

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Loodusteaduskond
Geoloogia Instituut



**SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUSUURUSTE
PROGNOOS PUUR-LÕHKETÖÖDEL EESTI
PAEKARJÄÄRIDES**

Bakalaureusetöö

Juhendaja/õppejõud: Tõnu Tomberg, MSc

Üliõpilane: Kristel Veersalu
142812 AAGB

Õppekava nimetus: AAGB 02/09

Tallinn 2017

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

Kristel Veersalu

.....

(allkiri ja kuupäev)

Juhendaja: *Tõnu Tomberg*

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

.....

(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

GEOLOGIA INSTITUUDI LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Tallinna Tehnikaülikool
Geoloogia instituut
Lõputöö ülesanne

Töö ID	1701B	Õppekava	AAGB02/09-Geotehnoloogia
Üliõpilane	Kristel Veersalu	Matrikli nr.	142812 AAGB
Töö liik	Bakalaureusetöö	Õppeaine kood	
Juhendaja	Tõnu Tomberg	Ülesanne kehtib kuni	01. juuni 2017

Töö ülesanne	Seismiliselt ohutute laengusuuruste prognoos lõhketöödel Eesti karjäärides
Topic of the Thesis	Prognosis of seismically safe charges for blasting in Estonian opencast mines

Töö sisu põhipunktid	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ülevaade seismiliste lainete liikidest. 2. Lõhketöödega kaasnevate seismiliste lainete mõõtmine ja põhiparameetrid. 3. Seismiliste lainete kahjustav mõju ehitistele ja kahjustav mõju elusorganismidele 4. Seismiliste lainete prognoosimine Eestis. 5. Mõju hindamise standardid. 6. Seismiliste lainete mõõtmise meetodika pealmaalõhkamistel. 7. Seismiliste lainete intensiivsuse prognoos.
----------------------	---

Seotud teadusteema ja/või sihtasutus	KIK16008 „Lõhketööde vibratsiooni uuring“ VERT15010 „EUExImp – Euroopa lõhkematerjalide ja lõhketööde kutsesüsteemi korrastamine“
--------------------------------------	--

Tähtajad			
Eelkaitsmine	Kuni 29. mai 2017	Kaitsmine	01. juuni 2017
Üliõpilane	Kristel Veersalu	<i>Kristel Veersalu</i>	11.04.17
Juhendaja	Tõnu Tomberg	<i>Tomberg</i>	11.04.17
Konsultant			
	<small>nimi</small>	<small>alkn</small>	<small>kehtiv</small>

Ülesanne kinnitatud	_____
Ülesanne täpsustatud	_____
Ülesanne pikendatud	_____

SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUSUURUSTE PROGNOOS PUUR-LÕHKETÖÖDEL EESTI PAEKARJÄÄRIDES

Lühikokkuvõte

Puur-lõhketööd on olulisemaks kaljuste kivimite raimamise meetodiks kaevandustes ja karjäärides. Lõhketöödega kaasnevad seismilised efektid võivad mõjuda kahjustavalt lõhketööde mõjupiirkonda jäävatele objektidele (ehitistele, hoonetele) ja inimestele.

Seismiliselt ohutute laengute prognoosi aluseks on vajalik leida seismiliste lainete intensiivsuse näitajate sõltuvus korraga plahvatanud lõhkeainekogusest ja kaugusest lõhkamiskohast. Selleks viidi läbi välitööd paekarjäärides, mille käigus mõõdeti lõhketöödel tekkivat võnkekiirust, kiirendust ja sagedust. Kogutud andmete statistiline analüüs näitas tugevat ja usaldusväärset korrelatiivset seost võnkekiiruse ja taandatud kauguse vahel lõhkamiskohast. Andmeanalüüsil saadud lähendusfunktsiooni võrrandist tuletati esialgne seismiliselt ohutute laengute prognoosimise võrrand Eesti paekarjääridele.

PROGNOSIS OF SEISMICALLY SAFE CHARGES FOR BLASTING IN ESTONIAN OPENCAST MINES

Abstract

Blasting is major method for breaking mineable rocks in quarries and mines. Seismical effect of blasting may have a harmful impact on objects and humans in the vicinity of blasting area.

For prognosis of seismically safe charges it is necessary to find correlation between charge weight and the distance from the blasting site. Fieldworks were carried out in limestone quarries to measure vibration velocity, acceleration and frequency. Statistical analysis of measured data pointed a strong correlation between vibration velocity and scaled distance from blasting site. Equation from statistical analysis was used to derive formula for prognosis of seismically safe charges for blasting in Estonian opencast mines.

SISUKORD

GEOLOOGIA INSTITUUDI LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	3
SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUSUURUSTE PROGNOOS PUUR-LÕHKETÖÖDEL EESTI PAEKARJÄÄRIDES	4
PROGNOSIS OF SEISMICALLY SAFE CHARGES FOR BLASTING IN ESTONIAN OPENCAST MINES	5
SISUKORD	6
JOONISED	8
SISSEJUHATUS	9
1 SEISMILISED LAINED	10
1.1 Ruumilained	11
1.2 Pinnalained	12
1.3 Seismiliste lainete tekkepõhjused	13
1.4 Seismiliste lainete põhiparameetrid	14
1.5 Seismiliste lainete levik	16
2 VIBRATSIOONI MÕÕTESEADE	18
2.1 Geofooni ehitus	18
2.2 Vibratsiooni parameetrid	19
2.3 Mõõtetulemuste interpreteerimine	20
3 SEISMILISTE LAINETE KAHJUSTAV MÕJU EHITISTELE JA HÄIRIV MÕJU INIMESTELE	21
3.1 Seismiliste lainete mõju ehitistele	21
3.2 Seismiliste lainete mõju inimestele	23
3.3 Mõju hindamiskriteeriumid	24
4 SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUTE MÄÄRAMINE EESTIS	26
4.1 Seismiliselt ohutute laengute määramine	26
5 PEALMAATÖÖDEL SEISMILISTE LAINETE MÕÕTMISE MEETOD	29

5.1	Võnkekeskkond.....	29
5.2	Mõõteaparatuur CM3	30
5.3	Mõõtmiste meetodika.....	30
5.4	Mõõtetulemused.....	32
6	SEISMILISTE LAINETE INTENSIIVSUSE PROGNOOS	33
6.1	Üldpõhimõtted.....	33
6.2	Taandatud kaugus.....	34
6.3	Võnkekiiruste prognoos	35
7	SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUTE ARVUTUS.....	39
7.1	Seismiliselt ohutu laengusuurus paekarjääris.....	39
8	JÄRELDUSED.....	41
	KOKKUVÕTE	42
	KASUTATUD KIRJANDUS.....	43
	Graafiline lisa 1.....	45
	Lisa 2.....	46
	Lisa 3.....	47
	Lihtlitsents lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ja reprodutseerimiseks	48

TABELID

Tabel 1.1	S- ja P-lainete levikukiirused erinevates pinnastes [7] [8]	17
Tabel 2.1	Lainete energia jagunemine [8]	20
Tabel 3.1	Maavõngete kahjustava mõju hindamise tabel [10]	25
Tabel 4.1	Ehitise suurim lubatav võnkekiirus sõltuvalt kaugusest ja aluspinnasest [2].	27
Tabel 4.2	Ehitise liigist sõltuv parandustegur [2]	27
Tabel 4.3	Pinnase seismilisuse tegur [2].....	28
Tabel 5.1	Võnkekeskkonna põhiparameetrid paekarjäärides [7].....	29
Tabel 5.2	Seismomeeter CM3 tehnilised parameetrid.....	30
Tabel 6.1	Lõhkeainete suhtelised võimsused	33

Tabel 6.2 Korrelatsioonikordaja usaldatavuse kontroll	37
Tabel 6.3 Vönkekiiruse prognoosimise võrrandid.....	38
Tabel 7.1 Mõõtmistulemused	46
Tabel 8.1 Regressioonvõrrandi parameetrid	47
Tabel 8.2 Regressioonvõrrandi lahend	47

JOONISED

Joonis 1.1 Erinevate allikate poolt põhjustatud maavõnked [8]	10
Joonis 1.2 Pikilained [6]	11
Joonis 1.3 Ristlained [6]	12
Joonis 1.4 Love'i lained [6]	12
Joonis 1.5 Rayleigh lained [6]	13
Joonis 1.6 Harmoonilise võnkumise parameetrid [8]	14
Joonis 1.7 Seismiliste lainete levik [9]	16
Joonis 2.1 Andurite asetus geofoonis [4].....	18
Joonis 2.2 Anduri ehitus [4].....	19
Joonis 3.1 Seismiliste lainete mõju ehitistele [8].....	22
Joonis 3.2 Inimese tundlikkus vibratsioonile [13]	23
Joonis 5.1 Seismomeeter SureWave CM3 (Vasalemma, 03.05.2017)	30
Joonis 5.2 Vibratsiooni mõõtmine pealmaa-lõhketöödel [7].....	31
Joonis 6.1 Vönkekiiruse sõltuvus taandatud kaugusest	36
Joonis 6.2 Vönkekiiruse prognoosimise nomogramm.....	38
Joonis 7.1 Seismiliselt ohutute laengusuuruste määramise nomogramm.....	40

SISSEJUHATUS

Puur-lõhketööd on oma efektiivsuse, madala hinna ja kiiruse tõttu peamine kaljuste kivimite raimamise meetod nii Eestis kui ka teistes maailma riikides.

Enamik Eesti karjääre paiknevad suuremate asulate, linnade ja külade piirimaal. Karjäärides (pae- ja põlevkivikarjäärid), kus teostatakse puur-lõhketöid, võivad kaasnevad keskkonnamõjud häirida inimeste elu või tekitada kahjustusi lähedal paiknevatele objektidele. Peamised lõhketöödega kaasnevad keskkonnamõjud on: müra, vibratsioon, õhulööklaine, tolmu ja laialipilduvad killud. Eestis reguleerib lõhkamistest põhjustatud keskkonnamõjusid seaduse „Lõhkematerjaliseadus“ [1] alusel välja antud määrus „Lõhketöö projektile esitatavad nõuded“ [2].

Minu bakalaureusetöö eesmärgiks oli leida meetod seismiliselt ohutute laengute prognoosimiseks paekarjäärides ning kogutud empiiriliste andmete põhjal üldistada Eestis kehtivat seismiliselt ohutuid laenguid prognoosivat valemit.

Mõõtmised viidi läbi kaheksas paekarjääris, mis asuvad erinevates Eesti piirkondades. Karjäärides teostasid puur-lõhketöid Voglers Eesti OÜ, Lemminkäinen Eesti AS, Balrock OÜ ja Intexler OÜ.

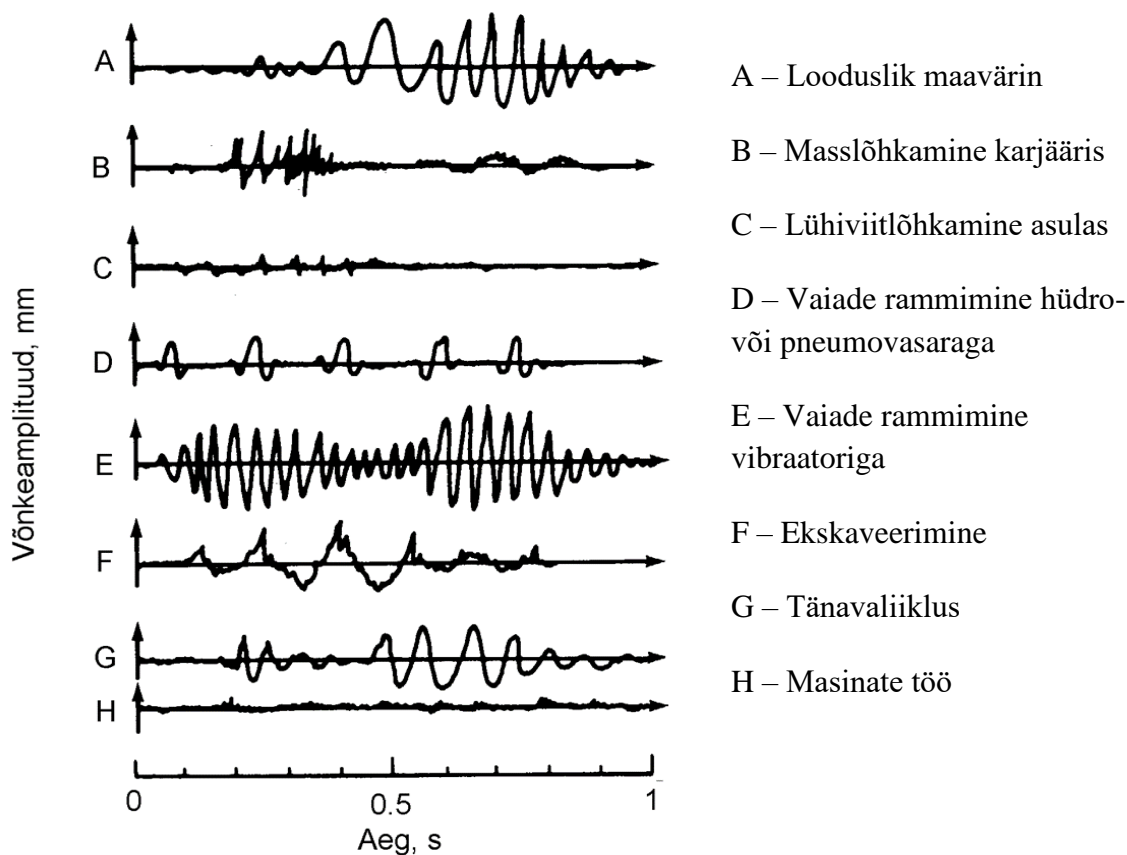
Eelnevalt on sarnane uurimus läbi viidud A. Toomiku ja T. Tombergi poolt 1990ndate aastate teisel poolel ning 2014. aastal R. Rootsi poolt. Eelnevates uurimustöodes tuletati seismiliselt ohutuid laenguid prognoosivad valemid põlevkivikaevandustele ja -karjääridele.

