

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

**Seismiliste pinnalainete meetodi (MASW) piirangud ja võimalused geotehnilistel
uuringutel Raplamaal**

Kiur Pedajas

Juhendaja: Argo Jõelett

Tartu 2025

Abstrakt

Seismiliste pinnalainete meetodi (MASW) piirangud ja võimalused geotehnilistel uuringutel Raplamaal

Kasutades geofüüsikalisi lahendusi, pinnalaineid ja mitmekanalilist pinnalainete analüüsimise meetodikat (MASW; *ingl multichannel analysis of surface waves*) on võimalik uurida pinnase omadusi, lainete levikukiirust ja tuvastada struktuure, mis pinnakatte alla jäävad. MASW meetodika on üks levinumaid ja efektiivsemaid geofüüsika uuringumeetodeid, mida kasutatakse tihti ehitusgeoloogias ja seismilises riskianalüüsis pinnase omaduste hindamiseks.

Selle uurimistöo eesmärk rakendada pinnalainete meetodikat, et hinnata, kas see on kasutatav uuringuala kontekstis ja kus võivad olla selle eelised või puudujäägid. Välitööd viidi läbi neljal Rail Balticu trassi lõigul Raplamaal. Peale andmete analüüsi anti hinnang meetodika efektiivsusest erinevates pinnastes. Leiti, et liialt pehmed ja ebaühtlased pinnased ei ole ideaalsed MASW meetodika kasutamiseks ja vajaksid täiendavaid uuringuid, et tulemustes veenduda. Tihedamates pinnastes töötas meetodika paremini ja tulemus langes rohkem kokku puuraukude andmestikuga.

Märksõnad: geofüüsika, pinnalained, Rail Baltica

CERCS kood: P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

Limitations and possibilities of the Seismic Surface Wave Method (MASW) in geotechnical investigations in Rapla County

Using geophysical solutions, surface waves and the multichannel analysis of surface waves (MASW) method, it is possible to examine the properties of the surface, and surface-wave travel velocity as well as identify structures underneath the surface. The MASW method is one of the most popular and effective methods in geophysical exploration that is used in engineering geology to specific surface properties and its compatibility in engineering projects.

The goal of this bachelor's thesis was to use the surface-wave methodology to evaluate if the method is usable in the context of the study area. The fieldwork was conducted at four Rail Baltic terraces in Raplamaa. The effectiveness of the method in different environments was given after data analysis. It was found that using the MASW method in environments that were

too soft or uneven, wasn't ideal and would need additional studies to confirm the results. In denser and more solid surfaces, the method worked well and the data was comparable to the result from drill holes. Keywords: geophysics, surface waves, Rail Baltica

CERCS code: P500 Geophysics, physical oceanography, meteorology

Sisukord

1. Sissejuhatus	5
2. Teoreetiline taust	6
2.1 Seismilised lained	6
2.2 Pinnalained ja Rayleigh' lained.....	6
2.3 Mitmekanaliline seismiliste pinnalainete meetod MASW	7
2.4 Pinnalainete rullumine	9
3. Geoloogiline taust	11
3.1 Raplamaa pinnakate	11
3.2 Siluri Llandovery kihistu lubjakivid	11
4. Materjal ja meetodid	13
4.1 Välitööd.....	13
4.2 Andmetöötlus	17
4.3 Puuraukude andmed.....	17
5. Tulemused	18
5.1 Tulemused pikett 8+200 kuni 8+240 juures	18
5.2 Tulemused pikett 11+720 kuni 11+760 juures	22
5.3 Tulemused pikett 12+980 kuni 13+020 juures	23
5.4 Tulemused pikett 13+980 kuni 14+020 juures	26
6. Arutelu	32
6.1 Pikett 8+200 kuni 8+240.....	32
6.2 Pikett 11+720 kuni 11+760.....	32
6.3 Pikett 12+980 kuni 13+020.....	33
6.4 Pikett 13+980 kuni 14+020.....	33
6.5 Rakendusvaldkonnad ja praktiline kasutus	34
6.6 MASW meetoodika tuleviku arendused.....	34
6.7 Uurimustöö edasiarendus.....	35
7. Kokkuvõte	36
Summary	37
Tänuavaldused	38
Kasutatud kirjandus	39

1. Sissejuhatus

Rail Baltica projekt on Baltikumi viimase 100 aasta suurim taristuprojekt, mille eesmärkideks on luua keskkonnasäästlik täielikult elektrifitseeritud turvaline raudteeühendus, mis ühendaks Balti riigid suuremasse Euroopa raudteevõrku (Rail Baltica, 2025). Enne ehitustöid trassidel viidi läbi uuringud, mille põhjal saab hinnata pinnase omadusi, kuhu trassid on planeeritud.

Pinnase omadusi on võimalik uurida erinevate gofüüsikaliste meetoditega. Üheks võimalikuks lahenduseks on rakendada pinnalainete levikut maapinnas. Kasutades mitmekanalilist pinnalainete analüüsimise meetodikat (MASW; ingl *multichannel analysis of surface wave*), saab analüüsida piki- ja ristilainete kiiruseid (V_p ja V_s) pinnases, mis annab informatsiooni pinnas geotehniliste omaduste muutuste kohta sügavuse kasvuga. Viimaste aastakümnete jooksul on see meetodika ehitusgeoloogilistes rakendustes ja seismilises riskianalüüsis palju populaarsust kogunud (Park et al., 2000).

Selles uurimistöös rakendati MASW meetodit, et mõõta Rail Baltica Raplamaa põhitrassil lõigul Hagudi–Alu, kus asusid pehmed pinnased, mis vajasis täiendavat uurimist enne ehitust. Erilist huvi pakkus Rayleigh lainete kiirus nõrkades pinnastes, kuna kiirrongidega, mille kiirus ületab vastavat kiirust pinnases, võib kaasnedä suur vibratsiooni kasv ehk “boom efekt”. Kuna Rayleigh laine kiirused on kõige madalamad pehmetes pinnastes, siis seal esineb oht, et vibratsioonid muudavad pinnase ebatasaseks. See võib tekitada kahjustust infrastruktuurile, mis rongirööbaste ümbruses paikneb. Esimesena ennustas seda Victor Krylov aastal 1994 (Krylov, 2001; Madshus et al., 2004). Meetod leiab ka kasutust kasutatakse mehhaniseeritud tunnelite puurimisel (Andersen & Nielsen 2005).

Uuringute eesmärk on testida MASW meetodit uuringuala pinnastes, et hinnata selle kasulikust kui puudujääke uuritavate pinnaste kontekstis. Uurimuse tulemusena mõõdeti seismiliste pinna, piki- ja ristilainete kiiruseid, hinnati pinnase omadusi ja üleminekupiire ning pandi need vastavusse nendest piirkondadest võetud puuraukude läbilõigetega, et veenduda meetodi täpsuses. Erilist tähelepanu pööratakse käesolevas töös pinnakatte lamamit moodustavate karbonaatkivimite iseloomustamisele ning aluspõhja–pinnakatte piiri määramisele.

2. Teoreetiline taust

2.1 Seismilised lained

Seismilised lained jagunevad kahte põhitüüpi: pinnalained ja kehalained, millest viimane jaotub P-laineteks (*ingl primary waves*) ja S-laineteks (*ingl secondary waves*). Need kaks kehalaine tüüpi on geofüüsika, maavärinate seismoloogia ja ehitusgeoloogia alustaladeks. P-lained on pikilained, mille puhul osakeste liikumine toimub laine levikuga samas suunas. Need lained on kõige kiiremad ja jõuavad seismograafini kõige varem. Levikukiiruse peamiseks määrajaks on keskkonna elastsusomadused ja tihedus. Mida jäigemaks kivimid või pinnas muutub, seda suuremaks muutuvad kiirused. P-lained liiguvad läbi tahkete kui ka vedelate pinnaste. P-lainete levikukiirused jäävad tüüpiliselt setetes 500–2000 m/s juurde, tahkemes kivimites/settekivimites 2000–6000 m/s juurde ja kristalsetes kivimites üle 6000 m/s (Arman, 2021; Brocher, 2005).

S-lained on ristilained, mille puhul osakesed liiguvad laine leviku suunaga risti. Erinevalt P-lainetest, ei levi S-lained vedelikes ega gaaside, vaid ainult tahketes pinnastes, sest on mõjutatud nihketugevustest. S-lained on aeglasemad kui P-lained ja võivad liikuda ligikaudselt 60% aeglasemalt, kui vaadeldavad materjalid on samad (Sheriff & Geldart, 1995). S-laineid saab kasutada pinnase nihketugevuse ja vastupidavuse hindamiseks, mis on vajalik maavärinate ja seismiliste olukordade ohuanalüüsis ja ehitusgeoloogias (U.S. Geological Survey, 1978).

2.2 Pinnalained ja Rayleigh' lained

Pinnalained on seismilised lained, mis levivad mööda maapinda. Nende energia väheneb eksponentsiaalselt sügavuse kasvuga. Peamine lainetüüp, mida kasutatakse ka MASW meetodi puhul, on Rayleigh lained, mis levivad maapinna lähistel. Pinnalained on dispersiivsed, seega nende kiirus muutub korrelatsioonis sagedusega. Kõige rohkem mõjutab pinnalained S-lained, kuid pinnalähedaste seismiliste omaduste uurimisel on olulised ka P-lainete kiirused. Rayleigh lained tekivad S- ja P-lainete ristumisel. Rayleigh lained näitavad, kuidas vertikaalsuunalise elliptilisi nihkega osakesed liiguvad pinnases sügavuse kasvuga (Xia et al., 2009).

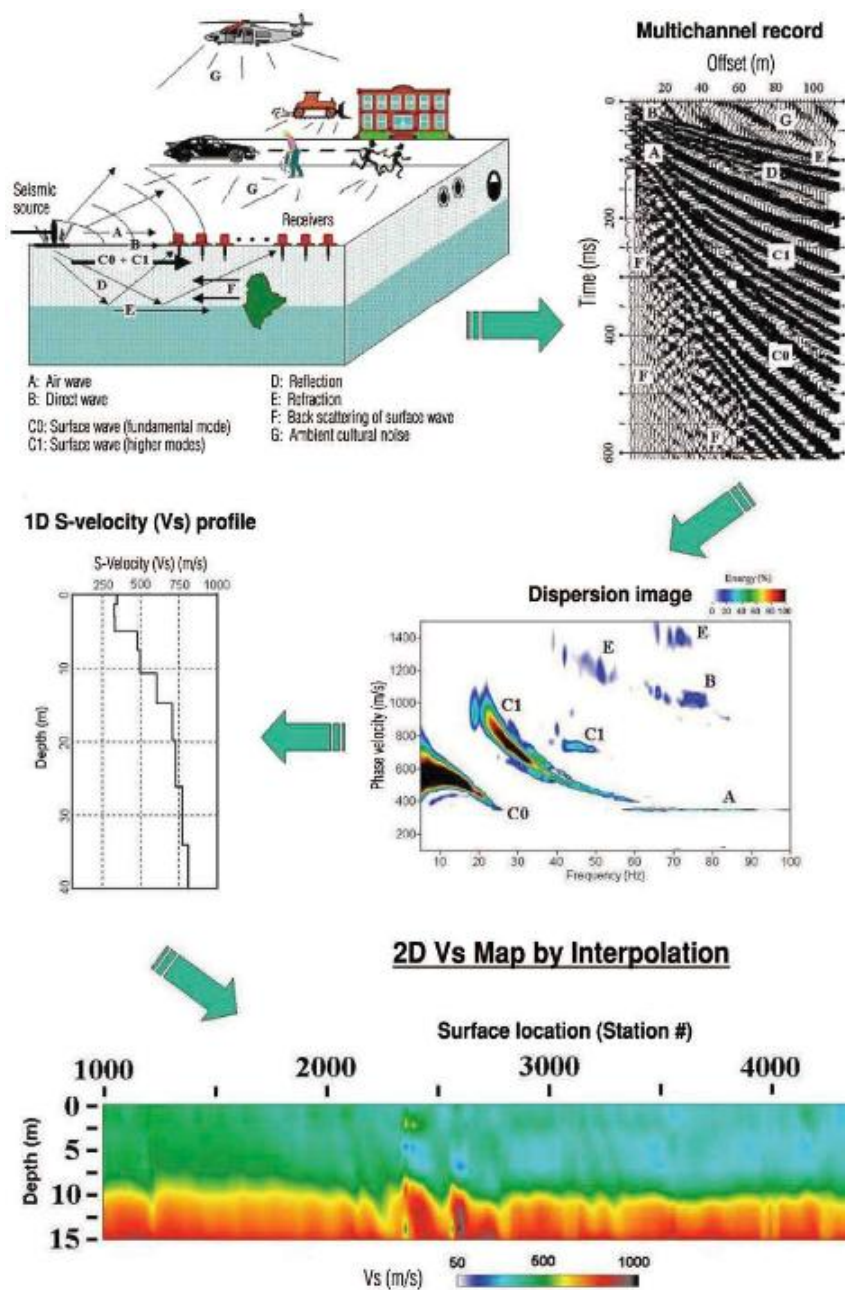
Rayleigh lained on pideva kiirusega, kui need paiknevad isotroopses homogeenes poolruumis. Nende leviku kiirus on ligikaudu 0,92 korda ristilaine kiirusest (V_s) juhul kui Poissoni suhe on 0,25. Kui keskkond on kihiline, siis Rayleigh lained muutuvad dispersiivseks ehk faasikiirus hakkab sõltuma sagedusest. Pikema lainepikkusega ja madalama sagedusega lained jõuavad sügavamatesse kihtidesse ja on rohkem mõjutatud sügavamate kihtide elastsetest omadustest. Lühema lainepikkusega lained on seevastu tundlikumad pinnalähedaste kihtide suhtes. Rayleigh lainete dispersiivsus ongi peamine omadus, mis neid lubab kasutada maapinnalähedase ristilaine kiiruse profiilide määramiseks geofüüsikas. Selle tulemusena on need head lahendused ehitusgeoloogias ja aitavad hinnata liikuvate pinnaset omadusi (Xia et al. 2009).

