

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Ökoloogia ja Maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Lauri Nõmtak

**LOODUSLIKE JA TÄITEPINNASTE UURIMINE
SEISMILISTE PINNALAINETE ANALÜÜSI (MASW)
MEETODIL MUUGA SADAMA NÄITEL**
Magistritöö

Juhendajad: Argo Jõelett
Annette Talpsep

Kaitsmisele lubatud:

Juhendajad:

Osakonna juhataja:

allkiri, kuupäev

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Asukoha kirjeldus.....	6
2. Seismiliste pinnalainete analüüsi meetod.....	8
3. Materjal ja meetodika.....	18
3.1. Välitööd.....	18
3.2. Dispersioonipilt	19
3.3. Inversioon.....	20
3.4. Penetratsioonikatsed.....	21
4. Tulemused	23
4.1. Dispersioonipildid	23
4.2. Inversioon ja V_s 1D mudelid	28
5. Arutelu.....	29
6. Järeldused	42
Kokkuvõte	43
Tänuõnad	44
Summary	45
Kasutatud kirjandus.....	47
Lisad.....	54

Sissejuhatus

Nõrkade ja kokkusurutavate pinnaste uurimine on üheks keskseks geotehniliseks probleemiks. Lisaks väiksele tugevusele iseloomustab nõrku pinnaseid kompakteerumine ehitiste, liikluskoormuse ja täitepinnase koormuse all, mis põhjustab suuri vajumeid. Eestis on nõrkadeks pinnasteks enamasti savikad ja/või orgaanilist ainet sisaldavad setted, mida esineb näiteks mereäärsetel aladel, mattunud ürgorgudes, jõelammidel, aga ka näiteks nn viirsavibasseinides Pärnus, Haapsalus ja Matsalus.

Levinumad meetodid pinnaste geotehniliste omaduste, sealhulgas nõrkade pinnaste puhul eriti oluliste näitajate, tugevuse ja kokkusurutavuse, hindamiseks on puuraukude rajamine koos proovide võtmise ja laborikatsetega ning erinevad penetratsioonikatsed (löök-, suru- ja keerdpeneratsioon). Kõikide penetratsioonikatsete põhimõte seisneb selles, et pinnasesse süvistatakse seade, mis mõõdab sisuliselt pinnase vastupanu, mis on korrelatsioonis tugevuse ja/või kokkusurutavusega.

Penetratsioonikatsed annavad küll väärtuslikku infot pinnaseprofiili ja omaduste kohta vertikaalsuunas, kuid ei võimalda tuvastada kihtide pidevat pindalalist paiknemist, kuna läbilõige uuringupunktide vahel on interpretatsioon. Nii vertikaalset kui ka pindalalist läbilõiget on võimalik uurida geofüüsikaliste meetoditega. Seismiliste pinnalainete analüüs (*Multi-channel Analysis of Surface Waves – MASW*) on 1990-date aastate lõpus välja töötatud küllaltki uus meetod pinnase jäikuse hindamiseks, mistõttu saab seda kasutada ka geotehniliste uuringute jaoks. Meetod kasutab Rayleigh-tüüpi pinnalaineid, mille mõõdetud levikukiiruste põhjal tuletatakse kõige tõenäolisem ristilainete levikukiirus (V_s), mille põhjal on omakorda võimalik arvutada pinnase tugevust.

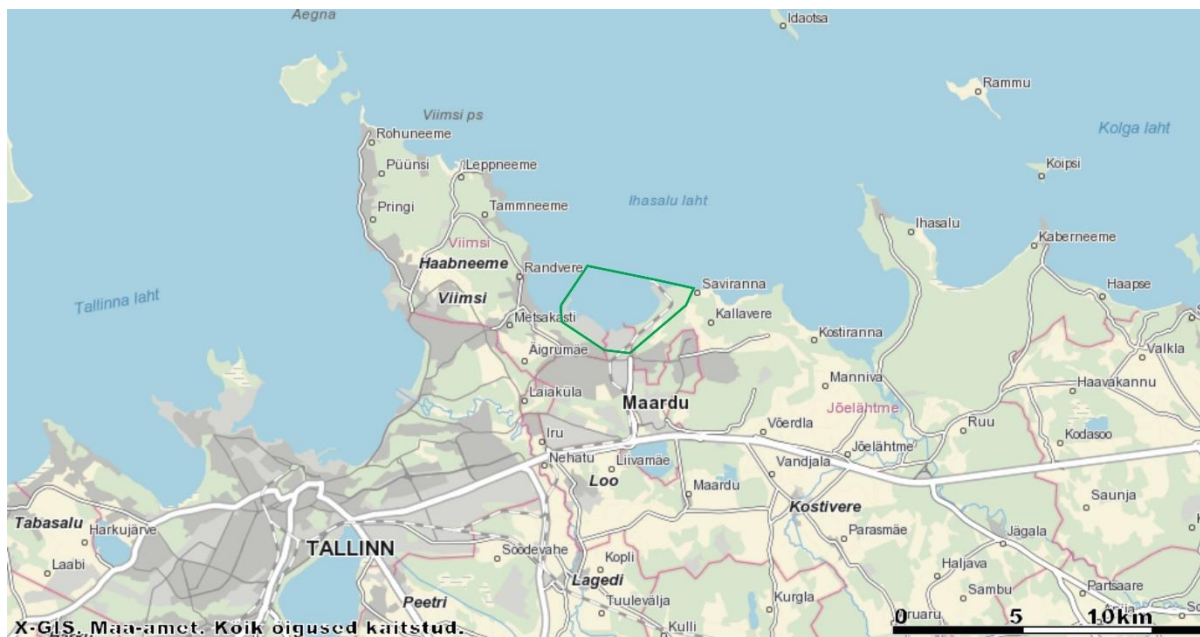
MASW-i on geotehniliste uuringute tegemisel kasutatud mujal maailmas, kuid Eestis on tehtud vaid mõned katsed töö juhendaja poolt. Meetodi sobivuse hindamiseks Eesti tingimustes on vaja seda testida kohas, kus esinevad nõrgad pinnased ning võrdluseks on olemas geotehniline andmestik. Sellistele tingimustele vastab Muuga sadam Tallinna külje all, mis annab võimaluse testida seismiliste pinnalainete analüüsi meetodit kontrollitud tingimustes. Muuga sadam paikneb osaliselt nõrkade setetega täitunud ürgorul, sadama territooriumil on tehtud suuremahulisi täitetöid ning nõrkade pinnaste all erineval sügavusel maapinnast lamab geotehnikas kaljupinnaste alla liigitatud aluspõhjaline tugev sinisavi. Ala

kohta on olemas eelnevate aruannete põhjal geotehniline andmestik, mis võimaldab saadud tulemusi võrrelda olemasolevate pinnaseomadustega ja hinnata, kas meetodit on võimalik rakendada ka teiste nõrkade pinnasete levialadel.

Käesoleva töö laiemaks eesmärgiks on testida MASW meetodi kasutamist Eesti tingimustes. Kitsamateks eesmärkideks Muuga sadama uuringualal on uurida, milline on seismiliste pinnalainete analüüsi meetodi (i) tundlikkus (kas on võimalik eristada erinevate geotehniliste omadustega kihte), (ii) lahutusvõime (kas on võimalik tuvastada näiteks tehnogeense täiteliiva ja looduslike pinnaste piiri) ja (iii) uuringusügavus antud pinnaste korral (kas õnnestub tuvastada aluspõhjalise sinisavi pealispinda ja selle peal oleva nõrkade savide kompleksi paksust). Lisaks püüti selgitada ka eesmärkide saavutamiseks sobilikke välitööde konfiguratsioone.

1. Asukoha kirjeldus

Muuga sadam asub Põhja-Eestis Harjumaal Tallinna külje all Maardu lähedal Muuga lahe ääres (Joonis 1). Uuringualaks on Muuga sadama idaosa, kuhu on kavandatud ka sadama laiendus.



Joonis 1. Muuga sadama asukoht. Põhikaart: Maa-amet 2015.

Uuringuala alla jääb lõuna-põhjasuunaline Maardu rike, mille peal on kvaternaarse teetega täitunud ürgorg (Suuroja jt, 2002) (Joonis 2). Kuna uuringuala jääb ürgoru idanõlvale, on kõik pinnakatte kihid kallutatusega lääne poole. Geoloogilise läbilõike võib jagada üldjoontes neljaks: (i) aluspõhi, (ii) jääaja setted (moreen), (iii) hilisjääaja jääjärve- ja mereliste savide kompleks ja (iv) rannikuvööndi liivad ja täitepinnased.

Uuringualal avanevad Kambriumi ajastu vanusega sinisavid. Kihi paksus Põhja-Eestis on umbes 60...100 m ja lasuv pind paikneb absoluutkõrgusel -9 kuni -22 m. Sinisavi pealispind on murenenud, murenenud osa paksus jääb 2...3 m vahele. Puutudes kokku veega, imbub see pealmistes kihtides ja niiskuse sisaldus kasvab. Seetõttu ongi sinisavi pealmine pind pehmem kui sügavam osa. Esineb ka kivistunud aleuriidikaid vahekihte, mille paksus on 2...3 m ja tugevus kaks korda suurem kui savil. (Suuroja jt, 2002)

Aluspõhi on kaetud 3...5 m paksuse jääaja sette moreeniga, mille pealispind jääb absoluutkõrgusele -18...-4 m. Moreen koosneb peamiselt sinisavi materjalist, kuid ka liivakivi tükkidest ja graniitsest kruusast. Esineb ka graniidi rahne läbimõõduga 0,4...0,6 m. (Suuroja jt, 2002)

Moreenil lasuvad hilis-jääaja järvesetted ning hilisemad meresetted. Järves on settimine toimunud veetaseme alanemisel (regressioonil). Järvesetete allosas valdab peenpurdne materjal, ühtlane pruun aleuriitne savi, mille paksus on kuni 2 m. Järvesetete ülaosa koosneb juba rohke liivaga varvilisest aleuriidist, mille paksus on 1...3 m. Hiljem, juba mere arengu käigus, on settinud savikas aleuriit, kihi paksuseks on 2...5 m. Järvesetted ning ja merelised savikad aleuriidid moodustavad nõrkade pinnaste kompleksi.

Nõrkade pinnaste kompleksil paiknevad mere edasisel taandumisel settinud jämedamad setted – aleuriit ja aleuriitne peenliiv. Aleuriidi ja aleuriitse peenliiva kihi paksus on 3...8 m. Kiht asub vahetult täitepinnase all absoluutkõrgusel -3...0 m. Enne ala täitmist aastail 2000 kuni 2001 moodustas aleuriitne peenliiv ranna. Maapinda täideti peenliivaga, täitekihi paksus on 2...5 m. Merelised liivad on tihenened ning kõrge või keskmise suhtelise tihedusega. Täitepinnase liiv aga on halvasti tihenened ja väikse suhtelise tihedusega.



Joonis 2. Uuringuala aluspõhja geoloogiline kaart koos aluspõhja reljeefiga (absoluutkõrgus, m). Kollase joonega on märgitud uuringuala, rohelisega Maardu sadam, punasega Maardu rike ja pruuni viirutusega ürgorg. Maa-ameti geoportaal, geoloogia rakendus.

2. Seismiliste pinnalainete analüüsi meetod

Pinnalaineid on seismoloogias kasutatud juba 1920ndatest aastatest, et kirjeldada Maa siseehitust. Nende laiem kasutamine algas 1950-60ndatel aastatel tänu numbrilise analüüsi arengule ja uuemale tehnikale, mis võimaldas varasemast paremini salvestada seismilisi sündmusi (Ben-Menhaem, 1995). Plahvatustel tekkivaid pinnalained on kasutatud settebasseinide geofüüsikaliseks iseloomustamiseks (Malagnini *et al.* 1995). Geotehnilistel uuringutel hakati pinnalaineid kasutama 1950ndatest aastatest, kui töötati välja *Steady State Rayleigh* meetod (Jones, 1958). 1980. aastate alguses töötati välja SASW-meetod (*Spectral analysis of surface waves*) (Nazarian *et al.* 1983, Hesev *et al.* 1982), millega oli võimalik tekitada pinnase ristilainete levikukiiruste profiile. Meetod kasutab aktiivset allikat ja kahte vastuvõtjat, mida seadistatakse korduvalt, et saavutada soovitud sagedusvahemik. Seda meetodit on efektiivselt kasutatud mitmetes geotehnilistes projektides (Stokoe *et al.* 1994). Andmeanalüüsil saadakse dispersioonikõver, arvutades faasivahe iga vastuvõtja paari kasutuskorra kohta. Müra klassifitseerimiseks kasutatakse empiirilisi kriteeriume, mis on kohandatud iga uuringuala jaoks. Iga uuringuala on ainulaadne ja seega ei saa neid kriteeriume ühtlustada. Samuti on raskendatud signaali eristamine müra, kuna kasutusel on ainult kaks vastuvõtjat. Meetod on ajamahukas ja nõuab ka suurt tööjõudu (Park *et al.* 1999a). SASW-meetod annab kasulikke tulemusi, aga interpretatsioon on keerukas ning nõuab hulgaliselt eelnevaid kogemusi (Crice, 2005).

Seismiliste pinnalainete analüüsi meetod (*MASW – Multi-Channel Analysis of Surface Waves*) on 1990ndate lõpus väljatöötatud seismilise pinnalaine uuringu meetod pinnalähedaste, kuni paarikümne meetri sügavuste kihtide kirjeldamiseks (Park *et al.* 1999a). Meetodiga saadakse tulemuseks ristilainete levikukiiruste vertikaalne profiil, mis on tähtis geotehniline parameeter. Seda meetodit on lihtsam kasutada kui teisi seismilisi uuringuid nagu peegeldunud lainete ja murdunud lainete meetodid (Park, 2013).

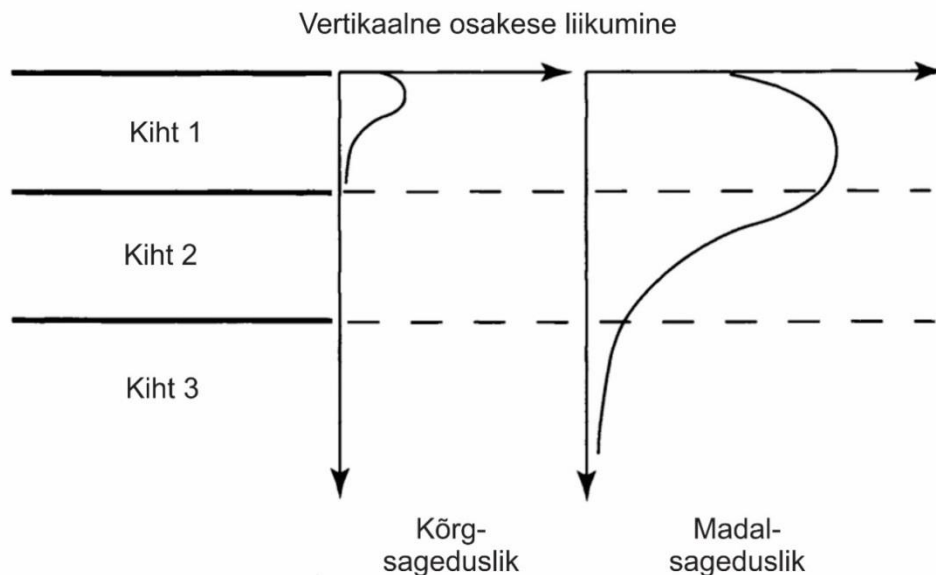
Mitme vastuvõtjaga konfiguratsioon, mida kasutab MASW, on pinnalainete uuringutel eelistatud, kuna tekitatud lained registreeritakse samaaegselt mitmes vastuvõtja asukohas korraga. Selline konfiguratsioon on sarnane teistele seismilistele uuringutele, murdunud ja peegeldunud lainete meetoditele, võimaldades kooslusi erinevate meetodite vahel (Ivanov *et al.* 2006; Socco *et al.* 2010).

Seismiliste pinnalainete analüüsi meetod kasutab horisontaalselt levivaid Rayleigh-tüüpi laineid, et teada saada pinnase elastsusomadusi. Seda meetodit on edukalt kasutatud aluspõhja 2-D kaardistamisel (Miller *et al.* 1999a) ja nõrkade kohtade leidmisel (Miller *et al.*, 1999b), Poissoni suhte muutlikkuse kirjeldamisel (Ivanov *et al.* 2000a), ristilainete kiiruste profiilide tekitamisel (Xia *et al.* 1999b), tühimike avastamisel (Park *et al.* 1998a) ja merepõhja setete seismilisel kirjeldamisel (Park *et al.* 2000; Ivanov *et al.* 2000b).

Ristilainete levikukiiruse profiile saab kasutada ehitusgeoloogilistes rakendustes. Näiteks pinnase tugevuse leidmiseks kasutatakse ristilainete keskmist kiirust 30 m sügavuseni (Borcherdt, 1994). Eriti tähtis on see maavärina rohkete aladel. Pinnalainete uuringu meetodid on üks võimalustest ristilainete kiiruste mõõtmiseks. Need kuuluvad pinnapealsete meetodite hulka, mille puhul allikas ja vastuvõtjad on maapinnal ja puudub vajadus rajada puurauke. Sellesse klassi kuuluvad ka murdunud ja peegeldunud lainete meetodid. Maasiseste meetodite alla kuuluvad puuraugu kirjeldamine, löökpenetratsioonkatsed, surupenetratsioonkatsed, keerdpenteerimiskatsed ja tiivikkatsed. Ristilainete levikukiirusi on võrreldud teiste erinevate geotehniliste katsemeetoditega (standardse penetratsiooni-, surupenetratsiooni- ja tiivikkatsete) tulemustega ja omavahel korreleeritud (Wair *et al.* 2012). Seismiliste pinnalainete analüüsil meetodil saadud ristilainete levikukiiruseid on edukalt võrreldud ka puuraugust saadud ristilainete kiiruste andmetega. Andmed kattuvad ja tulemuste erinevus kahe meetodi vahel jääb 15% piiresse ja on juhuslik (Xia *et al.* 2002).