Antud töö on seotud Geoloogia Instituudi projektiga KIK16008 „Lõhketööde vibratsiooni uuring“

Soovin avaldada tänu ettevõtetele, Voglers Eesti OÜ, Lemminkäinen Eesti AS, Balrock OÜ ja Intexler OÜ, nende koostöö eest, samuti oma juhendajale, Tõnu Tombergile, asjakohaste nõuannete eest.

1 SEISMILISED LAINED

Seismilised lained on energia järsust vabanemisest põhjustatud võnkeliikumised. Võnkeallikad võivad olla looduslikud – maavärinad, või tehislikud ehk inimtekkelised – puur-lõhketööd, vaiade rammimine, liiklus jne [3]. Inimeste poolt tajutavatele tehislikele seismilistele lainetele võib viidata ka kui vibratsioonile [4]. Eri allikatest põhjustatud maavõnked on erinevad. Graafiliselt väljenduvad näited on esitatud joonisel (vt Joonis 1.1).



Joonis 1.1 Erinevate allikate poolt põhjustatud maavõnked [8]

Seismilised lained on füüsiliselt elastsete deformatsioonide edasikandumine maapinnas. Võnkeallikast kaugenedes seismiliste lainete energia väheneb, st toimub lainete sumbumine. Kõige kiiremini sumbuvad kõrgsageduslikud lained. Sellest tulenevalt domineerivad väiksemate kauguste puhul kõrgsageduslikud ja suuremate kaugustel puhul madalsageduslikud lained [3].

Maavõnked on oma olemuselt väga keerulised ja koosnevad mitmetest erinevatest lainetüüpidest. Eristatakse [3]:

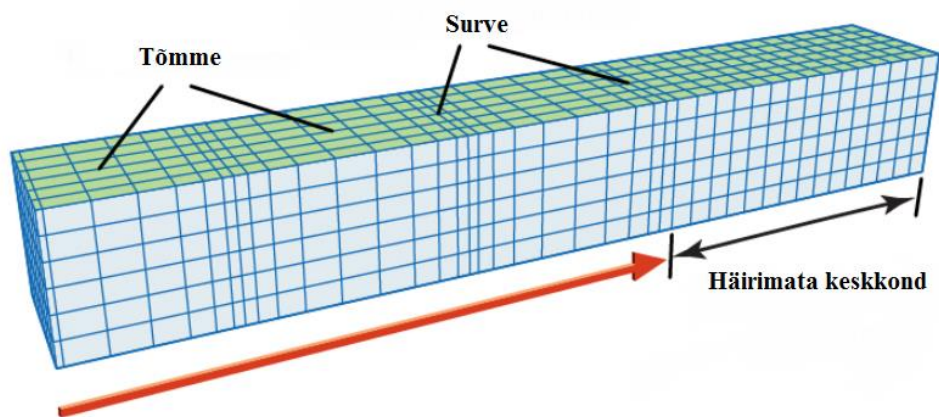
1. ruumilaineid,
2. pinnalaineid.

1.1 Ruumilained

Ruumilained levivad keskkonnas sfäärilise frondina sarnaselt helilainete levimisele õhus [5].

Ruumilained jaotatakse:

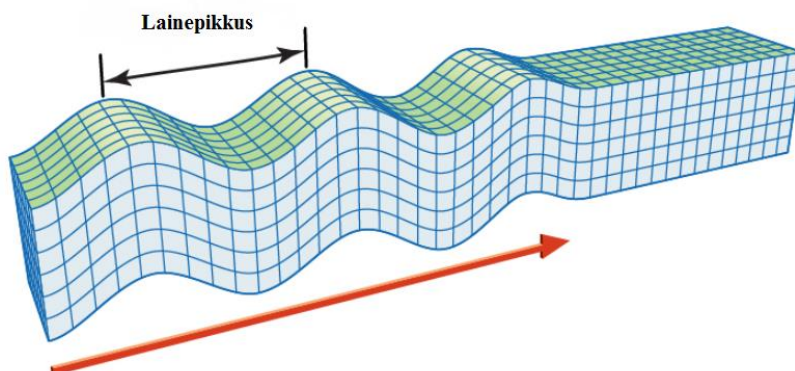
1. Pikilained (survelained) ehk P-lained, kus võnkumine toimub piki laine levimise suunda [3]. Pikilaine levimisel toimub võnkekeskkonna kokkusurumine ja laienemine laine levimise suunas (vt Joonis 1.2) [6]. Laine leviku käigus muutub perioodiliselt keskkonna tihedus [3]. Seismilistest lainetest levivad pikilained kõige kiiremini, nende levimiskiirus maakoos on 6-11 km/s (sõltuvalt kivimite omadustest ja massiivi ehitusest ja häiritusest) [6].



Joonis 1.2 Pikilained [6]

2. Ristlainete (nihkelainete) ehk S-lainete puhul toimub võnkumine risti laine levimise suunale (vt Joonis 1.3). S-lainete levimisel toimub võnkekeskkonna kujumuutus, seejuures jääb keskkonna tihedus muutumatuks. Ristlained levivad pikilainetest aeglasemalt [3]. S-lainete levimiskiirus maakoos on 3,4-7,2 km/s

(sõltuvalt kivimite omadustest ja massiivi ehitusest ja häiritusest). Ristlained ei levi vedelas ja gaasilises keskkonnas [6].



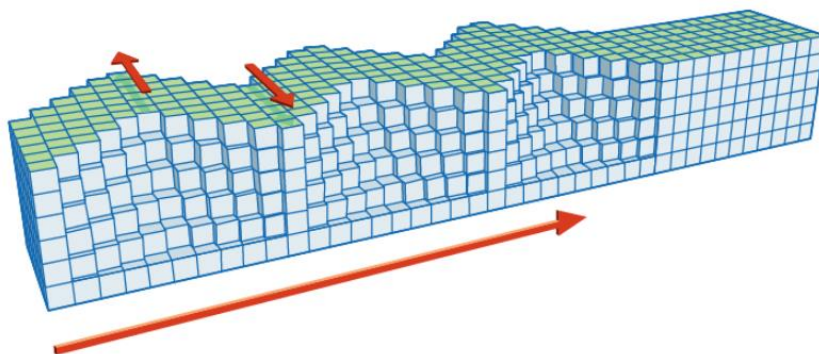
Joonis 1.3 Ristlained [6]

1.2 Pinnalained

Pinnalained levivad erinevate keskkondade piirpindadel [4]. Pinnalainete kiirus on väiksem kui piki- ja ristlainetel. Nende poolt edasikantav energia on suurim, mistõttu põhjustavad kõige suuremaid kahjustusi. Pikilainete mõju on põhjustatud lainete suurest võnkeamplituudist ja nende aeglasest levikust [5].

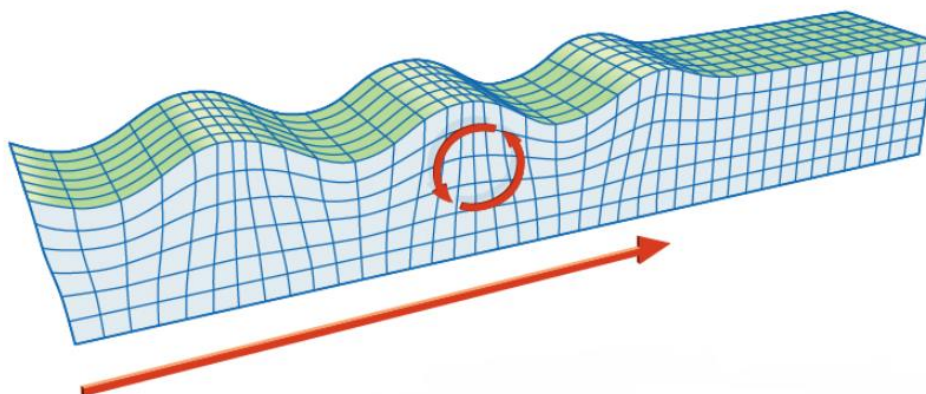
Pinnalained jagunevad:

1. Love'i lained, mille puhul toimub võnkumine risti laine leviku suunale, puuduvad vertikaal- ja pikikomponent (vt Joonis 1.4). Lained levivad erinevate keskkondade piirpindadel, kus erinevate materjalide elastsusomadused on erinevad. Love'i lainete puhul kandub energia edasi horisontaal ja pikisuunas [6].



Joonis 1.4 Love'i lained [6]

2. Rayleigh'i lained ehk R-lained, mille puhul toimub osakeste liikumine vertikaaltasandil elliptiliselt laine levimise suunas (vt Joonis 1.5). Eri keskkondade piirpindadel on osakeste liikumine vastupidine laine levimise suunale. R-lained sumbuvad kiiresti sügavuse kasvades. Rayleigh'i lained levivad P- ja S-lainetest aeglasemalt [3].



Joonis 1.5 Rayleigh lained [6]

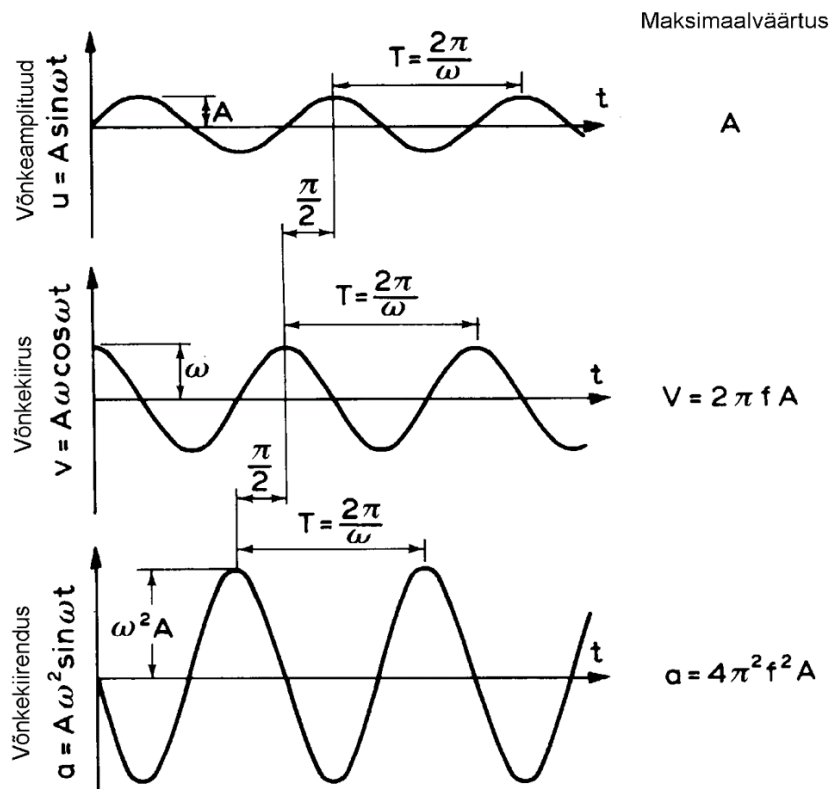
1.3 Seismiliste lainete tekkepõhjused

Seismilised lained on elastsed lained. Esimeses lähenduses võib kivimimassiivi vaadelda elastsena. Dünaamilised protsessid tekitavad keskkonnas perioodilisi elastseid deformatsioone ehk seismilisi laineid. Pikilainete levikul avaldub deformatsioon tiheduse muutuses, ristlainete levikul aga kuju muutuses [4].

