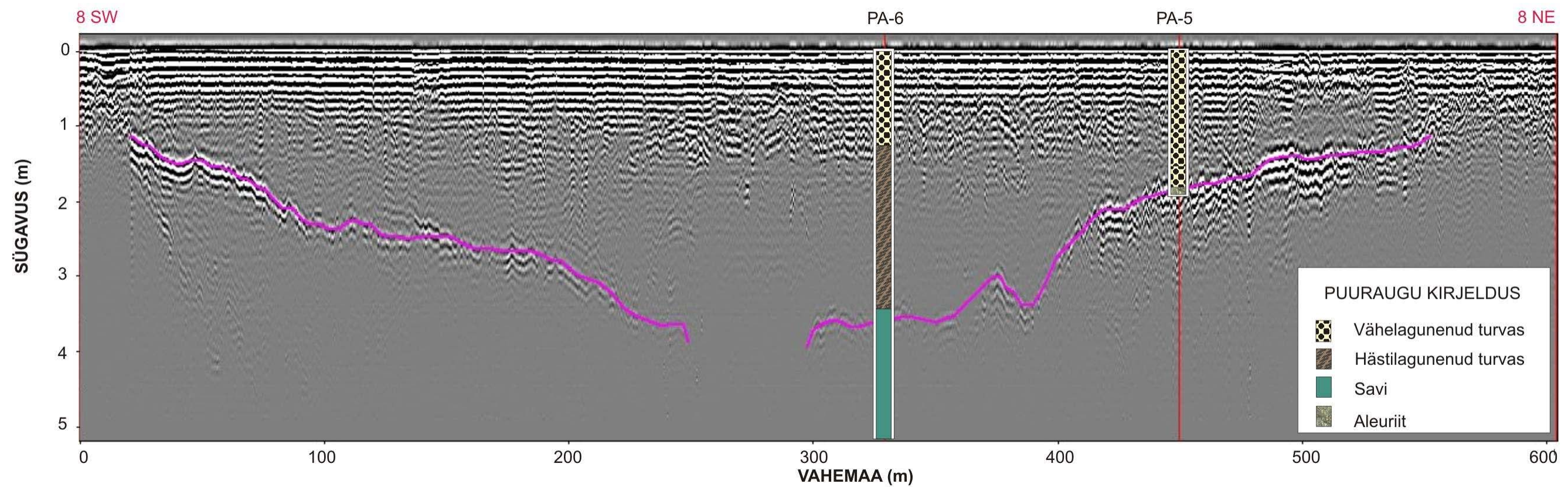
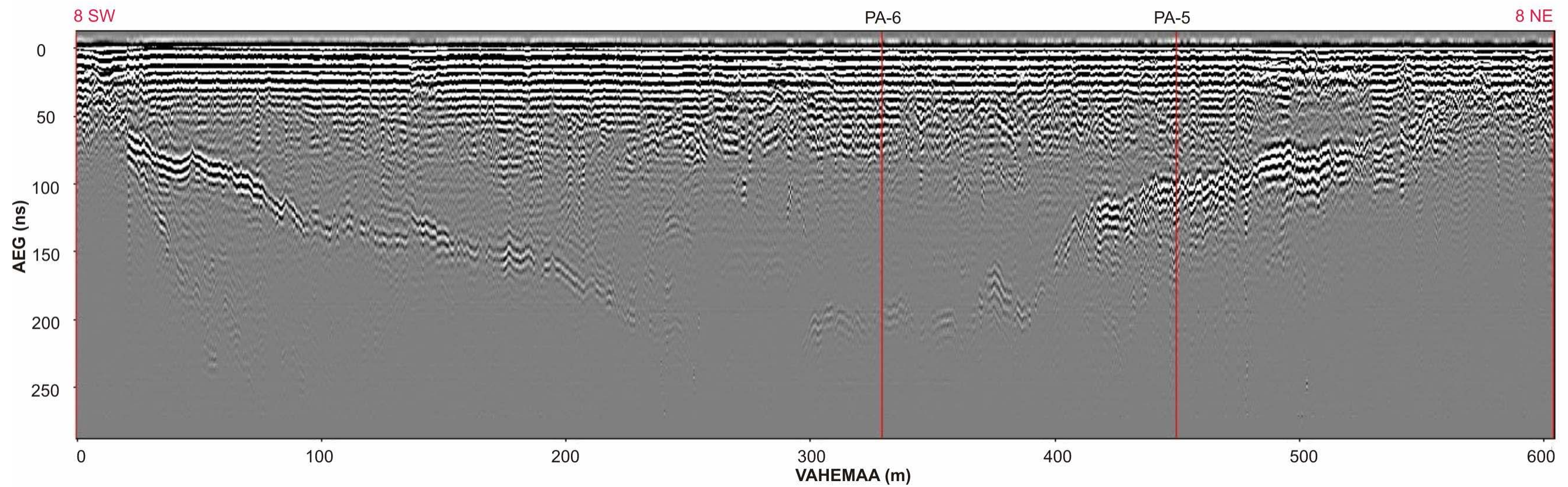
Lisa 5. Radargramm piki profiili 5 (asend vt joonis 7). Nagu ka 4. profiili korral, on siingi jälgitav ebasümmeetrilise kujuga peegeldav pind, mis viitab nõo edelanõlv järsemale kaldele. Kaugusel 150 kuni 250 m võib eristada mitut selget väljapeetud peegeldust, millest alumised markeerivad muutust mineraalpinnase elektrilistes omadustes, võimalik et tegemist on piiriga liiva ja moreeni vahel. Turbakihi paksus puuraugus 3 on 1,8 m.



