



Seismiliselt ohutu laengusuuruse leidmine gaasitorule Vão Iubjakivikarjääris

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Jürgen Birnbaum

Üliõpilaskood: 206422LARB

Juhendaja: Tõnu Tomberg, Geoloogia instituut, lektor

Õppekava: Maa süsteemid kliima ja tehnoloogiad

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Jürgen Birnbaum
[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.
Juhendaja:
[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Abstract	5
Sissejuhatus.....	6
2. Töö teoreetilised alused.....	7
2.1. Ruumilained	7
2.2. Pinnalained	8
2.3. Lainete levik maapõues	9
2.4. Seismiliste lainete parameetrid	10
3. Seismiliste lainete kahjustav mõju lõhketöödel.....	12
3.1 Mõju torustikele.....	12
3.2 Torude pingete ja maksimaalse vibratsiooni hindamine	13
4. Vibratsiooni mõõteseadmed.....	15
4.1 Seismoandur	15
4.2 Vibratsiooni parameetrid.....	16
4.3 Mõõtetulemuste tõlgendamine.....	16
5. Ohutute laengusuuruste arvutusmeetod Eestis	17
5.1 Seismiliselt ohutute laengute määramine	17
5.2 Torudele ohutute laengute määramine	19
6. Uuringuala tutvustus.....	20
6.1 Geoloogiline ehitus	20
6.2 Hüdrokeoloogilised tingimused	21
7. Mõõtmised Vao V lubjakivikarjääris.....	22
7.1 Vönkekeskond.....	22
7.2 Mõõteseadmed.....	22
7.3 Metoodika.....	23
7.4 Tulemused.....	24
8. Seismiliste lainete intensiivsuse prognoos.....	25
8.1 Taandatud kaugus.....	25
8.2 Vönkekiiruse prognoos	26
9. Ohutute laengute arvutused gaasitorule	29
10. Arutelu ja Järeldused.....	31
Kokkuvõte.....	32
Tänuavaldused	33
Kasutatud kirjandus.....	34
Lisa 1. Mõõtmiste tulemused.....	36

Annotatsioon

Lõhkamistööd on olulisel kohal maavarade väljamisel mäetööstuses. Kaasnevate seismiliste lainetega on alati oht kahjustuste tekkeks lähedal asuvatele infrastruktuuriobjektidele.

Käesolevas töös uuriti Vao lubjakivikarjääris lõhkamistöõde mõjualasse jääva Tallinn-Kehra C12 gaasi ülekandeliinile tekkivat seismilist mõju. Põhiliseks eesmärgiks oli leida sealsele gaasitorule ohutute laengute suurused mida kasutades saaks võimalusel lõhketööde mahtu suurendada.

Seismiliselt ohutute laengusuuruste leidmiseks viidi välitöödel Vao lubjakivikarjääris läbi seismika mõõtmised. Seismoanduritega koguti gaasitoru pealt lõhketööde tagajärjel tekkivat võnkekiirust. Saadud andmeid kasutasin regressioonvõrrandi koostamisel, mis tõestas seost taandatud kauguse ja võnkekiiruse vahel. Regressioonvõrrandi ja DIN4150 juhendväärtuste alusel koostati ohutu laengusuuruse prognoosvalemi gaasi ülekandeliinile.

Valemiga saadud ohutud laengusuurused on võrreldes hetkel karjääris kasutatavate laengusuurustega oluliselt suuremad seega suuremaid lõhkamisi ilmselt teostada saaks küll. Valemi kasutamine aga pole veel soositav teema vähesee uuritavuse ja andmete vähesuse tõttu.

Finding seismically safe charge size for a gas transmission pipeline in Vão quarry

Abstract

Blasting plays an important role in the extraction of minerals in the mining industry. With associated seismic waves created from blasts, there is always risk of damage to nearby infrastructure.

In this thesis paper, the seismic impact on the Tallinn-Kehra C12 gas transmission line in the Vão limestone quarry, which is affected by blasting operations, was investigated. The main objective was to find a safe charge size limit for the gas pipeline there, which could be used to increase the volume of blasting operations.

To find seismically safe charge size, seismic measurements were carried out in the field at the Vão limestone quarry. Seismic sensors were used on the gas pipeline to collect the vibration values generated by the blasting operations nearby. The data obtained was used to do regression analysis that proved the relationship between distance and the vibration velocity. On the basis of the regression analysis and DIN4150 guide values for pipelines, a safe charge size prediction formula for a gas transmission line was worked out.

The safe charge sizes obtained by the formula are significantly higher than the charge sizes currently used in the quarry, so it would probably be possible to carry out larger explosions. However, the use of the formula is not yet favourable due to the limited amount of research and data.

Sissejuhatus

Lõhketööd on tänapäeval maavarade kaevandamisel väga olulisel kohal. Niivõrd kui lõhkamine on väga efektiivne kivimite väljamisel kaasnevad kasutatava meetodiga limitatsioonid. Asulate ja tähtsate infrastruktuuriobjektide vahetus läheduses on tavaliselt lõhketööde mahule pandud peale piirangud, mis määravad maksimaalse lubatud seismilise mõju.