Lõhketööd tekitavad maapõues alati seismilisi laineid, sest lõhkamise eesmärk on kivimimassiivi kobestamine. Kivimi purustamiseks kasutatav energia on alati suurem kivimi enda tugevusest. Kivimite purunemise käigus toimub energia järkjärguline vähenemine. Kivimite purunemine lõpeb, kui kasutatav energia väheneb alla kivimi tugevuspiiri. Kivimeid tükeldavad ja neis pragusid/lõhesid tekitavad pingelained muunduvad (sumbuvad) kivimimassiivis levides seismilisteks laineteks, mis kutsuvad esile massiivi/kivimeid mitte purustavaid deformatsioone [4].

1.4 Seismiliste lainete põhiparameetrid

Seismiliste lainete leviku saab lihtsustatult taandada harmoonilisele võnkumisele ehk siinusvõnkumisele ja seismilisi laineid saab kirjeldada harmoonilise võnkumise parameetritega, milleks on: võnkeamplituud, võnkesagedus, võnkeperiood, võnkekiirus ja –kiirendus (vt Joonis 1.6). Teades võnkeamplituudi ja sagedust, saab tuletada võnkekiiruse ja kiirenduse [7].



Joonis 1.6 Harmoonilise võnkumise parameetrid [8]

Harmoonilist võnkumist kirjeldab võrrand [4]:

$$u = A \sin(\omega \cdot t) \quad 1.1$$

Kus u – siirde väärtus ajahetkel t , [mm];

A – võnkeamplituud, [mm];

ω – nurkkiirus, [rad/s];

t – aeg, [s].

Võnkekiirus leitakse valemiga [3]:

$$v = 2\pi f A \quad 1.2$$

Kus v – võnkekiirus, [mm/s];

f – sagedus, [Hz];

A – võnkeamplituud, [mm].

Kiirenduse saab leida valemist [3]:

$$a = 4\pi^2 f^2 A \quad 1.3$$

Kus a – kiirendus, [mm/s²];

f – sagedus, [Hz];

A – võnkeamplituud, [mm].

Võnkeperioodi ja sageduse vahel kehtib pöörvõrdeline seos [4]:

$$f = \frac{1}{T} \quad 1.4$$

$$T = \frac{1}{f} \quad 1.5$$

Kus T – võnkeperiood, [s];

f – sagedus, [Hz].

Lainepikkus λ on vahemaa kahe laineharja või lainepõhja vahel ning on võrdne võnkeperioodi T ja levimiskiiruse v korrutisega [4].

$$\lambda = v \cdot T \quad 1.6$$

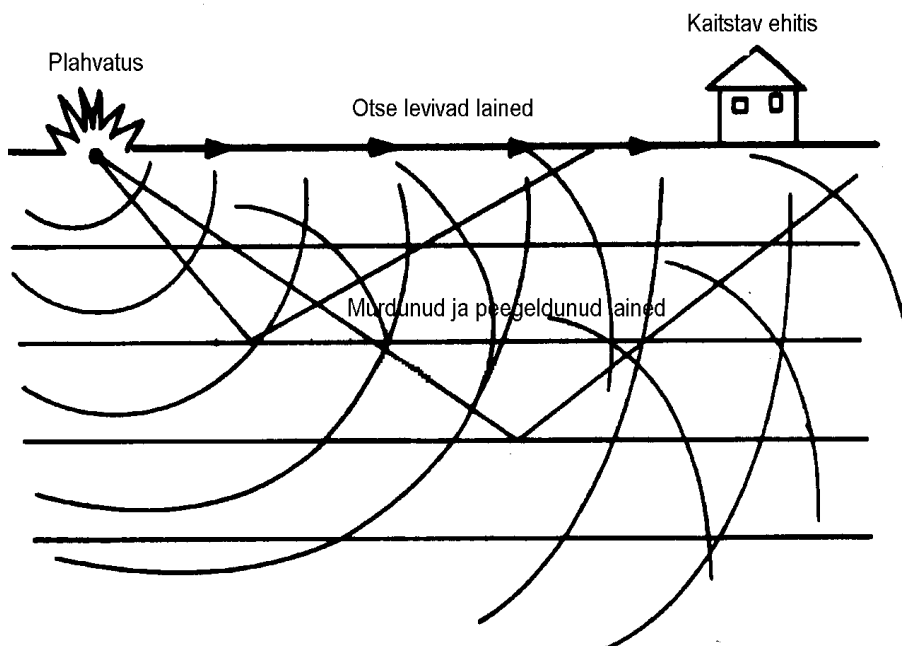
Kus λ – lainepikkus, [mm];

v – võnkekiirus, [mm/s];

T – periood, [s].

1.5 Seismiliste lainete levik

Pikilained, ristlained ja pinnalained levivad maapõues mööda kolme erinevat trajektoori. Elastsed lained kanduvad ühtlases massiivis edasi sirgjooneliselt. Piirpindadel (kihtide pindadel) toimub lainete peegeldumine ja murdumine vastavalt geomeetrilise optika seadustele, sellest tulenevalt võivad mõjualas asuva objektini jõuda nii otse levinud, peegeldunud kui ka murdunud lained (vt Joonis 1.7) [7].



Joonis 1.7 Seismiliste lainete levik [9]

Seismiliste lainete levimiskiirus sõltub mitmest tegurist: seismilise laine liigist, kivimimassiivi mehaanilistest omadustest ning massiivi ehitusest ja häiritusest [7].

Kõige kiiremini levivad massiivis pikilained ehk P-lained, ristlained levivad pikilainetest aeglasemalt, nende kiirus moodustab 50-60% pikilainete levikukiirusest. Rayleigh' lainete levimiskiirus on veel väiksem ja moodustab ligikaudu 90% ristlainete kiirusest [10]. Rist- ja pikilainete levimiskiirused on toodud tabelis (vt Tabel 1.1).

Seismiliste lainete levikut mõjutavad kivimimassiivi tugevus- ja elastsusomadused. Mistahes keskkonnas levivad elastsed lained kiirusega, mis on võrdne materjalis leviva heli kiirusega. Homogeense ehitusega tugevates ja elastsetes kivimites levivad seismilised lained kiiremini, kui pehmetes ja plastsetes kivimites [3].

Seismiliste lainete levikut mõjutavad kivimimassiivi kihilisus, lõhelisus ja häiritus. Ühtlases ja häirimata massiivis levivad seismilised lained suurema kiirusega kui keskkonnas, kus esineb lõhesid ja tühimikke. Lõhede ja tühimike täituvus veega või mõne purdmaterjaliga vähendab seismiliste lainete levimiskiirust ja sagedust [7].

Tabel 1.1 S- ja P-lainete levikukiirused erinevates pinnastes [7] [8]

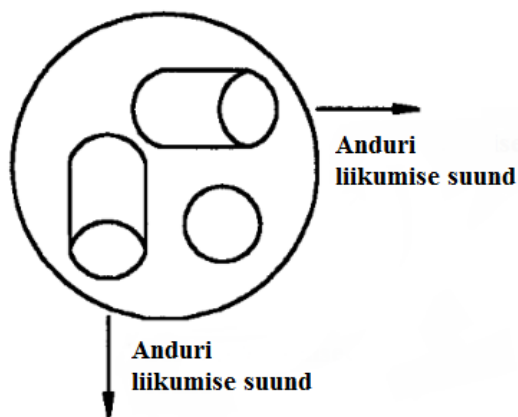
Kivimi liik	Lainete levikukiirus, [m/s]	
	Ristlainel	Pikilainel
Kuiv savi või möll	Kuni 300	400 - 600
Veega küllastunud savi või möll	Kuni 300	1200 - 1500
Kuiv liiv või kruus	100 - 300	300 - 800
Veega küllastunud liiv või kruus	100 - 300	1300 - 1700
Kuiv saviliivmoreen	400 - 800	800 - 1500
Veega küllastunud moreen	400 - 800	1400 - 2300
Lubjakivid, tugevad liivakivid	1200 - 1700	2000 - 3500
Graanit, gneiss	2000 - 2500	4000 - 4500

2 VIBRATSIOONI MÕÖTESEADE

Tänapäeval kasutatakse maavõngete uurimiseks peamiselt elektroonilisi seismomeetreid. Seismomeeter salvestab vibratsioonikomponentide väärtused, milleks on: kiirus, kiirendus ja sagedus. Seismomeetri geofooni abil indutseeritakse mehhaaniline võnkumine elektrivooluks. Geofoon on enamasti kas ühe- või kolmeteljeline, vastavalt sellele on seismomeeter suuteline mõõtma võnkekiirust ühe või kolme telje suunas [7].

2.1 Geofooni ehitus

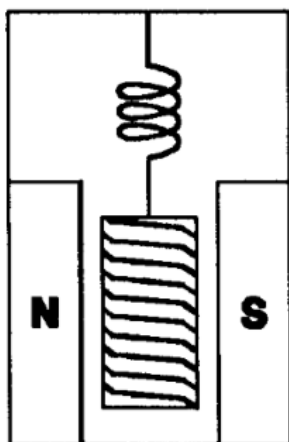
Geofoon on seismomeetri sensor, mis võtab vastu maavõnked ja indutseerib need elektrivooluks. Geofoon koosneb kolmest eraldiseisvast andurist, mis paiknevad omavahel risti. Üks anduritest paikneb verikaaltasandil ja kaks horisontaaltasandil. Iga andur reageerib liikumisele ainult selle anduri telje suunas. Kolme anduri abil saab määrata kolme risttelje suunalisi maavõnked. Andurite asetus gefoonis on näidatud joonisel (vt Joonis 2.1) [4].



Joonis 2.1 Andurite asetus gefoonis [4]

Andur on elektromagnetiline muundur, mis indutseerib maapinna võnkumise elektrivooluks. Anduri sees on pool, mis on paigutatud magnetvälja. Püsimagnet on kinnitatud anduri korpuse külge ning on selle suhtes liikumatu. Anduris paiknev pool saab vedru või liigendi abil oma telje suunas vabalt liikuda (vt Joonis 2.2). Pooli liikumine magneti suhtes tekitab elektrivälja, mis on võrdeline pooli liikumise kiirusega. Mida kiiremini pool liigub, seda tugevam elektrivool tekitatakse ja vastupidi. Maapinna

võnkumisel hakkab andur liikuma, inertsitõttu püsib aga pool paigal, tekib suhteline liikumine magnetvälja ja pooli vahel, mille tulemusena tekib elektrivool [4].



Joonis 2.2 Anduri ehitus [4]

Mõõteseade registreerib andurites saabuva muutuva tugevuse ja sagedusega elektrivoolu ja teisendab selle arvandmeteks. Kuna sensor koosneb kolmest erinevast andurist, antakse üheaegselt mõõteseadmesse kolm erinevat elektrilist signaali, vastavalt piki-, põiki- ja vertikaalkomponendile [4].

2.2 Vibratsiooni parameetrid

Vibratsiooni iseloomustavad peamised parameetrid on [4]:

1. võnkekiirus – näitab osakese asukoha muutust ajaühikus, [mm/s];
2. võnkekiirendus – näitab osakese kiiruse muutumise kiirust, [mm/s²];
3. võnkesagedus – ühes sekundis toimunud täisvõngete arv, [Hz].

Vibratsiooni võib iseloomustada ka nihkega, mis on osakeste asukoha muutus võrreldes algasukohaga ja mida mõõdetakse millimeetrites [4]. Nihke mõju ehitistele ja elusorganismidele on väike, suurema tähtsusega on nihke esimene ja teine tuletis aja järgi – kiirus ja kiirendus. Sagedusega määratakse seismiliste lainete mõju ulatus. Kõrge sagedusega lained sumbuvad kiiresti ja nende negatiivne mõju on oluliselt väiksem kui madala sagedusega lainetel, sest kõrge sagedusega lained ei tekitada ehituskonstruktsioonides resonantsi [3].