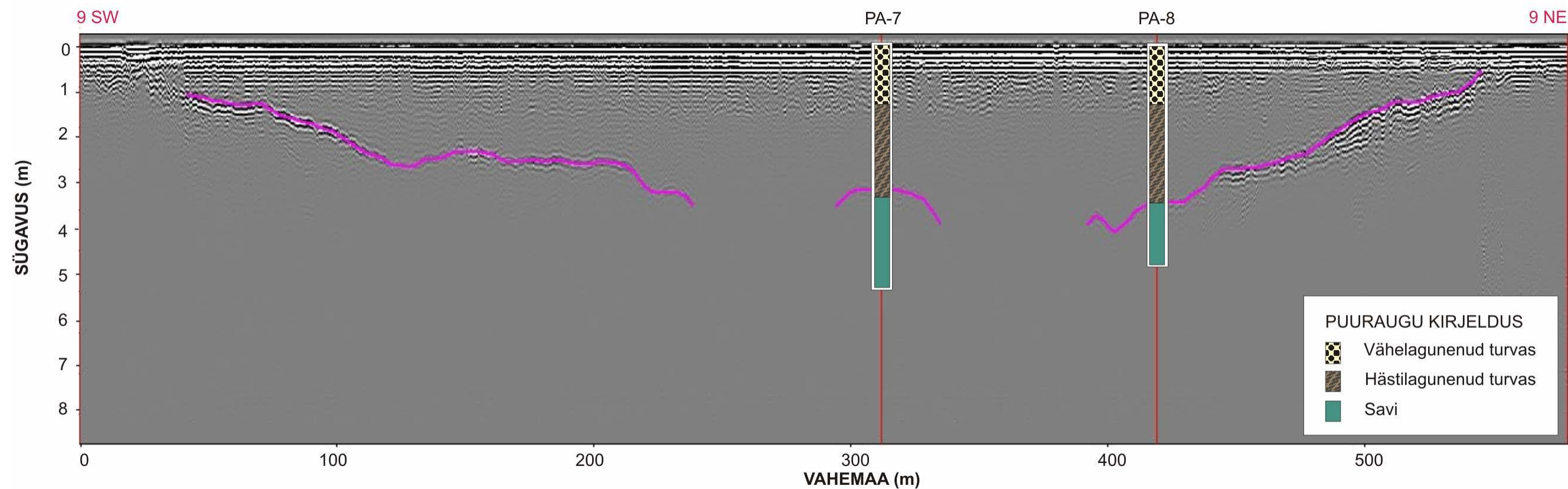
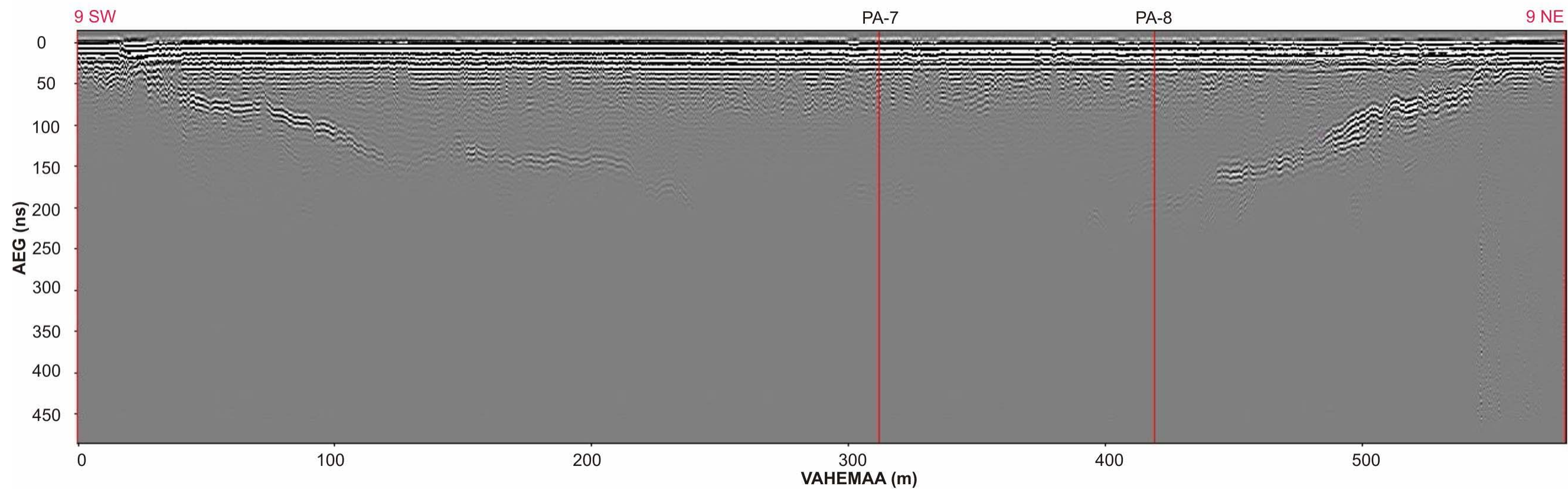
Lisa 6. Radargramm piki profiili 6 (asend vt joonis 7). Sellel profiilil laskub peegeldav pind sügavamale kui eelnevatel. Umbes 450 m kaugusel algusest suureneb turba paksus sedavõrd, et korralikku signaali ei saadud. Seetõttu otsustati teha profiili keskossa puurauk (PA-4), kus turbakihi paksuseks mõõdeti 4,25 m. Alates kaugusest 500 m jätkub peegeldav pind suhteliselt horisontaalselt enam kui 200 m ulatuses ja tõuseb maardla edelaserva läheduses küllaltki järsult maapinnale lähemale. Pinna kontuur tervikuna on heas kooskõlas 100 m kagu pool paikneva 5nda profiili omaga.