Rayleigh lainete levik on erinevate omadustega pinnastes muutlik, millest tulenevalt võib nõrkades pinnastes hakata toimuma vibratsiooni kasv ehk “boom efekt”. See on tihti põhjustatud kiirrongide liiklusest, mille kiirused ületavad pinnase Rayleigh lainete kiirused, muutes pinnase ebatasaseks. Selle pärast kasutatakse pinnase vibratsiooni uuringuid kõige rohkem rongiliinide ehitusel, aga ka tunnelite kaevamisel (Andersen & Nielsen 2005; Madshus et al., 2004). Victor Krylov ennustas nähtust esimesena 1994. aastal ja esimesed katsed viidi läbi 1997-1998 Rootsisis ehitataval uuel kiirrongi liinil Gothenburgi ja Malmö vahel. Vibratsiooni kasv pinnases sarnaneb ülehelipaugu (*ingl sonic boom*) nähtusele (Krylov, 2001).

2.3 Mitmekanaliline seismitiliste pinnalainete meetod MASW

MASW (*ingl Multichannel Analysis of Surface Waves*) meetod on geofüüsikaline meetod, millega saab määrata maapinnalähedase pinnase ristilainekiiruste vertikaalne jaotus. Meetod rakendab eelnevalt mainitud Rayleigh' laineid. MASW on välja töötatud selle eelkäia, pinnalainete spektraalanalüüsi (SASW; *ingl Spectral Analysis of Surface Waves*), põhjal, aga võimaldab suuremat eraldusvõimet mitmekanalilise andmesalvestuse abil (Xia et al., 2009). MASW meetod koosneb andmete kogumisest, dispersioonikõverate loomisest ja inversioonist. Andmete kogumiseks tekitatakse laineallikaga impulss, mis liigub maapinda. Laine levi ja peegeldus salvestatakse geofonide liini abil (Park et al., 2003). Uurimistöös kasutatud lahendustest tuleb täpsemalt juttu peatükis “4. Materjalid ja meetodika”.

Esimese sammuna tuleb tekitada pinnases lained (vasaraga metallplaadile löök või raskuste kukutamine) geofonide liini läheduses, et oleks võimalik andmeid koguda. Teise sammuna luuakse kogutud andmete põhjal dispersioonipilt, milleks kasutatakse laineallikast määratud kaugusvahemikus registreeritud seismogramme. Rayleigh lained ei jõua moodustuda allikale liiga lähedal. Kaugemal registreeritud pinnalained on omakorda kehalainetest mõjutatud (Park et al. 1999). Saadud andmete põhjal luuakse dispersioonikõverad valitud tarkvaras. Dispersioonikõverate loomiseks teisendatakse salvestatud signaal sagedus-kiirus ($f-v$) domeeni, milleks kasutades näiteks kõrgresolutsioonilist lineaarset Radoni teisendust, kaldkuhjamist (*ingl slant stacking*) või faasinihke meetodit (*ingl phase-shift method*). Kolmanda sammuna tehakse dispersioonikõvera inversiooni, mille käigus teisendatakse faasikiiruste kõver 1D ristilainekiiruse profiiliks (joonis 1), mis omistatakse kasutatud vastuvõtuliini keskpunktile (RM; *ingl receiver midpoint*). Kõige olulisemaks muutujaks on V_s , kuna see mõjutab Rayleigh' laineid kõige enam. Kui analüüs on viidud läbi mitmes lähestikku paiknevas lõigus, siis võib 1D profiilide alusel luua 2D interpoleeritud V_s läbilõike (Park et al., 2007; Xia et al., 2009).

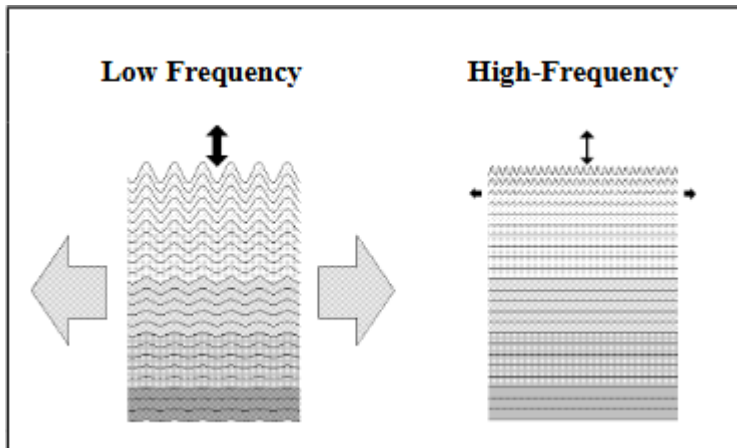


Joonis 1. MASW meetoodika töökäik andmete kogumisest kuni 2D V_s kiiruste interpoleeritud pildini loomiseni. Viiakse läbi välitööd, kogutakse andmed, luuakse dispersioonipilt, luuakse esialgne 1D V_s , millele järgneb inversioon ja 2D V_s pilt (Park et al., 2007).

2.4 Pinnalainete rullumine

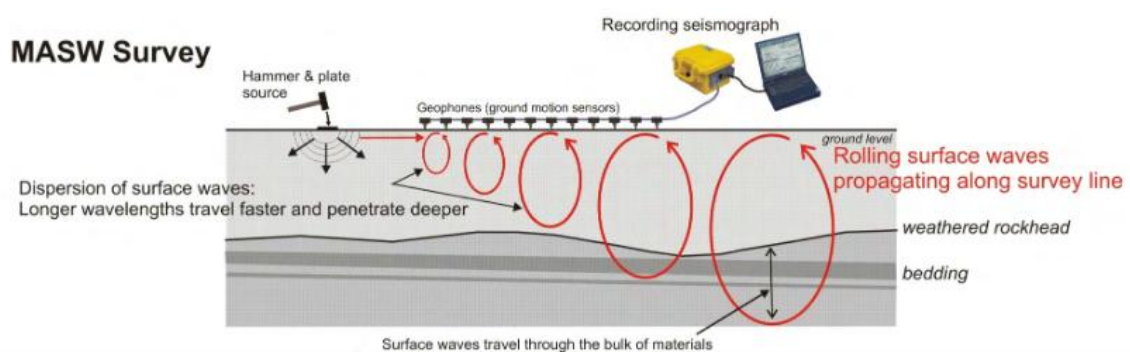
Seismilise uuringu käigus tekib pinnalainete rullumine (*ingl ground roll*). Pinnaste elastsed omadused muutuvad sügavusega. Pinnalainete rullumine on dispersiivne. Selle tulemusena saab maapinna rullumist kasutada elastsete pinnaste omaduste määramiseks jälgides

lainekiiruste muutumist sügavuse kasvuga. Madalamad sagedused ja kiirused annavad teavet pehmematest pinnastest, aga kõrgemad sagedused ja kiirused näitavad, et pinnas on tihedam (joonis 2). Sageduse muutuste analüüsi põhjal saab koostada kahe või kolmemõõtmeline kujutis, mis näitab kuidas omadused sügavuse kasvuga muutuvad (Park et al., 1998).



Joonis 2. Pinnalainete rullumise sügavus erinevatel sagedustel. Sageduste muutus näitavad pinnase omaduste muutust erinevatel sügavustel (Park et al. 1998)

Pinnalainete dispersioonil liiguvad lained üha sügavamale. Suurema lainepikkusega lained jõuavad sügavamatesse kihtidesse, kus kiirused on tavaliselt suuremad kui nõrgemates pindmistes kihtides. Lainete levikut pinnases kujutab joonis 3 (Jonathan Thomas & Rob McDonald).



Joonis 3. MASW meetodika välitööde illustratsioon ja pinnalainete rullumine pinnases. (Jonathan Thomas & Rob McDonald).

3. Geoloogiline taust

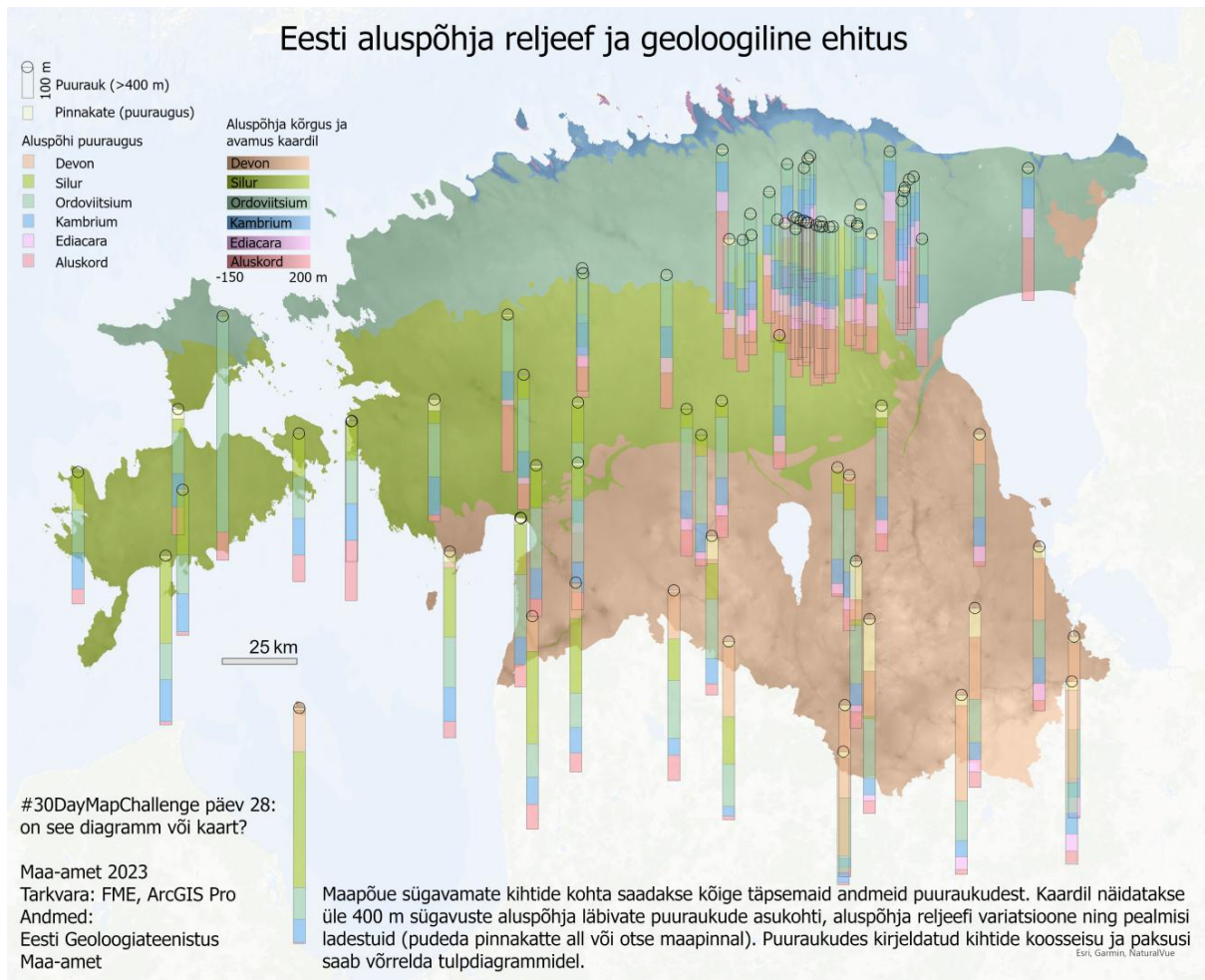
Eesti asub Ida-Euroopa platvormil ja selle läbilõige koosneb kolmest osast: (i) pinnakattest, (ii) settekivimitest (koos moodustavad pealiskorra), ja (iii) kristalsest aluskorrast. Kristalne aluskord on Proterosoikumi vanusega 1,8–1,6 miljardit aastat. Pealiskorra settekivimid on tekkinud 540–420 miljonit aastat tagasi Ediacarast kuni Devonini (Puura & Vaher, 1997). Pinnakattet moodustavad pudedad setted, purdsetted ja kohati moreenid, mis tekkisid peale jääajal või pärast seda (Nestor & Einasto, 1997) .

3.1 Raplamaa pinnakate

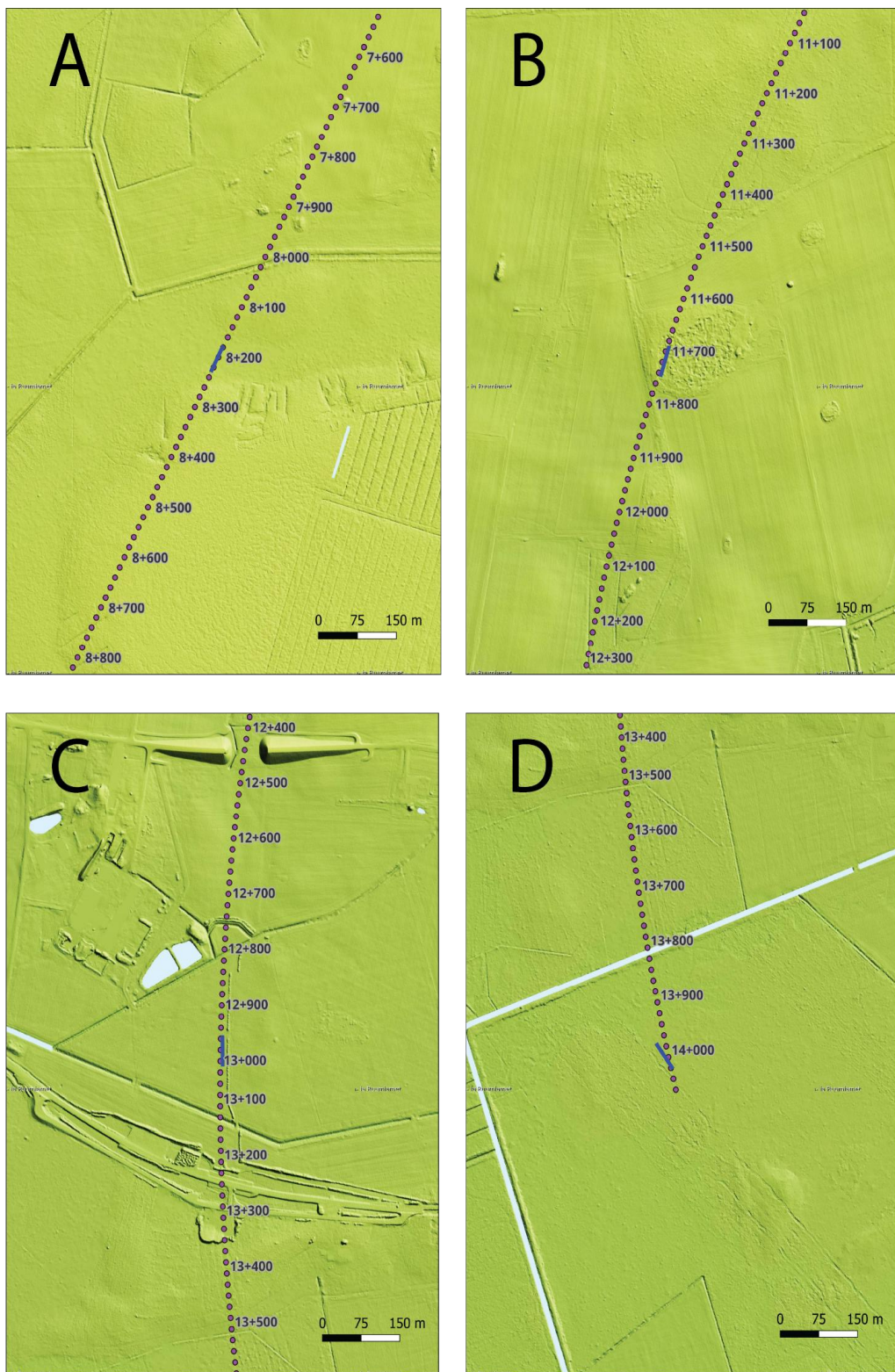
Raplamaa pinnakatte setted on peamiselt moreenid, liiv, kruus, savi ja aleuriit. Moreenid tekkisid mandrijääst välja sulanud materjali settimisel. Liiv ja kruus on kokku kandnud liustikujõed. Savi ja aleuriit on tekkinud peamiselt liustikujärvedes settides. Raplamaal leidub ka soosid ja rabasid (Puura & Vaher, 1997). Uuringuala lähedal asus Hagudi raba.