2.3 Mõõtetulemuste interpreteerimine

Maavõngete mõõtmisel jõuab seismomeetri geofooni seismiliste liitlainete kolme komponendi lained: piki-, rist- ja pinnalained. Energia jagunemine eri laineliikide vahel on erinev. Lainete energia protsentuaalne jagunemine on toodud tabelis (vt Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Lainete energia jagunemine [8]

Laineliik	Energia protsentuaalne jagunemine
Pikilained	5...20
Ristlained	15...50
Pinnalained	45...80

Geofooni jõuavad nii otse levinud, peegeldunud kui ka murdunud lained. Tegemist on ebakorrapärase liitvõnkumisega, mis jaguneb piki-, põiki- ja vertikaalkomponendiks [11]. Lainete liitumisel võib tekkida interferents, mille tulemusena, sõltuvalt lainete faasidest, kas seismiliste lainete võnkeamplituud suureneb või väheneb [4].

Praktilises rakenduses saab mõõtetulemusi kasutada puur-lõhketööde projekteerimisel. Mõõtetulemusi saab kasutada vibratsiooni mõju vähendamiseks, samuti optimeerida lõhkeaine kogust, mis on vajalik kivimite purustamiseks [4].

3 SEISMILISTE LAINETE KAHJUSTAV MÕJU EHITISTELE JA HÄIRIV MÕJU INIMESTELE

Lõhketöödel tekkivad seismilised lained võivad omada negatiivset mõju nii objektidele (hoonetele, ehitistele) kui ka inimestele. Lõhketöödel tekkiv vibratsiooni tekitab harva kahjustusi, kuid võib selle eest kõige suurema tõenäosusega tekitada kahju [9].

Lõhketööde mõjupiirkonda jäävate hoonete ja ehitisteni jõuavad kolme erinevat liiki lained: otse levinud, peegeldunud ja murdunud lained. Tegemist on liitvõnkumisega, mis koosneb pinna- ja ruumilainetest [11]. Erinevad laineliigi komponendid mõjutavad mõjupiirkonnas asuvat objekti erinevalt [7]:

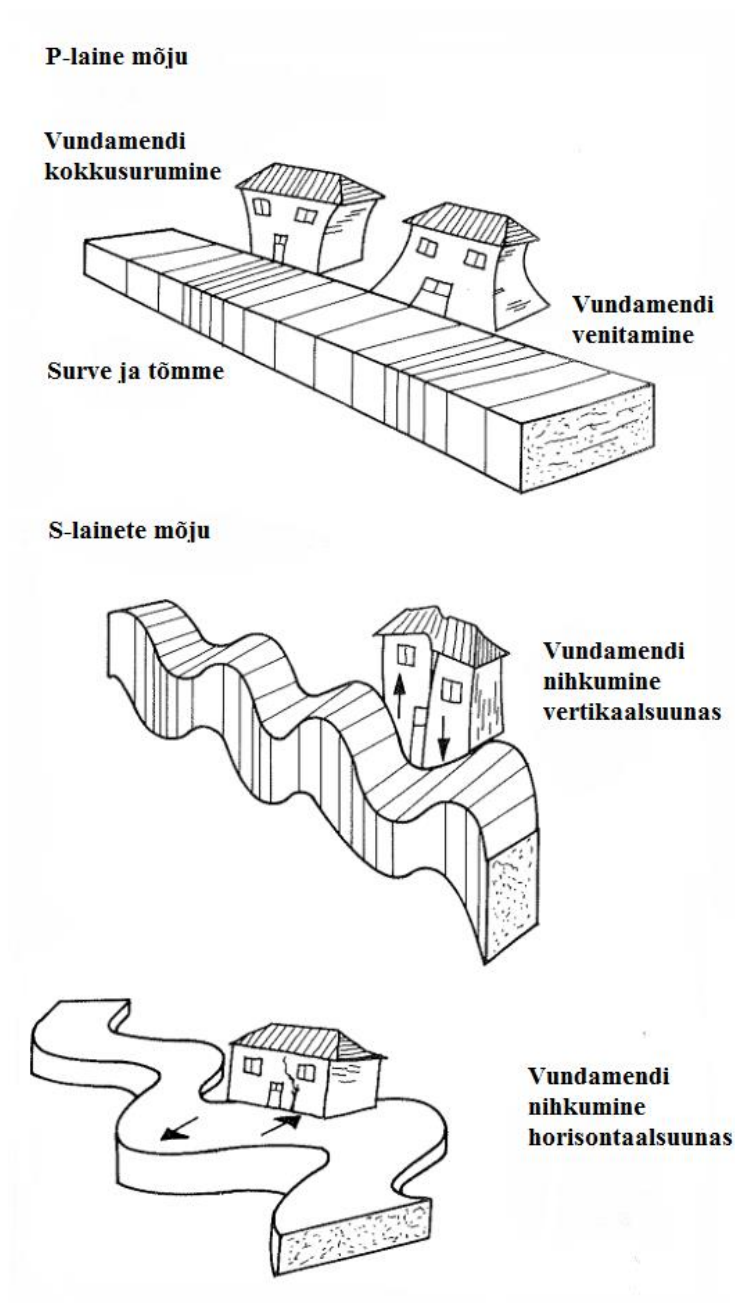
1. pikikomponent, mida nimetatakse ka pikilaineks, tekitab objektides perioodilisi horisontaalsuunalisi surve- ja tõmbepingeid;
2. vertikaalne ristikomponent, mida nimetatakse ka ristlaine vertikaalkomponendiks, tekitab mõjutavates objektides perioodilisi vertikaalseid nihkepingeid;
3. horisontaalne ristikomponent, mida nimetatakse ka ristlaine horisontaalkomponendiks, tekitab mõjutavates objektides perioodilisi horisontaalseid nihkepingeid.

3.1 Seismiliste lainete mõju ehitistele

Liitvõnkumise erinevate suundadega lainekomponendid võivad tekitada hoonetes ja ehitistest erineva ulatuse ja olemusega kahjustusi (vt Joonis 3.1) ja mõjutada peenmehhaanika- ja elektroonikaseadmete tööd [11]. Hoonetele avaldab kahjulikku mõju suhteline deformatsioon, mis on otseselt seotud võnkekiirusega, võnkekiirendus mõjutab aga peenmehhaanika kiiresti liikuvaid osi. Kui seismiliste lainete intensiivsus ületab mingi kriitilise piiri, võivad ehitised ja seadmed muutuda kasutuskõlbmatuks [7]. Ajalooliste ja kultuuriliste ehitiste, mälestusmärkide, lisaks ka haiglate ja tundlike elektroonikaseadmete puhul, tuleks seismiliste ohutute laengute määramisel lähtuda konkreetsest olukorrast [12].

Hoonel ja ehitistel on kindel omavõnkesagedus. Kui lõhkamisest tekkivate seismiliste lainete sagedus ühtib ehitise või hoone omavõnkesagedusega või on selle kordne, võib tekkida resonants. Madalatel sagedustel, mis on suurusjärgus 4 kuni 12 Hz, võib

maavõngete sagedus langeda kokku maja omavõnkesagedusega, mis võib suurendada tekkivate kahjustuste ulatust. Sageduse suurenedes väheneb tõenäosus, et ehitise omavõnkesagedus langeb kokku maavõngete sagedusega. Sellest võib järeldada, et väikeste kaugustel on lubatud suurem võnkekiirus, sest domineerivad suurema võnkesagedusega seismilised lained ja suurtel kaugustel on lubatud väiksem võnkekiirus, sest domineerivad madala sagedusega seismilised lained [9].

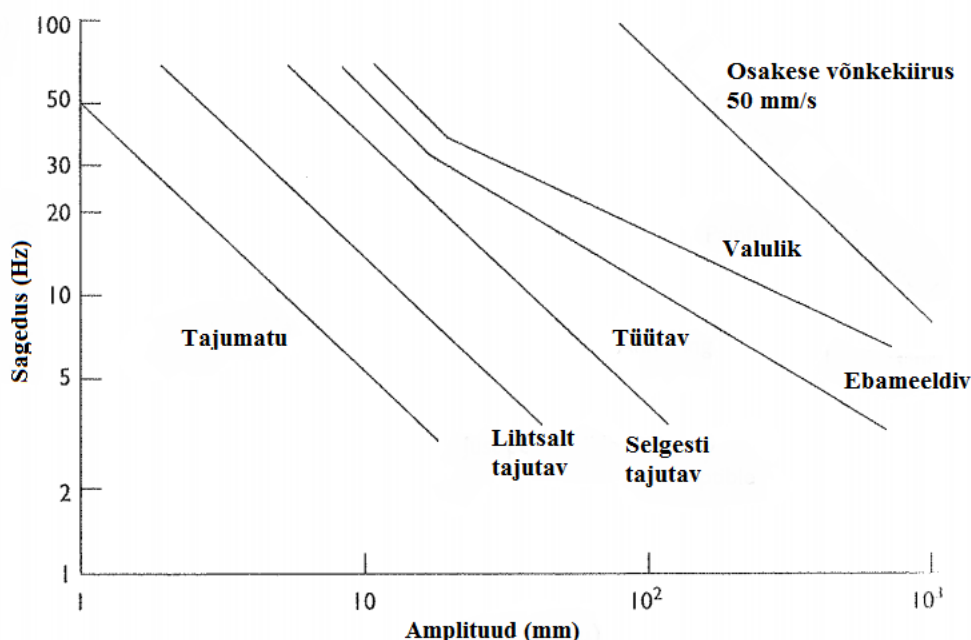


Joonis 3.1 Seismiliste lainete mõju ehitistele [8]

3.2 Seismiliste lainete mõju inimestele

Inimesed on võimelised tajuma seismilisi laineid võnkekiirusega alates 0,5 mm/s kuni 10 mm/s [13]. Inimese vibratsiooni taju sõltub seismiliste lainete võnkekiirusest, kiirendusest, sagedusest ja vibratsiooni kestusest. Peamiselt põhjustab ebamugavustunnet võnkekiirendus [14]. Üldiselt reageeritakse tugevamini suure amplituudiga seismiliste lainetele, mis kestavad pikaajaliselt, kui sama intensiivsusega väikese amplituudiga lühiajalise kestusega lainetele [13]. Suure sageduse ja intensiivsusega seismilised lained on paremini tajutavad, kui madala sagedusega [9]. Vibratsioonist põhjustatud ebamugavustunne inimestel on äärmiselt subjektiivne [4].

Inimeste suur vibratsioonitundlikkus põhjustab palju probleeme, sest arvatakse, et tajutav vibratsioon võib mõjuda kahjulikult ehitistele. Tegelikuses jääb inimeste poolt tajutud vibratsiooni intensiivsus allapoole lubatud piirnormati. Maja omavõnkesageduse ja seismiliste lainete sageduse kokkulangemisel võib tekkida resonants, mistõttu tekib hoones sees viibides suurem ebamugavustunne kui see oleks väljas [9]. Inimeste keskmine taju erineva sageduse ja amplituudiga seismiliste lainetele on toodud joonisel (vt Joonis 3.2). Osakeste võnkekiirust 50 mm/s võib lugeda ohutuks võnkekiiruseks, mis ei tohiks tekitada kahjustusi hoonetele ja ehitistele [13].



Joonis 3.2 Inimese tundlikkus vibratsioonile [13]

3.3 Mõju hindamiskriteeriumid

Vibratsiooni kahjuliku mõju hindamisel hoonetele ja ehitistele mõõdetakse peamiselt nelja parameetrit: võnkeamplituud, -kiirus, -kiirendus ja -sagedus [13]. Kõige paremini saab kahjustuste mõju hinnata seismiliste lainete võnkekiiruse ja –sageduse kaudu [3]. Sõltumata võnkekiirusest, võivad madalad sagedused mõjutada peenmehaanika tööd [11]. Ehitistes tekkivad pinged ja deformatsioonid on võrdelises sõltuvuses võnkekiirusest. Seos võnkekiiruse ja suhteliste deformatsioonide vahel avaldub järgmiselt [3]:

$$y = \frac{v}{c} \quad 3.1$$

Kus y – seismiliste lainete mõjul tekkiv suhteline deformatsioon, [mm/m];

v – osakeste võnkekiirus, [mm/s];

c – seismiliste lainete levikukiirus, [m/s].