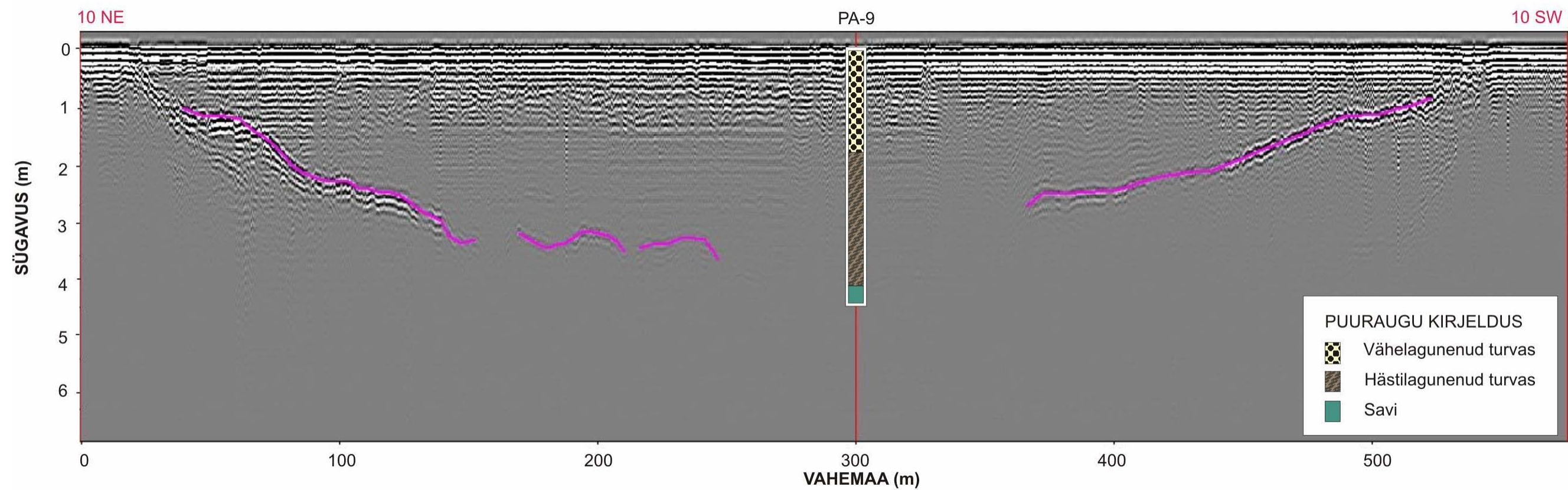
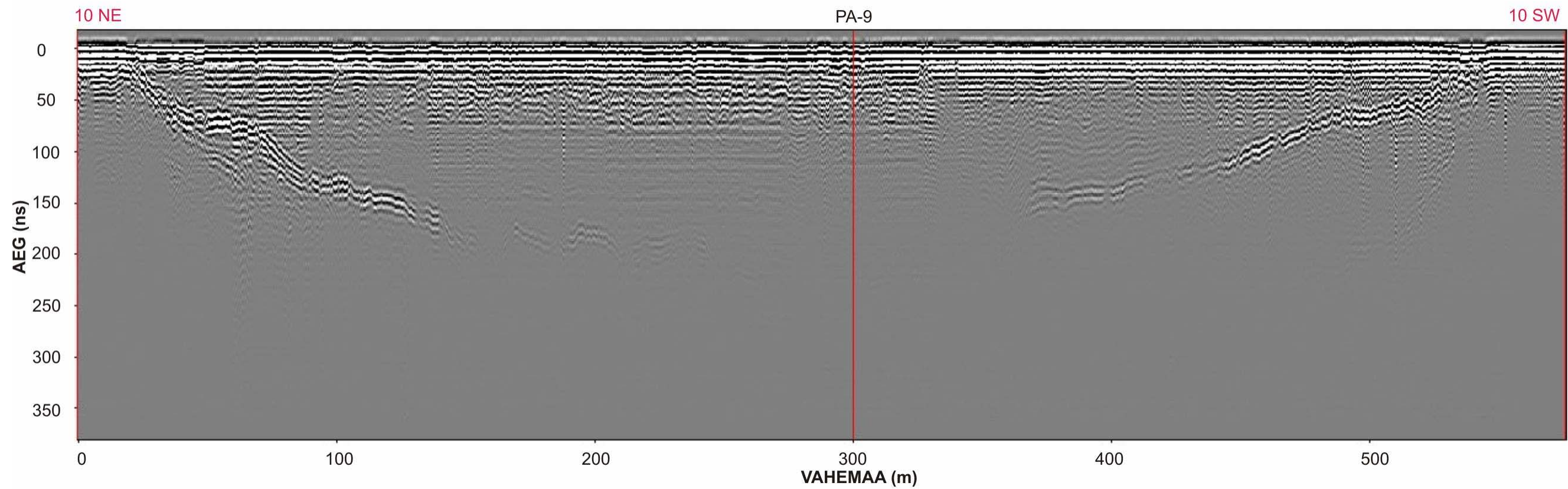
Lisa 7. Radargramm piki profiili 7 (asend vt joonis 7). Profiilil 7 laskub turba lamav pind maardla kirdeküljes suhteliselt laugelt, ent kaugusel ~200 m muutub kallakusnurk suuremaks. Profiili keskosas pole pind jälgitav; turbakihi paksus on seal arvatavalt üle 3,5 m. Võrreldes profiiliga 6 on selgelt jälgitav suurema turbapaksusega võõndi laienemine. Teine suurem lünk pinna väljajoonistamisel tekkis kaugusel ~450 m peegelduste paljususe tõttu. Ilmselt jätkub seal turbakihi vähenemine sarnaselt lünga eelse ja järgse olukorraga.