Seismilistel uuringutel tekivad nii keha- kui ka pinnalained. Suurem osa tekitatud energiast avaldub Rayleigh-tüüpi pinnalainetena (Richard *et al.* 1970). Rayleigh lained on pinnalained, mis levivad maapinna ülemistes kihtides ja on tulemus ühinenud risti- ja pikilainetest (Rayleigh, 1885). Vasakult paremale leviva Rayleigh laine osakeste liikumine on elliptiline, vastupäeva ning vertikaaltasandil (Babuska ja Cara, 1991). Pikema lainepikkusega lained tungivad sügavamale kui lühema lainepikkusega lained ja annavad tavaliselt kõrgemaid faasikiiruse väärtusi. Lühema lainepikkusega lained sõltuvad pinnalähedaste kihtide omadustest. Seega igal pinnalaine lainepikkusel on kindel faasikiirus (Babuska ja Cara, 1991). Maapinnas levivate Rayleigh lainete hajuv olemus on seismilise pinnalainete analüüsi meetodi (MASW) aluseks. Joonis 3 näitab osakese vertikaalset liikumist heterogeenses kolmekihilises keskkonnas. Vasakul on näidatud vertikaalne osakese liikumine kõrgel sagedusel ehk väikesel lainepikkusel. Suurem osa liikumisest toimub maapinna lähedal, ühe

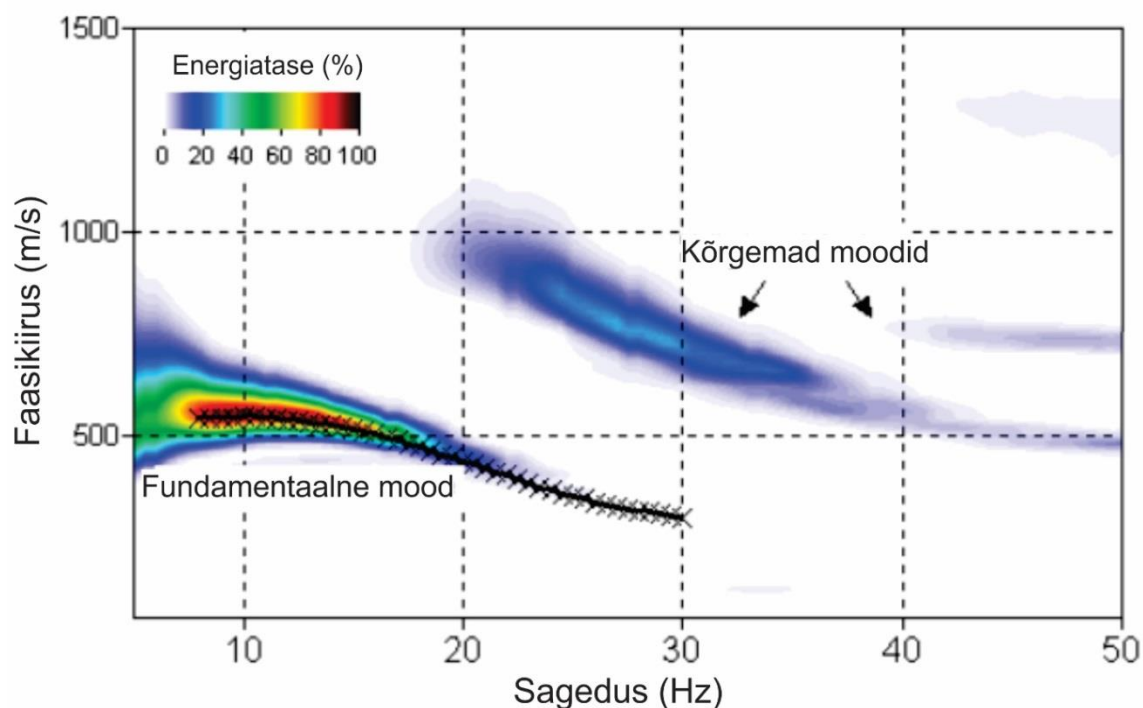
lainepikkuse sees (esimeses kihis). Seega mõjutavad Rayleigh laine kiirust ainult esimese kihi omadused. Paremalt on ära toodud osakese vertikaalne liikumine madalal sagedusel ehk pikal lainepikkusel. Osakese liikumine ulatub sügavamale pinnasesse ja esineb eelkõige esimeses ja teises kihis ning vähem komandas kihis. Seega madalsagedusliku Rayleigh laine kiirus sõltub kõigi kolme kihi omadustest. (Rix, 2005)



Joonis 3. Vertikaalne osakeste liikumine madalal ja kõrgel sagedusel kolmekihilises keskkonnas. (Rix, 2005)

Pinnalaine jaguneb sageduskomponentideks, millel igaühel on oma levikiirus ehk faasikiirus. Seetõttu on ka igal tekkinud sagedusel oma lainepikkus (Park *et al.* 1999a). Seda omadust kutsutakse dispersiooniks. Pinnalaine dispersiooni seostatakse aluspinna omadustega, sest erinevad sagedused läbivad erinevaid sügavusi erinevatel kiirustel.

Rayleigh laine kiirused tulevad laiast sagedusvahemikest, mis kokku annavadki dispersioonikõvera. Joonis 4 on esitatud dispersioonikõvera näide, mis on iseloomulik kohtadele, kus pinnase jäikus suureneb koos sügavuse kasvuga. Madalsageduslikud lained pikemate lainepikkustega tungivad sügavamatesse kihtidesse, mis tihti on jäigemad ja seega ka suuremate ristilainete levikiirustega.



Joonis 4. Dispersioonipilt. Musta joonega on määratud fundamentaalne dispersioonikõver. (Park et al., 2007)

Elastusmooduleid kasutatakse kirjeldamiseks pinnase käitumist pinge olukorras, kui see on koormatud. Nende põhjal planeeritakse mullatöid, projekteeritakse hoonete vundamente, ja monitooritakse olemasolevate ehitiste turvalisust. Kasutatakse Youngi ja nihkemoodulit. Youngi moodul kirjeldab deformatsiooni piki pinge suunatelge. Nihkemoodul kirjeldab kujumuutust, mis on seoses materjali viskoosusega (Park, 2013).

Nihkemoodul (Võrrand 1) on seotud tiheduse ja ristilainete levikukiirusega ning Youngi moodul (Võrrand 2) lisaks nendele veel Poissoni suhtega. Ristilainete levikukiirus määrab suuremas osas nende mõlema koguväärtuse. Looduslikes pinnastes muutub ristilainete levikukiirus suuremal määral kui teised parameetrid, seega on täpne ristilainete levikukiiruste määramine geotehnilikas vajalik (Park, 2013).

$$\mu = \rho V_s^2$$

Valem 1. Nihkemoodul. ρ - tihedus, V_s - ristilainete levikukiirus.

$$E = 2\rho V_s^2(1 + \sigma)$$

Valem 2. Youngi moodul. ρ - tihedus, V_s - ristilainete levikukiirus, σ - Poissoni suhe.

Samal sagedusel, kuid erineva faasikiirusega ja lainepikkusega Rayleigh laineid kutsutakse moodideks. Kõige madalamat faasikiirust mingi sageduse juures kutsutakse fundamentaalseks või esimeseks moodiks. Fundametaalsest moodist suuremat faasikiirust nimetatakse teiseks moodiks jne. Korruga võib esineda mitu moodi. Erineva sagedusega Rayleigh lainetel võib olla sama lainekiirus (Joonis 4). Kõrgemad moodid ei sõltu fundamentaalsest moodist. Kõrgemad moodid võivad tekkida siis, kui üks madala ristilaine levikukiirusega kiht asetseb kahe suurema ristilaine levikukiirusega kihi vahel (Stokoe *et al.* 1994). Kõrgemad moodid tulevad dispersioonipildis paremini nähtavale, kui esimese vastuvõtja kaugus allikast suureneb (Park *et al.* 1999b). MASW meetodiga on võimalik registreerida kõrgemaid moode (Park *et al.* 1999c). Erinevate moodide olemasolu ja halb dispersioonipildi kvaliteet võib tekitada segadust moodide määramisel. Kõrgem mood võidakse määratleda kui fundamentaalne mood. Vale määratlusega dispersioonikõver võib inversioonil põhjustada vigase ristilainete levikukiiruse profiili. (Zhang ja Chan, 2003). Samuti võib juhtuda erinevate moodide segunemine ja määramine üheks moodiks. Kasutades kõrgemate moodide andmeid, saadakse rohkem informatsiooni maapinna omadustest ja inversioonil suureneb ristilainete levikukiiruste tulemuste täpsus (Xia *et al.* 2000).

Sageduse ja faasikiiruse seos avaldub dispersiooni pildil dispersioonikõverana. Dispersioonipildi saamiseks kasutatakse erinevaid transformatsioone ning dispersiooni kõver saadakse spektraalselt maksimumilt. Algandmed (aeg-ruum) transformeeritakse kas sagedus-lainenumbriga või sagedus-faasikiiruse domeeni. Esimese alla kuulub *f-k* meetod ning teise alla *pi-omega* (McMechan ja Yedlin, 1981) ja faasinihke meetod (Park *et al.*, 1998b). *F-k* meetodiga saadud dispersioonipildid on kõige madalama resolutsiooniga. Faasinihke meetod on kõrgema resolutsiooniga kui *pi-omega* meetod. (Moro *et al.* 2003).

Kasutades kahedimensionaalset lainevälja transformatsiooni nagu sagedus-lainenumbriga transformatsioon, muudetakse aeg-ruum domeenis algandmestik sagedus-faasikiiruse domeeni, kus dispersiooni mustrid väljenduvad lainevälja maksimumina. Graafikult märgitakse dispersioonikõver, mida kasutatakse inversioonil. Dispersioonikõvera täpne määramine on

oluline, sest see on edaspidise inversiooni aluseks. Signaali ja mürataseme suhe mõjutab dispersioonipiltidelt kõvera määramist olulisel määral.

Kõrge signaali ja mürataseme suhe tagab täpsemad tulemused. MASW meetod kasutab Rayleigh-tüüpi pinnalaineid, mida teistel seismomeetritel uuringutel peetakse müraaks. Kuna aktiivse allika impaktil tekkivad Rayleigh-tüüpi lained on kõige tugevama energiaga, siis tavaliselt tagab see kõrge signaali ja mürataseme suhte ning muudab andmete kogumise välitöödel ja pärastise andmetöötluse lihtsamaks ja efektiivsemaks. Kõrge signaali ja müra suhe jääb allikast umbes 5–100 m kaugusele. Lähemal ei ole veel pinnalained täielikult väljakujunenud ning kaugemal kui 100 m muutub laine energia liiga väikseks ja jääb müra varju (Park, 2013).

Inversioon on MASW meetodi viimane etapp, mis toodab ka lõpptulemuse – ristilainete levikukiiruse 1D profiili. Inversioon ennustab kihilise maapinna mudeli parameetreid, ning muudab laine levimise omadused ümber kihilise maapinna mudeli omadusteks.

Rayleigh-tüüpi laine faasikiirus on funktsioon sagedusest ja neljast pinnast iseloomustavast parameetrist: piki- ja ristilaine, tihedus ja Poissoni suhe. Rayleigh laine dispersioon sõltub eelkõige ristilaine levikukiirusest ja vähem pikilaine levikukiirusest, Poissoni suhtest ning tihedusest, mida hinnates saab luua kihilise maa mudeli. Ristilainete levikukiiruse saab tuletada Rayleigh pinnalaine faasikiirusest. (Dorman ja Ewing, 1962) MASW kasutab ristilainete levikukiiruste saamiseks Rayleigh-tüüpi pinnalaineid, mis kihilises keskkonnas hajuvad ehk dispergeeruvad. Erineva sagedusega lained liiguvad eri kiirustel. Dispersioon sõltub eelkõige pinnalainete poolt läbitava materjali ristilainete levikukiirusest ning vähem pikilainete levikukiirustest ja tihedusest. Seega oletades realistlikud väärtused pikilainete levikukiirusele ja tihedusele ning analüüsides hajumist, saab määrata ristilainete levikukiirust (Xia *et al.* 1999a).

Inversiooni eesmärgiks on määrata profiilis iga kihi ristilainete levikukiirus. MASW meetodil teostatakse inversioon tavaliselt dispersioonikõverate alusel. Reaalse inversiooni aluseks on täpne dispersioonikõverate määramine. Seejärel arvutatakse teoreetilised dispersioonikõverad erinevate maapinna mudelitele, mida võrreldakse tegelikega. Selleks kasutatakse erinevaid modelleerimise tüüpe, millest kõige tavalisem on Schwab ja Knopoff (1972). Ristilainete

levikukiiruse profiili uuendatakse korduvalt kuni teoreetiliste ja mõõdetud dispersioonikõverate erinevus on väiksem või kuni sobivus on rahuldav.

Mõõdetud ja teoreetilise dispersioonikõvera sarnasuse hindamiseks kasutatakse standardhälvet ehk ruutkeskmist viga. Kõige väiksema veaga ristilainete levikukiiruse profiil loetakse lõplikuks lahendiks. Lisaks kasutatakse deterministliku meetodit nagu vähimruutude meetod (Xia *et al.* 1999a) ja juhusliku meetodit nagu Monte Carlo (Socco ja Boiero, 2008). Kõige väiksema veaga mudel ei pruugi olla kõige realistlikum.

Inversioonil on lisaks dispersioonikõveratele kasutatud pinnalainete meetodi erinevatel etappidel esinevaid andmete tüüpe.

Algandmete inversioonil võrreldakse välitöödel mõõdetud seismilist andmestikku tehniliku algandmestikuga (Forbriger, 2003). Selle eeliseks on hilisema andmetöötlusel, dispersioonipildi loomisel ja dispersioonikõvera määramisel, tekkida võivad vead.

Dispersioonipildi inversioon kasutab dispersioonipildi andmestikku. Seega ei ole vajalik dispersioonikõvera määramine (Ryden ja Park, 2006). See meetod välistab mitme moodi andmestiku olemasolul moodide määramisel tekkivad vead.

Multimodaalne inversioon kasutab lisaks fundamentaalsele moodile ka kõrgemaid moode. See suurendab inversiooni täpsust vähendades erinevate mudelite valikut (Beatty *et al.* 2002). Kasutades inversioonil ainult fundamentaalse moodi dispersioonikõveraid on ristilainete levikukiiruste tulemuste usaldusväärsus 15% (Xia *et al.* 1999b). Inversioon muutub ebatäpsemaks juhtudel, kui fundamentaalse moodi määramine on raskendatud, sest määramist segavad kehalained või kõrgemate moodide Rayleigh lained. Väikesed muudatused andmestikus põhjustavad suure kõikumise inversiooni mudelis. Vea vähendamiseks saab määrata inversioonile piirangud või kasutada lisaandmestiku. Kui kumbagi kasutada ei saa, siis võib vähendada ristilainete levikukiiruste mudeli resolutsiooni (Xia *et al.* 2000).

Mõnikord on kõrgemate moodide andmed vajalikud, sest lühikese lainepikkusega fundamentaalse moodi andmed on varjatud kõrgema-sageduslike andmetega, kuid kus kõrgemad moodid paistavad välja. Kõrgema moodi andmestikuga saab näha sügavamale (rohkem kui lainepikkus) kui täpselt sama lainepikkusega fundamentaalse moodi andmestik (vähem kui lainepikkus). Kasutades inversioonil lisaks fundamentaalsele ka kõrgemaid moode saab täpsema ristilainete levikukiiruse tulemuste. (Xia *et al.* 2000)

Seismiliste pinnalainete meetodi saab jagada kasutatava allika alusel kaheks. Aktiivse seismilise pinnalainete analüüsi meetodil tekitatakse pinnalaineid allikaga, mille kokkupõrge maapinnaga tekitab pinnase sees laineid, näiteks vasaraga. Passiivne seismilise pinnalainete analüüsi meetod kasutab ära juba keskkonnas eksisteerivaid laineallikaid, mis võivad olla nii looduslikud (äike) kui inimtekkelised (liiklus).

Aktiivse MASW meetodit tutvustati esimest korda 1999 a. See on kõige tavalisem MASW uuringu tüüp. See kasutab traditsioonilist seismilise uuringu konfiguratsiooni, kus laineid tekitatakse impulsiivselt, vastuvõtjad on paigutatud lineaarselt ja andmeid kogutakse rullimise (*roll-along*) meetodil. See kasutab pinnalaineid, mis levivad horisontaalselt allikast vastuvõtjateni. See annab ristilainete levikukiiruste informatsioon olles kulu ja ajasäästlik. Maksimaalne uuringusügavus on 10-30 m, aga see oleneb uuringu asukohast ja allikast. (Park *et al.* 2007)

Nõudlus suurema uuringusügavuse järgi kasvab. Saamaks kätte madala sagedusega lained dispersioonikõvera lõpus, et kasvatada uuringusügavust mõne meetri jagu, läheb vaja mitu suurusjärku suuremat aktiivse allika energiat, muutes need ebapraktilisteks ja ebaökonomseteks.

Passiivselt tekkivad pinnalained on madala sagedusega (1-30 Hz) ja lainepikkustega mõnest kilomeetrist kuni mõnekümne meetrini. See tagab suurema uuringusügavuse. Selle meetodi eelkäija on MSM (*microtremor survey method*) meetod, kus kasutatakse ainult piiratud arvu vastuvõtjaid (10). Passiivne MASW kasutab rohkem (tavaliselt >24) vastuvõtjaid. MSM kasutab nii looduslikke kui ka inimtekkelisi laineallikaid (Okada, 2003). Võrreldes MSM meetodiga on passiivse MASW meetodi välitööd paindlikumad, andmete töötlusel töökindlam ja suurema resolutsiooniga.