Sõltuvalt lõhketööde mõjualasse jääva objekti (hoone, ehitise) tehnilisest seisukorrast, konstruktsioonist ja objektis kasutatavatest materjalidest, vibratsiooni iseloomust ja kestusest ning seismiliste lainete levikukiirusest, võib kahjustusi mitte põhjustav maksimaalne võnkekiirus olla erinev [3]. Võimalikku mõju võib hinnata ka lõhketööde korduvuse järgi, st kas tegemist on pikaajaliste, korduvate või ajutiste lõhketöödega [7].

Seismiliste lainete kahjustav mõju ehitistele, sõltuvalt võnkekiirusest ja ehitise aluspinnasest, on esitatud tabelis (vt Tabel 3.1) [3].

Tabel 3.1 Maavõngete kahjustava mõju hindamise tabel [10]

	Kivim			Eeldatav mõju
	Veega küllastunud liiv, kruus või savi	Moreen, kildad, pehme lubjakivi	Graniit, gneiss, lubjakivi, dolomiit	
Seismiliste lainete levikukiirus (m/s)	1000 – 1500	2000 – 3000	4500 – 6000	
Võnkekiirus (mm/s)	18	35	70	Vigastuste täielik puudumine
	30	55	110	Vähesed, väikese ulatusega praod, krohvi pudenemine
	40	80	160	Pragude moodustamine
	60	115	230	Intensiivne pragude moodustumine

4 SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUTE MÄÄRAMINE EESTIS

Lõhketööde ning lõhkematerjalide käitlemise ohutust Eestis reguleerib „Lõhkematerjaliseadus“ [1], mille alusel välja antud normatiivdokumendis „Lõhketööde projektile esitatavad nõuded“ [2] on välja toodud metoodika ohutute laengute prognoosimiseks.

Eestis kehtiv määrus seismiliselt ohutute laengute arvutamiseks on üle võetud Soome normatiivist. Soome ja Eesti geoloogilised tingimused on erinevad. Soomes esinevad peamiselt ühtlase massiiviga tardkivimid. Eestis on levinud peamiselt kihilised ja lõhelised paekivid, kus lõhed võivad olla täitunud vee või erinevate settetega. Sellest tulenevalt ei ole Soome normatiivist üle võetud seismiliste ohutute laengute arvutamise valemit otstarbekas kasutada Eesti geoloogilistes tingimustes.

Võrdlemisi usaldusväärsed valemid on välja töötatud 20 aastat tagasi 1996-1999. aastatel T. Tombergi ja A. Toomiku poolt seismiliselt ohutute laengute määramiseks Eesti põlevkivikaevandustele ja –karjäärile, mis on toodud määruses „Lõhketöö projektile esitatavad nõuded“. Seismiliselt ohutute laengute määramiseks Eesti paekivikarjäärides puudub analoogiline metoodika.

4.1 Seismiliselt ohutute laengute määramine

Maksimaalne lubatud võnkekiirus leitakse järgmise valemi abil [2]:

$$v_{maks} = v_1 \cdot F_k \quad 4.1$$

Kus v_{maks} – maksimaalne võnkekiirus, [cm/s];

v_1 – kaitstava ehitise kaugusest ja tema aluspinnast sõltuv suurim lubatud võnkekiirus, [cm/s] (vt Tabel 4.1);

F_k – ehitise liigist sõltuv parandustegur (vt Tabel 4.2).

Tabel 4.1 Ehitise suurim lubatav võnkekiirus sõltuvalt kaugusest ja aluspinnasest [2]

Kaugus ehitiseni, [m]	Suurim lubatav võnkekiirus v_1 , [cm/s]		
	Ehitise aluspinnas		
	Savi, kruus, liiv, pehme moreen	Tugev moreen, kildad, pehme lubjakivi, liivakivi	Graniit, gneiss, tugev lubjakivi, tugev liivakivi
1	1,8	3,5	14,0
5	1,8	3,5	8,5
10	1,8	3,5	7,0
20	1,5	2,8	5,5
30	1,4	2,5	4,5
50	1,2	2,1	3,8
100	1,0	1,7	2,8
200	0,9	1,4	2,2
500	0,7	1,1	1,5
1000	0,6	0,9	1,2
2000	0,5	0,7	0,9

Tabel 4.2 Ehitise liigist sõltuv parandustegur [2]

Nr	Ehitise liik	Parandustegur F_k
1	Rasked ehitised, nagu sillad ja sadamakaid	2,00
2	Betoon-, raudbetoon- ja teraskonstruksioonid, eelmainitud konstruktsioonidest tööstushooned, pritsbetooniga kaetud allmaarajatised	1,50
3	Tellistest ja betoonist büroo- ja ühiskondlikud hooned, betoonvundamendile või kaljupinnasele ehitatud puuhooned	1,20
4	Betoonist või tellistest elumajad (ehitises ei tohi olla kasutatud kergbetooni ega silikaattelliseid), allmaakaablid. Kivistuv valubeton eaga üle ühe nädala	1,00
5	Kergbetonehitised (ka kõik muud ehitised, milles on kasutatud kergbetooni). Kivistuv valubeton eaga 3–7 ööpäeva	0,75
6	Eriti vibratsioonitundlikud ehitised, nagu muuseumid, kirikud ja teised kõrgete võlvide ja suurte pingeväljadega hooned, silikaattellistest hooned. Kivistuv valubeton eaga kuni 3 ööpäeva	0,65
7	Varinguohtlikud ajaloo- ja arhitektuurimälestised, varemed	0,5

Maksimaalne seismiliselt ohutu laeng arvutatakse valemiga [2]:

$$Q_{max} = \frac{v_{max}^2 r^{2,7}}{K^2} \quad 4.2$$

Kus Q_{max} – seismiliselt ohutu laeng, [kg];

v_{max} – ehitise suurim lubatud võnkekiirus, [cm/s];

K – pinnase seismilisuse tegur (vt Tabel 4.3);

r – kaugus lõhkamiskohast hoitava objektini, [m].

Tabel 4.3 Pinnase seismilisuse tegur [2]

Objekt aluspinnases	Pinnase seismilisuse tegur	
	K_{min}	K_{max}
Veevaene kaljupinnas paksusega kuni 15 m	200	300
Keskmise veesisaldusega üle 15 m paks liiva- või savipinnas	300	450
Veega küllastunud kobe pinnas (vesiliivad)	450	600

Teguri maksimaalväärtus võetakse kasutusele viimasel ja suurvee perioodil. Minimaalväärtus võetakse kasutusele suvisel perioodil. Aastaringssel töötamisel võetakse kasutusele maksimaalväärtus [2].

5 PEALMAATÖÖDEL SEISMILISTE LAINETE MÕÕTMISE MEETOD

5.1 Vönkekeskkond

Eestis levivad paekivid (lubja- ja dolokivid) on moodustunud Ordoviitsiumi ja Siluri ajastul. Sõltuvalt paekivi tekketingimustest, võib kivimite koostis ja omadused Eesti aladel suuresti erineda. Lubjakivi peamine koostisosa on mineraal kaltsiit, lisanditena võib esineda dolomiiti, savi, glaukoniiti ja raudhüdrosiide. Lubjakivi sisemine ehitus võib olla peitkristalliline kuni jämedateraline. Dolokivide peamine koostisosa on mineraal dolomiit ja suur osa dolokividest on tekkinud lubjakivi dolomiidistumisel [15].

Paekivid on kihilised, mis avaldub kihikompleksi ainelise koostise, terajämeduse või mõne muu litoloogilise omaduse vertikaalses muutumises. Esineb ka lõhesid, mis on sageli täitunud veega, pudedate setetega või muude kivimitega. Paekivi peal lasub katendikiht, mis koosneb kasvupinnasest, moreenist, liivast, kruusast või savist [15].

Paekivikarjäärides lõhkamisel levivad plahvatusimpulsi mõjul seismilised lained sfääriliselt igas suunas kuni lainete sumbumiseni. Piirpindadel toimub seismiliste lainete peegeldumine ja murdumine. Vönkekeskkonna füüsikalised ja mehaanilised omadused mõjutavad oluliselt seismiliste lainete levikut kivimimassiivis. Ühtlase ehitusega tugevates ja elastsetes kivimimassiivides levivad seismilised lained kiiremini, kui pehmetes ja plastsetes kivimites. Eestis esinevate kivimite ja setete põhiparameetrid on toodud tabelis (vt Tabel 5.1) [7]:

Tabel 5.1 Vönkekeskkonna põhiparameetrid paekarjäärides [7]

Kivimid	Paksus, [m]	Tihedus, [Mg/m ³]	Survetugevus, [MPa]	Dünaamiline elastsumoodul, [MPa]	Seismiliste lainete levikukiirus, [m/s]
Liiv, moreen	kuni 10	1,6 – 1,9	-	-	1000 - 1500
Lubjakivi, dolokivi	12-50	2,5 - 2,7	40 - 70	36000 - 52000	1600 - 2500

5.2 Mõõteaparatuur CM3

Mõõtmiste teostamiseks kasutati Suurbritannias valmistatud SureWave CM3 elektroonilisi seismomeetreid (vt Joonis 5.1). Seadme tehnilised andmed on toodud tabelis (vt Tabel 5.2).



Joonis 5.1 Seismomeeter SureWave CM3 (Vasalemma, 03.05.2017)

Tabel 5.2 Seismomeeter CM3 tehnilised parameetrid

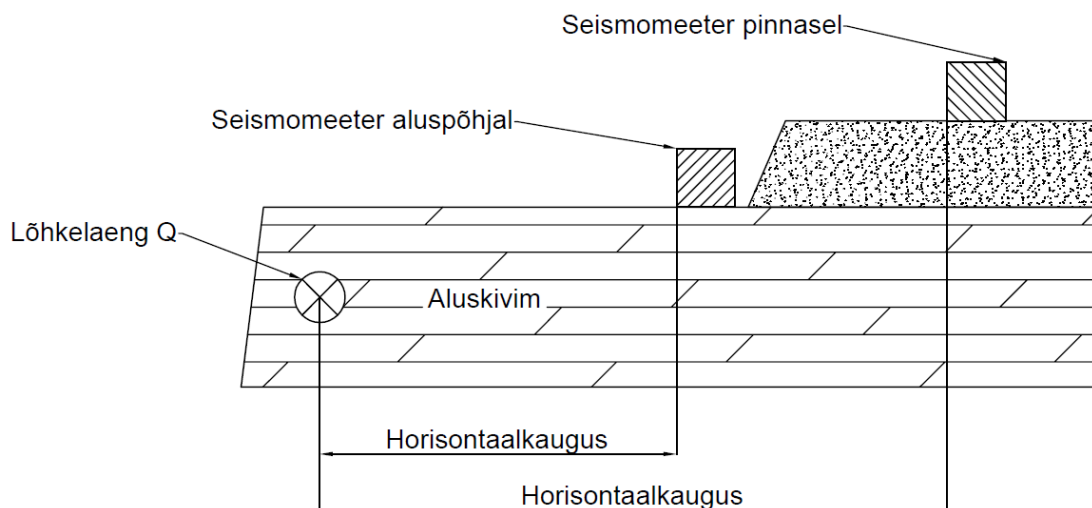
Tehnilised andmed	CM3
Geofooni tüüp	Kolmeteljeline
Mõõteulatus [mm/s]	0,01-99,8
Mõõtmistäpsus [mm/s]	0,01
Sagedusulatus [Hz]	0,5-1000
Mälu [GB]	32

5.3 Mõõtmiste metoodika

Lõhketööde mõjupiirkonnas asuva objekti peamiseks mõjutajaks on võnkeskkonna ainesakeste võnkekiirus [7]. Mõõtmistel määrati võnkekiiruste pikisuunaline, vertikaalsuunaline ja horisontaalsuunaline komponent.

Mõõtmiskohad karjääris valiti vastavalt konkreetsele situatsioonile. Geofoonide paigutusel lähtusime tingimusest, et puuduksid katkestuspinnad seismomeetri ja lõhatava

ploki vahel ning, et seismograafid asetseksid lõhatavast plokist erinevatel kaugustel, minimaalne vahekaugus kahe seismomeetri vahel pidi olema vähemalt 20 m. Seismomeeter paigutati peamiselt paljandatud aluskivimitele – paekividele. Mõnel juhul ka pinnasele. Seismiliste lainete mõõtmise skeem on toodud joonisel (vt Joonis 5.2).