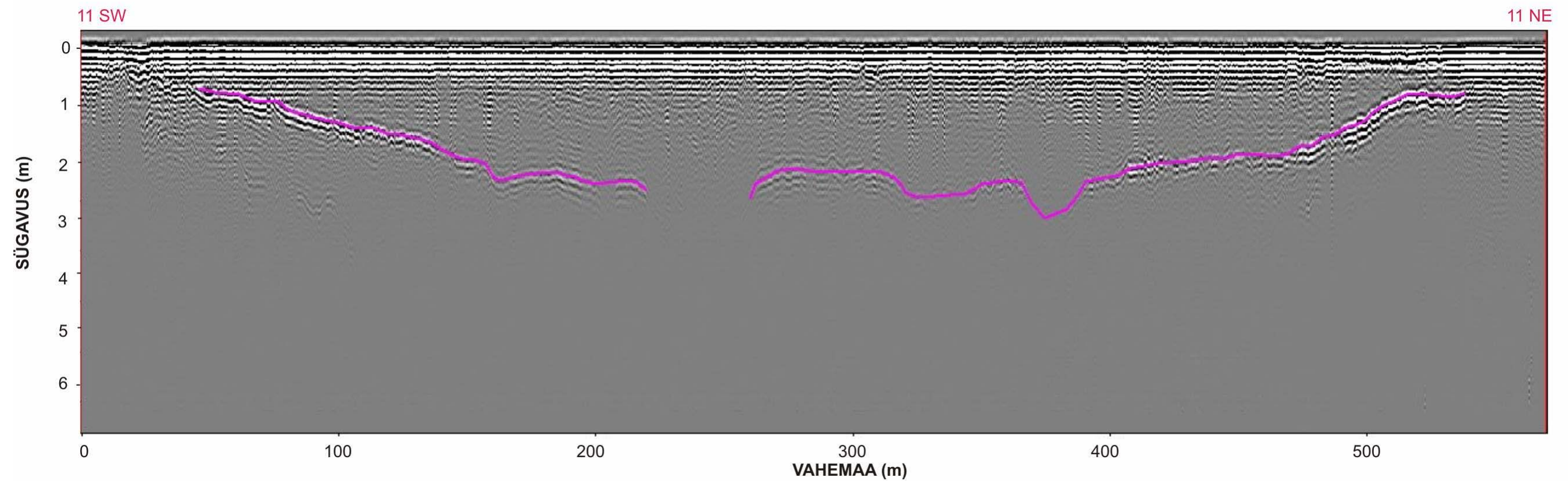
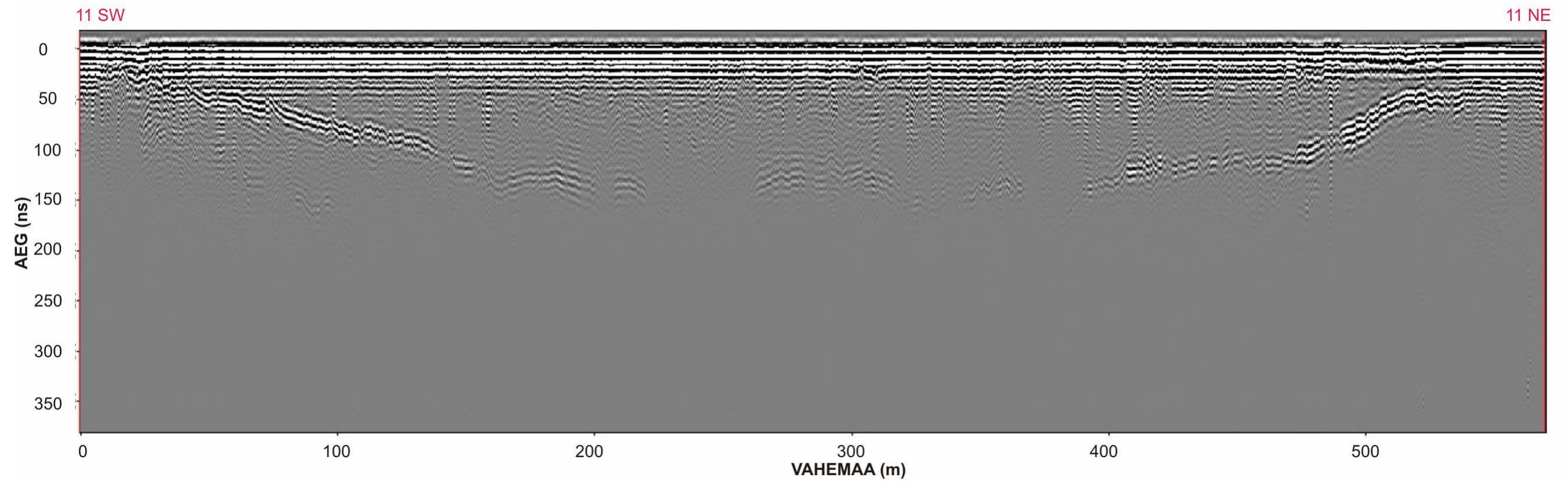
Lisa 8. Radargramm piki profiili 8 (asend vt joonis 7). Profiil 8 läbiti edela-kirde suunaliselt, seepärast on turba paksuse järsem muutus maardla edelaservas, mida võis profiilidel 4-7 jälgida lõpuosas, nähtav paremal kaugusel ~70-100 m. Sealt edasi laskub peegeldav pind umbes 100 m ulatuses küllaltki ühtlaselt. Pärast kaugust 200 m kallakusnurk suureneb ja vahemikus 250-300 m muutub signaal liiga nõrgaks. Profiilile rajati kaks puuraugu. PA-6 oli antud töö raames puuritutest üks sügavamaid, vähe- ja hästilagunenud turbakihi kogupaksuseks mõõdeti seal 3,35 m. Kahe puuraugu vahel võib eristada väikest kõrgendikku. Teises puuraugus (PA-5) saadi turba paksuseks 1,95 m.