3.2 Siluri Llandovery kihistu lubjakivid

Vaadeldavad trassid asuvad Raplamaal, lõigul Hagudi–Alu, mis asub Siluri Llandovery kihistul (joonis 4). Llandovery kihistu jaguneb kolmeks ladestuks: Juuru, Raikküla ja Nurmekundi ladestuks (Ainsaar et al., 2010). Raplamaa aluspõhi sisaldab Juuru ja Raikküla ladestu kivimeid (Tammeorg, 1991).



Joonis 4. Eesti aluspõhja geoloogiline ehitus (Maa- ja Ruumiamet, 2023).



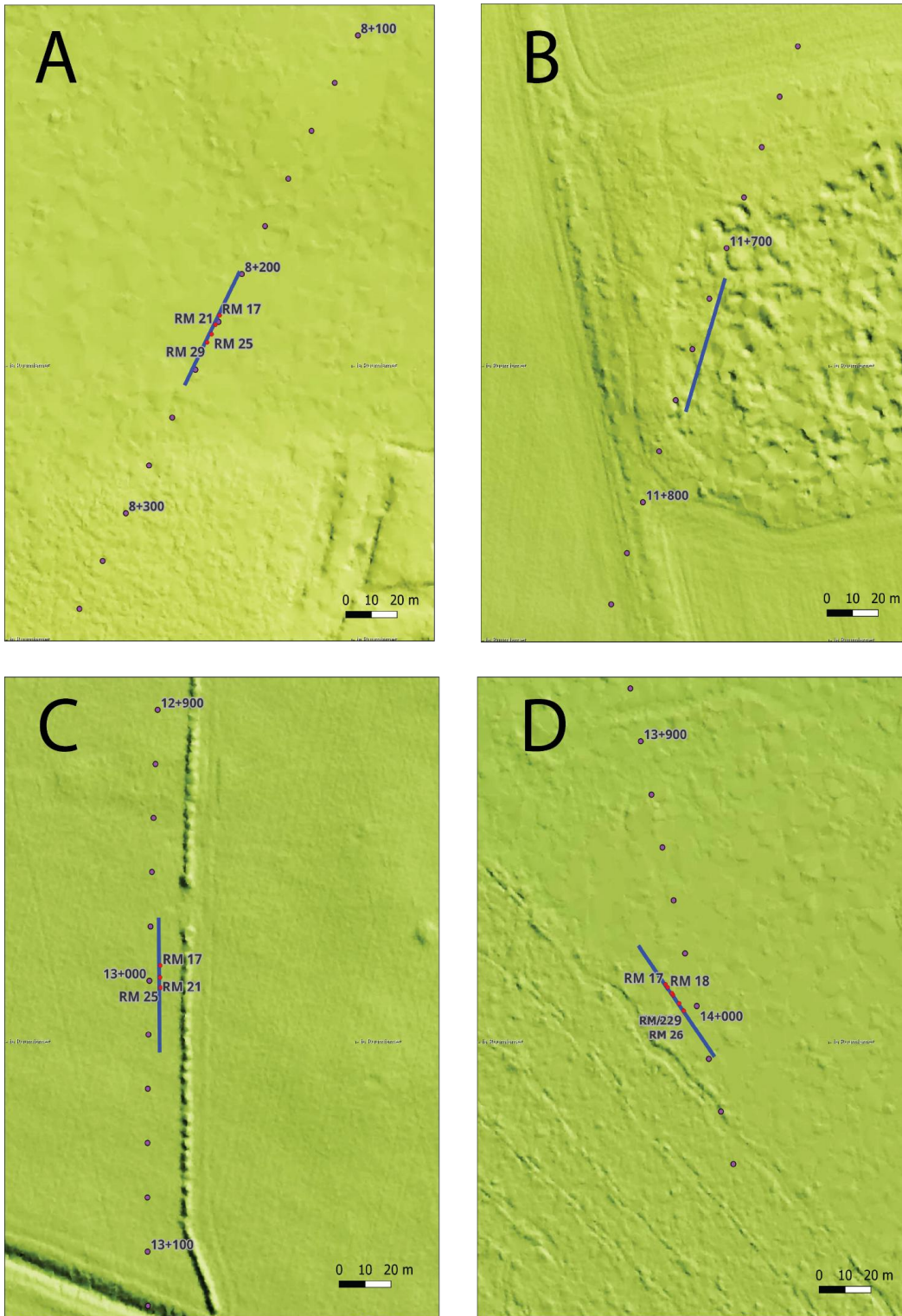
Joonis 6. Uuritud lõikude asukohad (sinised jooned) mööda Rail Baltica põhitrassi (lillad punktid). Joonis (A) kujutab pikette 8+200 kuni 8+240. Joonis (B) kujutab pikette 11+720 kuni 11+760. Joonis (C) kujutab pikette 12+980 kuni 13+020. Joonis (D) kujutab pikette 13+980 kuni 14+020. Taustal maapinna reljeefivarjutuse kaart (Maa- ja Ruumiamet).

Välitöödel kasutati kahte 24-kanaliga seismomeetrit DMT Summit Compact II. Laineid salvestati kolme sekundi jooksul pärast tekitamist. Kasutatavad geofonid olid sagedusega 4,5 Hz ja paigutati 1 m tagant (pilt 1). Lainete tekitamiseks kasutati 8 kg raskust vasarat, millega löödi vastu alumiinium plaati, et tekitada laineid pinnases.



Pilt 1. Geofonide paigutus välitöödel (Foto: Argo Jõelett)

Löövide arv geofonide juures oli neli. Löögid tehti geofoniliini kummagist otsimisest geofonist -4 m, 0 m, 4 m ja 8 m kaugusel. Liiguti 4 m sammuga ja kokku 7–8 kohas. Igal liikumisel paigutati vasaraga kaasnev varustus ja alumiiniumplaat uue geofoni kõrvale, et seal lööke korrata. Saadud andmetest valiti 3–6 salvestist, mille juures Rayleigh lained olid piisavalt hästi eristatavad. Valitud salvestiste keskpunktide (RM) asukohad on nähtavad kaardipildis (joonis 7).



Joonis 7. Lõikude asukohad põhitrasil (sinised jooned) ja kasutatud salvestiste keskpunktide (RM) asukohad (punased punktid). Joonis (A) kujutab pikette 8+200 kuni 8+240. Joonis (B) kujutab pikette 11+720 kuni 11+760. Joonis (C) kujutab pikette 12+980 kuni 13+020. Joonis (D) kujutab pikette 13+980 kuni 14+020. Taustal maapinna reljefivarjutuse kaart. Taustal maapinna reljefivarjutuse kaart (Maa- ja Ruumiamet).

4.2 Andmetöötlus

Andmetöötuseks kasutati tarkvara RadExPro Professional versiooni 2013.3. Töö protseduur algas RadExPro tarkvara aknas, kus loodi iga lõigu jaoks eraldi töövoog. Punktidelt kogutud andmed loeti sisse SEG-Y Input mooduliga ja esitati Trace Output mooduliga. Järgnevalt loodi uus töövoog MASW mooduliga. MASW moodul lõi andmestiku põhjal dispersioonipildi, kuhu märgiti sobilikud dispersioonikõverad erinevate anduri keskpunktidesse (RM; *ingl Receiver midpoint*). Edaspidi viidatakse andurite keskpunktidele "RM" nime all. Pikett 8+200 kuni 8+240 (edaspidi pikett 8+200) juures kasutasin andmetöötuseks RM 21, 25 ja 29. Pikett 11+720 kuni 11+760 (edaspidi pikett 11+000) juures andmetöötlust läbi ei saanud viia. Pikett 12+980 kuni 13+020 (edaspidi pikett 13+000) juures kasutasin RM17, 21 ja 25. Pikett 13+980 kuni 14+020 (edaspidi pikett 14+000) juures kasutasin RM 17, 18, 21, 22, 26 ja 29 (joonis 7).

Järgmise sammuna teostas inverteerimise, mis kasutas eelnevalt dispersioonipildilt märgitud faasikiiruse kõveraid (dispersioonikõverad). Analüüsil kasutati seismogramme kaugusvahemikus 4–38 m laineallikast, mis omistati vastuvõtuliini keskpunktidele (RM). Inverteerimise käigus sobitas programm iga RM juures algselt loodud dispersioonikõverad teoreetilise kõveraga võimalikult palju kokku. Seda kordasin iga RM juures kuni kõverad kattusid võimalikult palju. Kui inverteerimispilt oli loodud, siis vajadusel sobitas dispersioonikõveraid uuesti, kui andmestik oli loetamatu. Lõplikku inverteerimispilti sai võrrelda puuraugu andmestikuga, et hinnata meetodi täpsust uuritud alal. Poolruumi sügavus (*ingl half space*) oli 12 m.

4.3 Puuraukude andmed

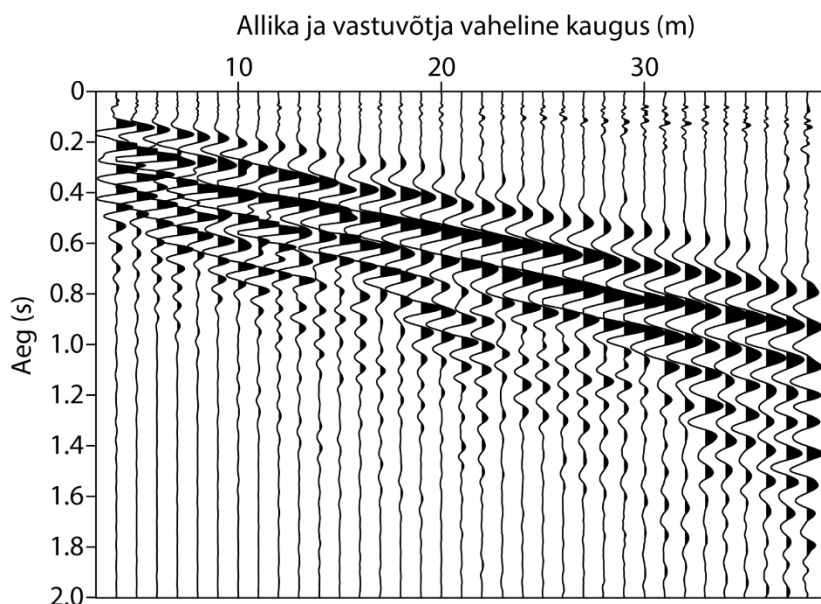
Seismilistele andmetele lisandus hiljem puuraukude andmestik. Lõigul 8+200 kuni 8+240 puuriti kaks puurauku, kus lubjakivi tuli vastu 3,5-4 m sügavusel (lisa 1). Lõigul 12+980 kuni 13+020 puuritakse puuraukude põhjal asus lubjakivi sügavusel 4,5–5,5 m (lisa 2). Lõigul 13+980 kuni 14+020 puuriti sügavusele 3,5 m, kus lubjakivini ei jõutud (lisa 3). Puuraukude andmestiku kasutati MASW meetodi tulemuste võrdlemiseks.