Joonis 5.2 Vibratsiooni mõõtmine pealmaa-lõhketöödel [7]

Mõõtmisel fikseerib seismomeeter vertikaal-, horisontaal- ja pikisuunalise komponendi maksimumid. Seismiliste lainete erineva levimiskiiruse, samuti ka lainete murdumise ja peegeldumise tõttu, ei lange komponentide maksimaalväärtused ajaliselt kokku. Seetõttu kasutatakse seismouuringutes võnkekiiruse maksimaalset vektorsummat [16]:

$$v_{VS} = \max \sqrt{v_P^2 + v_{SH}^2 + v_{SV}^2} \quad 5.1$$

Kus v_{VS} – võnkekiiruse vektorsumma, [mm/s];

$v_P^2, v_{SH}^2, v_{SV}^2$ – vastavalt seismilise laine piki- ning horisontaalse ja vertikaalse ristkomponentide võnkekiirused, [mm/s].

Vektorite resultantsumma kasutamine sisaldab täiendavat ohutusvaru, sest liidetakse iga kolme komponendi maksimaalväärtus [11].

5.4 Mõõtetulemused

Mõõtmised toimusid alates 10.04.2017 kuni 3.05.2017. Mõõtmised toimusid kaheksas erinevas paekarjääris üle Eesti (vt Graafiline lisa 1). Kokku mõõdeti kahe seismomeetriga 26 lõhkamise seismilist mõju, mõõtekaugused jäid vahemikku 38-189 m. Viitegruppide (50 ms jooksul plahvatanud lõhkeaine hulk) maksimaalväärtused jäid vahemikku 37-126,4 kg. Lõhkeainetest kasutati põhilaenguna peamiselt ANFO-t ja emulsioonlõhkeainet Sibirit 1200, löökpadrulina dünamiiti Ergodyn ja padrundatud emulsioonlõhkeainet Senatel.

Mõõtmistulemused on esitatud lisa (vt Lisa 2)

6 SEISMILISTE LAINETE INTENSIIVSUSE PROGNOOS

6.1 Üldpõhimõtted

Seismiliste lainete intensiivsuse prognoos seisneb seismiliste lainete intensiivsuseparameetrite määramises. Selleks peab olema teada võnkekeskkonna omadused, lõhkamisel vabanenud energia hulk ja kaugus lõhkamiskohast kuni mõjupiirkonda jääva objektini [7].

Intensiivsuse hindamise peamiseks parameetriks on võnkekeskkonna aineosakeste võnkekiirus. Sama parameetrit kasutatakse peamise hindamiskriteeriumina seismiliselt kahjustava mõju hindamiseks [17].

Lõhkamisel vabanenud energia hulk sõltub plahvatavast lõhkeainekogusest ehk laengu või viitegrupi suurusest ja kasutatava lõhkeaine omadustest. Eesti paekarjäärides kasutatakse lõhkeainena peamiselt ANFO-t ja emulsioonlõhkeainet Sibirit 1200, mille plahvatusenergia jääb vahemikku 2,58-3,9 MJ/kg. Kuna üksiklaengute plahvatusenergia jääb võrdlemise väikesesse vahemikku, siis lainete intensiivsus sõltub peamiselt laengu või viitegrupi suurusest Q [7]. Erinevate lõhkeainetega lõhkamisel saadud andmete võrdlemiseks taandati kõik lõhkeaine kogused suhtelisele võimsusele etaloni suhtes ehk trotüülekviivalendile. Lõhkeainete suhtelised võimsused (REF) on toodud tabelis (vt Tabel 6.1).

Tabel 6.1 Lõhkeainete suhtelised võimsused

Lõhkeaine	REF
ANFO	0,81
Ergodyn 35 (dünaamiit)	1,2
Senatel	0,96
Sibirit 1200	0,97
TNT	1

Lõhketöödest põhjustatud seismiliste lainete intensiivsuse prognoosimiseks on vaja leida võnkekiiruse sõltuvus laengu või viitegrupi suurusest Q ja mõõtmispunkti kaugusest lõhkamiskohast d . Intensiivsuse prognoosimiseks tuleb leida seos [7]:

$$v = f(Q, d) \quad 6.1$$

Kus v – võnkekeskkonna aineosakeste võnkekiirus, [mm/s];

Q – laengu (viitegrupi) suurus, [kg];

d – kaugus lõhkamiskohast mõjustatava objektini, [m].

6.2 Taandatud kaugus

Seismiliste lainete intensiivsus, mille üks ehitisi kahjustav parameeter on võnkekiirus, sõltub laengu (viitegrupi) suurusest Q , objekti kaugusest d lõhkamiskohani ja võnkekeskkonna omadustest. Samasuguste lõhkamissituatsioonide puhul võivad laengute suurused varieeruda küllaltki suures ulatuses, samuti on muutlikud ka kaugused ohustatud objektist lõhkamiskohani. Laengu (viitegrupi) suurust ja kauguse muutlikkust ohustatud objektini võib lugeda juhuslikuks ning omavahel sõltumatuks [11].

Erinevate laengusuuruste ja mõõtmiskauguste ning lisaks ka erinevate võnkekeskkondade ja lõhkamissituatsioonide võrdlemiseks kasutatakse maailmapraktikas taandatud kauguse d_s mõistet [17].

Taandatud kauguse leidmiseks kasutatakse valemit [18]:

$$d_s = d \cdot Q^n \quad 6.2$$

Kus d_s – taandatud kaugus, [m · kg ^{$\frac{1}{2}$}];

d – kaugus lõhkamiskohast mõjustatava objektini, [m];

Q – laengu (viitegrupi) suurus, [kg];

n – astendaja.

Astendaja n väärtus sõltub kasutatava lõhkeaine omadustest ja lõhkeainelaengu plahvatuse mõjukaugusest. Suhteliselt lähedaste tööstuslike lõhkeainete puhul jääb määravaks plahvatuse mõjukaugus [18].

Seismiliste lainete intensiivsuse prognoosimisel kasutatakse astendajaid $n = -1/3$ ja $n = -1/2$. Astendaja $-1/3$ annab konservatiivsemaid tulemusi mõõtmisel plahvatuse vahetus läheduses, kus mõjukaugus on väiksem kui 6 m ja seismiliste lainete fronti võib

vaadelda kui kerapinda. Astendaja $-1/2$ annab konservatiivseid tulemusi kaugusel, mis on suurem kui 31 m, kus seismiliste lainete fronti võib vaadelda tasapinnana. Kaugustel, mis jääb vahemikku 6 kuni 31 m, võib kasutada mõlemat astendajat, tulemustes olulisi erinevusi ei ole [11].

Kaitstavad objektid jäävad paekarjäärides enamasti kaugemale kui 31 meetrit, mistõttu tuleb taandatud kauguse määramisel kasutada astendajat $n = -1/2$, mis annab ka juhuslike suuremate võnkekiiruste puhul suurema varuteguri. Suuremad võnkekiirused võivad olla põhjustatud võnkekeskkonna juhuslikest muutustest, näiteks purd- või savika materjaliga täitunud lõhed, tühimikud jms. Taandatud kaugus arvutatakse lõhketööde seismilise mõju hindamiseks valemiga [7]:

$$d_s = \frac{d}{\sqrt{Q}} \quad 6.3$$

Kus d_s – taandatud kaugus, $[m \cdot kg^{-\frac{1}{2}}]$;

d – kaugus lõhkamiskohast mõjustatava objektini, [m];

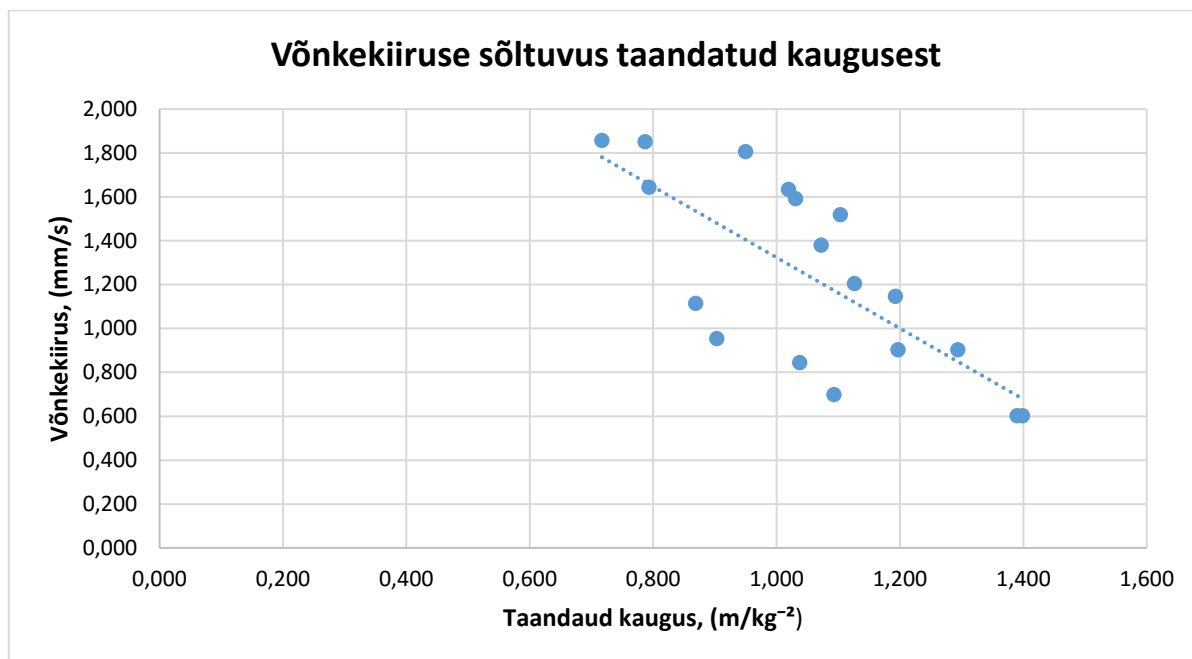
Q – laengu (maksimaalse viitegrupi) suurus, [kg].

Taandatud kauguse kasutamine võimaldab siduda omavahel laengu (viitegrupi) massi ja lõhkamiskauguse üheks muutujaks ning muuta võrreldavaks erinevatel lõhkamistel kogutud mõõtmistulemused [7].

6.3 Võnkekiiruste prognoos

Võnkekiiruse prognoosimiseks kasutati Microsoft Excel tabelarvutus- ja andmetöötlus tarkvara.

Võnkekiiruse prognoosimiseks paigutati võnkekiiruste resultantsummad ja taandatud kaugused logaritmitud telgedega graafikusse (vt Joonis 6.1).



Joonis 6.1 Võnkekiiruse sõltuvus taandatud kaugusest

Joonisel (vt Joonis 6.1) on toodud logaritmitud telgedega graafikus võnkekiiruse sõltuvus taandatud kaugusest. Joonisel on näha, et mõõtepunktid koonduvad mõningase hajuvusega ühe sirge ümber. Sellest võib järeldada, et logaritmitud võnkekiiruse ja taandatud kauguse vahel on lineaarne sõltuvus, mida võib kirjeldada lineaarse regressiooni võrrandiga [11]:

$$\log(v) = A \cdot \log(d_s) + \log(B) \quad 6.4$$

Millest võnkekiirus avaldub kujul:

$$v = B \cdot d_s^A \quad 6.5$$

Kus v – võnkekiirus, [mm/s];

d_s – valemi (6.3) järgi määratud taandatud kaugus, [m · kg^{-1/2}];

A ja B – vastavalt regressioonvõrrandi kordaja ning vabaliige.

Regressioonanalüüsi gruppi valiti ainult need mõõtepunktid, mis mõõdeti lõhatava astangu ülemiselt pinnalt ning mis asusid lõhkamisega samal tasandil.

Seaduspärasuste leidmiseks (lähendusfunktsiooni leidmiseks) viidi läbi andmete regressioonanalüüs. Regressioonanalüüsil määrati regressioonvõrrandi kordaja A ,

vabaliige $\log(B)$, korrelatsioonikordaja R ning regressioonvõrrandi standardhälve [7]. Vönkekiiruse regressioonanalüüsi tulemused on esitatud lisas (vt Lisa 3).