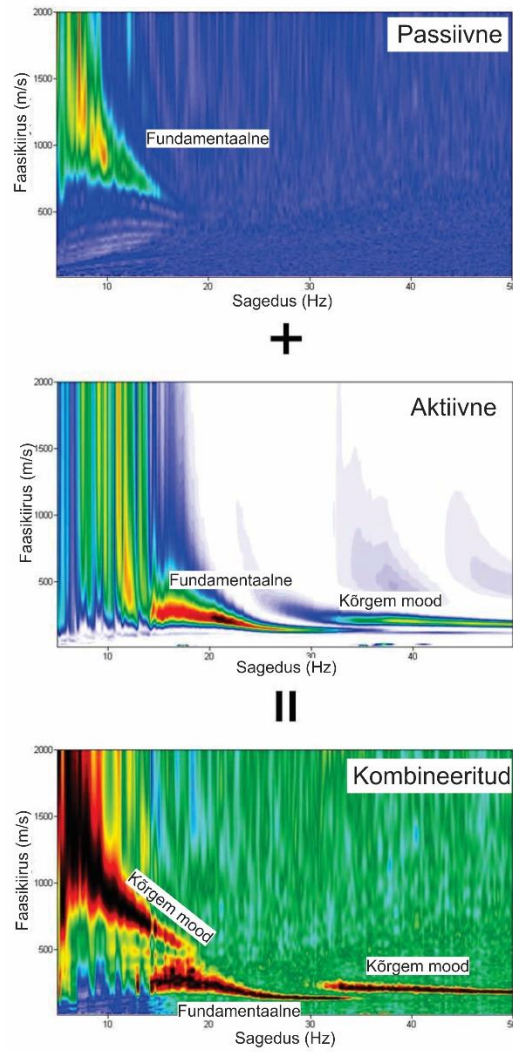
Passiivne MASW jaguneb välitööde logistika ja saadava ristilainete levikukiiruste profiilide põhjal omakorda kaheks. Kaug-passiivne ja passiivne teeäärne MASW. Esimese meetodiga saadakse 1D profiil kõikidest kihtidest kuni 100 m raadiuses ja sügavusel. Teise meetodiga saadakse 2D profiil kuni 100 m sügavuseni, aga uuringu kaugus sõltub vastuvõtjate liini

pikkusest. Mõlemad meetodid kasutavad pinnalaineid, mis on inimtekkelised (Park *et al.* 2007).

Kaug-passiivne meetod kasutab kahedimensionaalset sümmeetrilist vastuvõtjate paigutust, näiteks risti, kolm- ja nelinurkselt või ringikujuliselt. Selline konfiguratsioon tagab kõige täpsema ühedimensionaalse ristilainete levikukiiruste hindamise, kuid vajab suurt ala ja välitööd on ajamahukad. Meetod on kasulik siis, kui on vaja hinnata regionaalselt ristilainete levikukiiruseid. Asümmeetrilised konfiguratsioonid ei ole soovitatavad, sest nii registreeritakse kindla leviku suunaga pinnalained suurema energiaga kui tegelikult ning tulemused ei pruugi kirjeldada reaalses keskkonda uuringuala all (Park *et al.* 2007).

Passiivne teeäärne meetod kasutab tavalist lineaarset vastuvõtjate liini ja neid pinnalaineid, mida tekivad liiklusega. Meetod ei vaja nii suurt välitööde ala ja on ka vähem ajakulukam kui kaug-passiivne meetod, kuid seetõttu kaotab täpsuses, mis tavaliselt erineb võrdlustes 10% ulatuses. Vastuvõtjate liin paigutatakse kõnnitee või sõidutee äärde ja liigutakse edasi rullides. Lisaks võib pikal ajavahemikul, u 30 s jooksul salvestada andmeid aktiivse allika impaktil liini alguses, millega saadakse koheselt informatsiooni ristilainete levikukiiruste kohta nii madalatest kui ka sügavamatest kihtidest (Park *et al.* 2008)

Mõnikord on kasulik ühendada aktiivsel ja passiivsel uuringul saadud dispersioonikõverate andmed. Esiteks, et suurendada analüüsitava sagedusvahemiku. Tavaliselt saadakse passiivse meetodiga madalama sagedusega lainete dispersioonikõverad ja aktiivse meetodiga kõrgema sagedusega dispersioonikõverad. Kui need ühendada saadakse suurem uuritav sagedusvahemik ja seega ka täpsem dispersioonikõver, mis tagab täpsema inversiooni ja täpsema ristilainete levikukiiruste profiili. Teiseks (Joonis 5), et paremini identifitseerida dispersioonikõverate moode (Park *et al.* 2005).



Joonis 5. Näide valest moodide identifitseerimisest. Ühendades aktiivse ja passiivse meetodi selgub, et algselt fundamentaalseks määratud on tegelikult kõrgem mood (KGS koduleht).

3. Materjal ja meetodika

3.1. Välitööd

Välitööd toimusid kahel korral 2014. a mais ja juunis AS Tallinna Sadama Muuga sadama idaosas konteinerterminaali ja söeterminaali vahelise alal. AS Tallinna Sadama arenguplaani kohaselt sooviti rajada uus terminaliala ja selleks tõsteti maapinna kõrgust 2000–2001 aastail 2–5 m paksuse täitepinna kihiga, suurendades sel moel maismaa pindala (AS Tallinna Sadam arendusplaanid). Seismiliste pinnalainete analüüsi meetodi profiil pikkusega 1150 m asus sadama idaosas keskel täidetud alal autoteest paralleelselt põhja pool (Joonis 6). Profiili suund oli kirdest edelasse. Asukoht oli väga mürarikas. Müra allikateks olid läheduses asuv aktiivselt töötav sadam. Vahetus läheduses asus pidevalt kasutatav sõidutee ja sellest natukene eemal raudtee.



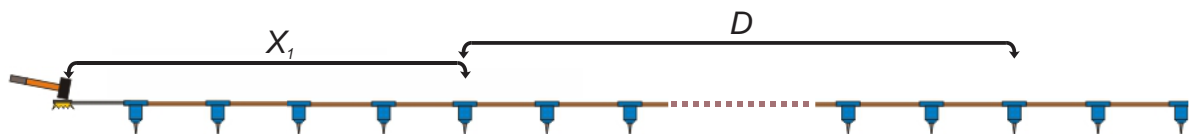
Joonis 6. Seismilise profiili (oranžid täpid) ja töös kasutatud geotehniliste puuraukude ja penetratsioonikatsete (kollased täpid) asukohad.

Välitöödel kasutati aktiivset seismiliste pinnalainete analüüsi meetodit. Välitöödel kasutati 72-kanaliga seismomeetrilist süsteemi, mis jagunes kolmeks järjestikuks liiniks (3x24 kanalit). Kasutati kolme seismomeetrit Summit. Vastuvõtjateks olid 4,5 Hz geofonid, mis olid paigutatud 2 m vahemaadega. Kokku oli liini pikkus 142 m. Seismilised pinnalained tekitati 8 kg vasaraga, iga 4 m tagant (üle ühe geofoni paari). Igas punktis summeeriti 8 lööki, et

parandada signaali ja vähendada müra esinemist tulemustes. Kuna töid tehti pehmel täitepinnasel, kasutati löögi alusena metallplaati. Edasi liiguti rullimise meetodil. Laineid tekitati esimesel liinil, seejärel liigutati see liin kolmandaks ning tegevust korrati kuni profiili lõpuni. Väljas registreeriti kõigi kanalite andmed, kuid andmetöötleses kasutati ainult teatud kaugusvahemikus asuvate geofonide andmeid.

3.2. Dispersioonipilt

Dispersioonipilt sõltub mõningal määral sellest, millisel kaugusel allikast asuvate kanalite andmeid kasutatakse. (Joonis 7)



Joonis 7. X_1 on esimese aktiivse vastuvõtja kaugus allikast. D tähistab aktiivse liini pikkust.

Hindamaks geofoniliini pikkuse D mõju dispersioonipildile, valiti välja kogu profiili andmestikust 5 löögikohta, millest saadud dispersioonipildid olid omavahel kõige rohkem erinevad, kuid millest igäüks iseloomustas profiili pikemas lõigus iseloomulike dispersioonipilte. Nendeks punktideks olid 6, 88, 176, 908, 964 m, mis markeerivad allika asukohta profiilil. Dispersioonipildi tundlikkust kasutatava geofoniliini pikkusele kontrolliti pikkustega $D=20, 40, 60, 80$ m. Esimese vastuvõtja asukohaks võeti alati 10 m allikast, sest eeldati, et enne seda piiri ei ole pinnalainete levik täielikult välja kujunenud. Vastavat suurust soovitavad ka mitmed allikad (Park *et al.* 2002). Kui muuta liinipikkust, siis muutub ka keskpunkt, millele dispersioonipilt omistatakse. Kui liinipikkus oli 80 m, siis esimese vastuvõtja kaugus allikast oli 10 m ja viimasel 90 m. Seega keskpunkt asus 45 m kaugusel allikast ning dispersiooniga kirjeldati läbilõiget profiili selles kohas. Kui liinipikkus oli 60 m, siis vastavalt ka kirjeldatav keskpunkt asus 35 m kaugusel allikast. Algandmetest ja varasematest aruannetest võis järeldada, et kihtide horisontaalne muutlikus ei ole nii suur, et

see mõjutaks dispersioonipiltide väljanägemist. Seetõttu hindamisel keskpunkti nihkumist arvesse ei võetud.

Tarkvaraga "Geopsy" toodeti dispersioonipildid, mis baseeruvad erinevate pinnalaine sageduste saabumisaegadel, amplituuditele ja faasidele (Wathelet, 2005). Tarkvara kasutab f - k (sagedus-lainenumber) transformatsiooni. Vaadeldi dispersioonipilte nii maksimum energia normaliseerimisega (*maximum beam power*) kui ka ilma. Maksimum energia normaliseerimist kontrollib saadaval olev energia antud sagedusel ja energia hulk, mis levib antud kiirusel. Normaliseerimine toimub siis, kui energia jaotus vaadeldaval kiirusel ei ole kogu sagedustel konstantne. Dispersioonipildi spektraalsele maksimumile on normaliseeritud üle kõigi sageduste sama väärtus. Ilma normaliseerimata ei pruugi näha täieliku dispersioonipilti üle kõigi sageduste, sest võib esineda lünki, mis on tingitud allikast, geofonidest või pinnasest. Kuid vaatlemaks puhast energia väärtust dispersioonipildil, on see kasulik.

3.3. Inversioon

Inversiooni aluseks on eelnevalt dispersioonipiltidel määratud disperatsioonikõverad, mida võrreldakse tarkvara enda loodud mudelitega. Mudelid on seotud parameetritega, milleks on risti- ja pinnalainete levikukiirus, Poissoni suhe, tihedus ja kihtide paksused.

Ristilainete kiiruste inversiooniks kasutatud tarkvara „Geopsy“ võimaldab sisestada algsed parameetrite vahemikud, mis iseloomustavad piirkonna pinnaseid. Seetõttu on vajalik eelnev oletus või kindel informatsioon kihtide kohta uuringualal. Parameetrite vahemike määramine annab inversioonile piiritluse ja võimaldab inversioonil hõlpsamini leida tõenäolisema ristilainete kiiruste läbilõike.

Tarkvara kasutatava algoritmiga (*neighbourhood algorithm*) otsitakse mudeleid multidimensionaalses parameetrite ruumis. Algoritm tekitab eelnevalt defineeritud parameetrite piires juhuslikud mudelid ning arvutatab nendele disperatsioonikõverad. Kõikide algselt tekitatud mudelite tõenäosus on võrdne. Arvutatud ja reaalse disperatsioonikõvera võrdlusel saadakse vea väärtus, mis näitab kui erinev on arvutatud kõver tegelikust. Kui kõikide tekitatud mudelite viga on teada, otsitakse parameetrite ruumis kohad, kus kõige tõenäolisemalt asub õige mudel. Seejärel tekitatakse uus kogus mudeleid, rohkem ruumi

nendes kohtades, kus tõenäoliselt kõver asub ning vähem seal, mis nii tõenäosuslikud ei olnud.

Kõverate vea arvutamisel kasutatakse Voronoi geomeetriat. Iga algselt tekitatud mudeli ümber asub üks regioon. Koht, kus asub mitu väikse veaga regiooni, loetakse potentsiaalseks õige mudeli asukohaks. Uued, tekitatud juhuslikud mudelid lisatakse olemasolevatele ning muudetakse ka regioonide geomeetriat.

Viga arvutatakse tarkvaras valem 3, kus x_{di} on tegeliku kõvera kiirus sagedusel f_i , x_{ci} on arvutatud kõvera kiirus samal sagedusel (f_i), σ_i on arvestatud sageduste määramatus ja n_f nende sageduste arv. Vea väärtus on peaaegu võrdne kahe kõvera erinevusega protsentides e vea väärtus 0,1 näitab erinevus tegeliku ja arvutatud kõvera vahel on ca 10 % (Wathelet, 2008).

$$Viga = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_f} \frac{(x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n_f}}$$

Valem 3. Tegeliku ja arvutatud kõvera vahelise vea arvutamine.

Inversioonil mudeldati läbilõikeid 4 kihilisena ning võeti arvesse kohalike pinnaste eeldatavaid omadusi.

Inversioonil saadud ristilainete läbilõigete tulemuste kontrollimiseks viidi sama dispersioinkõveraga inversiooni protsessi läbi mitu korda ja võrreldi saadud tulemusi. Kui tulemused tulid sarnased mitmel korral, võis inversiooni õigeks lugeda. Ühe inversiooni protsessi käigus toodeti suur hulk, u 50 000 – 100 000 mudelit, kuni saavutati rahuldav arvutatud ja tegeliku kõvera viga, mis oli väiksem kui 0,02. Inversiooni protsess loeti lõppenuks siis, kui uute mudelite tekitamisel vea väärtus märgatavalt ei vähenenud.

3.4. Penetratsioonikatsed

Võrdluseks kasutati varem Muuga sadamas läbi viidud geotehniliste uuringute andmeid, peamiselt löökpenetratsioonikatsetel saadud redutseeritud löökide arvu (N_{20}). Andmed pärinevad IPT Projektijuhtimine OÜ aruannetest (IPT Projektijuhtimine OÜ, 2003, 2004 ja 2014) ning AS GIB aruandest (AS GIB, 1995). Löökpeneratsioonikatse (LP) ehk dünaamiline penetratsioonikatse (DP) seisneb koonuse süvistamises pinnasesse löökidega,

kasutades kindla massi ja langemiskõrgusega vasarat. Penetratsioonitakistust iseloomustatakse löökide arvuga, mis kulub 20 cm pinnasekihi läbimiseks (Eesti Standardikeskus, 2008).

Redutseeritud löökide arv (N_{20}) saadakse välitöödel registreeritud löökide arvu (n_{20}) korrigeerimisel energiakao ja varraste sügavuse suunas kasvava massiga, kasutades valemit GOST 19912-81 (1987):

$$N_{20} = n_{20} \cdot K_d/K_0$$

K_d – energiakadu konkreetsel sügavusel

K_0 – energiakadu sügavusel 0–1,5 m

Energiakadu arvutatakse, kasutades valemit:

$$K_{0,d} = (M_h + e^2 \cdot M_r)/(M_h + M_r)$$

M_h – vasara mass

M_r – alasi ja varraste mass

e – efektiivsustegur, võrdne 0,56-ga

Empiirilisel on näidatud, et Rootsi standardile vastava löökpenetratsioonikatsega (Muuga sadamas kasutatud meetoodika) saadud redutseeritud löökide arv (N_{20}) on ligikaudu võrdne standardpenetratsioonikatses (STP) saadud löökide arvuga 30 cm läbimiseks (SPT N_{30} , *bpf* = *beats per feet*) (Bergdahl. & Ottosson, 1988).

4. Tulemused

4.1. Dispersioonipildid

Geofoniliini pikkuse mõju hindamiseks dispersioonipildile, arvutati löögikohtadele 6 m, 88 m, 176 m, 908 m ja 964 m kaugusel profiili algusest dispersioonipildid kasutades erinevaid liinipikkusi $D = 20, 40, 60, 70$ m. Joonis 8 on toodud pildid normaliseerituna ja joonisel 9 mitte.

Kaugusel 6 m löögikoha dispersioonipiltide spektraalne maksimum jäi liinipikkuse suurendamisel sarnaseks ja suuri muutusi liinipikkuse erinevad vahemikud ei põhjustanud. Kõrgematel sagedustel (>30 Hz) muutus spekter alates $D = 60$ m ebatäpsemaks, kõige rohkem müra tekkis $D = 80$ m. Keskmiste sageduste (15–60 Hz) puhul oli kõige ühtlasem spektraalne maksimum $D = 40$ m, kuigi esines „hakkimist“ – spektraalne maksimum ei liigu ühtlaselt üle kogu sagedusvahemiku, vaid mõningatel sagedustel esineb üksikuid kiirema Rayleigh laine faasikiirusega tippe. Liinipikkuse suurenedes „hakkimine“ võimendub. 20 m liinipikkuse juures oli näha maksimaalse spektri „auku“ sagedusvahemikul 30–35 Hz. Antud sageduse juures asus spektraalse maksimumi lõik 100–120 m/s faasikiiruste juures. Liinipikkuse suurenedes (40 ja 60 m) löigu signaal vähenes, kuni kadus täielikult 80 m liinipikkuse dispersioonipildil. Madalsageduslik spekter (<15 Hz) oli ebamäärane 20 m liinipikkuse puhul, mis ei võimaldaks määrata täpset dispersioonikõverat. Alates 40 m muutus madalal sagedusel maksimaalne spekter täpsemaks ning liinipikkuse edasisel suurenemisel see tähelepanuväärselt ei muutunud. Üldiselt kujunes välja faasikiiruste tendents. Madalsageduslikud olid kõige suurema faasikiirusega (>300 m/s) ja kuni keskmiste sageduste lõpuni toimus ühtlane kiiruse vähenemine kuni u 200 m/s. Kõrgetel sagedustel faasikiirus (200–250 m/s) jällegi tõusis.

Löögikohal 88 m tehtud katsest tehtud dispersioonipilt erines 6 m omast oluliselt. Faasikiirused olid üldjoontes madalamad. Spektraalne maksimum oli sagedustel 14–70 Hz hästi vaadeldav ja kontsentreeritud väiksematele faasikiiruste vahemikule. Faasikiirus tõusis natukene madalamatele sagedustele liikudes, kuid jäi vahemikku 120–160 m/s. Samuti ei esinenud „hakkimist“. Liinipikkuse suurendamine erilisi muutusi selles sagedusvahemikus ei põhjustanud. Madalamate sageduste (<14 Hz) spektraalne maksimum on ikkagi umbmäärane

ja faasikiirused laialivalguvad. Liinipikkuse suurenemisel muutus madalsageduslik osa liinipikkuse suurenemisega segasemaks. 20 m liinipikkusega madalsagedusliku osa puhul võiks arvata, et dispersioonikõver liigub ühtlaselt suureneva faasikiirusega madalamatel sagedustele, kuid teiste liinipikkustega dispersioonipildid seda ei näidanud, vaid esines hüppeline faasikiiruse suurenemine 13 Hz.