5. Tulemused

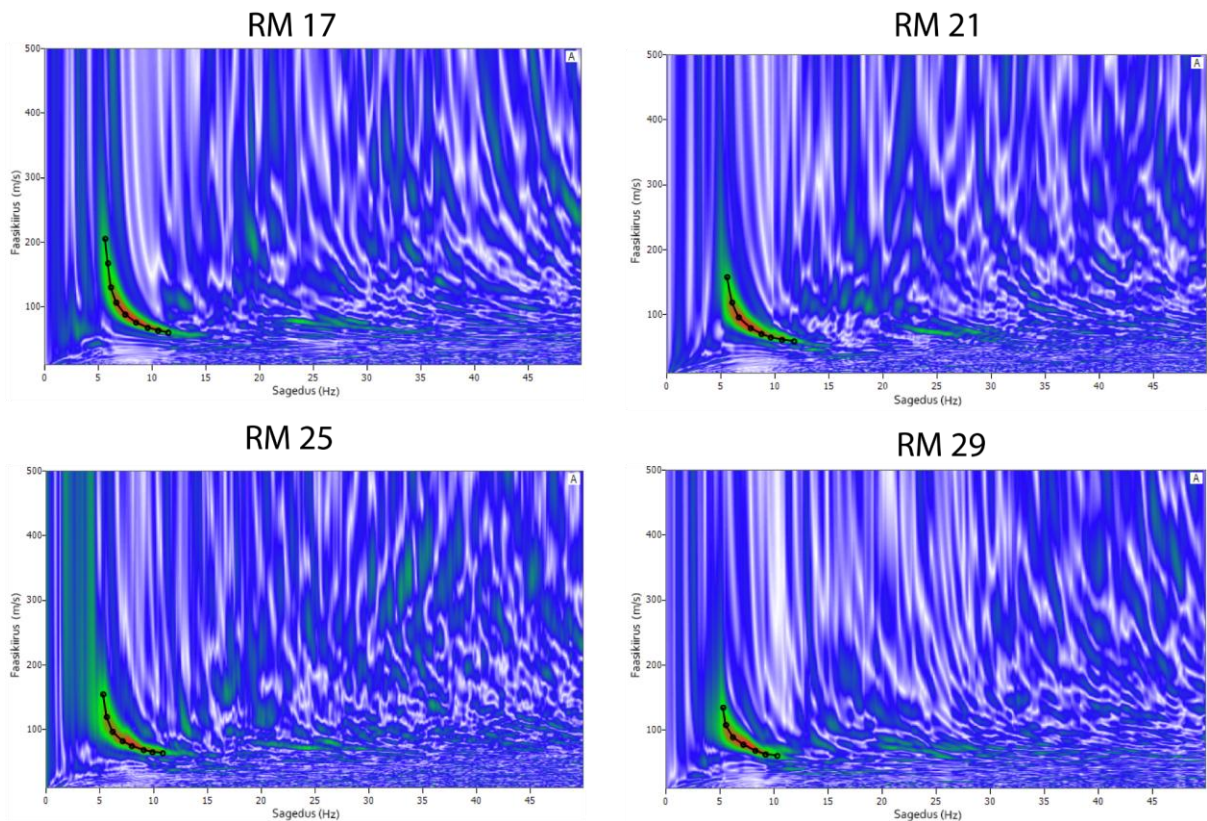
5.1 Tulemused pikett 8+200 kuni 8+240 juures

Mõõtmispiirkond jäi trassil vahemiku 8+200 kuni 8+240 ja asus Hagudi raba lääneservas. Ümbruskonnas esinesid madal- ja siirdesooturbad. RM 17 jäi raba serva poole, RM 29 jõudis juba raba kupli jalamile (joonis 7). Välja jäid RM 18, 22, 26 ja 30, mille andmestikust ei tulnud Rayleigh lained piisavalt hästi välja, et tulemusi usaldusväärseks lugeda. Rayleigh lainete levikut näeb väliandmestikult (joonis 8) ja dispersioonipiltidelt (joonis 9).

RM 17 juures on pinnalähedased Rayleigh laine kiirused väikesed, kuid kasvavad sügavuse kasvuga. Rayleigh laine kiirused maapinna lähedal jäävad 62 m/s juurde sagedusel 11 Hz. Sügavamal jõuavad kiirused maksimaalselt 210 m/s juurde sagedusel 5,5 Hz. RM 21 juures algavad kiirused vahemikus 61-65 m/s sagedusega 11,5-12 Hz ja jõuavad maksimaalselt kuni 160 m/s sagedusel 5,6 Hz. RM 25 juures algavad kiirused 62 m/s juures sagedusega 11 Hz ja jõuavad sügavamal kuni kiirusteni 156 m/s sagedusel 5,1 Hz. RM 29 juures algavad kiirused 62 m/s juures sagedusega 10,5 Hz ja jõuavad kuni kiiruseni 139 m/s sagedusel 5,4 Hz. Rayleigh laineikiirused hakkasid vähenema raba serva ehk RM 29 suunas.



Joonis 8. Seismogrammid pikett 8+200 juures näitavad hästi välja kujunenud pinnalaineid.



Joonis 9. Pikett 8+200 dispersioonipildid ja dispersioonikõverad RM 17 (üleval vasakul), RM 21 (üleval paremal), RM 25 (all vasakul) ja RM29 (all paremal) juures.

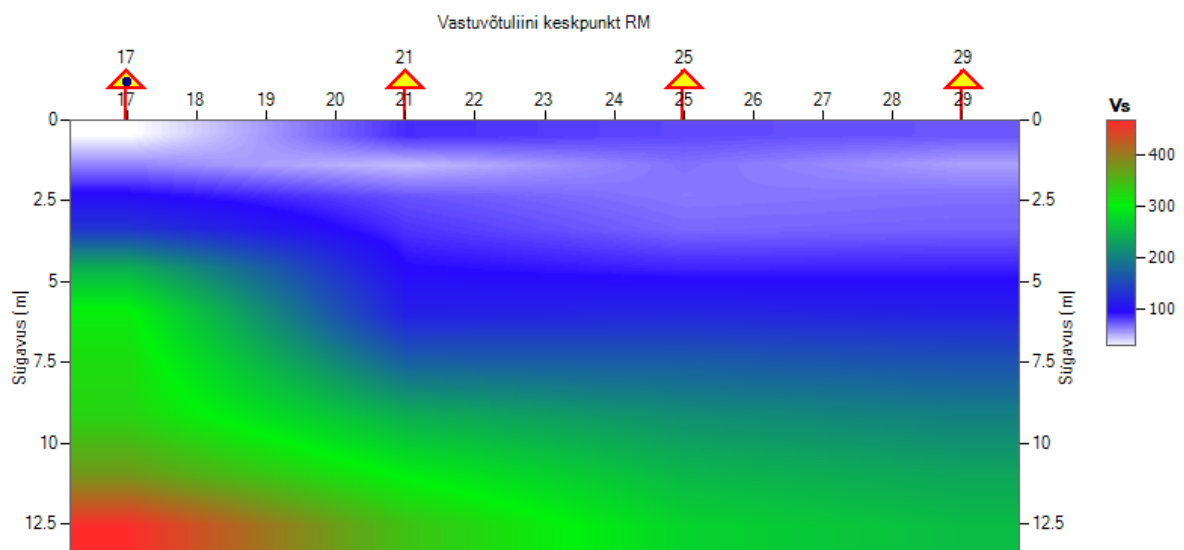
Inversiooni tulemusel saadud ristilainete kiiruse läbilõikelt (joonis 10) on näha, et ristilainete kiirus (V_s) RM 17 juures ülemise 4,2 meetri piires jäi vahemikku 28-200 m/s, millest sügavamal hakkavad kiirused kasvama. Ristilainekiirus on 11 meetri juures kuni 400 m/s, sügavusel 12 m jõuab kiirus 469 m/s juurde.

RM 21 juures algavad kiirused maapinnalähedases osas umbes 89 m/s ja jõuavad 8 meetri juures 180 m/s juurde. Sügavusel 0,8-2,6 m langeb V_s võrreldes maapinnalähedase osaga, jäädes vahemikku 50-70 m/s. Sügavustel 8-12 m jäävad kiirused vahemikku 180-317 m/s ja üle 400 m/s need ei jõua.

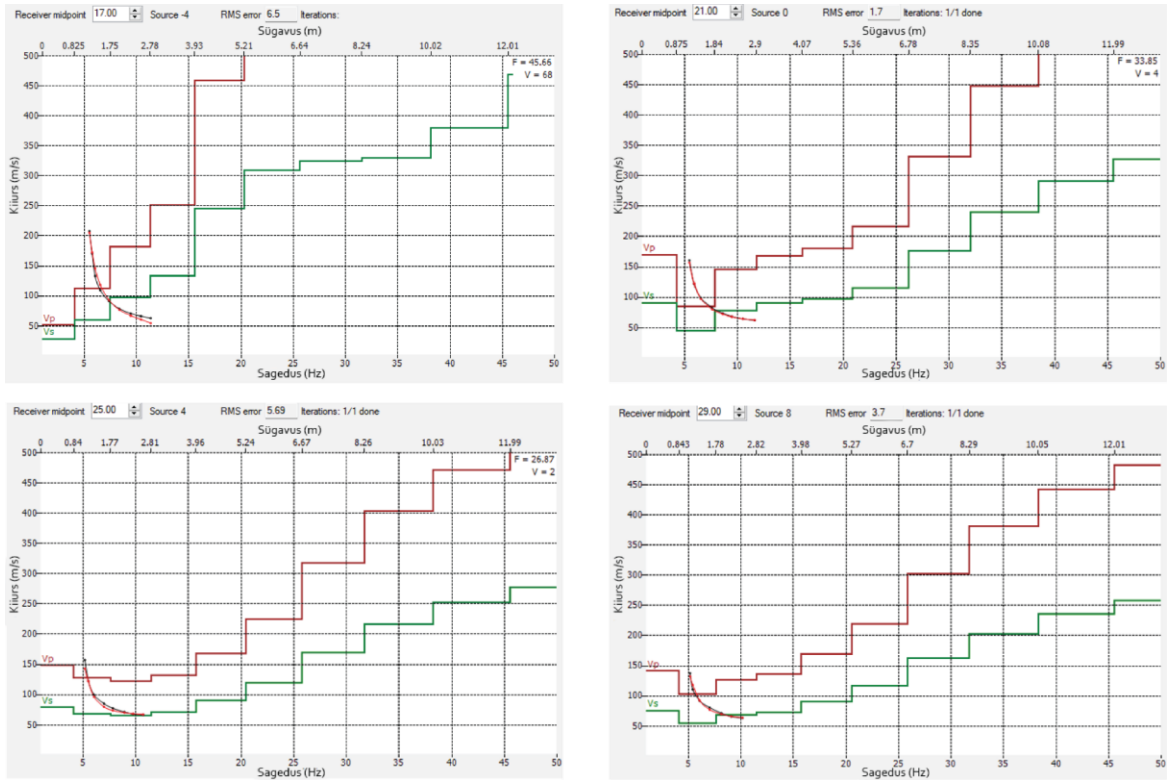
RM 25 tulemused sarnanevad RM 21 omadele kuni sügavuseni 8 m, jäädes 79-180 m/s vahemikku, kuid peale seda jäävad ristilainete kiirused 183-270 m/s vahemikku.

RM 29 ristilainete kiirused sarnanevad RM 25 tulemustega. Esimese 3,5 m sügavusel jäävad ristilainete kiirused 50-75 m/s vahemikku, aga sügavusel 3,5-8 m jäävad kiirused vahemikku 75-175 m/s. Sügavusel 8-12 m jõuavad kiirused kuni 260 m/s.

On näha, et liikudes raba servast (RM 17) kuni rabakupli jalami poole (RM 29) langevad ristilainete maksimaalsed kiirused 211 m/s võrra (tabel 1 ja 2) ja kiiruste tõus sügavuse kasvades hakkab sügavamal (joonis 10). Inversiooni tulemusena jõudis Vs kuni 469 m/s, Vp jõudis 878 m/s juurde (tabel 1) Teoreetilised dispersioonikõverad suutis tarkvara sobitada võrdlemisi täpselt ja madala veaga. Vs ja Vp kasv oli loogiline ja ei esinenud suuri hüppeid kiirustes (joonis 11). RM 29 juures jõudsid Vp maksimaalselt 482 m/s juurde ja Vs 258 m/s juurde (tabel 2)



Joonis 10. Pikett 8+200 inversioonipilt. RM 17 on raba serva pool ja RM 29 on osaliselt raba kuplil.



Joonis 11. Pikett 8+200 dispersioonikõverate kujud peale inversiooni. Must kõver on algselt vormistatud kõver, punane kõver on teoreetiline kõver, mida tarkvara inversiooniga sobitas. RMS on vea %.

Tabel 1 ja 2. Vs ja Vp kasv kuni 12 m sügavuseni RM 17 ja 29 juures piketil 8+200. Kihipaksused on märgitud h(m). Poolruumisügavus (HS) on 12 m.

RM17 8+200		
h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0.825	51	28
0.921	113	60
1.03	182	97
1.15	251	134
1.28	459	245
1.43	580	310
1.6	605	324
1.78	618	330
1.99	712	380
HS (12)	878	469

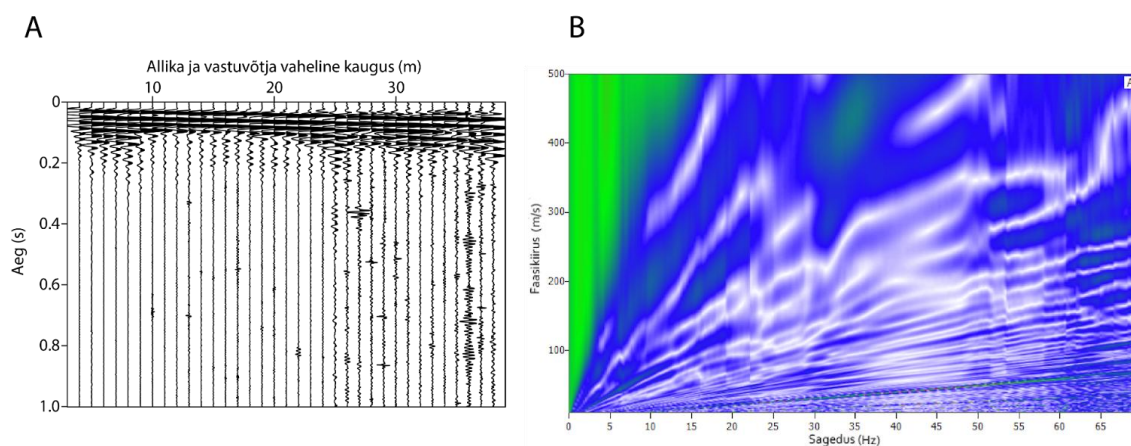
RM29 8+200		
h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0.843	141	75
0.937	103	55
1.04	127	68
1.16	136	72
1.29	170	91
1.43	219	117
1.59	303	162
1.76	381	203
1.96	442	236
HS (12)	482	258

5.2 Tulemused pikett 11+720 kuni 11+760 juures

Piketi 11+720 kuni 11+760 pinnas oli võsastunud, ebatasane lohkude ja muhkudega. Kõrgusvahed olid muutlikud ja kohati üle ühe meetri. Pinnas sisaldas kohati suuremaid kive, mis takistasid geofonide korrektset paigaldust osadel juhtudel (pilt 2). Seismogrammidel ei ole näha pinnalaineid (on ainult kehalained) ning andmete alusel ei saanud selget dispersioonipilti, mille abil saaks dispersioonikõveraid luua (joonis 12). Pinnalaineid prooviti tekitada seitsmes asukohas, kuid ükski ei andnud kasutatavaid tulemusi.