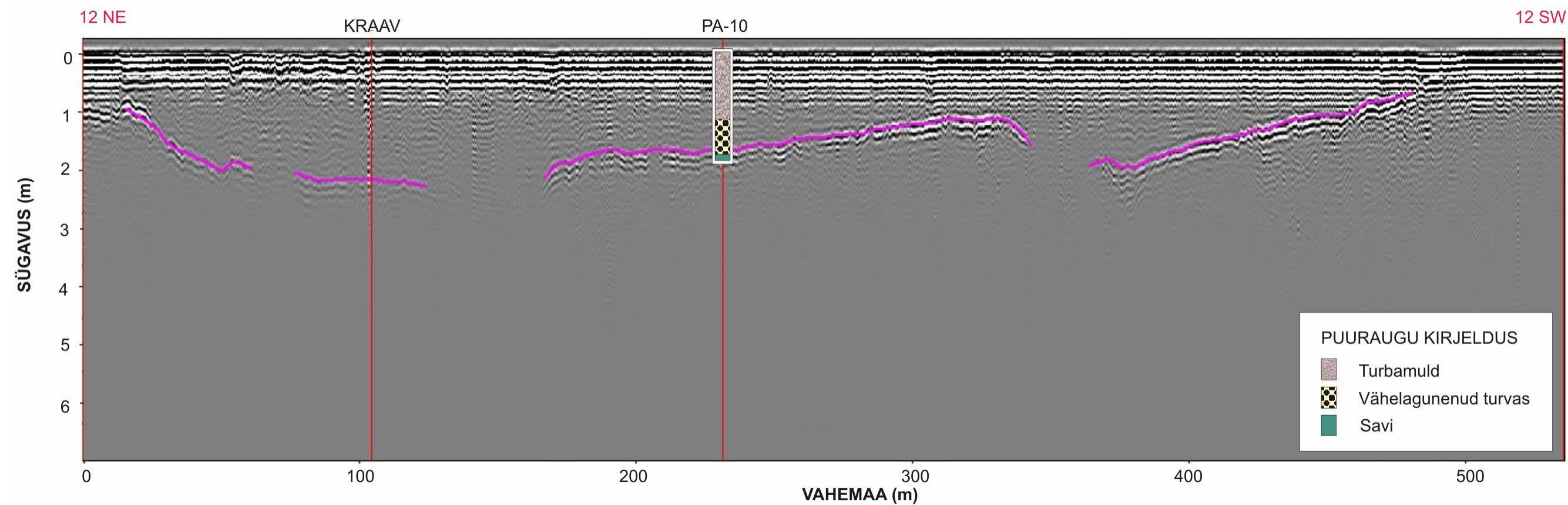
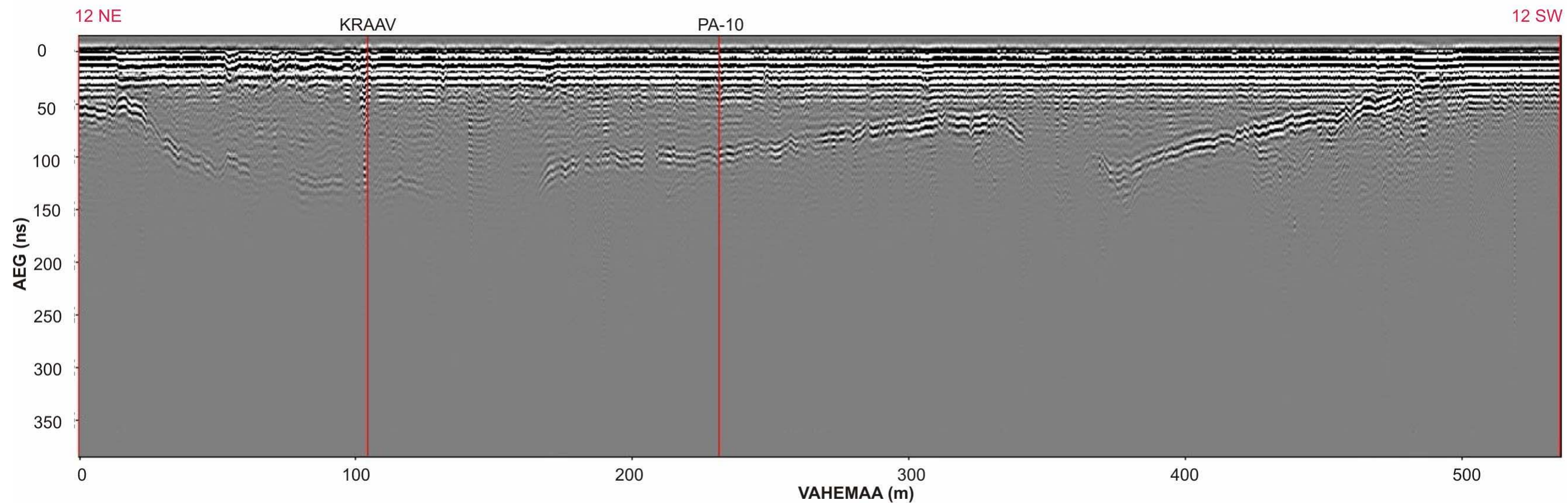
Lisa 9. Radargramm piki profiili 9 (asend vt joonis 7). Profiil 9 läbiti esmalt kirde-edela suunaliselt, seejärel laiendati radargrammi “akent” ja profileeriti sama teekond edelast kirdesse. Antud joonisel on seetõttu aja telg suurema ulatusega (500 ns) kui eelmistel. Paraku ei suudetud terve profiili jaoks annotatsioone koostada, sest peegeldav pind osutus katkendlikuks. Esimene lünk on jälgitav vahemikus 240-290 m ning teine vahemikus 320-380 m. Tähelepanu väärib nende kahe vagumuse vahele jääv ala, kus turba paksus on väiksem (3,2 m; PA-7). Võib arvata, et vagumustes küündib turba paksus üle 3,5 m. Puurauk (PA-8) on esimesest 0,5 m madalam, kuid peaaegu samasuguse läbilõikega. Puuraukust 8 kerkib peegeldav pind võrdlemisi ühtlaselt maapinnale lähemale.