176 m katsekoha dispersioonipildid sarnanesid 88 m asukohale. Sagedustel >12 Hz oli spektraalne maksimum väikese faasikiiruse vahemikus, seega dispersioonikõvera määramine oleks täpne. Kui 88 m löögikohta dispersioonipildi spektraalne maksimum muutub ebatäpseks sagedustel >70 Hz, siis 176 m oli näha konkreetne maksimum kuni 80 Hz. Faasikiirused tõusevad sageduste vähenedes alates 110 m/s kuni 200 m/s. Madalsageduslik spekter (<12 Hz) muutus erinevatel liinipikkustel. 60 ja 80 pikkustel liinide dispersioonipildidel oli spektraalne maksimum ebamäärane. 40 m liinipikkusel oli näha faasikiiruste tõusu kuni 7 Hz ja 300 m/s, pärast seda muutub ebamääraseks. 20 m liinipikkusel dispersioonipildil oli tõus umbes sarnane.

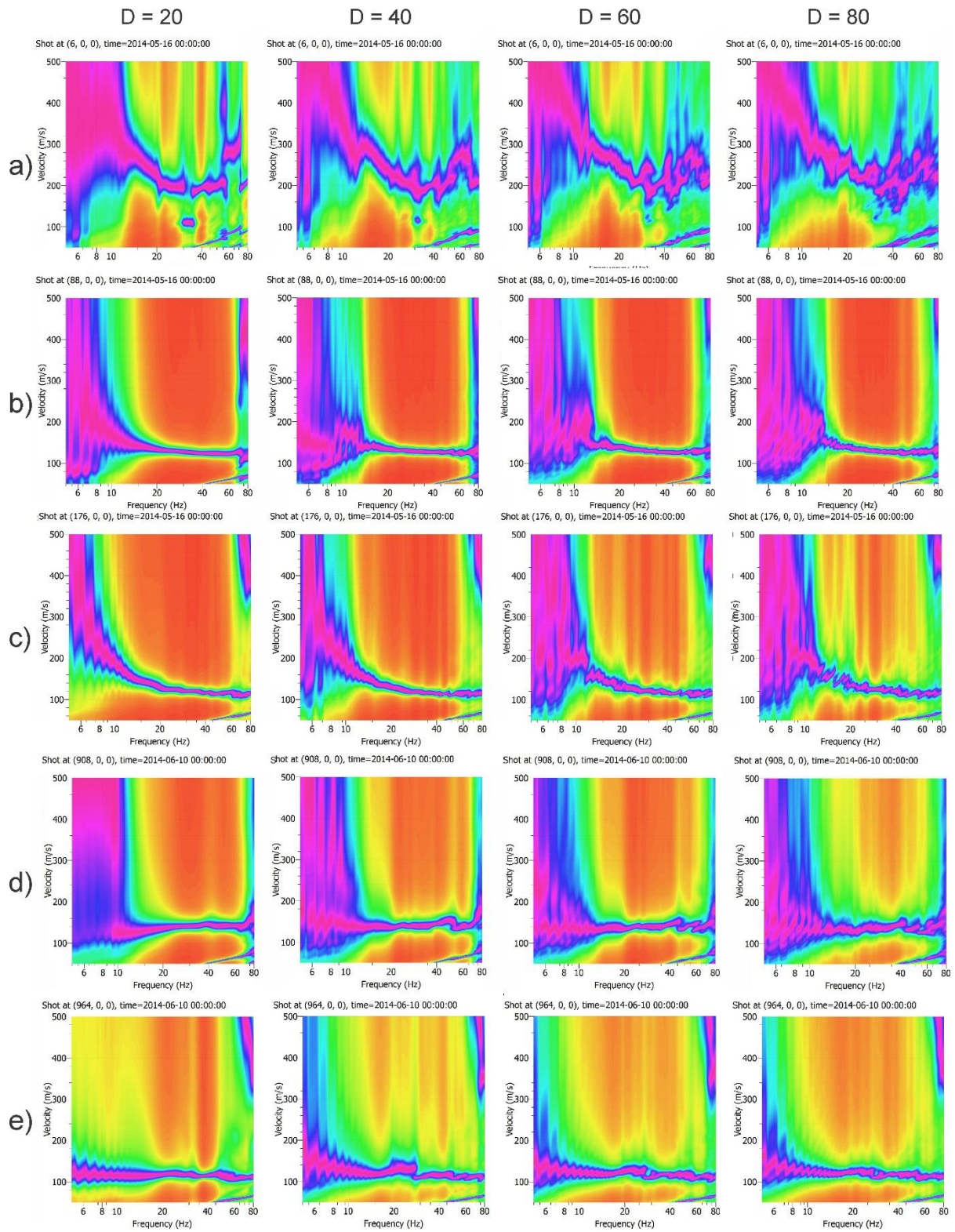
908 m punkti dispersioonipildid erinesid eelmistest. Spektraalse maksimumi faasikiirused jäid sageduse vähenedes samaks või langesid, ning kiiruse kasvu nagu eelmistel ei olnud. 20 m liinipikkuse dispersioonipildidil toimub 35 Hz–10 Hz vahemikus faasikiiruste vähenemine (140–120 m/s). Suurematel liinipikkustel see nii selgelt välja ei tulnud. Nagu 88 m katsekoha pildidel, muutus ka siin spektraalne maksimum kõrgemal kui 70 Hz määramatuks. 40, 60 ja 80 m liinipikkustel oli kõrgematel sagedustel (45–70 Hz) ka „hakkimist“. Madalsageduslik spekter oli kõikidel liinipikkusetel sarnane, <13 Hz muutus spektraalne maksimum ebatäpseks ja seega dispersioonikõvera määramine oleks olnud keeruline. Kui 20 m liinipikkusel dispersioonipildil ei esinenud madalatel sagedustel (<15 Hz) spektraalse maksimumi faasikiiruste tõusu (<120 m/s), siis 40, 60 ja 80 m liinipikkusel oli seda näha (145 m/s). Madalatel sagedustel (<14 Hz) oli ka „hakkimist“. 40 m liinipikkusega dispersioonipildi keskmisestel sagedustel oli löik (20 – 28 Hz) suuremate faasikiirustega, kuid 20, 60 ja 80 m liinipikkustega dispersioonipildidel see oli taandunud. Sarnaselt asukohale 176 m on kõrgemate sageduste spektraalse maksimum täpne, ulatudes kuni 80 Hz. Liinipikkuse suurenedes üldpilt suures osas ei muutunud ja peamine spektraalne maksimum jäi samasse kohta. Dispersioonikõvera määramine oleks võimalik isegi ka kõige väiksema, 20 m, liinipikkusega ehk ainult 11 aktiivse vastuvõtjaga, kuid selle põhjal määratud dispersioonikõver oleks madalal sagedusel siiski liiga oletuslik. Kui liinipikkus oli rohkem

kui 70 m, siis muutus madalsageduslik osa müra tõttu segaseks ja suurenes võimaluste hulk dispersioonikõvera määramiseks. Põhjuseks oli nõrk allikas ja tugev müra tase, mis uuringu asukohas ka eksisteeris ning hakkas kaugemal kui 70 m domineerima pinnalainete signaalide üle. Ka normaliseerimata kujul muutub madalsageduslik spekter pikima $D = 80$ juures halvemaks. Eriti löögikohtades 6 ja 908 m ning natukene 176 m. (Joonis 8.)

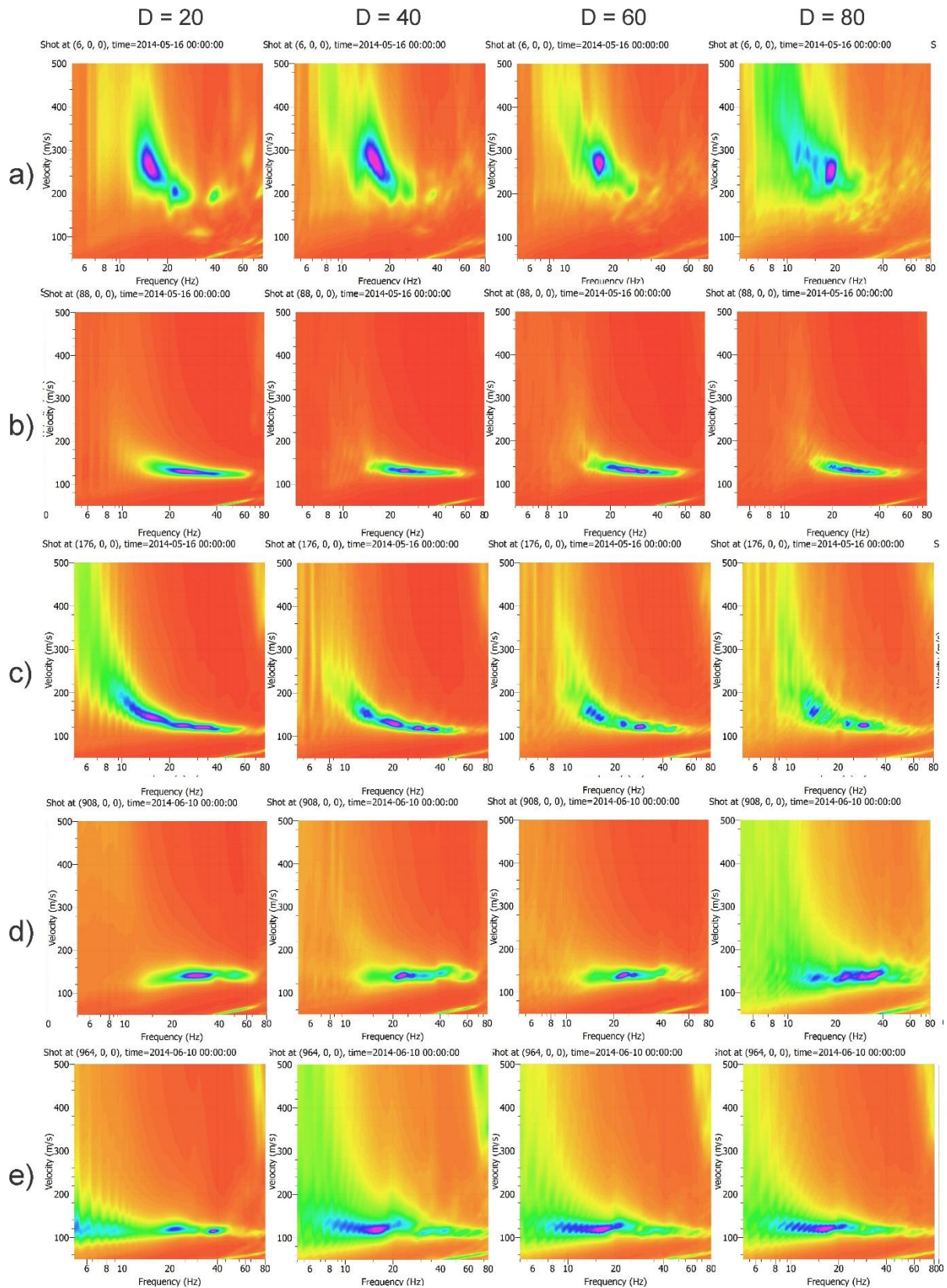
Dispersioonipilte vaadeldes selgub, et disperatsioonikõvera määramiseks sobiv vahemik jääb enamasti sageduste 15–70 Hz vahele. Mõne juhtumi korral saab vaadelda ka madalamaid või kõrgemaid sagedusi. Liinipikkuse suurenemisega suurenes ka spektraalse maksimumi resolutsioon normaliseeritud piltidel. Kõrgemaid moode antud uuringu andmetes ei täheldatud.

Vähendamaks müra esinemist dispersioonipiltidel ning suurendamaks dispersioonikõverate määramiseks oluliste pinnalainete signaalide tugevust, liideti mitme naaber-löögikoha algandmed üheks, justkui laineid oleks tekitatud korraga. Katsetati erinevaid liitmisastmeid: 10, 20, 30, 40 ja 50 m kaupa.

Liitmisega vähenes profiilil läbilõiget iseloomustavate punktide arv, seega muutus kirjeldus üldisemaks. Kuna kihtide horisontaalne muutlikus oli väike, ei olnud resolutsiooni vähenemine probleemiks.



Joonis 8. Normaliseeritud dispersioonipildid erinevatel D väärtusetel. Löögikohad a) 6 m b) 88 m c) 176 m d) 908 m e) 964 m.



Joonis 9. Normaliseerimata dispersioonipildid erinevatel D väärtusetel. Löögikohad a) 6 m b) 88 m c) 176 m d) 908 m e) 964 m.

4.2. Inversioon ja V_s 1D mudelid

Inversiooni tulemuseks saadi profiilile 28 1D risitilainete levikukiiruse kihilise maapinna vertikaalset mudelit vahekaugusega 40 m.

Kõik mudelid on toodud lisas 2. Läbilõike nimetuses olev number (nt läbilõige 50 m) näitab selle läbilõike kaugust profiili alguspunktist uuringuala kirdeosas.

Läbilõiked profiili alguses, keskel ja lõpus erinevad üksteisest, kuid on ka mõningaid ühiseid jooni: kõige ülemise kihi kiirus jääb peaaegu igas läbilõikes alla 200 m/s ning kõige alumise kihi kiirused on suuremad, jäädes vahemikku 300–685 m/s. Seevastu vahepealne osa on profiili lõikes muutlikum.

Profiili algus (läbilõige 50 m) erineb oluliselt ülejäänud profiilist, kuna kõik kiirused, seal hulgas ülemises kihis, on suuremad kui 200 m/s. Ka järgmisel läbilõikel (90 m) on ülemises kihis kiirus üle 200 m/s. Profiilil edasi liikudes hakkavad inversiooni mudelid mingil määral ühtlustuma – eristub 4 kihti, mille kiirused suurenevad sügavuse suunas: ülemine kiht jääb vahemikku 1–3,5 m ja on kiirustega 100–160 m/s, järgneb kiht kiirustega 150–180 m/s ning 7,5–8 m sügavuselt kiht kiirustega 200–280 m/s. Alates 16–22 m sügavuselt on jälgitav kiht, kus kiirused on juba oluliselt suuremad (enamasti ligi 500 m/s).

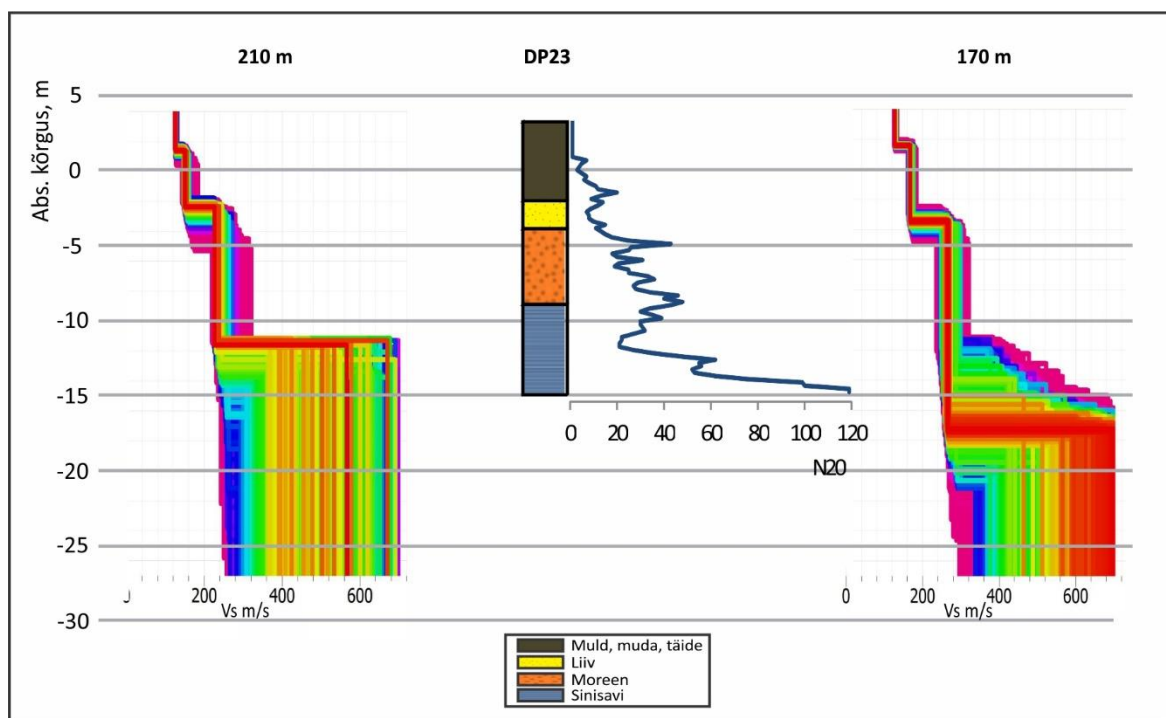
Profiili lõpuosas eristub enamasti kolm kihti ning paljudes läbilõigetes ei lange kiirus sügavuse suunas, vaid kohati on kõige ülemine kiht kiirem kui selle all paiknev kiht.

On iseloomulik, et maapinnale lähedasemas osas mudelid üldjuhul koonduvad hästi, kuid kõige alumise kihi kiirused varieeruvad suurtes piirides. Tüüpiliselt ulatub mudelite koonduvus 15 meetrini.