Pilt 2. Uuringuala pikett 11+000 juures välitöödel. Pinnas oli ebatasane ja kaetud kividega (Foto: Argo Jõelett)



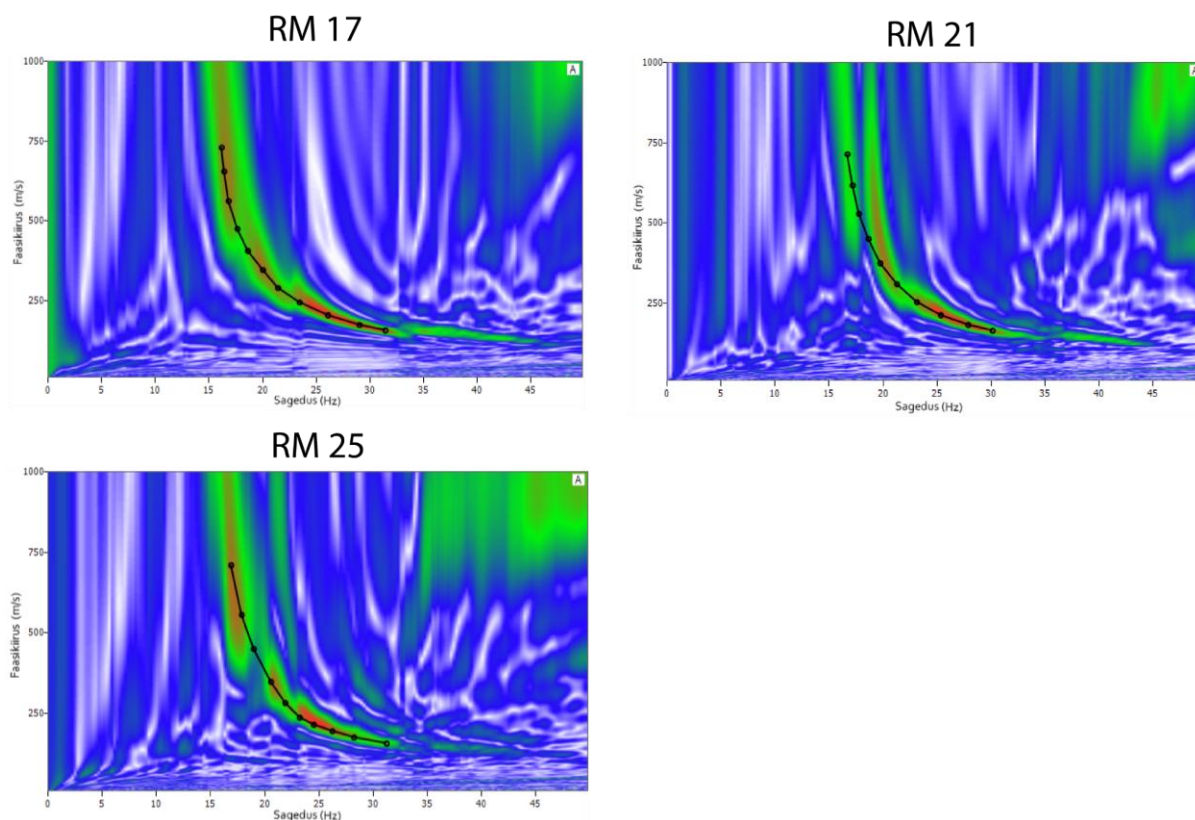
Joonis 12. Dispersioonipilt pikett 11+000 tulemustest. Lainete levik pinnases ei ole selgelt välja loetav (A). Ei kujunenud Rayleigh laineid, mida dispersioonipildis kasutada saaks (B). Dispersioonipilt on tehtud RM 17 juurest.

5.3 Tulemused pikett 12+980 kuni 13+020 juures

Mõõtmispiirkond oli piketil 12+980 kuni 13+020, mis asus tasasel põllul. Dispersioonipildis on näha hästi välja kujunenud pinnalaineid RM 17, 21 ja 25 juures. Pinnalainete levikut näeb hästi väliandmestikust (joonis 13). Välja jäid RM 18, 22, 26, 29 ja 30, millele ei olnud võimalik tõmmata korralike dispersioonikõveraid hilisemaks andmetötluseks. Dispersioonikõverate kujud on kõigis kolmes RM punktis sarnased. Kolmest kõverast erineb kõige rohkem RM 21, mille kõver ei ole niivõrd hästi välja kujunenud kui teised kaks. Rayleigh lainete kiirused algavad kõigil kolmel juhul ligikaudu 160 m/s juures sagedusega 31 Hz ning jõuavad keskmiselt 720-730 m/s juurde sügavamale liikudes, jäädes sagedusvahemiku 16-17 Hz. RM 17 ja 25 juures muutuvad dispersioonikõverad vertikaalseks umbes sagedusel 17 Hz, RM 21 juures vahemikus 17-18 Hz (joonis 14).



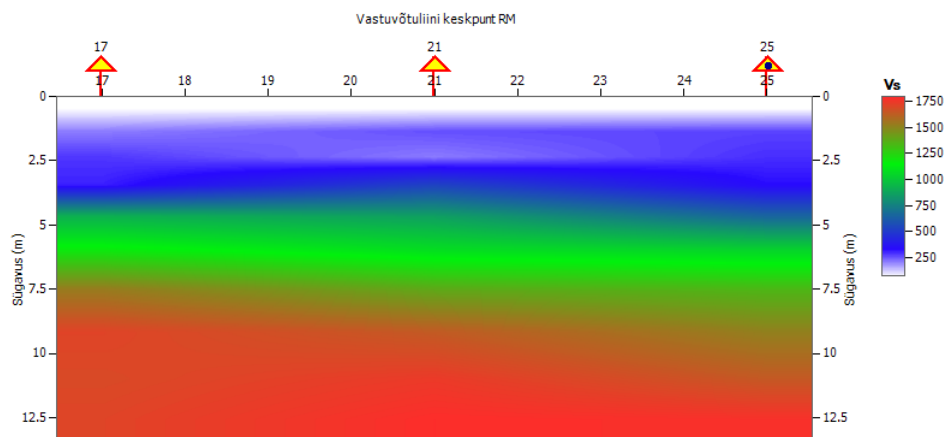
Joonis 13. Seismogrammid pikett 13+000 juures näitavad hästi välja kujunenud pinnalaineid.



Joonis 14. Pikett 13+000 dispersioonkõverad RM 17, 21 ja 25 juures.

Inversiooni tulemustest on näha, et kõigi kolme RM juures on ristilaine kiirused kuni 100 m/s sügavusel 0,5 m. Sügavusel 0,5-4 m jäävad lainete kiirused vahemikku 100-630 m/s kõigis kolme RM juures. Sügavustel 4-7 m jäävad kiirused vahemikku umbes 630-1415 m/s. Laine

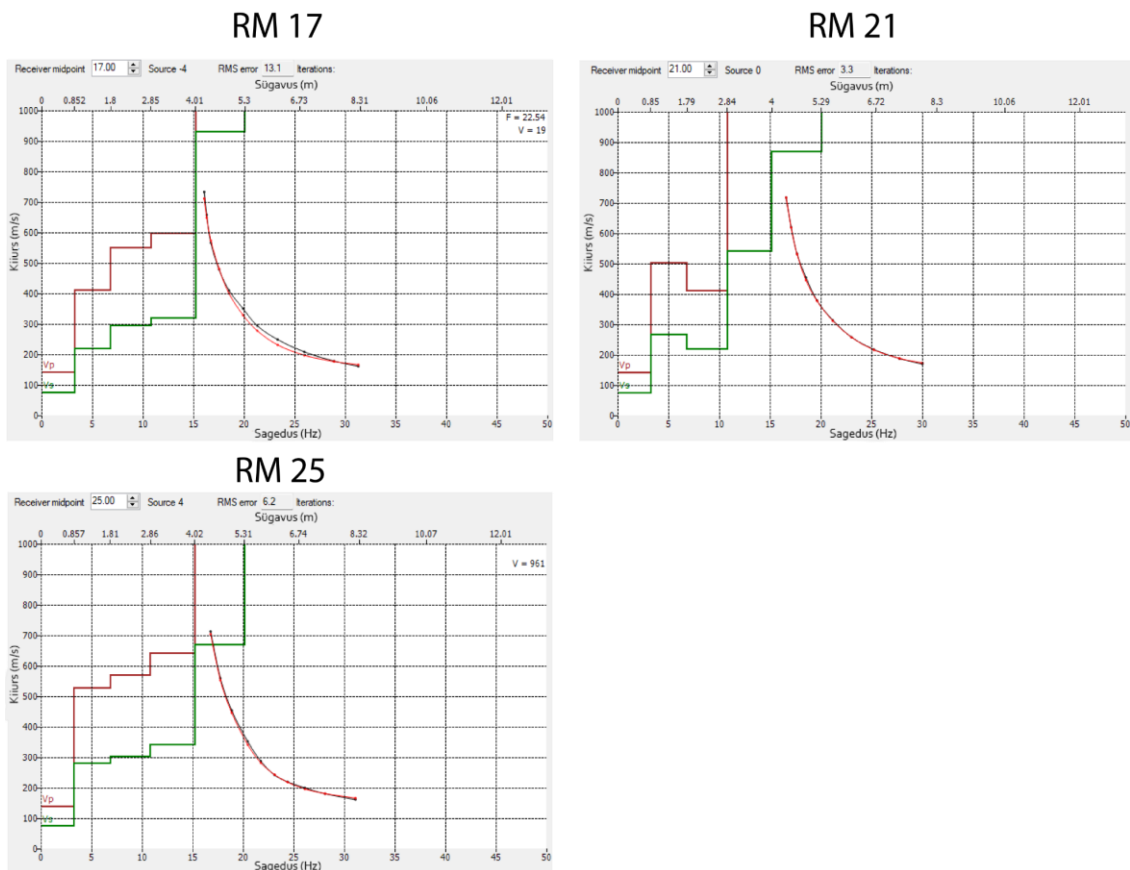
kiirusteni üle 1400 m/s jõutake alles umbes 8 m sügavusel. Sügavustel 7 m (RM 17 juures) kuni 8 m (RM 25 juures) alates jäävad kiirused vahemikku umbes 1420-1785 m/s. Sügavusel 12 m jäävad kõik kolm RM-i vahemikku 1720-1797 m/s, kus kõige kõrgemad kiirused esinevad RM 21 juures. Üldiselt on kiiruste muutus pinnases sügavuse kasvuga võrdlemisi ühtlane (joonis 15.). Maksimaalne V_s pinnases on 1785 m/s ja V_p on 3339 m/s. sügavusel 12 m (tabel 3). Teoreetilised dispersioonikõverad sobitusid joonestatud kõveratega hästi kokku, suurim erinevus esines RM 17 juures. Kõigis kolmes punktis on näha suur V_s ja V_p kasvu sarnases vahemikus (joonis 16).



Joonis 15. Pikett 13+000 inversioon. Kasutati RM 17, 21 ja 25 poolruumi sügavusega 12 m.

Tabel 3. V_s ja V_p kasv kuni 12 m sügavuseni RM 25 juures piketil 13+000. Kihipaksused on märgitud h(m). Poolruumisügavus (HS) on 12 m.

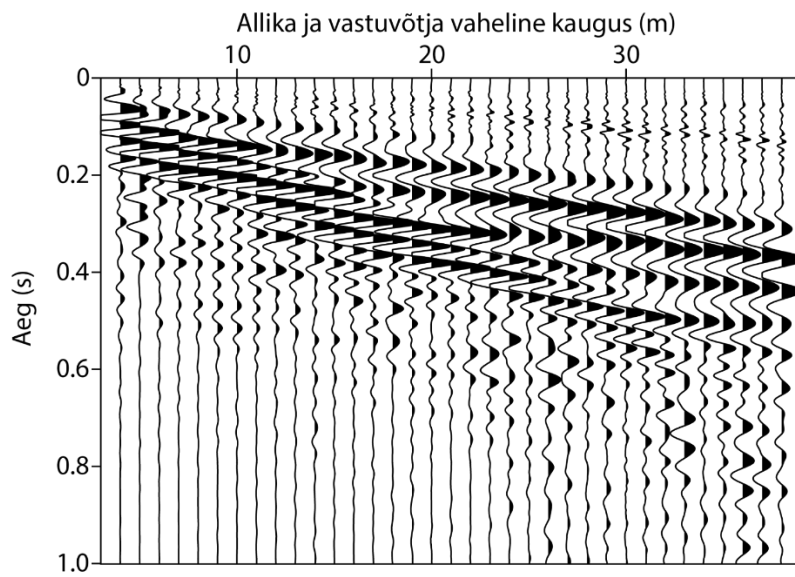
RM25 13+000		
h (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
0.857	141	75
0.949	530	283
1.05	570	305
1.16	642	343
1.29	1256	671
1.43	1991	1064
1.58	2537	1356
1.75	2861	1529
1.94	3099	1657
HS (12)	3339	1785



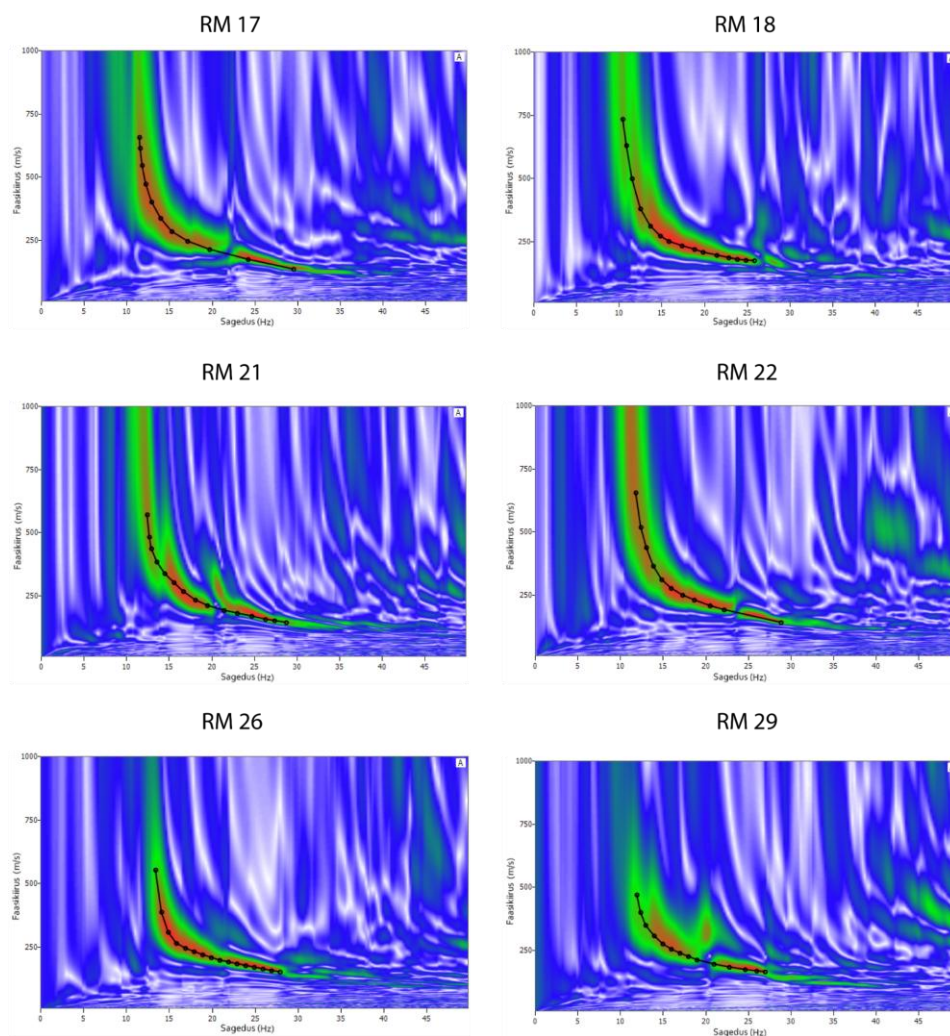
Joonis 16. Pikett 13+000 dispersioonikõverate kujud peale inversiooni. Must kõver on algsest vormistatud kõver, punane kõver on teoreetiline kõver, mida tarkvara inversiooniga sobitas. RMS on vea %.