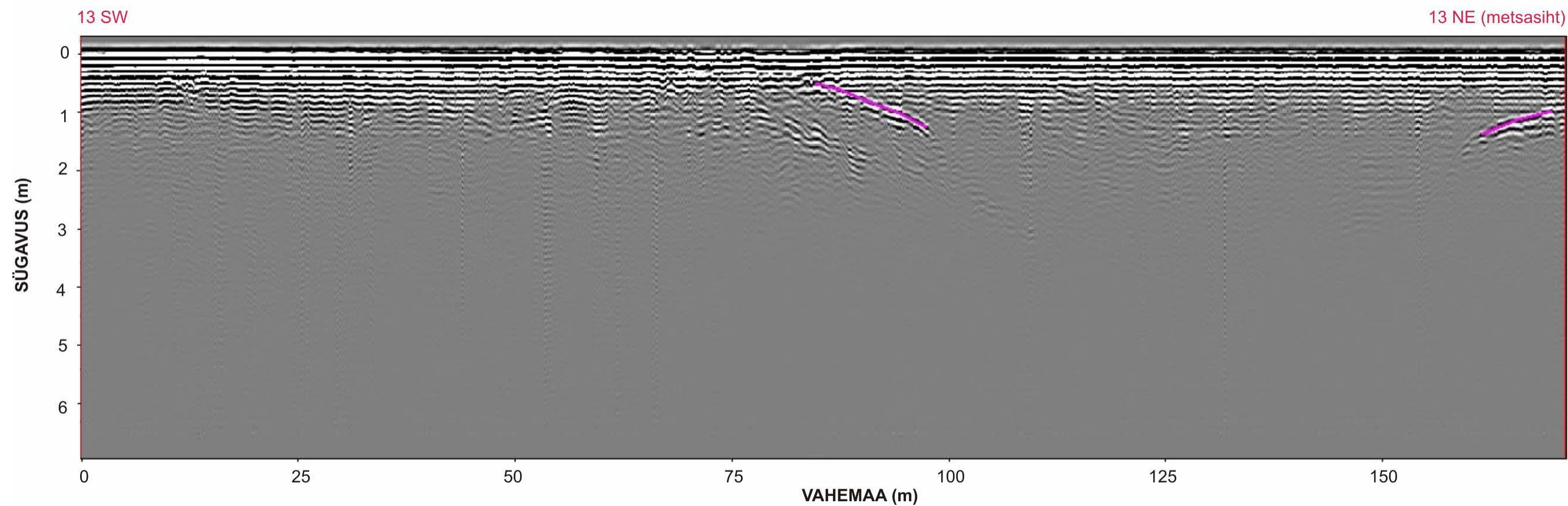
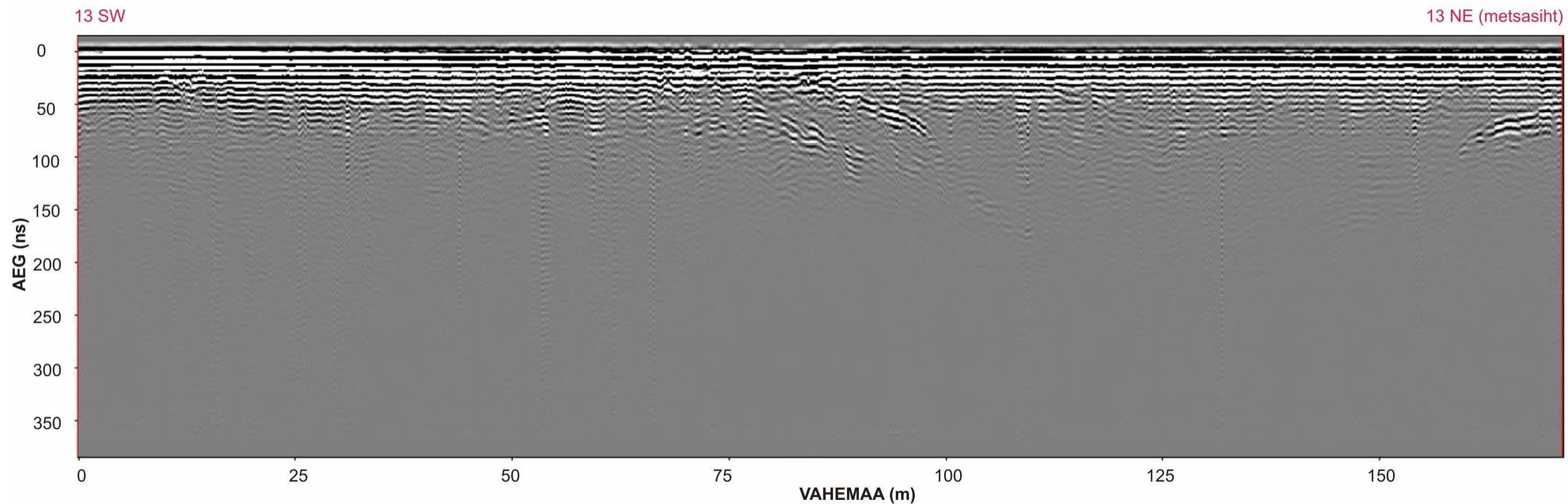
Lisa 10. Radargramm piki profiili 10 (asend vt joonis 7). Alates profiilist 10 on radargrammi vertikaalse telje „akna“ ulatus 400 ns. Peegeldav pind on alguses väga selgelt näha, kuid 150ndast meetrist tekivad lüngad. Üldistavalt võiks siiski järeldada, et pind on 150-250 m vahemikus suhteliselt horisontaalne. Kui sinnamaani (250 m) oli veel võimalik pinda annotateerida, siis edasi muutus signaal väga nõrgaks. Kohati võib vaid aimata, et peegeldav pind paikneb ~230 ns tasemel. Oletust kinnitab puurauk (PA-9), kus turba paksuseks mõõdeti 4,0 m. Profiili lõpuosas väheneb turba paksus üsna ühtlaselt.