Vönkekiiruse analüüsil kontrolliti korrelatiivset seost vönkekiiruse ja taandatud kauguse vahel. Lisaks määrati Student'i jaotusega suurus t_v , mis avaldub valemist [19]:

$$t_v = \frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \cdot \sqrt{n-2} \quad 6.6$$

Kus R – korrelatsioonikordaja;

n – mõõtmistulemuste arv.

Saadud suurus t_v võrreldi tõenäosustabelis toodud suuruse t kriitilise väärtusega (t_{kr}) [19]. Arvutatud t_v väärtus ületas tabelis toodud kriitilist Student'i jaotuse väärtust (vt Tabel 6.2). Sellest võib järeldada, et vönkekiiruse ja taandatud kauguse vahel on korrelatiivne seos. Lähtudes korrelatsioonikordaja R küllaltki suurest arväärtusest võib korrelatsiooni lugeda suhteliselt tugevaks, kuna korrelatsioonimärk on negatiivne, tähendab see seda, et taandatud kauguse suurenemine toob kaasa vönkekiiruse vähenemise.

Tabel 6.2 Korrelatsioonikordaja usaldatavuse kontroll

Lõhketöö iseloom	Geofooni asukoht	n	R	Usaldus-nivoo	t_v	t_{kr}	Hinnang korrelatsioonile
Pealmaa-lõhkamine	alus kivim	18	0,733	0,999	4,31	3,97	usaldatav

Regressioonvõrrandi parameetrite põhjal saab lisaks vönkekiiruse sumbumise võrrandile andmete keskvaartusel matemaatiliselt tuletada 97,5% tõenäosuse ülemise usalduspiiri. Võrrandi saamiseks lisatakse regressioonvõrrandile selle kahekordne standardhälve [11]:

$$\log(v_{97,5\%}) = A \cdot \log(d_s) + \log B + 2\sigma \quad 6.7$$

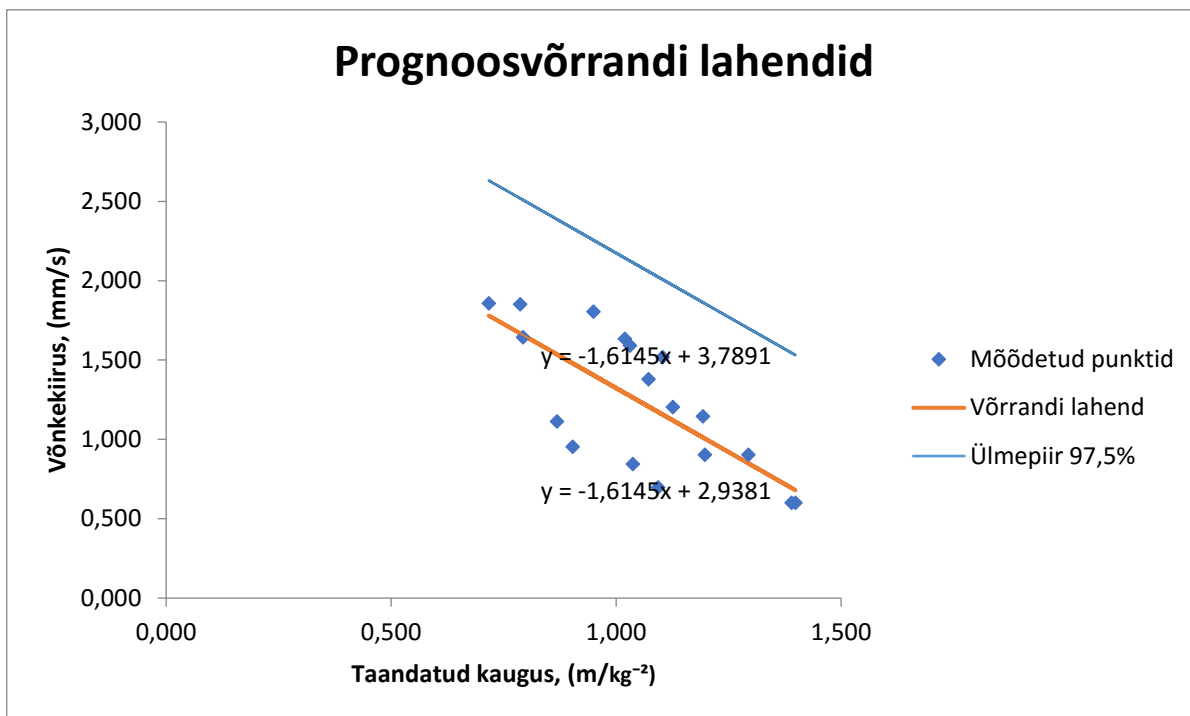
Milles vönkekiirus avaldub:

$$v = B \cdot d_s^A \cdot 10^{2\sigma} \quad 6.8$$

Kus $v_{97,5\%}$ - vönkekiiruse tõenäosuse 97,5% ülemine usalduspiir, [mm/s];

σ – standardhälve (vt Lisa 3 Tabel 8.1).

Võnkekiiruste prognoosimise nomogramm, sõltuvalt taandatud kaugusest, on toodud joonisel (vt Joonis 6.2). Võnkekiiruse võrrandid mõõtmistulemuste keskvaärtusel ja 97,5% tõenäosuse ülempiiril on toodud tabelis (vt Tabel 6.3).



Joonis 6.2 Võnkekiiruse prognoosimise nomogramm

Tabel 6.3 Võnkekiiruse prognoosimise võrrandid

Lõhketöö iseloom	Geofooni asukoht	n	R	Kiiruse võrrand	
				Mõõtmistulemuste keskvaärtusel	97,5% tõenäosusega ülemisel usalduspiiril
Pealmaalõhkamine	aluskivim	18	0,733	$v = 867 \cdot d_s^{-1,62}$	$v = 6152 \cdot d_s^{-1,62}$

7 SEISMILISELT OHUTUTE LAENGUTE ARVUTUS

7.1 Seismiliselt ohutu laengusuurus paekarjääris

Seismiliselt ohutu laengusuurus on selline laeng, mis antud võnkekeskkonnas plahvatades ei tekita lubatust suurema intensiivsusega võnkeliikumist [11].

Taandatud kaugus avaldub võrrandist (6.5) järgnevalt:

$$d_s = \left(\frac{B}{v}\right)^{-\frac{1}{A}} \quad 7.1$$

Kaugusel üle 31 meetri avaldub taandatud kaugus valemi (6.3) järgi:

$$d_s = \frac{d}{\sqrt{Q}} \quad 7.2$$

Järelikult:

$$\frac{d}{\sqrt{Q}} = \left(\frac{B}{v}\right)^{-\frac{1}{A}} \quad 7.3$$

Laengusuurus Q avaldub järgnevalt:

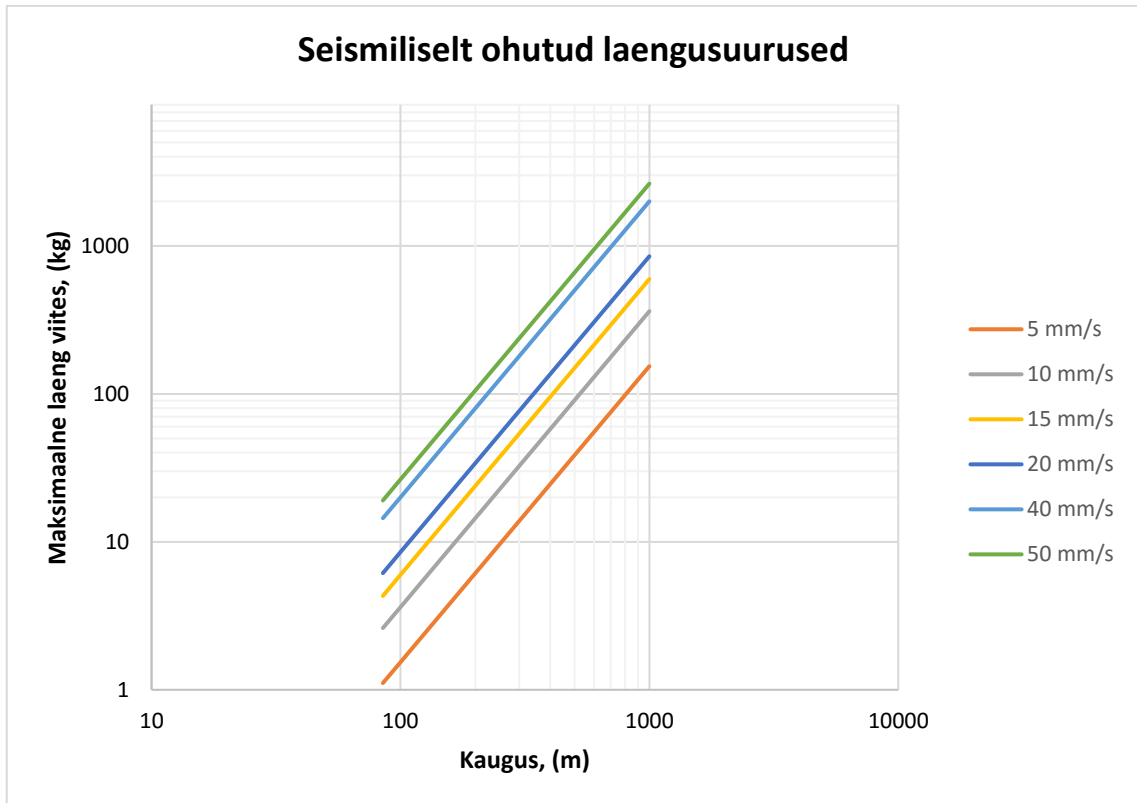
$$Q = \left[\frac{d}{\left(\frac{B}{v}\right)^{-\frac{1}{A}}} \right]^2 \quad 7.4$$

Seismiliselt ohutu laengusuuruse valem paekarjääride jaoks:

$$Q_{oh} = \left[\frac{d}{\left(\frac{6152}{v_{lub}}\right)^{0,617}} \right]^2 \quad 7.5$$

Valemi (7.5) tuletamiseks kasutati regressioonvõrrandi lahendi 97,5% usalduspiiri. Ohutu laengu arvutamiseks tuleb asendada v_{lub} tabelis (vt Tabel 4.1) toodud maksimaalse lubatud võnkekiirusega, mis on antud Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi määruses „Lõhketöö projektile esitavad nõuded“.

Seismiliselt ohutu laengu nomogrammi jaoks arvutasin erinevatel võnkekiirustel ja kaugustel seismiliselt ohutud laengud (vt Joonis 7.1). Saadud väärtused panin log-log graafikusse.



Joonis 7.1 Seismiliselt ohutute laengusuuruste määramise nomogramm

8 JÄRELDUSED

Bakalaureusetöö „Seismiliste ohutute laengusuuruste prognoos puur-lõhketöödel Eesti paekarjäärides“ tulemusena sain empiirilistel andmetel põhineva valemi (7.5) seismiliselt ohutute laengute prognoosimiseks. Saadud valem on esialgne üldistus Eesti paekarjääride jaoks.

20 aastat tagasi kogutud mõõtetulemused A. Toomiku ja T. Tombergi poolt Ida-Virumaa põlevkivikarjääride katendi lõhkamistest ei ole piisavad, et saadud tulemusi rakendada kogu Eesti karbonaatsete kivimite juures. Samas võib uute mõõtmistulemuste lisandumisel arvestada eelnevad mõõtmised valimi hulka, mille alusel leitakse seismiliselt ohutute laengute prognoosimise valem Eesti karbonaatsete kivimite karjääridele.

Bakalaureusetöös saadud esialgse ohutute laengusuuruste valemi parendamiseks, on vaja läbi viia suuremahulisi mõõtmisi, et leida usaldusväärne prognoosimismetoodika Eesti paekarjääridele.

KOKKUVÕTE

Puur-lõhketööd on olulisemaks kivimite raimamise meetodiks karjäärides ja kaevandustest. Puur-lõhketöödega kaasnevad keskkonnamõjud võivad omada negatiivset efekti nii mõjupiirkonnas paiknevatele objektidele kui ka inimestele.

Bakalaureusetöö „Seismiliselt ohutute laengusuuruste prognoos puur-lõhketöödel Eesti paekarjäärides“ eesmärgiks oli kogutud empiirilistel andmetel tuginedes tuletada arvutusvalem seismiliselt ohutute laengute prognoosimiseks puur-lõhketöödel Eesti paekarjäärides.