5.4 Tulemused pikett 13+980 kuni 14+020 juures

Mõõtmiskoht asus kergelt lainetaval maastikul raiesmiku servas. Väliandmestikust näeb head pinnalainete levikut (joonis 17). Hästi kujunesid välja dispersioonikõverad RM 17, 18, 21, 22, 26 ja 29 juures. RM 17, 18, 21 ja 22 juures jäid Rayleigh lainete kiirused maapinnale lähedases osas enamuse juhtudel vahemikku 145-180 m/s sagedustel 27-29 Hz. Dispersioonikõverad muutusid 10-12 Hz vahemikus vertikaalseks. RM 26 juures muutus dispersioonikõver vertikaalseks varem, 13 Hz juures (joonis 18).

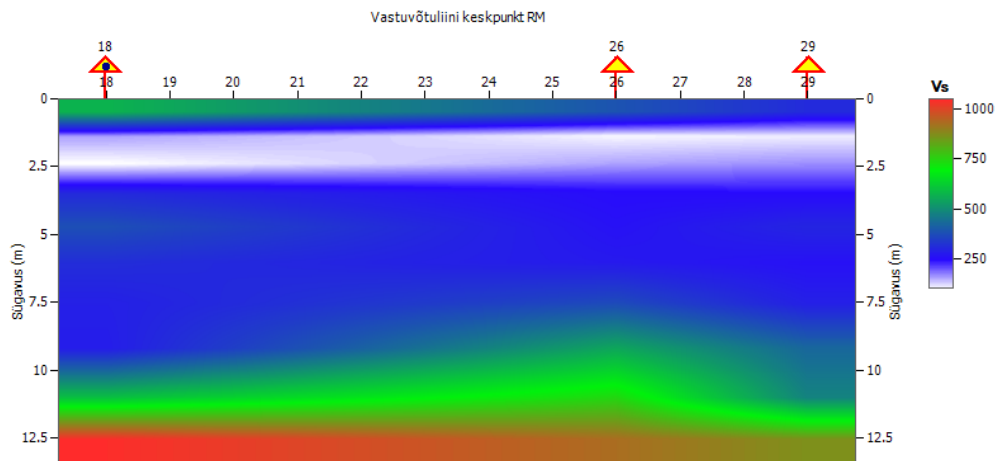


Joonis 17. Seismogrammide pikett 14+000 juures näitavad hästi välja kujunenud pinnalaineid.



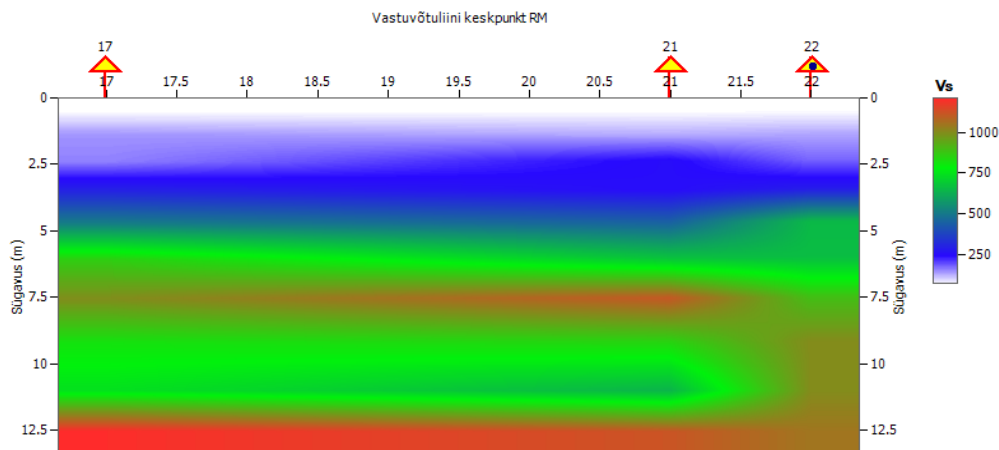
Joonis 18. Pikett 14+000 dispersioonkõverad RM 17, 18, 21, 22, 26 ja 29 juures.

Inversiooni käigus tekkis kaks teineteisest erinevat inversioonipilti. Sarnased tulemused ja esimene inversioonipilt tuli RM 18, 26 ja 29 andmetest (joonis 19) ning teine inversioonipilt loodi RM 17, 21 ja 22 andmetest (joonis 20). RM 18, 26 ja 29 inversioonil olid ristilainete kiirused 0-1,2 m sügavusel vahemikus 230-380 m/s. Kõrgemad kiirused esinesid RM 18 suunas, kus need jõudsid kuni 580 m/s. Sügavusel 1,2-2,6 m langesid laine kiirused ja jäid 130-200 m/s vahemikku. Sügavustel 2,6-10 m on lainete kiiruste muutused väikesed, jäädes vahemikus 200-310 m/s, peale mida hakkavad kiirused kasvama. Sügavusel 12 m jõuavad kiirused umbes 800-1000 m/s vahemikku. On näha, et kõige suuremad kiirused leiduvad RM 18 juures, kus kiirused jõuavad üle 1000 m/s. RM 26 ja 29 juures ei ületa kiirused 920 m/s (joonis 19).



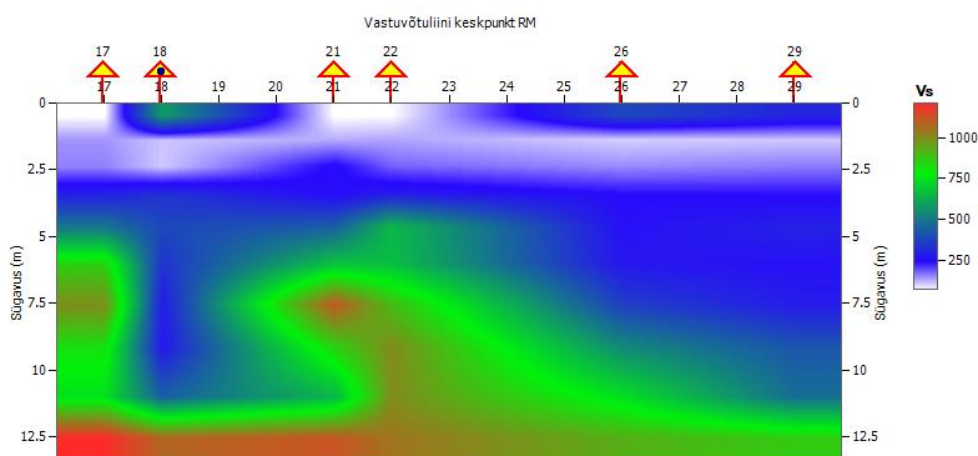
Joonis 19. Pikett 14+000 inversioonipilt. Kasutati RM 18, 26, 29 poolruumi sügavusega 12 m.

Teise inversioonipildi juures on 0,6 m sügavusel ristilainete kiirused kuni 90 m/s. Kiirused kasvavad ühtlaselt kuni sügavuseni 4,5 m ja jäävad vahemikku 90 m/s- 400 m/s. Sügavusel 4,5-11,7 m on kiirused muutlikud ja ei kasva sujuvalt. Ristlaine kiirused jäävad vahemikku 400-1070 m/s. Kõige ühtlasem kiiruste kasv toimub RM 22 juures. Kiirused jõudsid kõigis RM punktides sügavusel 12 m üle 1000 m/s. RM 17 juures jõudsid ristilainete kiirused kuni 1210 m/s (joonis 20).



Joonis 20. Pikett 14+000 inversioonipilt. Kasutati RM 17, 21, 22 poolruumi sügavusega 12 m.

Kui panna mõlema inversiooni lahendused kokku ühte pilti, siis on näha, et on tekkinud kaks erinevat süsteemi. Ühel juhul hakkab toimuma ristilainete kiiruste kasv juba 4,5 m peal, teisel juhul aga keskmiselt 11 m sügavusel. On ka märgata, et kõige pinnalähedases osas on selged erinevused laine kiirustes, kuid 1 m sügavusel on näha, et laine kiirused on mõlemas lahenduses sarnased vahemiku 130-200 m/s (joonis 21). Kiiruste muutust kihtide kaupa ja erinevust kahe inversiooni vahel näeb hästi RM 17 ja RM 26 Vp ja Vs muutustes (tabelid 4 ja 5), kus laine kiirused võivad väga palju erineda samades kihtides. Teoreetilisi dispersioonikõveraids ei saanud pikett 14000 juures niivõrd edukalt tarkvara paigutada kui 8+200 (joonis 11) ja 13+000 (joonis 16) juures. Veateated olid vaid RM 29 juures alla 10%. Vs ja Vp muutused olid hüppelised (joonis 22).



Joonis 21. Pikett 14+000 inversioonipilt, kus ühendas mõlemad eelmised inversioonipildid.

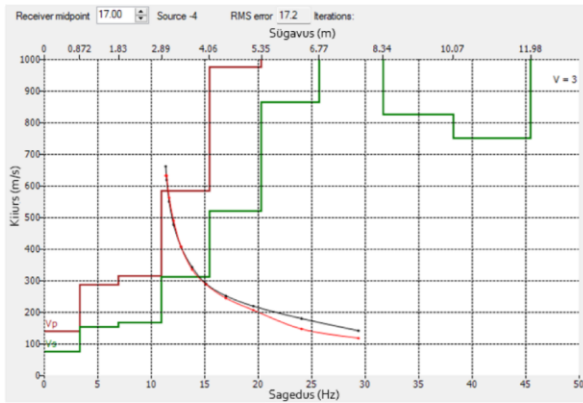
Tabel 4 ja 5. Vs ja Vp kasv kuni 12 m sügavuseni RM 17 ja 29 juures piketil 8+200.

Kihipaksused on märgitud h(m). Poolruumisügavus (HS) on 12 m.

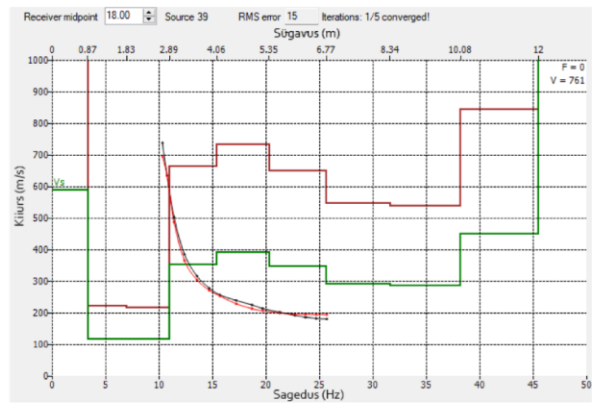
RM17 14+000		
h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0.872	141	76
0.962	288	154
1.06	314	168
1.17	584	312
1.29	975	521
1.42	1619	866
1.57	1880	1005
1.73	1543	825
1.91	1405	751
HS (12)	2265	1211

RM26 14+000		
h (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0.853	738	394
0.945	207	111
1.05	297	159
1.16	479	256
1.29	498	266
1.43	527	281
1.58	701	375
1.75	1033	552
1.94	1399	748
HS	1750	936

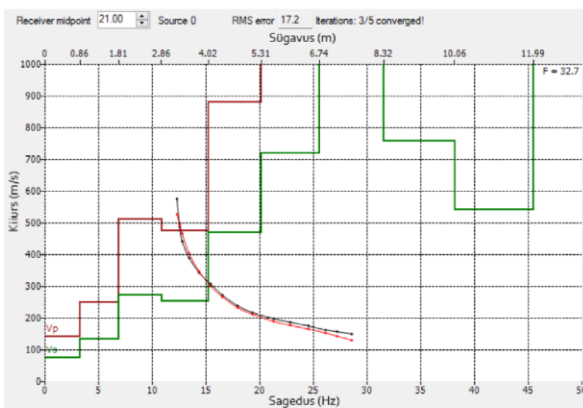
RM 17



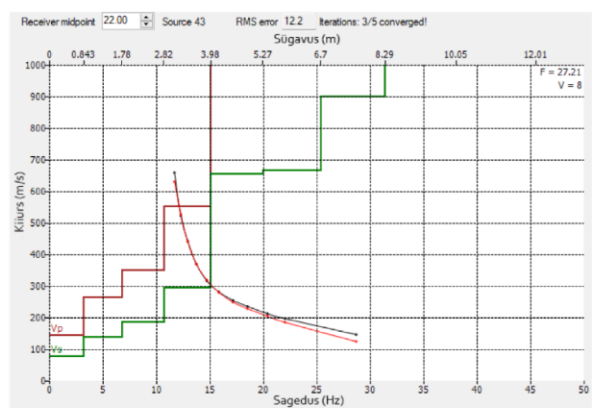
RM 18



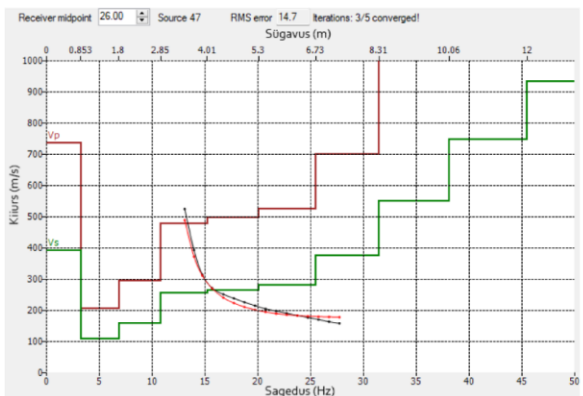
RM 21



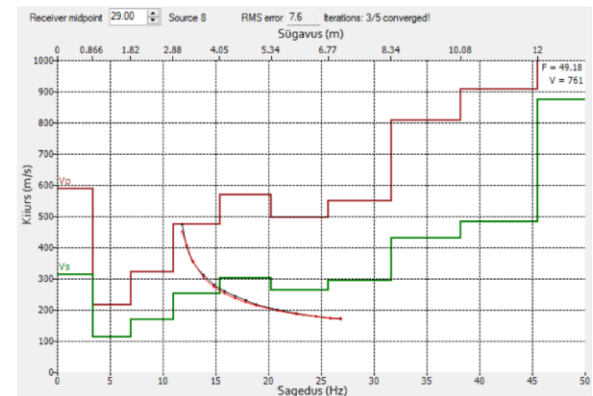
RM 22



RM 26



RM 29



Joonis 22. Pikett 14+000 dispersioonikõverate kujud peale inversiooni. Must kõver on algselt vormistatud kõver, punane kõver on teoreetiline kõver, mida tarkvara inversiooniga sobitas.