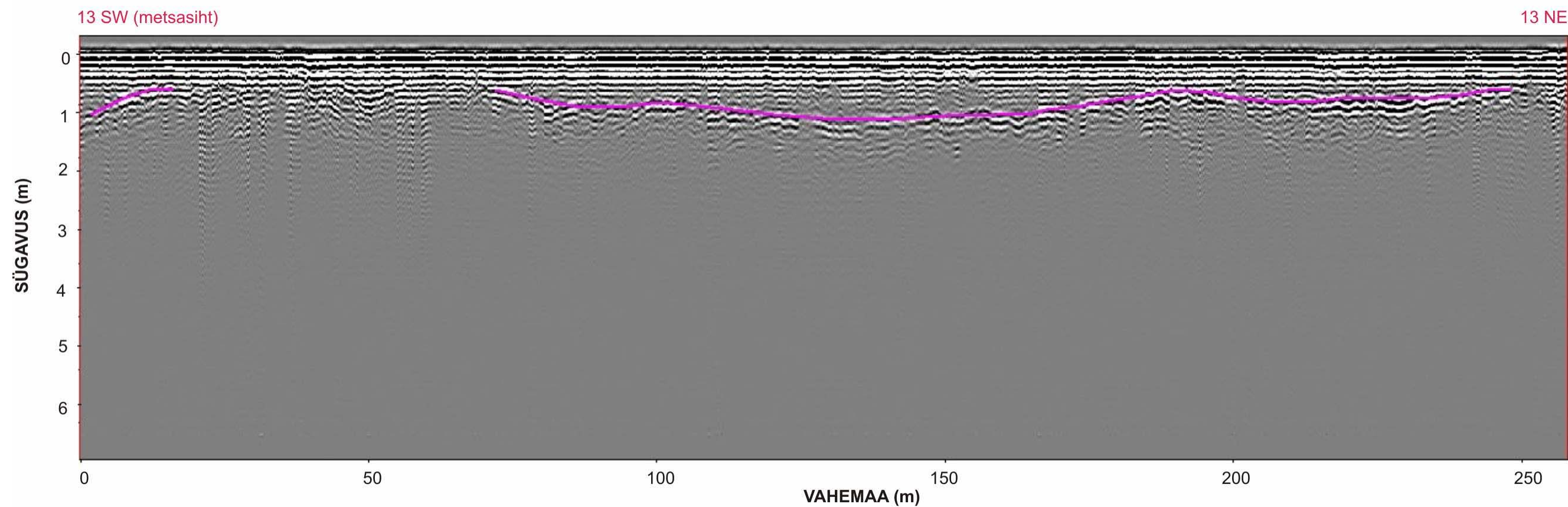
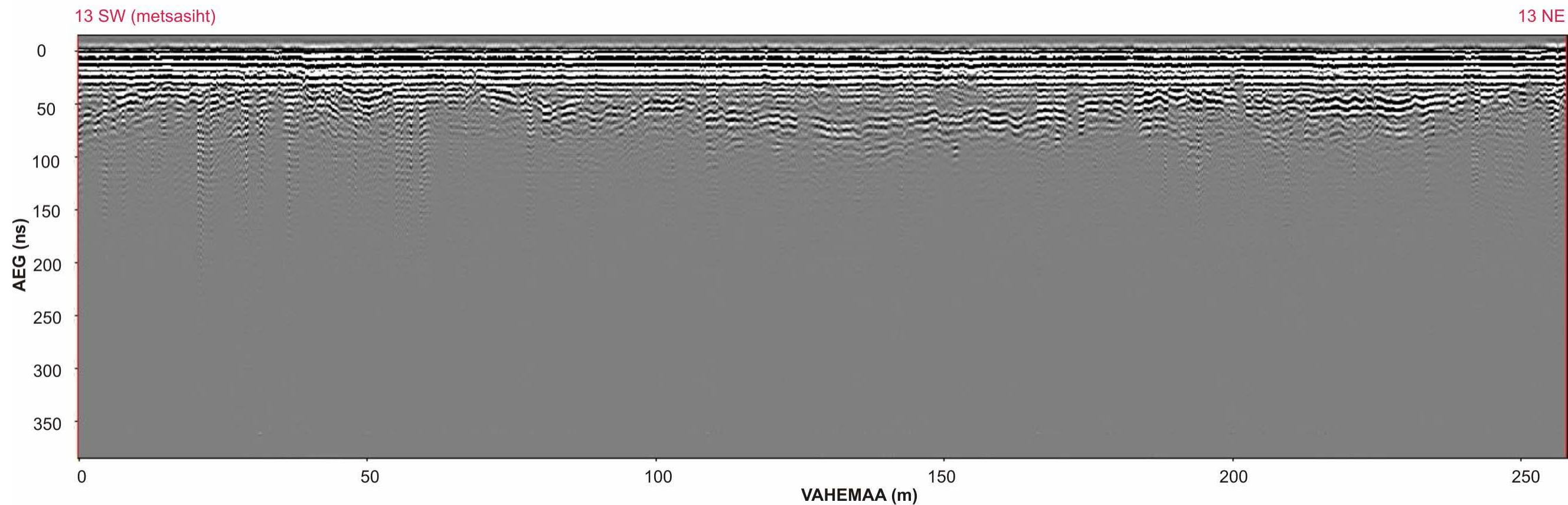
Lisa 11. Radargramm piki profiili 11 (asend vt joonis 7). Profiili 11 alguses langeb peegeldav pind küllaltki ühtlaselt kuni ~220 m kaugusele. Sealt edasi on peegeldus jälgimatu ning eeldatavasti turbakihi paksus suureneb mõnevõrra. Profiili keskosas 300-400 m vahel viitab georadar väikeste vagumuste olemasolule. Nende morfoloogia langeb hästi kokku teistel profiilidel märgatud madalamate kohtadega. Raba asukohaks olev voortevaheline nõgu muutub arvatavasti järjest kitsamaks. 400-470 m vahel on signaale peegeldav pind üsna horisontaalne, hakates seejärel kerkima.