5. Arutelu

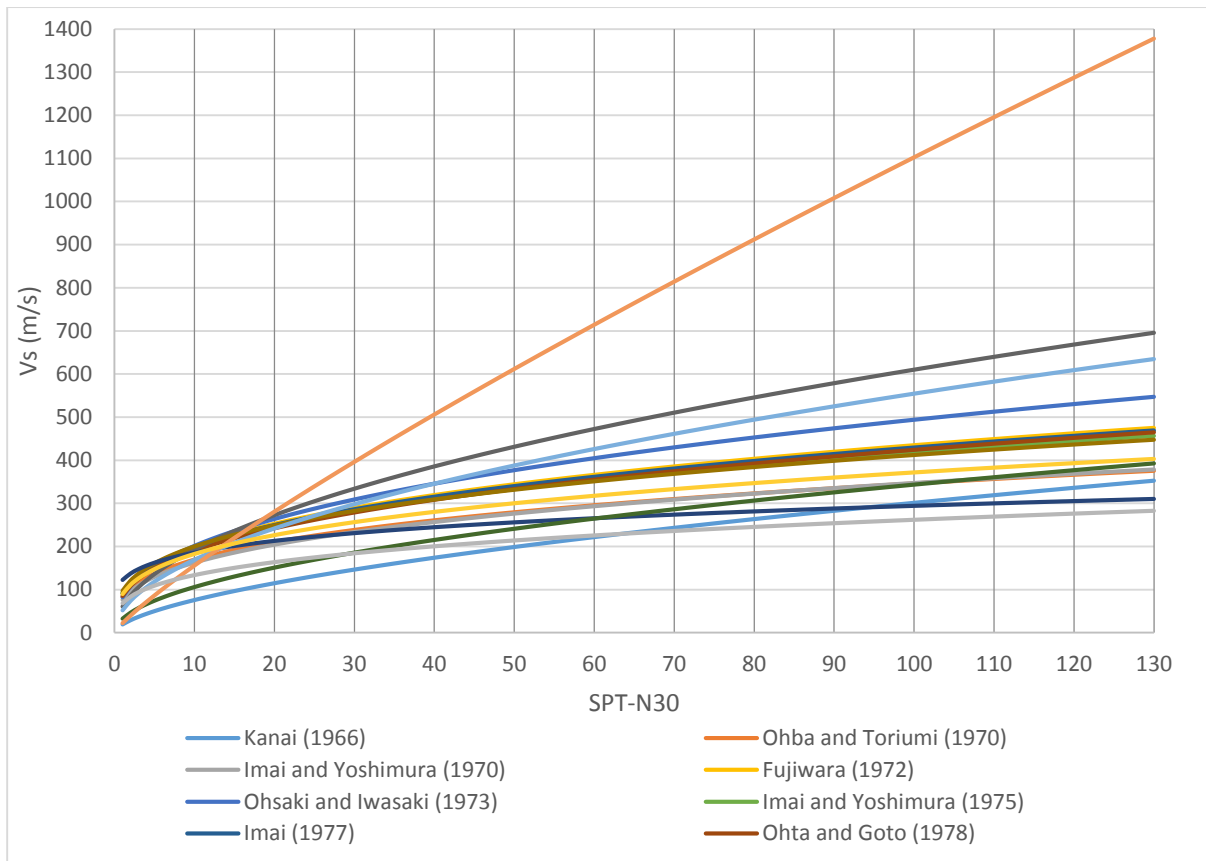
Ristilainete levikukiiruste ja pinnaseomaduste seoste leidmiseks võrreldi inversioonil saadud mudeleid varasematest Muuga sadama aruannete geotehnilise andmestikuga, täpsemalt kasutati löökpenetratsioonikatsetel saadud redutseeritud löökide arvu (N_{20}). Ristilainete levikukiiruste ja N_{20} väärtusi võrreldi kirjandusest pärit korrelatsioonikõveratega. (Joonis 11).

Lähemalt võrreldi omavahel penetratsioonikatsetepenetratsioonikatset DP23 ja DP21 andmeid ning neile kõige lähemal paiknevaid ristilainete läbilõikeid. DP23 puhul olid nendeks läbilõiked 170 m ja 210 m (Joonis 10), mis asuvad vastavalt 380 m ja 420 m kaugusel.



Joonis 10. Penetratsioonikatset DP23 määratud redutseeritud löökide arv N_{20} tõlgendatud läbilõikega ja V_s katsele lähimates seisilise profiili punktides.

Penetratsioonikatsetel on esimese kihina, absoluutkõrgusel 3,6...-2,5 m, välja eraldatud muld, muda ja täide, mis N_{20} väärtuste põhjal on väga nõrk pinnas. Kihi N_{20} väärtused jäävad vahemikku 2–20 lööki, olles kihi ülemises osas madalamad ning alumises osas pisut kõrgemad. Vastavalt korrelatsioonidele (Joonis 11) võrdub see N_{20} vahemik ristilainete kiirustele 20–280 m/s. V_s läbilõigetel vastab selle kihi ülemisele osale kõige aeglasema levikukiirustega (ca 120 m/s) kiht läbilõigete ülaosas. 170 m läbilõikel absoluutabskõrgusel 2...4 m ja 210 m läbilõikel kõrgusel 1...4 m asuvas kihi aeglasemad ristilainete levikukiirused viitavad nõrgale pinnasele ehk täitekihi ülemisele osale.



Joonis 11. Varasemad korrelatsioonikõverad V_s ja SPT- N_{30} vahel.

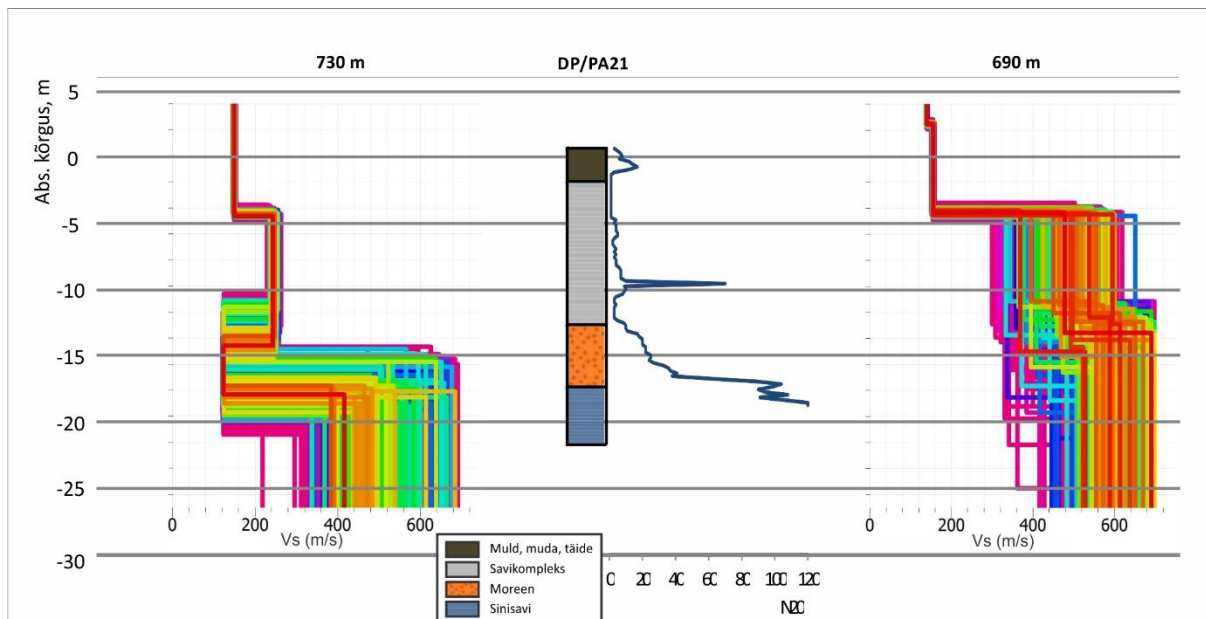
V_s läbilõigetel toimub kiiruste tõus *ca* 180 m/s-ni absoluutkõrgusel 1...1,5 m. Kuigi pinnase tugevnemisele viitavad N_{20} väärtused hakkavad tõusma juba varem, kõrgusel 0,5 m, on kiiruste suurenemise ja N_{20} kasvu sügavustel väike erinevus. Järgmine V_s läbilõigetel eristuv kiht 170 m kaugusel läbilõikel absoluutkõrguselabs. 2...-4 m ja 210 m läbilõikel absoluutkõrgusel 1...-2,5 m viitabki täitekihi alumisele osale ja liivakihi selle all. Liivakiht jääb absoluutkõrgusele -2,5...-4 m ning N_{20} väärtused jäävad vahemiku 8–16 lööki. Korrelatsioonidelt järeldub, et nendele väärtustele vastavad V_s väärtused 60–250 m/s, mis vastab inversioonil saadud kihi kiirusele. Kiiruse suurenemine märgib ka pinnase tugevuse suurenemist, mis tuleb välja ka N_{20} graafikult.

Kolmanda kihina on penetratsioonikatsel eraldatud eelmistest tugevam kiht moreen absoluutkõrgustel -4...-9 m ja N_{20} väärtustega 16–47. Korrelatsioonide põhjal jäävad sellesse vahemikku ristilainete kiirused 100–420 m/s, mõnde allikate korral ka rohkem (580 m/s). Moreenile vastab läbilõikel 170 m eristuv V_s kiht kiirustega 240–270 m/s, mille ülemine pind asub absoluutkõrgusel -4 m ja alumine pind varieerub -16...-17,5 m, kuna inversiooniga leiti mitu mudelit, mis olid kõik väikese veaga. Sarnaste kiirustega kiht (210–250 m/s) asub

läbilõikel 210 m absoluutkõrgusel -2,5...-12 m. Kihi ülemine piir läheb kokku moreeni ülemise kihi pinnaga, kus 1 m sügavamal suureneb ka N_{20} väärtus. Kihi paksused ei lähe kokku, kuna V_s jääb samaks *ca* 13 m, kuid moreeni paksuseks on märgitud ainult 5 m.

Viimase kihina on penetratsioonikatses eraldatud sinisavi, mille ülemine pind jääb absoluutkõrgusele -9 m ning N_{20} väärtused on läbilõike suurimad, jäädes vahemiku 20–120 lööki. Kuna sinisavi pealispind on murenenud, siis on N_{20} väärtused ka vastavalt väiksemad kihi ülemise osas. Sinisavi N_{20} väärtustele vastavad korrelatsioonigraafikult (Joonis 11) ristilainete kiirused 105–1300 m/s. Läbilõikel 201 m paigutub sinisavi piirläbilõikel paigutub V_s põhjal (560–580 m/s) *ca* 2 m sügavamale kui penetratsioonikatse läbilõikel. Kuid selles sügavusel tõuseb saranaselt ka N_{20} väärtus, mis viitab pinnase jäikuse tõusule, seega ka ristilainete kiirus sellel sügavusel tõuseb. 170 m läbilõikel iseloomustab sinisavi algust suurenev kiirus absoluutkõrgusel 17,5 m. Inversioonil on raske määrata kindlat kiirust, kuid see jääb vahemikku 560–700 m/s. pruugi uuringulala olla ühtlased ning vahemaaoluutkõrgustel

Teisena võrreldi omavahel löökpenetratsioonkatset DP21, kuhu on tehtud ka puurauk PA21, ja kahte talle kõige lähemal paiknevat V_s mudeli läbilõiget – läbilõiked 730 m ja 690 m, mis paiknevad DP21 asukohast 300 m ja 360 m kaugusel (Joonis 12).



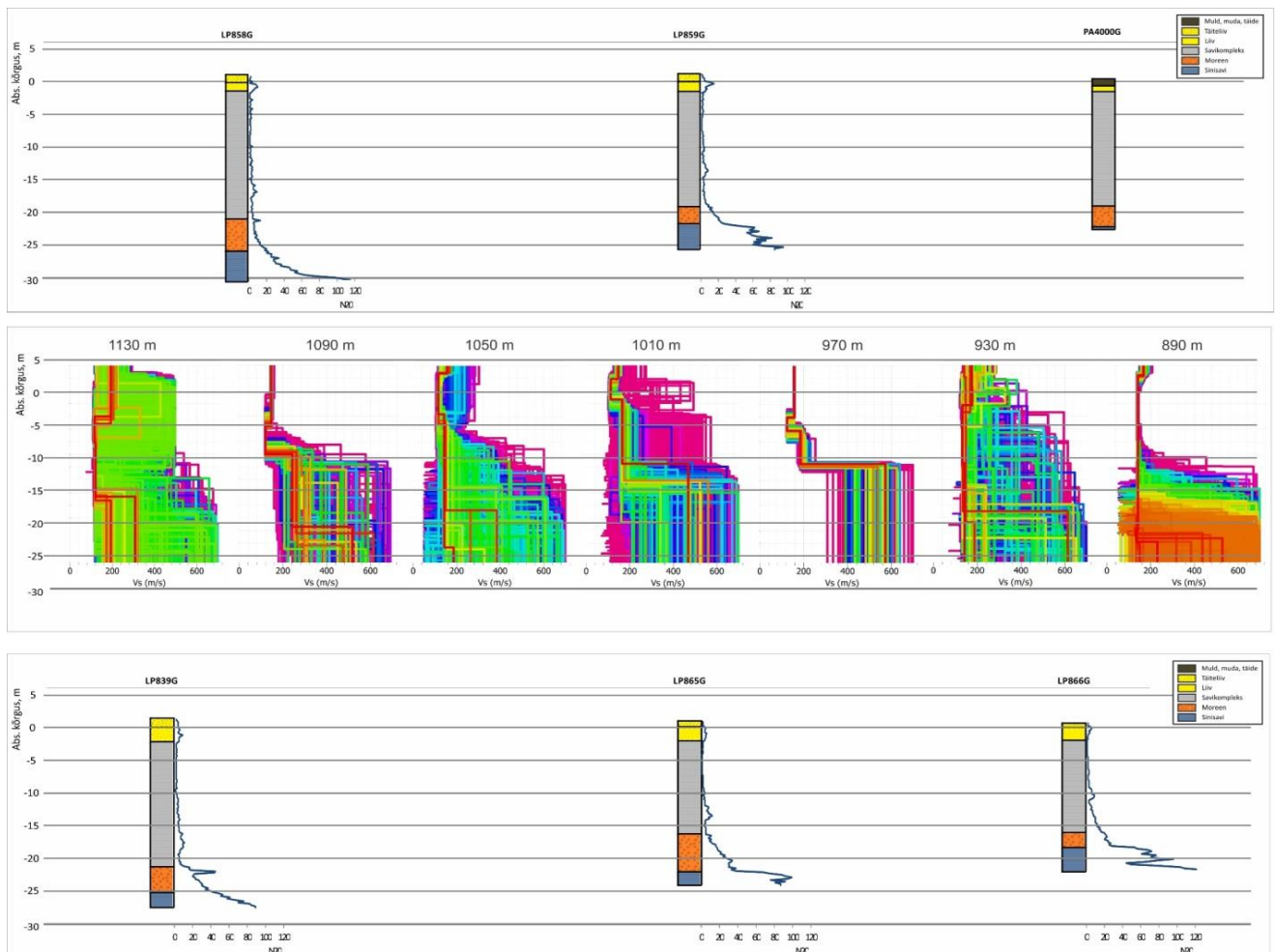
Joonis 12. Penetratsioonikatsel/puurauk DP/PA 21. koos penetratsioonikatsel määratud redutseeritud löökide arvuga arv N_{20} ning V_s katsele lähimates seisilise profiili punktides.

DP21 läbilõikel on välja eraldatud esimesena muld, muda ja täide, mille N_{20} väärtused jäävad 9–17 löögi vahele. Korrelatsioonikõveratel (Joonis 11) selgub, et nendele vastavad V_s väärtused 70–280 m/s. Läbilõikel 690 m on esimene kiht kiirustega u 140 m/s ja selle all natukene kiirem, 150 m/s kiht. Läbilõikel 730 m on samas sügavuses ainult üks kiht kiirusega 150 m/s. Kuigi mudeli kihtide paksused ei lähe kokku penetratsioonikatsel omadega, võiks nii läbilõike 690 m esimest kahte kihti kui läbilõike 730 m esimest kihti ristilainete kiiruste alusel pidada täitepinnaeks. DP21 läbilõikes paikneb ülemise kihi all nõrk savikompleks, mida iseloomustavad valdavalt madalad N_{20} väärtused (1–10 lööki). Korrelatsioonikõveratel (Joonis 11) vastab sellistele väärtustele V_s vahemik 20–200 m/s, mis samuti viitavab nõrgale pinnasele. Absoluutkõrgusel -9 m on kihis koht, kus N_{20} tõuseb märgatavalt kuni 70-ni, mis näitab, et tegu on heterogeense pinnasega ja esineb tugevamaid vahekihte. Läbilõikel algab N_{20} alusel pinnase tugevnemine absoluutkõrgusel -12 m, kus on välja eraldatud ka moreeni ülemine piir kuni sinisavini, kus N_{20} väärtus tõuseb kuni 120 löögini.

Läbilõigetel 690 m ja 730 m tõuseb V_s absoluutkõrgusel -5 m, kus puurauku andmetel peaks asuma nõrk savikompleks. Mõlema mudeli kiirused tõusevad liiga suureks (üle 120 m/s), mistõttu ei saa need olla nõrgad savid. Mudelil 690 m tõuseb kiirus 360–580 m/s vahemikku,

mis viitab tugevamale pinnasele. Tegu võiks kiiruste alusel olla moreeni või sinisaviga, kuid lähedal olev puuraugu andmetega see kokku ei lähe. Inversioonil saadud mudeli sügava kihtide kiirused on varieeruvad ja on selge, et kindlat väärtust ei saa omistada. Absoluutkõrgusel -14...-15,5 m tõuseb kiirus veelgi, jõudes vahemikuni 520–690 m/s. Läbilõikel 730 m tõuseb kiirus 240 m/s-ni, mis samuti ei kattu puuraugu andmetega. Kiirus langeb absoluutkõrgusel -15 m 120 m/s-ni, mis viitab nõrgemale pinnasele, seejärel jälle tõuseb absoluutkõrgusel -18 m 410 m/s. Kiiruste tõus viitab tugevamale pinnasele ning puuraugus vastab sellele absoluutkõrgusel -17,5 m sinisavi, mille N_{20} väärtused on 89–120 lööki, mis lähevad korrelatsioonikõveratel (Joonis 11) kokku ristilainete kiirustega 250–1280 kiirustega.

Kolmandana võrreldi profiili lõpus paiknevat seitset V_s läbilõike mudelit profiilist kagus ja edelas külgnevate penetratsioonikatsete ja puuraukudega (Joonis 13.)



Joonis 13. Penetratsioonikatsete redutseeritud löökide N_{20} ning V_s mudelite võrdlus.