RMS on vea %.

6. Arutelu

6.1 Pikett 8+200 kuni 8+240

Kui vaadata lõigu 8+200 tulemusi, siis on selgelt näha, et mida lähemale Hagudi raba servale RM jõudis, seda madalamaks muutus ristilainete kiirused ja kiiruste kasv algas sügavamalt. Sellest tulenevalt võib oletada, et RM 17 juures oli pinnas tihedam kui RM 21, 25 ja 29 puhul. RM 17 võib esineda peamiselt pinnas, mis koosneb tihendatud liivast (V_s levik 200-600 m/s) või niiske liiv (V_s levik 300-800 m/s) (Arman, 2021; Brocher, 2005). Vahemikus RM 21-29 oli oluliselt pinnakate oluliselt turbasem ja märjem. Vaadates üldist Rayleigh lainete dispersiooni, siis turbases pinnases töötab MASW meetod halvemini, kuna esimeste meetrite juures on näha kiiruste kõikumist. Seevastu RM 17 juures on kiiruste kasv palju loomulikum (joonis 10). On võimalik, et väga pehmed pinnaseid millel on kõrge veesisaldus või on väga pehmed, ei ole MASW-meetodiga uurimine kuigi efektiivne. Tihedamate liivaste pinnaste uurimine on meetodikaga hästi teostatav. Liiga pehmed ja kohevad pinnased tõenäoliselt summutavad lainete levikut piisavalt, et meetodi efektiivsust vähendada.

Puuraukude andmestiku põhjal algas piketil 8+200 lubjakivi sügavustel 3-4 m (Jõeleht et al., 2025). Sellest võib järeldada, et MASW meetodiga selles punktis edukalt lubjakivi piiri ei olnud võimalik leida, kuna V_p ja V_s kiirused jäid oluliselt alla eeldatud väärtuste.

6.2 Pikett 11+720 kuni 11+760

Kuna piketil 11+720 kuni 11+760 tehtud välitööd oli valdavalt pinnas, kus leidus väga palju lahtiseid kive, siis MASW meetodika seal korrektselt ei toiminud. Sellest võib oletada, et ebatasase ja rohke lahtise materjaliga pinnase (kivide ja rahnude) korral ei ole MASW-meetodi rakendamine otstarbekas. Sellistes tingimustes ei levi ega peegeldu pinnalained piisavalt ühtlaselt, mistõttu saadud andmed ei ole usaldusväärsed ega kasutuskõlblikud. Pikett 11+000 uurimiseks võiks näiteks kasutada georadarit, mis ei kasuta andmete saamiseks pinnalaineid, seega ei ole ebaühtlane pinnas piiravaks teguriks.

6.3 Pikett 12+980 kuni 13+020

Vaadates V_s muutust, siis esimene 4,5 m pinnasest on kaetud valdavalt pehmete setetega, milleks võivad olla muld ja tihendamata liiv. Allpool tõenäoliselt muutub liiv niiskemaks, sest kiirused kasvavad. Pärast seda hakkab toimuma järsk ristilainete kiiruste kasv, mis viitab sellele, et pinnased muutuvad jäigemaks ja tihedamaks. Kõige suuremad ristilainete kiirused jõuavad peaaegu 1800 m/s juurde, mis on juba lubjakividelele vastavad kiirused. Kuna lainekiirused lubjakivides võivad veel oluliselt suuremad olla, siis on võimalik, et lubjakivi on osaliselt porsunud. Sellest tulenevalt ei ole pinnas enam niivõrd tihe ja kiirused seal on madalamad. Siis võib oletada, et MASW meetodiga suudeti ära määrata ligikaudne piir 4,5 m peal, kus pinnakate setted hakkavad üle minema tihedamateks pealiskorra settekiivimiteks.

Kui võrrelda trasside juures läbi puuraukude andmestiku (Jõelet et al., 2025), siis lubjakivi algab sügavus vahemikus 4,5-5,5 m, mis läheb kokku MASW andmestikuga. Kuigi V_p ja V_s kiirused ei jõudnud lubjakivile iseloomulike väärtusteni, siis selged muutused laine kiirustest pinnase sügavuse kasvuga näitavad, et MASW meetodika rakendamine piketil 13+000 suures pildis oli edukas. Pinnas oli võrdlemisi tasane, aga sellegipoolest osade RM punktide juures ei moodustunud head dispersioonikõverad. Põhjusteks võisid olla näiteks geofonide paigutus või pinnase omadused/tegurid, mida ei osanud eeldada nendes asukohtades (liiga märjad, halvasti tihendatud pinnased, suured kivid pinnases). On ka võimalik, et dispersioonikõverad ei olnud tõmmatud piisavalt hästi, mis inversioonipilti muutsid.

6.4 Pikett 13+980 kuni 14+020

Pikett 13+980 kuni 14+020 juures oli selgelt näha, et kaks süsteemi erinesid teineteisest. Aruande (Jõelet et al., 2025) põhjal jõuti puuraukudega ligikaudu 3,5 m sügavusele. Sellest tulenevalt on raske hinnata, kumma inversiooni tulemus on täpsem. Võib oletada, et RM 17, 21 ja 22 inversioon on realistlikum tulemus, kuna kiirused kasvavad esimeste meetrite juures loomulikumalt, aga lainekiirused RM 18, 26 ja 29 juures vaatavad rohkem liivasele pinnasele. Kiiruste muutus umbes sügavustel 1,2 - 2,6 m, kus kiirused langevad, võib viidata pudemale vahekihile. Seda puuraugu andmetest välja ei tulnud. Erinevused võivad tulla sisse kas geofonide paigutustest, uuritavast alast kui ka tarkvara võimekusest. Pehmete pinnaste

paksuses ei saa tulemuste põhjal täiesti kindel olla, aga MASW meetodiga siiski kinnitas, et mõlemal juhul tulevad mingi hetk vastu tugevamad karbonaatkivimid. Kuna Vs kiirused ei ületanud 1210 m/s siis lubjakivi piiri MASW meetodiga selles piirkonnas ei saa kinnitada. Täiendava andmestiku juures oleks ka selles punktis mõttekas rakendada pinnalaineid koos georadariga.

6.5 Rakendusvaldkonnad ja praktiline kasutus

MASW on kasulik meetod geofüüsikas, kuna ei vaja sissetungi pinnasesse, on teiste meetoditega võrreldes odav, lihtne läbi viia ja kasutatav keerulistes geoloogilistes tingimustes. Peamised kasutusvaldkonnad on ehitusgeoloogias, pinnase uuringutes, keskkonnaseires ja seismiliste ohtude hindamiseks. Meetodi täpsust on võrreldud puuraukude andmetega ja erinevuse määr jääb $\pm 15\%$. Selles uurimistöös soovitakse ka seda kontrollida Rail Baltica trasside kontekstis. Käesolevas uurimistöös tuli välja, et MASW meetodika ei ole kasutuskõlblik ebatasastel ja väga pehmetel pindadel. Soistel ja niiskete pinnastega aladel oleks usaldusväärsem tugineda mõnede muudele geofüüsikalisele lahendusele. Kui tegu on tasasema liivase pinnaga, siis on mõttekas meetodi kasutust kaaluda.

6.6 MASW meetodika tuleviku arendused

Tulevikus plaanitakse võtta kasutusele Rayleigh lainete kõrgemate mooduste kasutamine (*ingl higher-order modes*), millega tõstetakse mudeli resolutsiooni ja suurendatakse sügavusi, kuhu maani meetod töötab. Kasutusele plaanitakse ka võtta täislainevälja inversiooni (*ing full-wavefield inversion*) FWI ja 3D MASW lahendused, mis lubavad keerukamaid geoloogilisi struktuure. Nende uuendustega loodetakse tõsta meetodika täpsust ja S-lainete profiilide moodustamise võimekust heterogeensetes keskkondades, mis aitaksid nii ehitusgeoloogiliste ja geofüüsikaliste objektide uuringul (Xia et al., 2009). Need uuendused aitaksid tõenäoliselt saada parmaid tulemusi näiteks piketidel 8200 ja 14000, aga ei ole tõenäoline, et piketil 11000 tulemused paraneksid ka uute lahendustega, kuna pinnases ei toimunud selget pinnalainete levikut.

6.7 Uurimustöö edasiarendus

Kuna tulemused olid kohati ebaselged ja mõningatel lõikudel MASW meetod ei olnud üldse kasutuskõlblik, siis tulevastel uuringutel oleks mõttekas rakendada georadar. Radari abil saab uurida, kas pinnas ei olnud sobilik või esines vigasid välitöödel. Kombineerides meetodid, saaks piirkonna pinnase omadustest parema ülevaate.

7. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö peamine eesmärk oli kontrollida MASW-metoodika kasutatavust uuritud trasside pinnaste ja tingimuste juures. Selleks analüüsiti välitööde andmeid, hinnati nende täpsust ning kasutati võrdluseks hiljem puuritud puuraukude andmestikku. Uuringu käigus viidi läbi välitööd ning valiti andmestik, mida sai kõige paremini analüüsida. Andmetöötamiseks kasutati tarkvara RadExPro Professional 2013.3. Selle abil loodi dispersioonipildid ja -kõverad, viidi läbi inversioon ning hinnati selle põhjal pinnase omadusi.

Andmete analüüsil selgus, et MASW-metoodika ei ole igas olukorras kasutatav ega anna usutavaid tulemusi. Piketil 8+200 ei kasvanud laine kiirused piisavalt suureks, et olla kindel, millal pehmed pinnased muutuvad lubjakiviks. Piketil 11+000 ei olnud meetodit üldse võimalik rakendada, kuna ebatasane maapind ja suur hulk lahtiseid kive takistas pinnalainete korrektset teket. Piketil 13+000 andis MASW-metoodika parimad tulemused, mis vastasid suurel määral ka puuraukude andmestikule. Piketil 14+000 esines kaks võimalikku lahendust. Kuna puuraukude andmestik ei ulatunud piisavalt sügavale, ei olnud võimalik kindlalt öelda, kumb interpretatsioon on õigem. Sellest järeldub, et MASW-metoodika täpsus suureneb, kui pinnased ei ole liialt ebatasased, pehmed ega niisked, sest nendel juhtudel väheneb pinnalainete efektiivne levimine.

Kuna kõigis punktides ei saavutatud soovitud tulemust, oleks otstarbekas rakendada MASW-metoodika kõrval ka muid geofüüsikalisi lahendusi kui on kahtlusi pinnase ehituse osas. MASW-metoodika kõrvale võiks tulevikus kasutada näiteks georadarit.

Limitations and possibilities of the Seismic Surface Wave Method (MASW) in geotechnical investigations in Rapla County

Kiur Pedajas

Summary

The main objective of this bachelor's study is to evaluate soft soil properties using Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) in four different locations of the planned Rail Baltica railway route in Rapla County. MASW is a seismic surface wave-based method widely used in engineering geology and seismic risk evaluation due to its non-invasive nature and ability to assess subsurface shear-wave velocity profiles at a low cost. By using the properties of the method, the thickness of soil in the study area can be evaluated.

Fieldwork took place at four track sections: 8+200 to 8+240, 11+720 to 11+760, 12+980 to 13+020, and 13+980 to 14+020. Seismic data were collected using a 24-channel seismograph with 4.5 Hz geophones that were placed at 1-meter intervals. For data processing RadExPro software was used where dispersion curves were generated, followed by inversion to obtain shear-wave velocity (V_s) profiles up to a depth of 12 meters.

The result of data processing showed that at track section 8+200 to 8+240 the shear-wave velocities were low and didn't reach the estimated velocities of limestone that was confirmed by drill-hole data. In track section 11+720 to 11+760, MASW method did not work due to the uneven landscape, which didn't allow for the proper travel of surface waves. Results of track section 12+980 to 13+020 showed results that aligned mostly with the drill-hole data although the maximum shear-wave velocity was somewhat lower than expected, which could have been caused by pores and canvases in the limestone. Track section 13+980 to 14+020 showed two conflicting results after inversion. The thickness of the soft sediments was at points up to 6 m different. The drillhole data didn't cover more than 3,5 meters, so a clear conclusion on the accuracy of either shear-wave velocity profiles could not be made. It is possible that the result suggests that there is a more complex subsurface layering present in the area or the soil and its properties were not suitable for the use of MASW.

Tänuavaldused

Töö autor tänab oma juhendajaid Argo Jõelete hea juhendamise ja suunamise eest töö kirjutamise vältel. Tänu Martin Aavale, Kaarl Rudolf Tammile ja Raul Paadile, kes aitasid välitööd läbi viia.