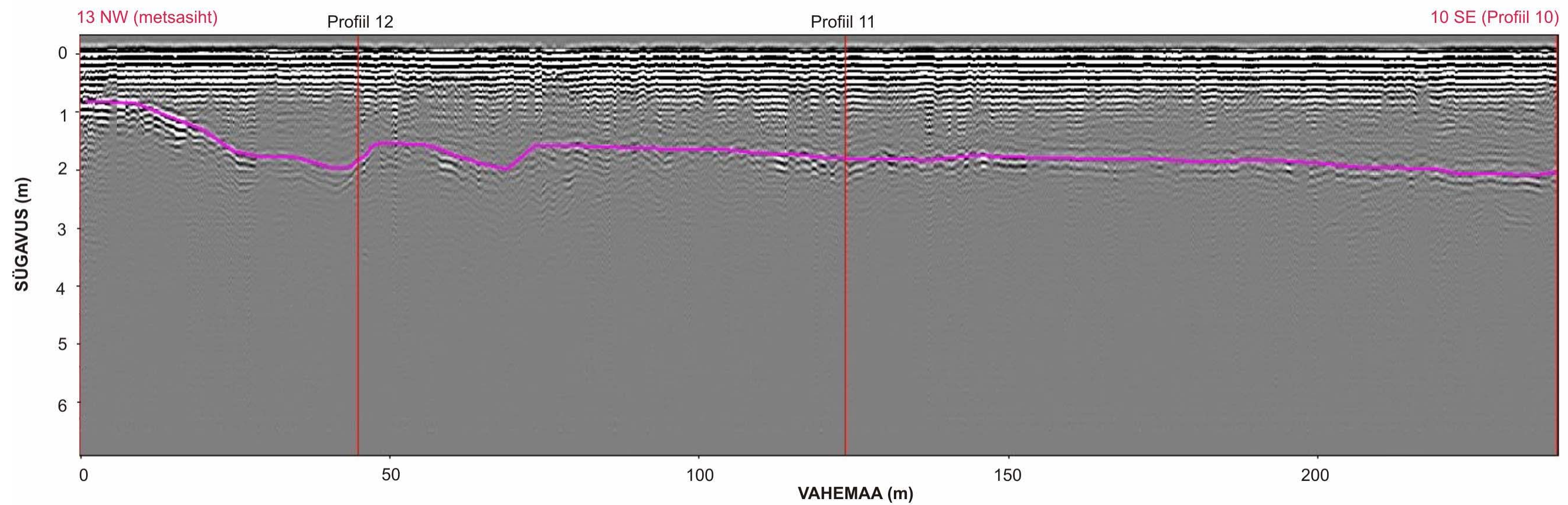
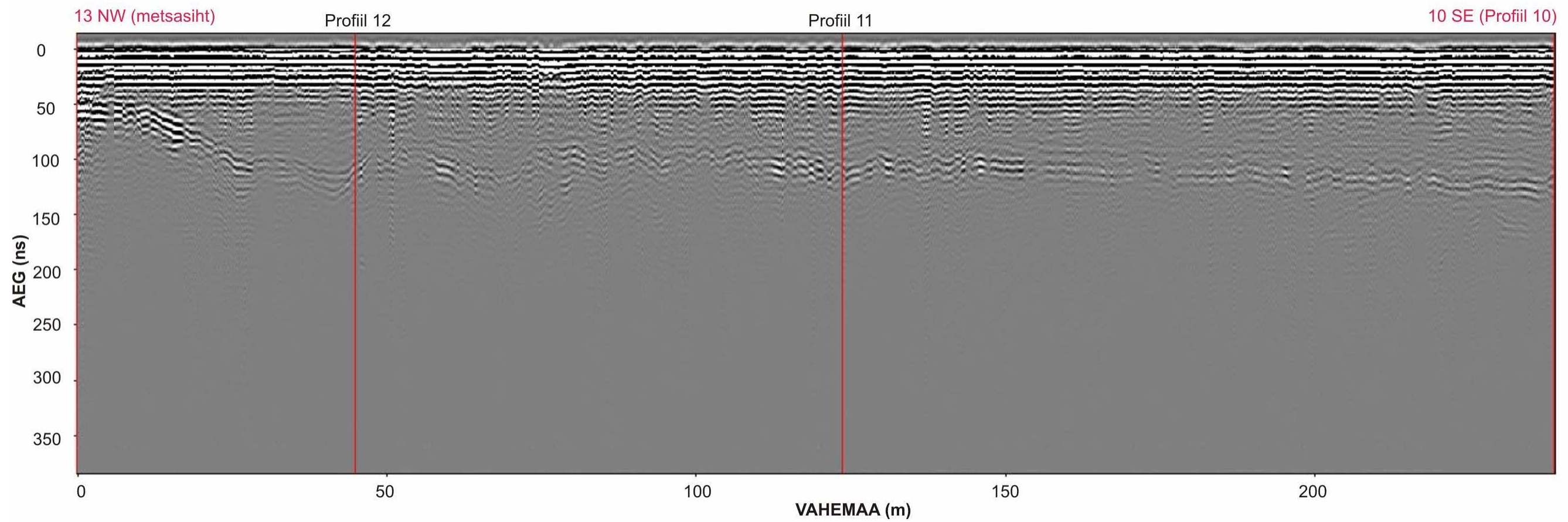
Lisa 12. Radargramm piki profiili 12 (asend vt joonis 7). Peegelpind on kohati lünklik: esimesed raskused interpreteerimisel tekkisid kaugusel ~70 m. Vahemikus 130-160 m on suurem lünk, mille asukoht on heas vastavuses profiilil 11 nähtuga (seal vahemikus 300-400 m). Loode-kagu suunaline vagumus on nüüd veelgi kitsamaks muutunud. Profiili keskosas kerkib peegeldav pind ühtlaselt. Puuraugus (PA-10) lasub turbarikka mulla all 0,65 m paksune vähelagunenud turba kiht. Kaugusel ~330 m kaugusel hakkab peegeldav pind uuesti langema. Edelapoolne vagumus on suhteliselt kitsas ja usutavasti mitte eriti sügav.



Lisa 13. Radargramm piki profiili 13 (asend vt joonis 7). Joonisel on näidatud profiili 13 edelapoolsem lõik, mis ulatub kohani, kus ta ristub metsasihiga (ühtlasi ka profiiliga 13s-10s). Peegeldavat pinda suudeti eristada vaid kahes kohas: vahemikus 80-100 m ja profiili lõpus. Nende vahele jääb madalam koht, kus signaal sumbub. Ilmselt jätkub siin profiili 12 edelapoolses osas kirjeldatud turbaga täidetud vagumus. Esimesest annotatsioonijoonest veidi allpool ja temaga paralleelselt võib märgata teist peegeldust. Võimalik, et selle põhjustab muutus mineraalpinnases.



Lisa 14. Radargramm piki profiili 13 (asend vt joonis 7). Joonisel on näidatud profiili 13 kirdepoolsem lõik, mis algab tema ristumiskohast metsasihiga (ühtlasi ka profiiliga 13s-10s). Algososas jätkub peegeldava pinna kerkimine sarnaselt eelmise joonise lõpuosaga. Kaugusel ~20-70 m ei ületa turbakihi paksus 0,5 meetrit. Kaugusel ~70 m jmuutub pind taas nähtavaks ja kulgeb edasi 50-60 ns tasemel. Võrreldes kagu pool asuvate profiilidega paikneb profiili 13 kirdeosas elektromagnetlaineid peegeldav pind maapinnale tunduvalt lähemal ja turbakihi paksus jääb alla 1,5 m.



Lisa 15. Radargramm piki profiili 13s-10s (asend vt joonis 7) kulgeb mööda metsasihti loodest kagusse (joonisel on näidatud ristumised profiiliga 12 ja 13). Läbilõige tõestab turbakihi paksuse suurenemist kagu- ehk maardla keskme suunas.