Löökpenetratsiooni LP866G läbilõikes on esimeseks kihiks täiteliiv, mis asub 0,8 – 0,2 m ümp. ning on N_{20} väärtusega 2. Selle all on 0,2 ümp kuni abs sügavuseni -1,8 m kiht, mille N_{20} väärtused on kõrgemad ja jäävad vahemiku 1 – 6. V_s mudelil 890 m vastab nendele mõlemale liivakihi ülemine kiht kiirustega 180 m/. Korrelatsioonikõverad väidavad N_{20} vahemikule 1 – 6 kiiruseid 22 – 165 m/s, mis on natukene madalam selles töös saadud tulemusele. 930 m mudelil on kaks samaväärset tulemus, milles üks eraldab ülemises osas välja natukene väiksemate kiirustega (150 m/s) kihi kuni 2 m ümp ja selle alla kiirema (160 m/s) lainete levikuga kihi. Selle variandi korral jääb kihi kiirus samaks kuni -20 m abs sügavuseni, ning enam ei lange nagu N_{20} väärtused alates abs sügavusel -1,5 m, siis võiks pikem õigeks lugeda mudeli variandi, kus kiirused langevad alates abs sügavusel u -2,5 m 180 kuni 140 m/s. Seega vastaks 930 m mudeli ülemine kiht täitepinnasele ja looduslikule liivale ning selle alumine kiht aeglasema levikukiirusega savikompleksile, mille N_{20} väärtused jäävad vahemiku 1 – 5. Ka korrelatsioonikõverate järgi vastavaks nendel suurustele V_s kiirused 22 – 156 m/s. 890 m mudelil vastab savikompleksile teine kiht kiirusega 140 m/s abs. kõrgusel 3... -21,5 m. Mudeli sügavaima kihi määramisel on probleeme, sest väikses veaga tulemused pole grupeerunud, vaid viitavad kiirusvahemikule 150 – 530 m/s. Kuna sarnasel sügavusel asub puuraugus PA4000G ning penetratsioonikatsel LP886 määratud sinisavi piir, siis võiks indikatsioonid kiiruse tõusust viidata just sellele. Penetratsioonikatsel on saadud sinisavi N_{20} väärtuseks 25 – 120. 930 m V_s mudelil jääb samuti kindel viimase kihi kiirus määramata, sest kiirused ei koonu.

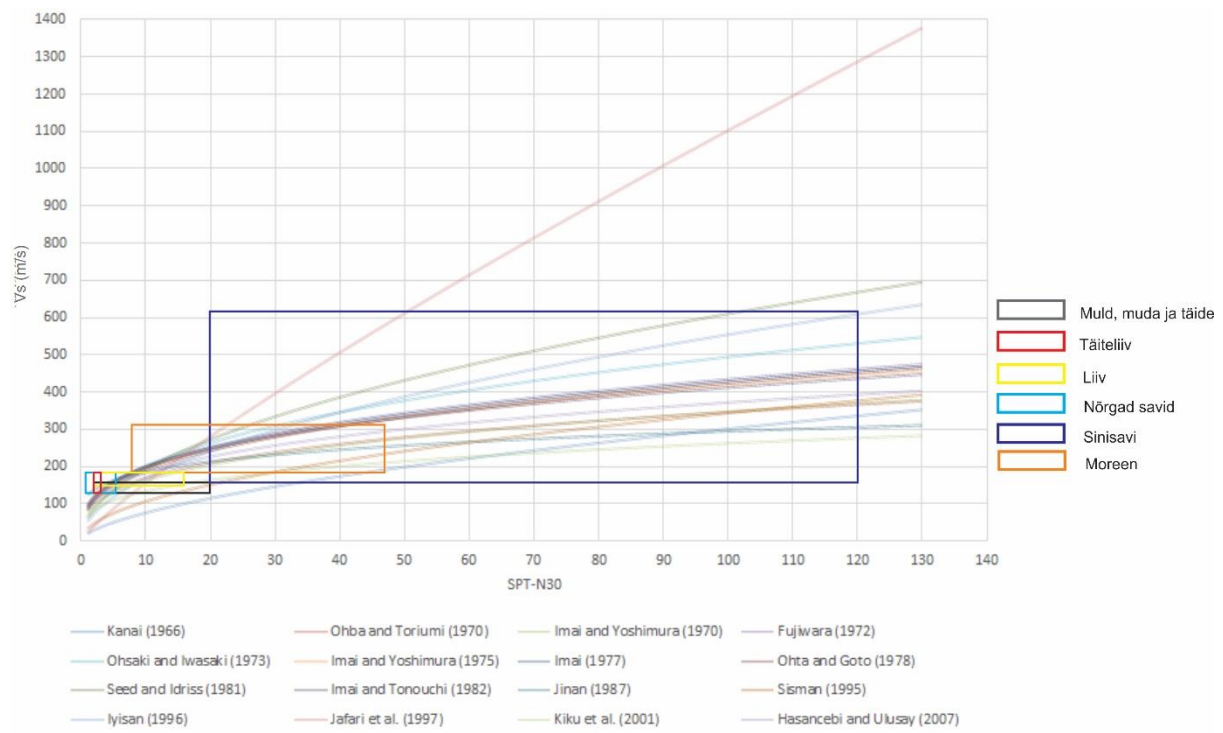
970 m kiiruste läbilõike mudeli esimese kihi kuni abs sügavuseni -4 m võiks lugeda sarnaste kiiruste tõttu (180 m/s) liiva pinnaste alla. Abs sügavusel -4...-6 m asub nõrgem 140 m/s lainetekiirustega pinnas, mille kohta andmed lähinaabruses paknevate penetratsioonikatsete tulemustes puuduvad. Samuti kõige viimase kiireima kihi algus abs sügavuselt -11 m tundub kahtlane, sest ükski andmestik nii suurele pinnase tuevuse suurenemisele ei viita. LP856G läbilõikes võib sarnasel sügavusel märgata väikset N_{20} väärtuse tõusu kuni 16, millele korrelatsioonikõverad annavad väärtuseks 100 – 232 m/s, kuid mis jääb antud kihi kiirusest väiksemaks (610 m/s). Sarnaselt eelmisele mudelile tõusevad 1010 m läbilõike viimase kihi kiirused abs sügavusel -11 m 435 m/s. Ülemine osa koosneb kihist kiirusega 140 m/s kuni 2 m ümp. Seejärel kiirused langevad 120 m/s 3 m paksusel kihil ning uuesti tõusevad kuni 180 m/s. Ülemine kiht võiks ikkagi olla täitepinnas, selle all paiknev väikese paksusega kihti nõrk looduslik liiv ning omakorda selle all paksema kompleksina savid.

1050 m Vs mudel näitab sarnast ülemiste kihtide kiiruste trendi, aga kiiruste erinevused on väiksemad. Abs sügavusel -5...-24 m kiht kiirusega 140 m/s võiks viidata paksule savikompleksile ning selle all väikest kiiruse tõusu (185 m/s tugevama pinnase ilminguna sinisavile murenenud osale või moreenile. Mudel profiilil kaugusel 1090 m, on ülemiseks kihiks eraldanud 8,5 m paksuse 140 m/s ristilainete kiirusega kihi, selle alla aeglasema 120 m/s ning 5 m paksus kihi. Abs sügavusel -9,5 kiirus kasvab kuni 250 m/s. Viimast kihi kiirust on jällegi raske määrata, sest väikseima veega mudelite väärtused ei koonu, jäädes vahemiku 520 – 610 m/s. Kuigi N_{20} ei lähe kokku, siis vastavalt penetratsioonikatsete läbilõigetele peaks kihid jaotuma vastavalt: esimene kiht on liivapinnased N_{20} väärtustega 1-15, teine nõrgale pinnasele nagu savid (N_{20} 1-5), kolmas kiiremate Vs väärtustega savikiht, ning viimasena aluspõhjaline sinisavi (N_{20} 20 – 120). Vs läbilõige, profiili algusest kaugusel 1130 m, esimeseks kihiks on 180 m/s kiirustega pinnase, mis võiks olla liiv. Penetratsioonkatsete tulemuste põhjal on liivakihtide N_{20} 1 – 15. Sellele järgneb 120 m/s kiirusega alates abs sügavusest -4,5 m nõrk savipinnas vastavalt N_{20} väärtustega 2 – 4, ning seejärel kiirus tõuseb, alates abs sügavusest -16 m, kuni 310 m/s ning võiks viidata moreenile, N_{20} väärtustega 8 – 42.

Profiili alguses puuduvad löökpenetratsioonikatsed ning asuvad ainult puuraugud. Kuna puuduvad tugevust näitavad N_{20} väärtused, siis korrelatsioonil neid ei kasutatud.

Enamik võrdlusi on tehtud löökpenetratsioonikatse põhjal koostatud läbilõigetega, seega määratud kihipiirid on tõlgendused ja ei pruugi olla täpsed. Samuti tuleb arvestada, et kihtide paksused ei levi ühtlaselt ning V_s mudelite ja nendega võrreldud penetratsioonikatsete ning puuraukude asukohad ei olnud kõrvuti. Seega ei pruugigi kihi pinnad asuda täpselt samadel abs sügavustel. Kuid tuleb tunnistada, et kihtidele määratud N_{20} väärtused ja V_s lähevad kokku.

V_s mudelite alusel on tugevamatele kihtidele viitavad kiirused e moreen või sinisavi väiksemal sügavusel kui löökpenetratsioonikatsete põhjal. Võimalik, et pinnalainete sagedused pole piisavalt suured alumiste kihtide välja eraldamiseks. Sügavaima kihi kiirused koonduvad mõnikord halvasti, eriti profiili lõpus, kus on sinisavi sügavamal. See viitab sellele, et dispersioonikõverad pole määratud piisavalt madalatel sagedustel ning ei kata seda sügavust.



Joonis 13. SPT- N_{30} ja V_s seosed erinevate pinnaste korral. Lisaks on taustaks varasemates töodes avaldatud korrelatsioonikõverad.

Joonis 13 näitab, et täiteliiva V_s ja N_{30} väärtused on sarnased savikompleksile. Mõlema ristilainete kiirused jäävad vahemiku 120 – 180 m/s, kuid savil võib esineda suuremad N_{30}

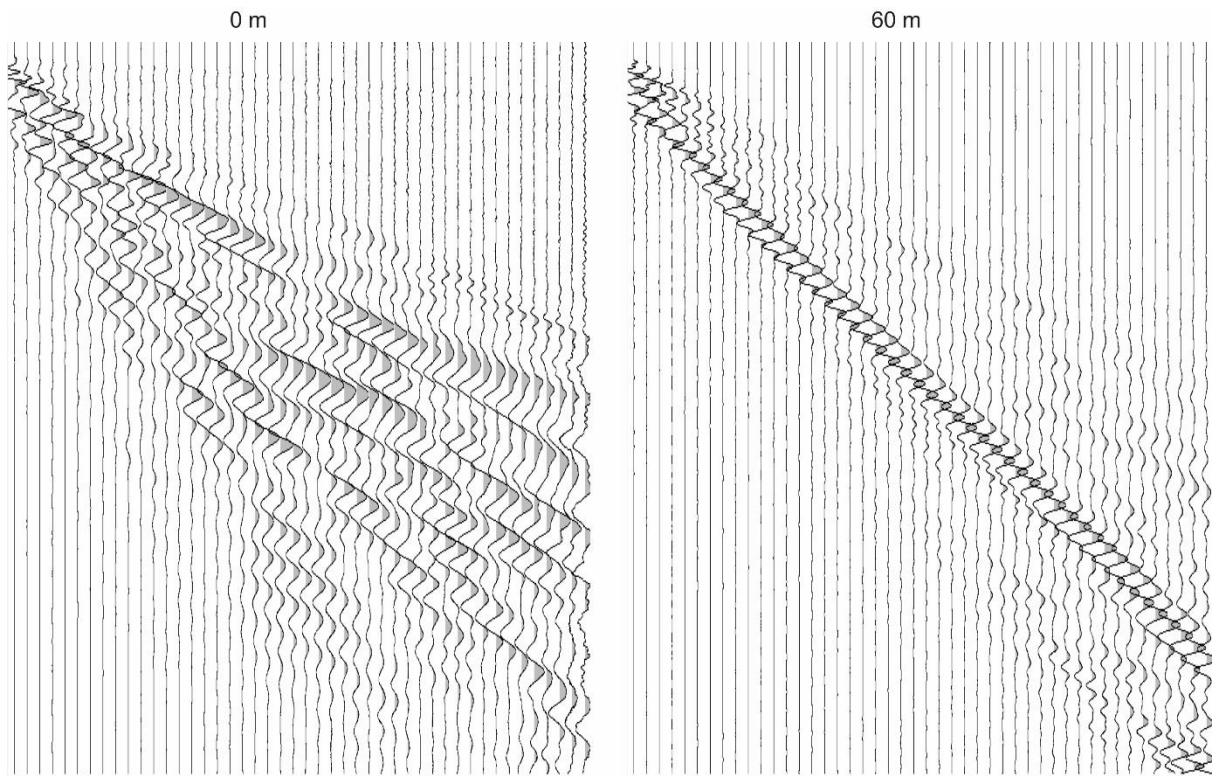
väärtused kui täiteliival. Täiteliiv on väikese suhtelise tihedusega ning kohev. Lisaks paikneb see kõige ülemise kihina teiste pinnaste peal, seega pole sellel peal koormust, mis tihendaks. Seetõttu ongi tema tugevus väike ja võrreldav nõrga savikompleksiga.

Looduslikul liival on N_{30} väärtus palju suurem ehk löökide arv kõrgem võrreldes täiteliivaga, samas ristilainete kiirused on sarnased ja palju üksteisest ei erine. Ilmselt pole MASW meetod tundlik liiva suhtelisele tihedusele ja seega erinevus loodusliku liiva ja täiteliiva vahel välja ei tule.

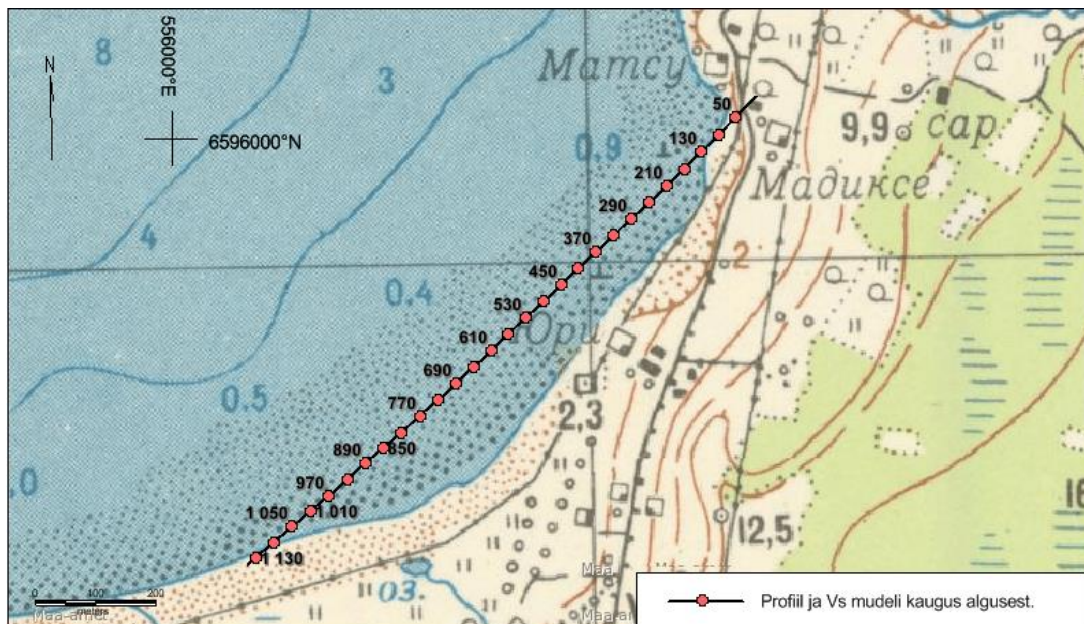
Sinisavi N_{30} ja V_s kõiguvad suures ulatuses. Väiksemad kiirused ja löökide arvud tulevad sinisavi ülemise, murenenud osa tõttu, mis on nõrgem. Samas kõrged V_s väärtused pärinevad sügavamal paikneva tugevama monoliitsest sinisavist.

Moreen on sinisavi järel tugevuselt teine pinnas. Selle tugevam osa läheb kokku sinisavi nõrgema osaga, seega on üleminek kihtide piiridel on ühtlane. Pinnase küllaltki suur N_{30} ja V_s varieeruvus näitab pinnase heterogeensusele.

Ristilainete levikukiirused on profiili alguses ehk kirdepoolsemas otsas suuremad kui ülejäänud profiilil. See väljendub nii algandmetes (Joonis 14) dispersioonipiltidel ja –kõveratel kui ka lõpuks inversiooni tulemustes (Lisa 2, V_s läbilõige 50 m) Põhjuseks on maapinna lähedal asuv aluspõhjaline tugev sinisavi, mida tõestavad ka puuraugud PA1544G – PA1548G. Jooniselt 15 selgub, et profiili alguses, u 50 m, asub ka klindias tang, mis nüüdseks on täitepinnastega kaetud.



Joonis 14. Seismogrammid löögikohtadel 0 ja 60 m.



Joonis 15. Nõukogude Liidu topograafiline kaart 1963 a. näitamaks klindi asukohta profiilil. (Maa-amet)

Lisaks sellele, et profiili alguses paikneb aluspõhi maapinnale lähedal, on seal pinnasetööde käigus kihtide lasumust rikutud (Joonis 16) Profiili alguses oli kaevatud kuivenduskraav, mille käigus on tõstetud välja nii moreeni kui sinisavi ja kasutatud seda kraaviäärse pinnase täitmiseks (välitööde ajal tuvastati sinisavi ja munakaid-rahne maapinnal). Maapinnal asuv sinisavi tekitab anomaalselt suured ristilainete levikukiiruste väärtused pinnalähedastes kihtides, põhjustades profiili alguse algandmete, dispersioonipiltide ja läbilõike mudelite erinevuse ülejäänutest.