Kasutatud kirjandus

- Ainsaar, L., Meidla, T., Männik, P. 2010. *Ordovician and Silurian of Estonia*. Tartu Ülikool.
- Andersen, L., Nielsen, S. R. K. 2005. Ground motion in the presence of a near-surface tunnel. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(9), 1093–1111.
<https://doi.org/10.1002/eqe.474>
- Arman, H. 2021. Correlation of P-wave velocity with mechanical and physical properties of limestone with statistical analysis. *Scientific Reports*, 11, 24104.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-03524-0>
- Brocher, T. M. 2005. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 2081–2092.
<https://doi.org/10.1785/0120050077>
- Madshus, C., Kaynia, A. M., Zackrisson, P. 2004. High-speed railway lines on soft ground: Dynamic behaviour at critical train speed. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 689–701.
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2598>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. 1998. Ground roll as a tool to image near-surface anomaly. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998, 874–877.
<https://doi.org/10.1190/1.1820162>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., Ivanov, J. 2000. Multichannel seismic surface-wave methods for geotechnical applications. *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, 11–15.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. H. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, 800–808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., Ivanov, J. 2003. Multichannel seismic surface-wave methods for geotechnical applications. *Kansas Geological Survey*, University of Kansas, 11 pp.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., Ivanov, J. 2007. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1), 60–64.
<https://doi.org/10.1190/1.2431832>
- Sheriff, R. E., Geldart, L. P. 1995. *Exploration Seismology*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 592 pp.
- Thomas J., McDonald R.. Seismic surveys – limitations and solutions: bedrock mapping and determining geo-mechanical properties for wind farm developments and slope stability studies. *TerraDat*.

U.S. Geological Survey. 1978. *Correlations between seismic wave velocities and physical properties in geologic materials*. Open-File Report, 78-1067, 94 pp.
<https://pubs.usgs.gov/of/1978/1067/report.pdf>

Xia, J., Miller, R. D., Xu, Y., Luo, Y., Chen, C., Liu, J., et al. 2009. High-frequency Rayleigh-wave method. *Earth Science*, 20(3), 563–579.

Aruanne:

Jõelet, A., Plado, J., Pedajas, K. 2025. *Rail Baltica põhitrassi pinnase vibratsioonilainete (Rayleigh wave) uuring pehmete aluspinnastega lõikudel*. Tartu Ülikool.

Internetiallikad:

Maa- ja ruumiamet, 2025. Geoportaal – Eesti riiklik ruumiametite keskkond. Kättesaadav: <https://geoportaal.maaamet.ee> (vaadatud 25.05.2025).

Rail Baltica 2024. Rail Baltica lugu: Rail Baltica – sajandi projekt, railbaltica.org (vaadatud 20.05.2024).

Raamatud:

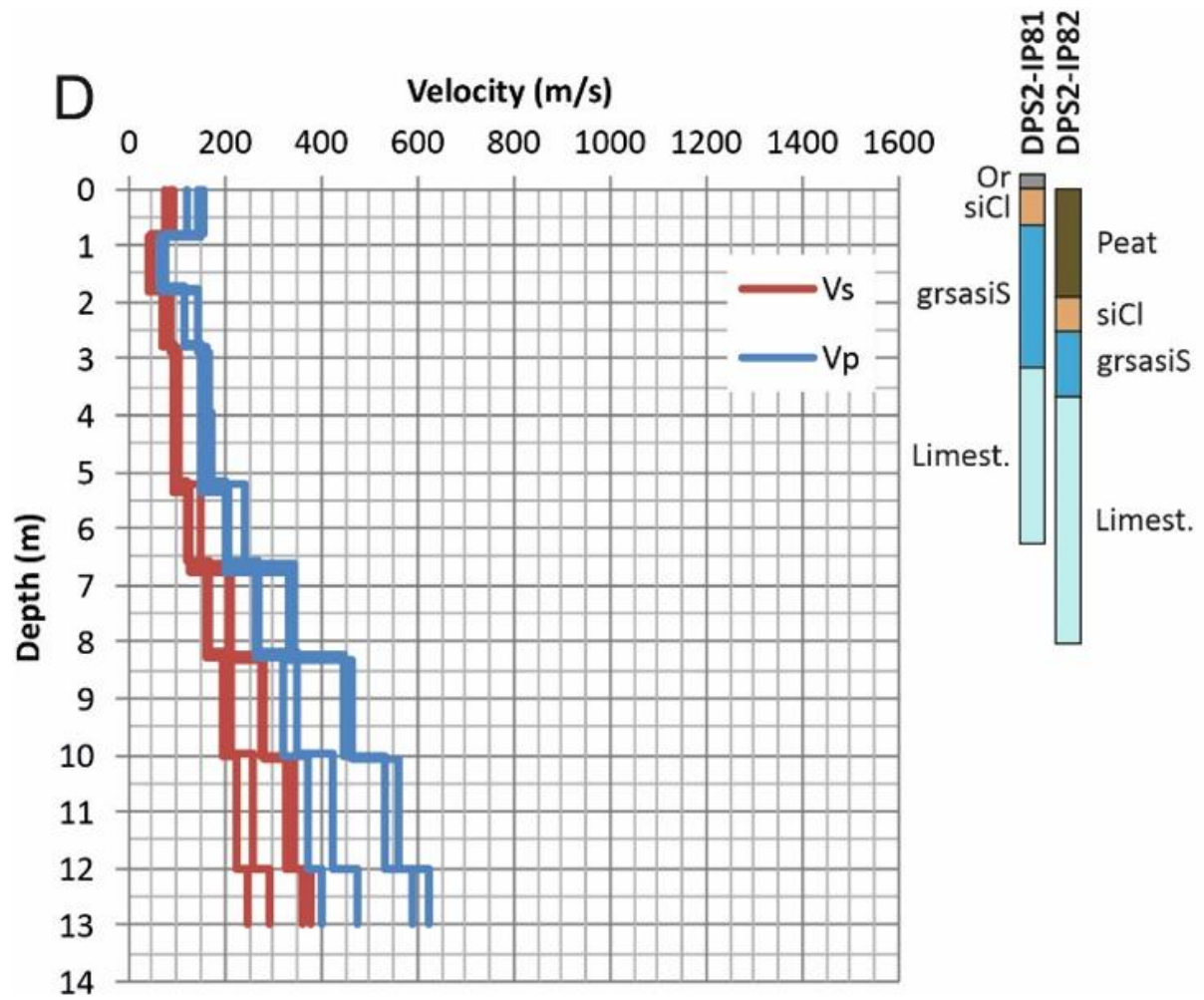
Nestor, H., Einasto, R. 1997. Ordovician and Silurian carbonate sedimentation basin. – In: Raukas, A., Teedumäe, A. (eds), *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, pp. 192–204.

Puura, V., Vaher, R. 1997. Eesti geoloogiline ehitus. – In: Raukas, A., Teedumäe, A. (eds), *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, pp. 13–32.

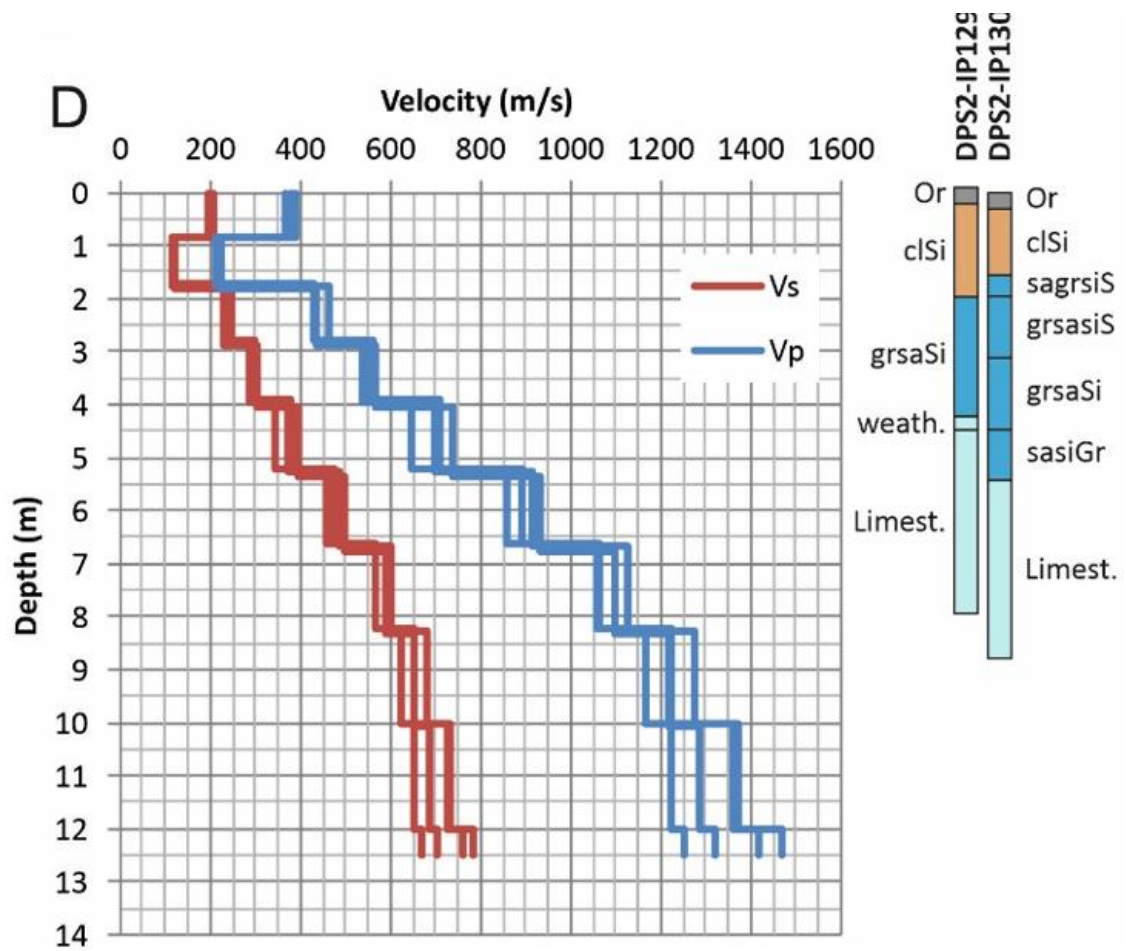
Raukas, A., Teedumäe, A. (eds). 1997. *Geology and Mineral Resources of Estonia*.
Veebiversioon: <https://geoloogia.info/geology/>

Tammeorg, O. 1991. *Geological Map of Estonia. Explanation to the Geological Map of Estonia*. Eesti Geoloogiakeskus.

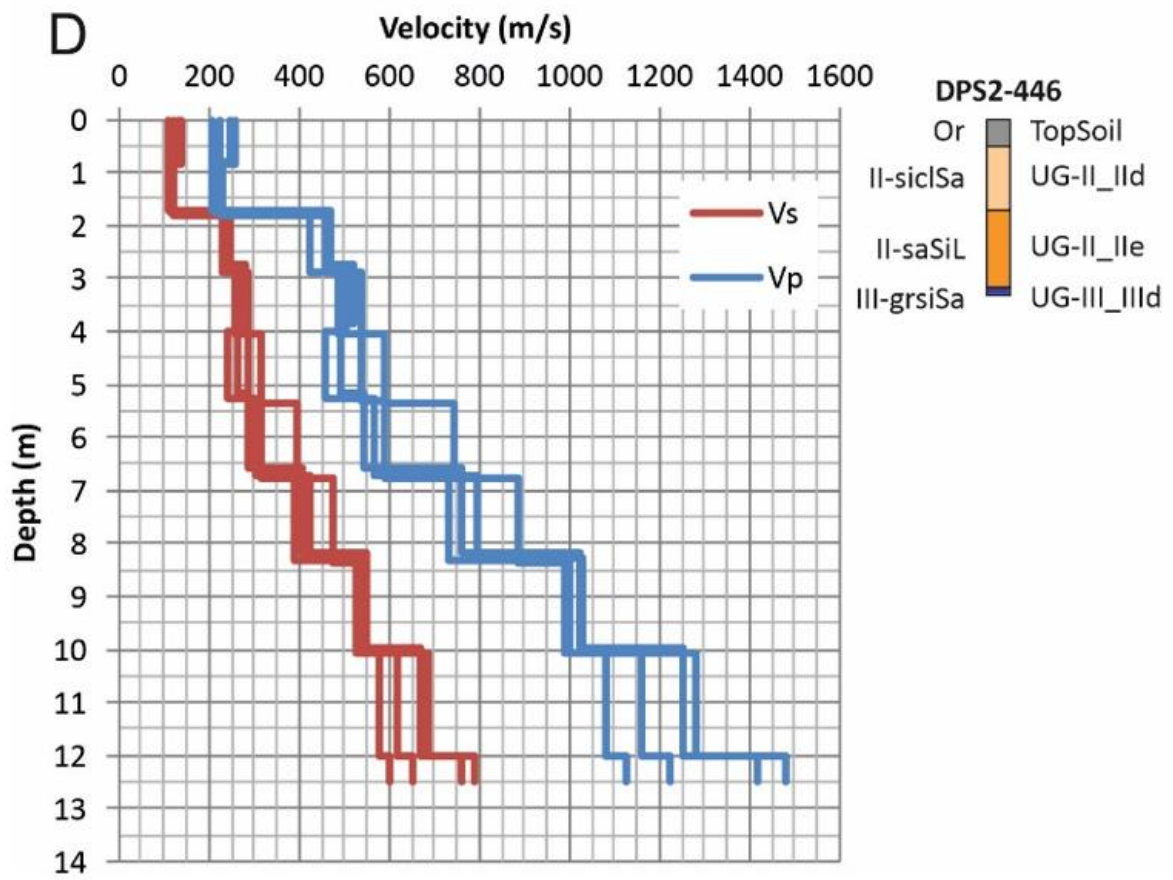
LISA 1. Puuraukude andmed pikett 8+200 juurest



LISA 2. Puuraukude andmed pikett 13+000 juurest



LISA 3. Puuraukude andmed pikett 14+000 juurest



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kiur Pedajas,

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

Seismiliste pinnalainete meetodi (MASW) piirangud ja võimalused geotehnilistel uuringutel Raplamaal

mille juhendaja on Argo Jõelet,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kiur Pedajas

26.05.2025