Välitööde käigus mõõtsime lõhketöödel tekkivat vibratsiooni kaheksas erinevas paekarjääris üle Eesti. Peamiseks mõõdetavaks suuruseks oli võnkekiirus, mis on peamiseks kahjustuste hindamise parameetrik. Erinevate lõhkamissituatsioonide võrreldavaks muutmiseks kasutasin taandatud kaugust. Võnkekiiruse võrrandi prognoosimiseks paigutasin võnkekiiruste resultantsummad ja taandatud kaugused logaritmitud telgedega graafikusse, kus avaldus võnkekiiruse ja taandatud kauguse vahel keskmisest tugevam korrelatiivne seos. Ohutu laengu prognoosimise valem avaldati taandatud kauguse ja lineaarse regressioonivõrrandi omavahelisest seosest.

Mõõtmisandmete vähesuse tõttu on otstarbekas jätkata andmete kogumist, et leida usaldusväärne meetodika, selle tagab tugevam korrelatiivne seos taandatud kauguse ja võnkekiiruse vahel. Seejärel tuletada parendatud seismiliselt ohutute laengusuuruste prognoosimise meetodika.

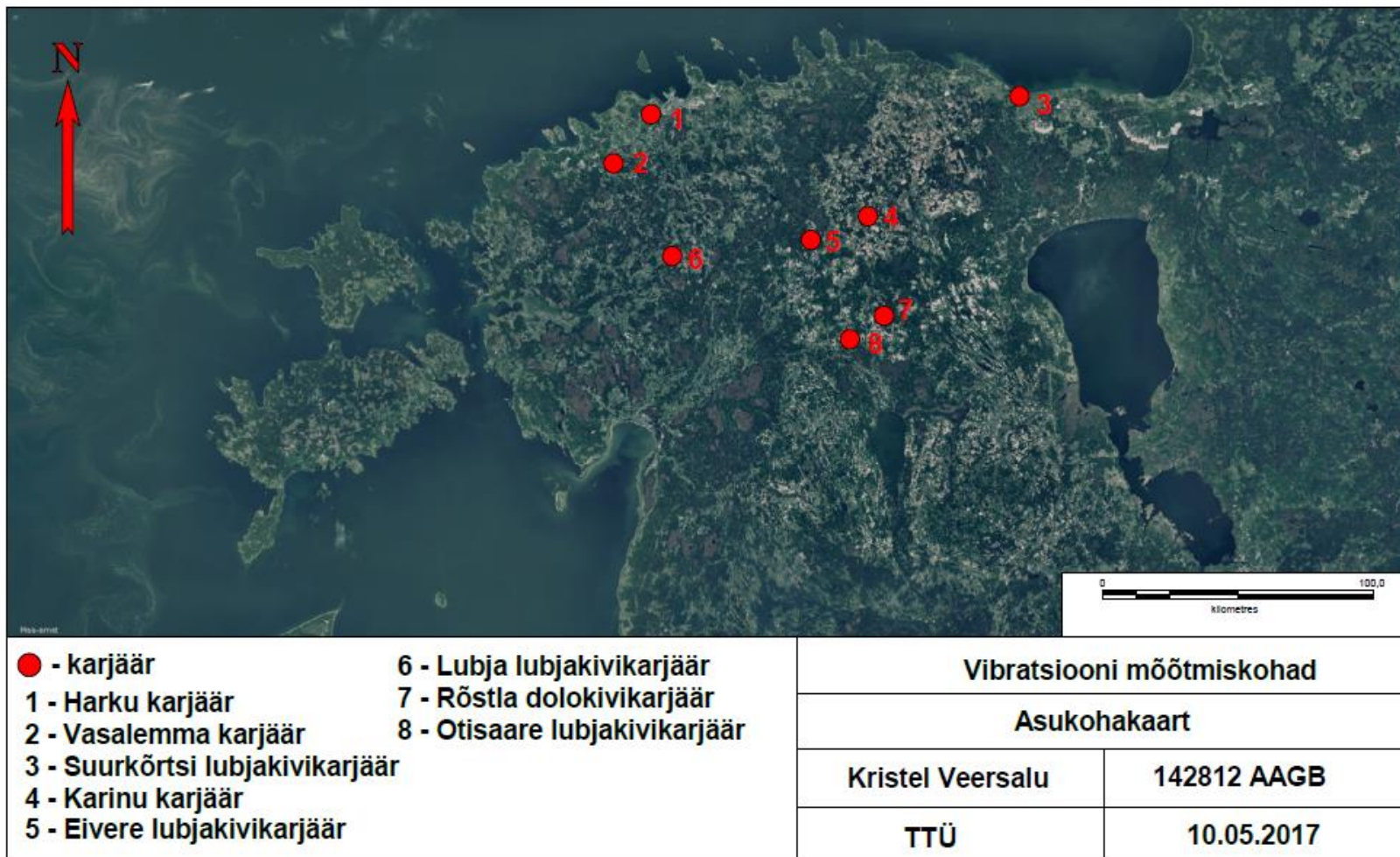
Antud töö on seotud Geoloogia Instituudi projektiga KIK16008 „Lõhketööde vibratsiooni uuring“.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Lõhkematerjaliseadus. -RT I 2004, 25, 170.
- [2] Lõhketöö projektile esitavad nõuded määrus. -RTL 2005, 63, 910.
- [3] Olofsson, S. O., Applied Explosives Technology for Construction and Mining. Ärla : Applex AB, 2002, pp. 229-299.
- [4] Konya, C. J., Walter, E. J., Rock Blasting and Overbreak Control. National Highway Institute, 1991.
- [5] Iskar, M., Maavärinad ja seismilised lained. TÜ Loodusmuuseum, 2012. [WWW] http://www.ut.ee/BGGM/ylidine_geoloogia/maavarinad.html (18.05.2017)
- [6] Seismic wave. Encyclopaedia Britannica, Inc., 2017. [WWW] <https://www.britannica.com/science/seismic-wave> (18.05.2017)
- [7] Tomberg, T., Lõhketöödest põhjustatud maavõngete analüüs põlevkivi kaevandamisel: magistritöö. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut, 1998.
- [8] Vuolio, R., Räjätystyöt. Forssa : Forssaan Kirjapaino Oy, 1991.
- [9] Rosenthal, M. F., Morlock, G. L., Blasting Guidance Manual. United States Department of the Interior, 1987.
- [10] Vuolio, R., Blast Vibration: Threshold Values and Vibration Control. Helsinki : The Finnish Academy of Technology, 1990.
- [11] Dowding, C. H., Blast Vibration Monitoring and Control. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1985.
- [12] Tomberg, T., Lõhketööd. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut, 1998, pp. 61-62.

- [13] Bell, F. G., Donnelly, L. J., Mining and its Impact on the Environment. Abington : Taylor & Francis Group, 2006, pp. 301-307
- [14] Structural vibration. Part 2: Human exposure to vibration in buildings. Building and Civil Engineering Standards Committee, DIN 2150-2:1999.
- [15] Paekivi. Geoeducation. [WWW]
<http://www.geoeducation.info/geoturism/paekivi.php> (23.04.2017)
- [16] Toomik, A., Tomberg, T., Lõhkamise seismiline mõju põlevkivi kaevandamisel. - 60 aastat mäeinseneride õpetamist Eestis: aastapäevakonverentsi ettekannete ja teesid ja artiklid. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut, 1998.
- [17] Toomik, A., Tomberg, T., Blast Vibration in Oil Shale Surface Mining. Oil Shale, 1997, 2, pp. 155-162.
- [18] Toomik, A., Tomberg, T., Lõhkamiste mõju ohjamine. Põlevkivi talutav kaevandamine : konverentsi ettekannete teesid ja artiklid. Jõhvi : Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut, 2000, pp. 16-18.
- [19] Aruküla, H., Abiks majandusmatemaatika õppijale IV : Matemaatiline statistika. Tallinn : TPI, 1982.
- [21] Toomik, A., Tomberg, T., Blast Vibration in Oil Shale Underground Mining. Oil Shale, 1998, 1, pp. 65-74.

Graafiline lisa 1



Lisa 2

Tabel 7.1 Mõõtmistulemused

Jrk nr	Kuupäev	Kellaeg	Asukoht	Nihe, [m]			Kiirendus, [mm/s ²]			Kiirus, [mm/s]			Res, [mm/s]	Sagedus, [Hz]		
				V	L	T	V	L	T	V	L	T		V	L	T
1	12.04.2017	16.35	Vasalemma	4	371	0	355	0	85	53	32	31	8	4	7	56
2	12.04.2017	16.35	Vasalemma	0	19	1	346	0	14	6	9	9	4	3	8	6
3	13.04.2017	14.13	Vasalemma	4	24	0	142	0	166	38	17	20	9	4	17	49
4	17.04.2017	17.44	Karinu	0	8	0	63	0	43	4	9	11	4	54	1	8
5	18.04.2017	12.02	Raikküla	0	356	0	563	0	132	63	44	45	71	88	4	77
6	18.04.2017	16.48	Vasalemma	5	264	0	561	0	414	67	19	32	43	2	70	8
7	18.04.2017	16.48	Vasalemma	0	11	0	518	0	0	70	32	36	64	73	72	2
8	24.04.2017	12.38	Suurkõrtsi	0	58	0	644	0	735	68	57	62	72	87	3	58
9	25.04.2017	12.56	Eivere	0	179	4	978	6	285	50	36	44	44	0	59	9
10	25.04.2017	12.56	Eivere	0	42	0	155	0	132	12	17	31	14	59	4	75
11	26.04.2017	17.20	Kalana	0	132	5	239	0	107	33	17	24	24	4	3	33
12	26.04.2017	17.35	Kalana	0	21	2	546	0	23	8	9	9	8	1	29	10
13	26.04.2017	17.35	Kalana	0	69	0	19	0	152	13	36	37	13	85	5	18
14	02.05.2017	13.00	Harku	0	0	0	176	0	28	15	28	29	16	7	5	61
15	02.05.2017	13.00	Harku	0	79	0	211	0	141	39	27	32	39	28	3	76
16	03.05.2017	12.42	Raikküla	0	142	3	471	0	198	28	50	55	5	1	58	28
17	03.05.2017	12.42	Raikküla	0	143	0	1	0	374	43	72	72	7	3	47	47
18	03.05.2017	17.55	Vasalemma	0	164	1	32	3	685	38	21	33	33	0	41	1

Lisa 3

Tabel 8.1 Regressioonvõrrandi parameetrid

Vabaliige (log(B))	2,938
Lahendi standardhälve	0,304
Korrelatsioonikordaja ruut	0,537
Korrelatsioonikordaja	0,733
Mõõtmistulemuste arv	18
Vabadusastmete arv	16
Regressioonivõrrandi kordaja (A)	-1,615

Tabel 8.2 Regressioonvõrrandi lahend

Taandatud kaugus		Res		Regressioonvõrrand, [mm/s]	
[m/kg ⁻²]	log	[mm/s]	log	Lahend	Ülempiir 97,5%
19,68	1,294	8	0,903	0,848900868	1,700
25,03	1,398	4	0,602	0,680286661	1,531
8,00	0,903	9	0,954	1,480075629	2,331
24,55	1,390	4	0,602	0,693863777	1,545
6,12	0,787	71	1,851	1,667907228	2,519
10,46	1,020	43	1,633	1,292077521	2,143
8,91	0,950	64	1,806	1,40453566	2,256
5,21	0,717	72	1,857	1,780784688	2,632
6,21	0,793	44	1,643	1,657670848	2,509
15,58	1,193	14	1,146	1,012706832	1,864
11,81	1,072	24	1,380	1,206962613	2,058
15,74	1,197	8	0,903	1,005542738	1,857
7,39	0,869	13	1,114	1,535688852	2,387
13,37	1,126	16	1,204	1,119969533	1,971
10,73	1,031	39	1,591	1,27420789	2,125
12,39	1,093	5	0,699	1,173345914	2,024
10,90	1,037	7	0,845	1,263185885	2,114
12,69	1,103	33	1,519	1,156570483	2,008

Lihtlitsents lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ja reprodutseerimiseks

Mina, Kristel Veersalu (sünnikuupäev: 31.03.1995),

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Seismiliselt ohutute laengusuuruste prognoos puur-lõhketöödel Eesti paeekarjäärides“,

mille juhendaja on Tõnu Tomberg,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogu 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 kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (*allkiri*)

27.05.2017