Joonis 16. Profiili alguse osa pinnasetööde käigus. (AS Merko Ehitus Eesti, 2003 – 2005 a)

690 m kaugusel profiili lagusest märgati seismogrammides ja dispersioonipiltidel häiringuid. Uurimisel selgus, et maapinna alla on rajatud vee äravoolu tunnel, millest risti üle liikus profiil (Joonis 17). Seismogrammides näitab tunneli asukohta tagasipeegelduvad lained.



Joonis 17. Seismilisel profiilil 690 m kaugusel asuva tunneli rajamine. (AS Merko Ehitus Eesti, 2003 – 2005 a)

Mitmetes mudelites on alumise kihi kiirused halvasti koonduvad, mis viitab sellele, et töös kasutatud valdavalt kõrgete sagedustega dispersioonikõverad (7–70 Hz) ei sisalda piisavalt madalaid sagedusi, et näha täpselt pinnase sügavaimaid kihte. Põhjuseks on ka konkreetne uuringu asukoht ning seal lasuvad pehmed pinnased. Oodatav uuringusügavus on pool kõige suuremast tekkivast lainepikkusest ($Z_{\max} = \lambda/2$), kuid võib näha ka sügavamale (Park *et al* 2002) Suurimat lainepikkust saab dispersioonikõveralt määrata kõige suurema pinnalainete faasikiiruse ja temale vastava sageduse jagatisena ($\lambda = V_f/f$).

Kuna pinnased on nõrgad, siis tekkivate pinnalainete levikiirused madalad, seepärast on ka lainepikkus samal sagedusel lühem kui oleks tugevamate pinnaste korral.

Kasutatud dispersioonikõveratel saab oletada, et uuringusügavus jääb alla 30 m. Võib oletada, et uuringusügavus jäi liiga väikseks, et kogu profiili ulatuses kaardistada aluspõhja pealispinda. Vaadates dispersioonipilte selgub, et enamusel jääb suurem osa laineenergiast vahemiku 10–60 Hz (Lisa 2).

Vastavalt uuringuaruannetele on profiili alal aluspõhja kõige suurem sügavus u 30 m, siis sinisavi pinna täielikuks kaardistamiseks oleks vaja, vastavalt valemile, lainepikkuseid >60 m. Seega peaks vastavalt töös leitud pinnalainete kiirustele olema sagedused keskmiselt alla 3,5 Hz, et saavutada 30 m uuringusügavust.

Madalamate sageduste tekitamiseks on vajalik tekitada maapinnas suurem deformatsioon, Seega on vaja tugevamat allikat, mis tekitab imapktil suurema energia. Pehmete pinnaste sügavaks uurimiseks on vaja madalsageduslikke laineid, mida võimaldab passiivne seismiliste pinnalainete uuring.

6. Järeldused

Mudeldatud 1D V_s läbilõigete ristilainete levikukiirused läksid vastavalt varem avaldatud korrelatsioonidele kokku löökpenetratsioonikatses mõõdetud N_{20} väärtustega.

Looduslikul liival on N_{30} väärtus palju suurem ehk löökide arv kõrgem võrreldes täiteliivaga, samas ristilainete kiirused on sarnased ja palju üksteisest ei erine. Ilmselt pole MASW meetod tundlik liiva suhtelisele tihedusele ja seega erinevus loodusliku liiva ja täiteliiva vahel välja ei tule. Samas tuleb välja murenenud sinisavi ja monoliitse osa vahe.

Pehmete pinnaste tõttu jäävad sagedused Kuna pinnased on nõrgad, siis tekkivate pinnalainete levikukiirused madalad, seepärast on ka lainepikkus samal sagedusel lühem kui oleks tugevamate pinnaste korral. Töös kasutatud valdavalt kõrgete sagedustega dispersioonikõverad (7–70 Hz) ei sisalda piisavalt madalaid sagedusi, et igal profiili punktil näha sinisavi ülemist pinda. Piirkonna ülemistes, pehmetes pinnastes tekkivad pinnalained on aeglased, seepärast on lainepikkus väike ning uuringusügavus madal. Sinisavi pinna täielikuks kaardistamiseks oleks vaja, lainepikkuseid >60 m. Seega peaks vastavalt asukoha pinnalainete kiirustele olema sagedused keskmiselt alla 3,5 Hz. Madalamate sageduste tekitamiseks on vaja kasutada tugevamat allikat või kasutada keskkonnas levivaid madala sagedusega pinnalained, mida võimaldab passiivne seismiliste pinnalainete uuring.

Välitööde konfiguratsioonidest uuriti liinipikkuse mõju dispersioonipiltidele. Rohkem kui 70 m pikkusega liinipikkusel muutusid dispersioonipiltide kvaliteet halvemaks.

Kokkuvõte

Seismiliste pinnalainete meetod (MASW) on hiljuti välja töötatud meetod, mis kasutab Rayleigh-tüüpi pinnalaineid. ristilainete levikukiiruse (V_s) tuletamiseks. V_s põhjal saab hinnata pinnaste tugevust ja kandevõimet, seega leiab meetod kasutust geotehnika valdkonnas.

Töö eesmärgiks oli testida seismiliste pinnalainete analüüs meetodi (MASW) rakendamist Eesti tingimustes, Muuga sadama uuringualal, kus asuvad nõrgad, geotehniliselt probleemsed nõrgad ja kokkusurutavad pinnased. Sadama laienemisplaanide kohaselt rajatakse uus terminal, mis võib põhjustada pinnaste kompakteerumist ja vajumite teket.

Välitööde käigus profileeriti 1150 m lõik Muuga sadama idaosas katsetamaks MASW meetodit. Töös uuriti liinipikkuse (D) mõju dispersioonipildi kvaliteedi ja resolutsioonile. Inversiooniga mudeldati profiilil 28 1D V_s läbilõiget. Saamaks aru meetodi tundlikusest ja lahutusvõimest, korreleeriti mudelite V_s väärtusi lähedal olevate puuraukude ja löökpenetratsioonikatsetega N_{20} väärtusetega. Korreleerimise tulemusi võrreldi varasemate tööde korrelatsioonikõveratega. Aluspõhja sinisavide pealispinna kaardistamisega uuriti ka meetodi uuringusügavust.

Tuleviku eesmärgiks on kasutada MASW meetodit ka teistes Eesti asukohtades, kus asuvad on nõrgad savikad ja/või orgaanilist ainet sisaldavad setted, mida esineb näiteks mereäärsetel aladel, mattunud ürgorgudes, jõelammidel ja viirsavibasseinides.

Tänuõnad

Täna oma juhendajaid Argo Jõehte ja Annette Talpsepa igakülgse abi eest ning Mikk Gaškovi, kes aitas välitöödel.

Summary

Characterization of soils (fills and natural sediments) in Muuga Harbour using multichannel analysis of surface waves (MASW)

Lauri Nõmtak

Weak and compressable soils are one of the main geotechnical problems. In addition to low stiffness, they tend to compact under the stress of buildings or fills, causing sinking. In Estonia the usual weak soils are seaside regions, buried sediment valleys and in varved clay basin in Pärnu, Haapsalu and Matsalu.

The aim of this thesis is to test multichannel analysis of surface wave method in Estonia, its sensitivity to geotechnical parameters, resolution to distinguish between fill and natural soil sediments, to determine depth of survey and if it is possible to map out bedrock and weak clay layer on top of it. Also the best line length was determined for this site.

Field works took place in Muuga Harbour. The site was chosen because there is geotechnical survey data available for testing the method in controlled environments and soils underneath were weak and compressable.

1150 m of seismic profiling was done in the east side of harbour. Dispersion images from different survey lengths were compared to process the best dispersion images for dispersion curve picking afterwards. Testing showed that the survey length bigger than 70 m caused more noise in the dispersion images. Because the site contained a lot of noise in the vicinity, for better S/N (signal to noise) ratio stacks of 20 m of shots were merged together and treated as one shot.

Total of 28 1D V_s models of layered earth were created, which were compared with borehole and penetration tests data for correlation of V_s and N_{30} and the values were compared with previous correlation curves. Mapping of bedrock revealed that the depth of survey is not enough to fully map out Cambrian clay in the bottom. The surface wave frequencies achieved were not low enough, because of low-velocity soils. Correlation of V_s and N_{30} showed consistent sensitivity of geotechnical parameters. The value matched with previous works.

The sand showed much bigger N_{30} values than fill, but both of them have similar shear-wave velocities. Therefore MASW method is not sensitive to the relative density and was not able

to make difference between fill and sand. The method showed difference between weathered and stiff bedrock clay.

The future goal is to use the MASW method in other sites, where weak soils are present.

Kasutatud kirjandus

Babuska, V., Cara, M., 1991, Seismic anisotropy in the Earth. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Beatty, K.S., Schmitt, D.R. and Sacchi, M., 2002. Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure. *Geophys. J. Int.*, v. 151, p. 622-631.

Ben-Menahem A., 1995. A concise history of mainstream seismology: Origins, legacy and perspectives. *Bull. Seism. Soc. of A.*, 85 (4). 1202-1225.

Bergdahl, U. ja Ottosson, E., 1988. Soil Characteristics from Penetration Test Results: A Comparison between various Investigation Methods in Non Cohesive Soils. Proceedings, First International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Florida, Vol. 1, pp. 399-405

Borcherdt, R. D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10:617-653.

Crice, D., 2005. MASW, The wave of future. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10 (2): 77-79.

Dal Moro, G., Pipan, M., Forte, E., Finetti, I., 2003. Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments- Expanded Abstract, Society of Exploration Geophysicists, p. 1247-1250.

Dorman, J., Ewing, M., 1962, Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and Crust-Mantle structure in the New York Pennsylvania: *J. Geophys. Res.*, 67, 5227-5241.

Eesti Standardikeskus (2008). Eurokoodeks 7: geotehniline projekteerimine. Osa 2. Pinnaseuringud ja katsetamine.

Forbriger, T., 2003. Inversion of shallow-seismic wavefields Part II: Inferring subsurface properties from wavefield transforms. *Geophys. J. Int.*, Vol. 153, 735-752.

Fujiwara, T., 1972. Estimation of ground movements in actual destructive earthquakes. Proceedings of the 4th European symposium on earthquake engineering, London, pp 125-132.

GOST 19912-81, 1987. Грунты. Метод полевого испытания динамическим зондированием. (Pinnased. Löökpeneratsiooni välikatsed).

Hasancebi, N ja Ulusay, R., 2007. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. Bull Eng Geol Environ 66(2):203–213. doi:10.1007/s10064-006-0063-0.

Heisey, J. S., Stroke K. H., Meyer, A. H., 1982. Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of Surface Waves. Transportation Research Record, 852: 22-31. Washington D.C.

Imai, T. ja Tonouchi, K., 1982. Correlation of N-value with Swave velocity and shear modulus. Proceedings of the 2nd European symposium of penetration testing, Amsterdam, pp 67–72.

Imai, T. ja Yoshimura, Y., 1970. Elastic wave velocity and soil properties in soft soil. Tsuchito Kiso 18(1):17–22.

Imai, T. ja Yoshimura, Y., 1975. The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan. Technical note OYO Corporation.

Imai. T., 1977. P-and S-wave velocities of the ground in Japan. Proceedings of the IXth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Japan, vol 2, pp 127–132.

Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 2000a. Mapping Poisson's Ratio of unconsolidated materials from a joint analysis of surface-wave and refraction events. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Arlington, Va., February 20-24, 2000.

Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 2000b. Joint analysis of surface-wave and refracted events from river-bottom sediments. Technical Program with biographies, SEG, 70th Annual Meeting, Calgary, Alberta, Canada, 1307-1310.

Iyisan, R., 1996. Correlations between shear wave velocity and in situ penetration test results. Chamber of civil engineers of Turkey. Teknik Dergi 7(2):1187–1199.

Jafari, M.K., Asghari, A., Rahmani, I., 1997. Empirical correlation between shear wave velocity (V_s) and SPT-N value for south Tehran soils. Proceedings of the 4th international conference on civil engineering, Tehran, Iran.

Jinan, Z., 1987. Correlation between seismic wave velocity and the number of blow of SPT and depth. Selected papers from the Chinese J Geotech Eng ASCE, pp 92–100.

Jones R.B., 1958. In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods. *Geotechnique*, 8 (1), 1-21

Kanai, K., 1966. Conference on cone penetrometer. The Ministry of Public Works and Settlement, Ankara, Turkey.

Kiku, H., Yoshida, N., Yasuda, S., Irisawa, T., Nakazawa, H., Shimizu, Y., Ansal, A., Erkan, A., 2001. In situ penetration tests and soil profiling in Adapazari, Turkey. Proceedings of the ICSMGE/TC4 satellite conference on lessons learned from recent strong earthquakes, pp 259–265.

Malagnini L., Herrmann R.B., Biella G, de Frando R., 1995. Rayleigh waves in quaternary alluvium from explosive sources: determination of shear-wave velocity and Q structure. *Bull. of Seism. Soc. of A.*, 85, pp. 900-922.

McMechan, G., ja Yedlin, M.J., 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation, *Geophysics*, v. 46, n. 6, p. 869-874.

Miller, R., Xia, J., Park, C., Ivanov, J., and Williams, E., 1999a, Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas; Technical Program with biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, Texas, 874-877.

Miller, R., Xia, J., Park, C., Davis, J., Shefchik, W., and Moore, L., 1999b. Seismic techniques to delineate dissolution features in the upper 1000 ft at a power plant. Technical Program with biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, Texas, 492-495.

Ohba, S ja Toriumi I., 1970. Dynamic response characteristics of Osaka Plain. Proceedings of the annual meeting AIJ.

Ohsaki, Y. ja Iwasaki, R., 1973. On dynamic shear module and Poisson's ratio of soil deposits. *Soils Foundations* 13(4): 61–73

Ohta, Y. ja Goto, N., 1978. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes. *Earthq Eng Struct Dyn* 6(2):167–187. doi:10.1002/eqe.4290060205

Okada, H., 2003. The microtremor survey method Geophysical monograph series no. 12 published by Society of Exploration Geophysicists (SEG) Tulsa, OK.

Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1998a. Ground roll as a tool to image near-surface anomaly. Technical Program with biographies, SEG, 68th Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 874-877.

Park, C. B., Xia, J., and Miller, R. D., 1998b. Imaging dispersion curves of surface waves on multichannel record. 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, 1377-1380.

Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999a. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, no. 3, 800–808.

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., Hunter, J.A., and Harris, J. B., 1999b. Higher mode observation by the MASW method: Technical Program with Biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, TX, 524-527.

Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999c. Multimodal analysis of high frequency surface wave: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 99), Oakland, CA, 14-18, p. 115-122.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., and Ivanov, J., 2000. Multichannel analysis of underwater surface wave near Vancouver, B.C., Canada. Technical Program with biographies, SEG, 70th Annual Meeting, Calgary, Alberta, Canada, 1303-1306.

Park, C. B., and Miller, R. D., Miura, H., 2002. Optimum Field Parameters of an MASW Survey.

Park, C. B., Miller, R. D., Ryden, N., Xia, J., and Ivanov, J., 2005a. Combined Use of Active and Passive Surface Waves. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, v. 10, no. 3, p. 323-334.

Park, C. B., and Miller, R. D., 2005b. Seismic characterization of wind turbine sites near Lawton, Oklahoma, by the MASW method. Kansas Geological Survey Open-file Report 22.

Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J., 2007. Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. The Leading Edge, January.

Park C., Miller R. D., 2008. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW). J Environ Eng Geophys 13:1–11.

Park, C. B., 2013. MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge, June 2013, v. 32 no. 6 p. 656-662

Rayleigh, J. W. S., 1885. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. Proc. London Math. Soc s1-17; 4-11.

Richard, F. E., Hall, J. R., Woods, R. D., 1970. Vibrations of soils and foundations. Prentice-Hall, Inc.

Rix, J. R., 2005. Near-Surface Site Characterization Using Surface Waves. Surface Waves in Geomechanics: Direct and Inverse Modelling for Soils and Rocks, 1-46.

Ryden, N., ja Park, C. B., 2006. Inversion of surface waves using phase velocity spectra. Geophysics, v. 71, n. 4, p. 49-58.

Schwab, F. A., ja Knopoff, L., 1972. Fast surface wave and free mode computations. Methods in Computational Physics, vol. 11, B.A. Bolt, B. Alder and S. Fernbach, eds., Academic Press, New York, 87-180.

Seed, H. B. ja Idriss, I. M., 1981. Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes. Preprint 81-544, in situ testing to evaluate liquefaction susceptibility, ASCE National Convention, Missouri, pp 81–544.

Sisman, H., 1995. An investigation on relationships between shear wave velocity and SPT and pressuremeter test results. M.Sc. Thesis, Ankara University, Geophysical Engineering Department, Ankara.

Socco L. V., Boiero D., Foti S., Piatti C., 2010. Chapter 4: Advances in surface wave and body wave integration. Miller RD, Bradford JH, Holliger K (eds) Advances in near surface

seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, pp 37–54

Socco, L. V. ja Boiero, D., 2008. Improved Monte Carlo inversion of surface wave data. *Geophysical Prospecting*, 56, 357-371.

Stokoe, K. H., II, Wright, G. W., James, A. B. Jose, M. R., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. Woods, R.D., Ed., *Geophysical characterization of sites*. Oxford Publ.

Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T., 2002. Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 6343 Maardu. Seletuskiri, 99 lk..

Zhang, S. X., ja Chan L. S., 2003. Possible effects of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 53, 17–29.

Wair, B.R., DeJong, J.T., Shantz, T., 2012. Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles. PEER Report No. 2012/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Wair, B.R., DeJong, J.T., Shantz, T., 2012. Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles.

Wathelet, M., 2005. Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD thesis, Université de Liège, Belgium

Wathelet, M. 2008. An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35, L09301, doi:10.1029/2008GL033256

Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., 2000. Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes

Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Hunter, J. A., Harris, J. H., Ivanova, J., 2002. Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements.

Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999a, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, 64, 691-700.

Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999b. Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments. Technical Program with biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, Texas, 437-440.

Lööpenetratsioonikatsete ja puuraukude andmed on pärit nendest aruannetest:

AS GIB (1995). Muuga Dry Terminal, railway. Geotechnical Report. Report No 341-1

IPT Projektijuhtimine OÜ (2003). Metal Terminal in Muuga Harbour. Summary of soil data. Geotechnical Report. Report No 03-10-0299.

IPT Projektijuhtimine OÜ (2004). Eastern Territory of Muuga Harbour. Geotechnical Investigations. Report No 04-09-0412.

IPT Projektijuhtimine OÜ (2014). Muuga sadama idaosa geoloogiline ülevaade. Töö nr 14-03-1137

Interneti allikad

AS Muuga Sadama koduleht, Ettevõttest > Arendusplaanid > Muuga
[<http://www.ts.ee/muuga-sadama-arendusplaanid>]

KGS koduleht, Kansas Geological Survey
[<http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/s2intro.html>]

OÜ Astlanda Ehitus, tehtud tööd 2010.
[<http://www.astlanda.ee/Album/Poolikud/Muuga%20sadama%20teed%20ja%20tehnov%C3%B5rgud/index.html>]

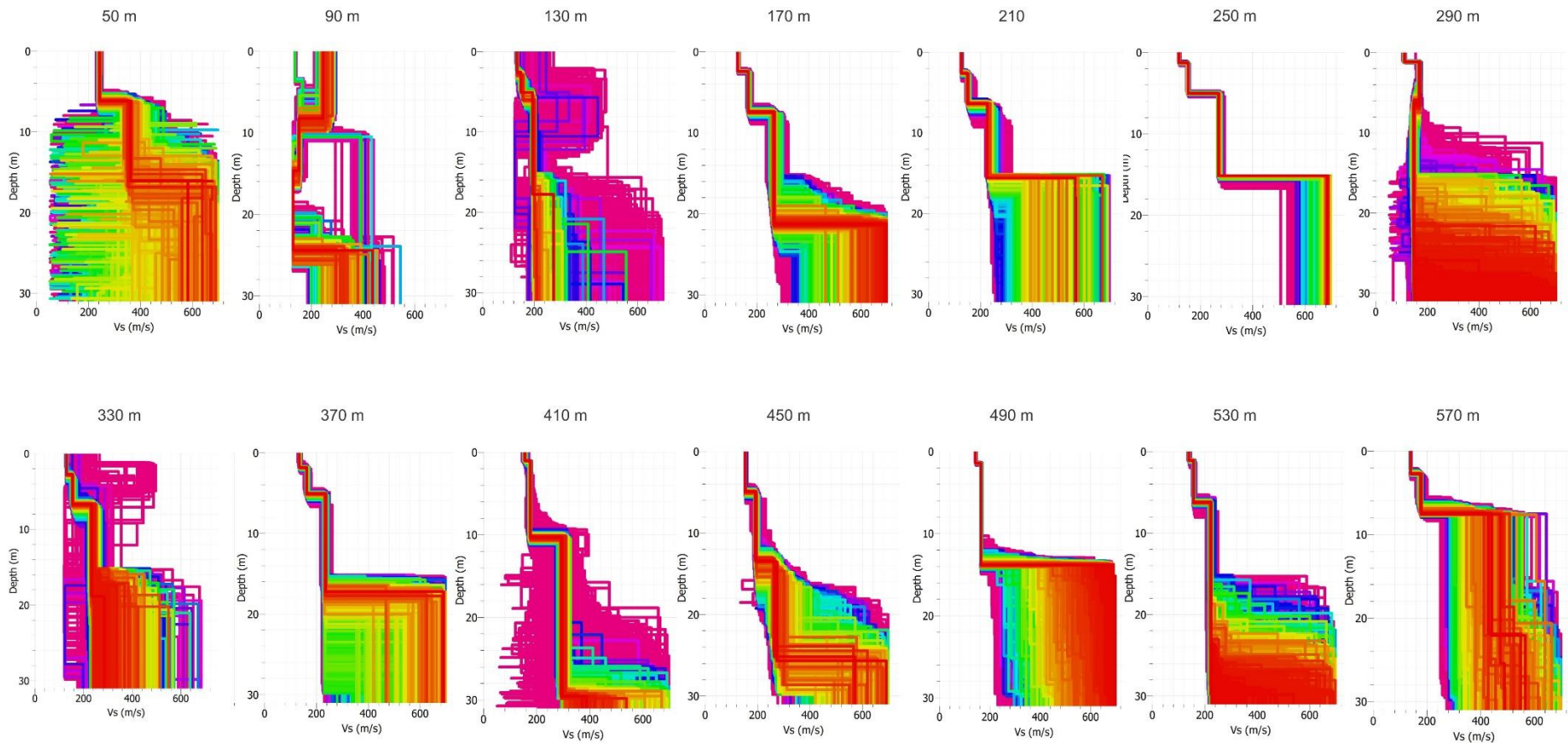
AS Merko Ehitus Eesti, projektid, Muuga kivisöeterminal. 2003-2005.
[<http://www.merko.ee/projekt/muuga-kivisoeterminal/>]

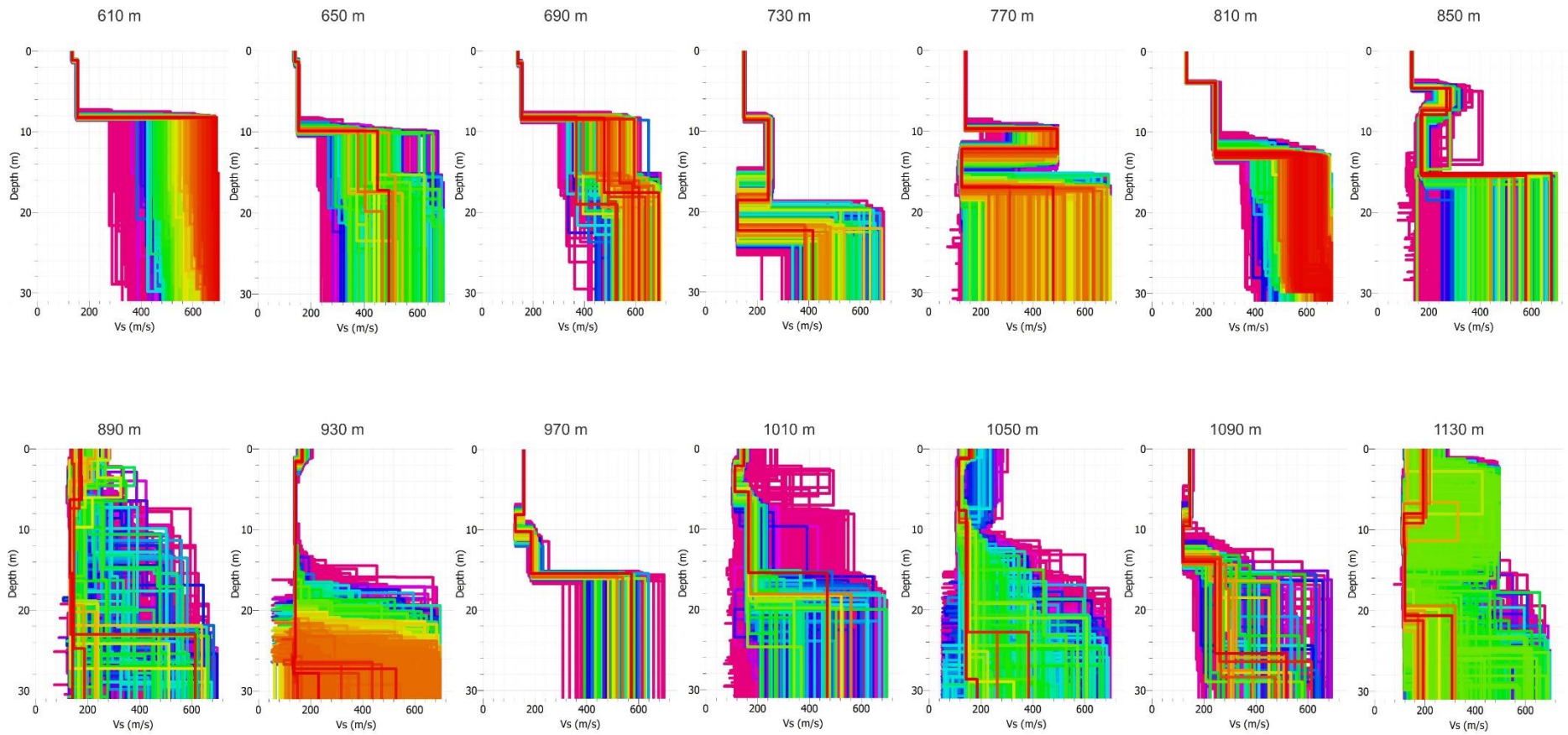
Lisad

Lisa 1. V_s ja N_{30} varasemate korrelatsioonikõverate autorid ja valemid.

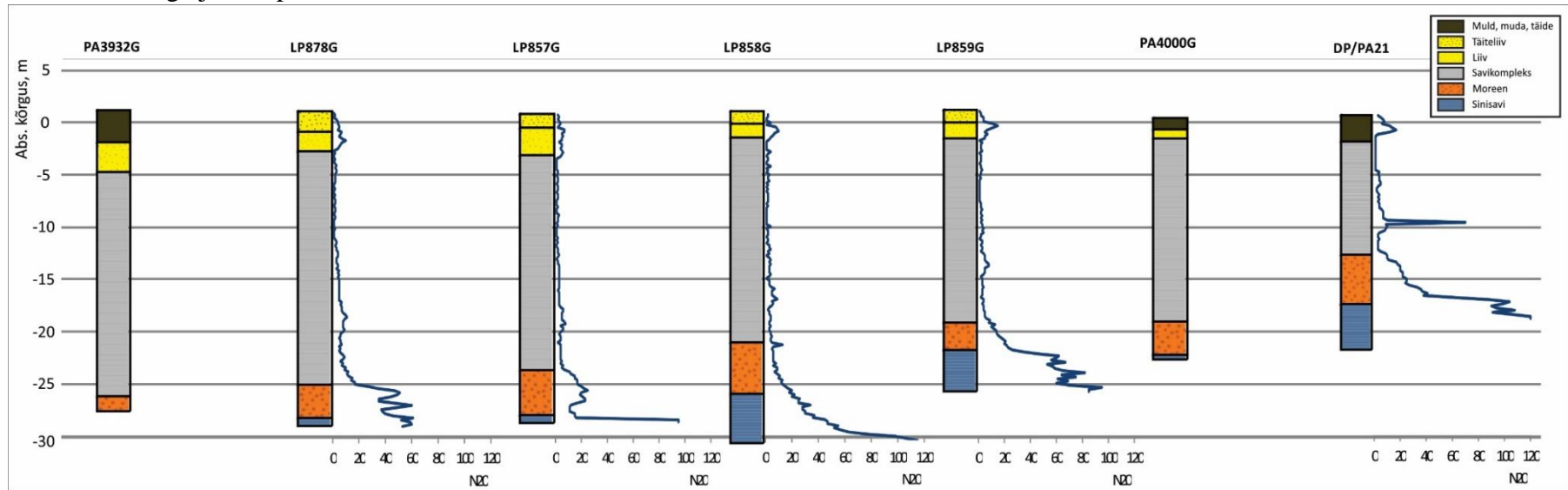
Autor	V_s (m/s)
Kanai (1966)	$19N^{0.6}$
Ohba and Toriumi (1970)	$84N^{0.31}$
Imai ja Yoshimura (1970)	$76N^{0.33}$
Fujiwara (1972)	$92.1N^{0.337}$
Ohsaki ja Iwasaki (1973)	$82N^{0.39}$
Imai ja Yoshimura (1975)	$92N^{0.329}$
Imai (1977)	$91N^{0.33}$
Ohta ja Goto (1978)	$85.35N^{0.348}$
Seed ja Idriss (1981)	$61N^{0.5}$
Imai ja Tonouchi (1982)	$97N^{0.314}$
Jinan (1987)	$116.1(N + 0.3185)^{0.202}$
Sisman (1995)	$32.8N^{0.51}$
Iyisan (1996)	$51.5N^{0.516}$
Jafari <i>et al.</i> (1997)	$22N^{0.85}$
Kiku <i>et al.</i> (2001)	$68.3N^{0.292}$
Hasancebi ja Ulusay (2007)	$90N^{0.308}$

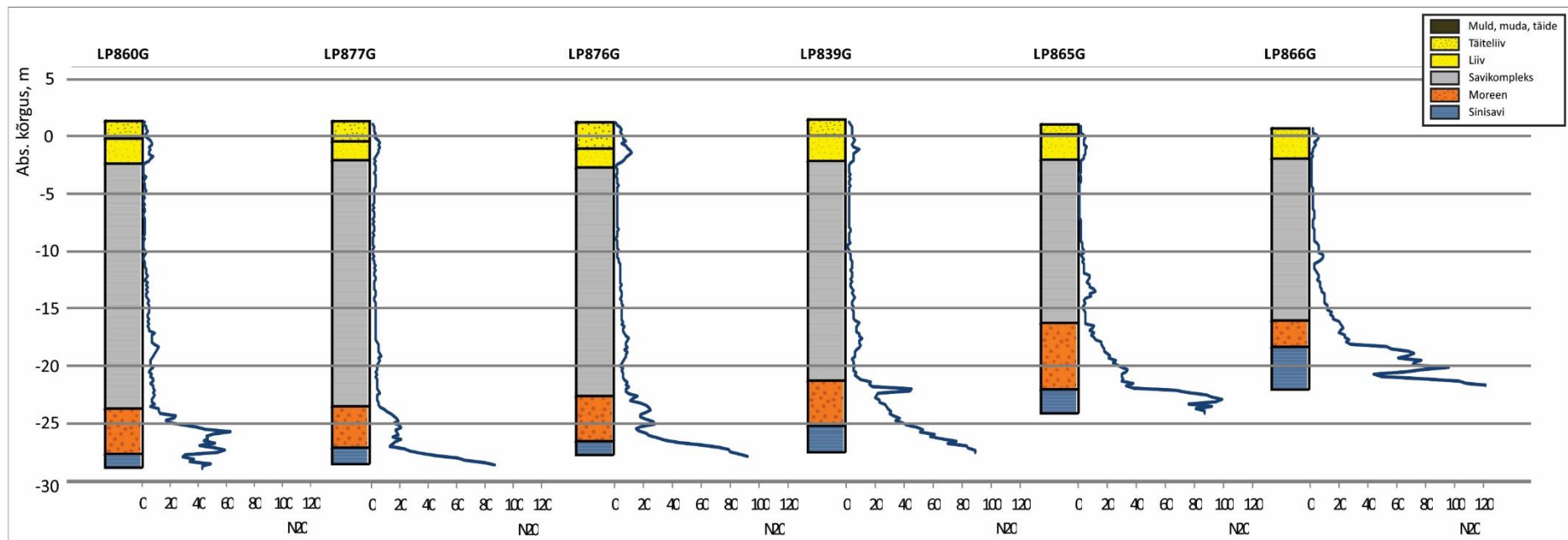
Lisa 2. Ristilainete levikukiiiruse 1D mudelid.

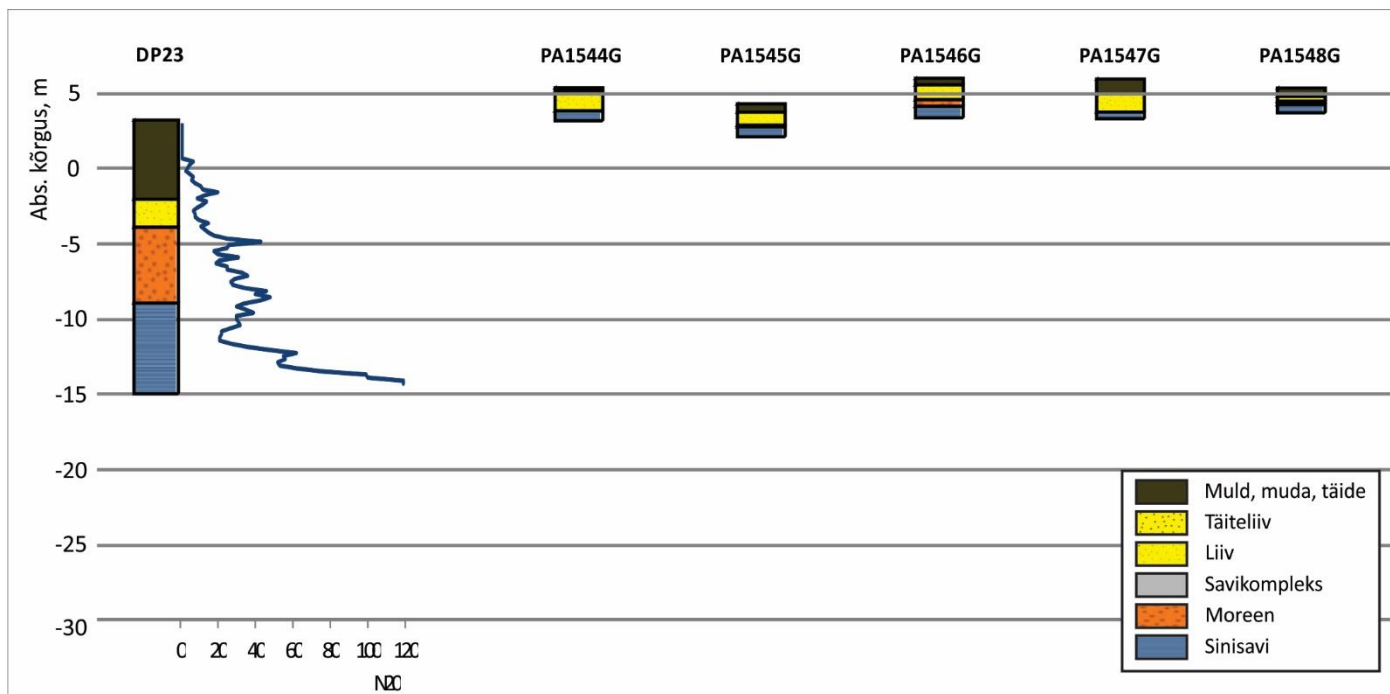




Lisa 3. Puuraegu ja löökpenetratsioonikatsed







Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Lauri Nõmtak

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Looduslike ja Täitepinnaste uurimine seismilise pinnalainete analüüsi (MASW) meetodil Muuga sadama näitel“,

mille juhendajad on Argo Jõelett ja Annette Talpsep,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 26.05.2015