Tänu sellistele standarditele on võimalik arvestada vastavalt karjääri või kaevanduse asukoha põhiselt kuidas väljamistööd ellu viia. Probleemiks aga osutub Eestis kui ka mujal maailmas, et pole olemas selgelt määratud piiranguid infrastruktuurile nagu näiteks, raudteed, ülekandeliinid ja gaasitorud. Nende objektide puhul on vibratsioonistandardid kaevandajatele ette määratud infrastruktuuri opereerijate poolt. Opereerijate poolt määratud standardid on tihtipeale kallutatud tugevalt liigse ohutuse suunas, mis teeb kaevandajate töö oluliselt keerukamaks

Bakalaureusetöö "Seismiliselt ohutu laengusuuruse leidmine gaasitorule Vao karjääris". Eesmärgiks on leida ohutu laengusuurus lõhkamistööl, et tagada gaasitoru terviklikus ja võimalusel leida mõistlikum ohutus standard, mis rahuldab nii opereerijat kui ka kaevandajat. Mõõtmised, et välja selgitada ohutu laengusuurus viidi läbi Vao 5 karjääris, kus puur lõhketöid teostab Balrock OÜ.

Eelnevalt on sarnane uurimus tehtud E.Siskindi, S.Stagg, E.Wiegand ja L.Schulzi poolt aastal 1994 pealkirjaga "Surface mine blasting near pressurized transmission pipelines".

2. Töö teoreetilised alused

Gaasitorudele seismiliselt ohutute laengusuuruste leidmiseks tuleb mõista seismilisi laineid. Seismilised lained tekivad kui energia vabaneb kiirelt, neid saab iseloomustada võnkeliikumistena. [Oloffson, 1990] Seismilised lained võivad tekkida looduslikult ja ka tehiskult. Looduslikud seismilised lained on põhiliselt seotud laamtektooniliste protsessidega näiteks maavärinad, vulkaanipursked või maalihked. Tehislikud lained tekivad mitmesuguse inimtegevuse tagajärjel: liiklus, lõhketööd ja tööstustegevus.[Schwardt jt, 2022]

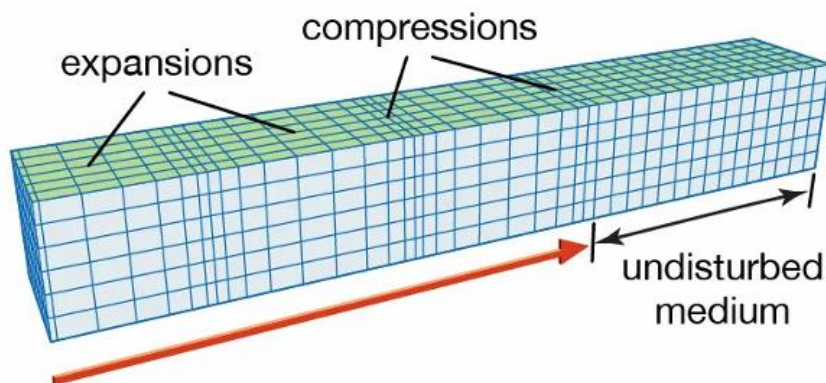
Seismilised lained on füüsiliselt elastsete deformatsioonide edasikandumine maapinnas. Võnkeallikast kaugenedes toimub seismiliste lainete sumbumine ehk energia vähenemine. Eri laine tüübid sumbuvad, kas kiiremini või aeglasemalt. Kõrgsageduslikud lained sumbuvad kiirelt ja madalsageduslikud lained aeglasemalt.[Oloffson, 1990]

Vibratsioonidest, plahvatustest ja maavärinatest tekib neli põhilist lainetüüpi, mis jaotatakse kahte kategooriasse. Ruumilained ja pinnalained. [The Editors of Encyclopaedia Britannica, i.a]

2.1. Ruumilained

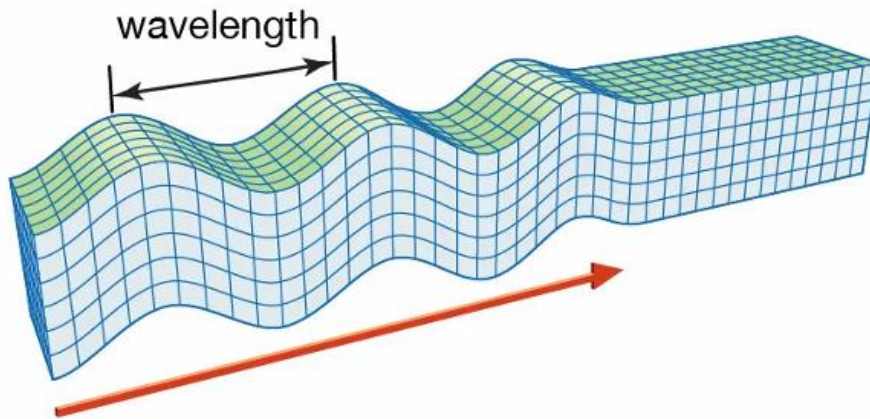
Ruumilained levivad maa sees sfäärilise frondina. Omakorda jagunevad ruumilained piki ja ristlaineteks.

Pikilained ehk P-lained on väga suure levikukiirusega ja jõuavad esimesena salvestusjaama. Nende liikumiskiirus maakoos on umbes 6 kilomeetrit sekundis mis kasvab 11 kilomeetrit sekundis vahevöös. Võnkumine toimub piki laine levimise suunda, mis tähendab seda, et lained suruvad kokku ja venitavad keskkonda.[The Editors of Encyclopaedia Britannica, i.a]



Joonis 1 Pikilained [The Editors of Encyclopaedia Britannica, i.a]

Ristlained ehk S lained põhjustavad võnkumist risti laine enda levikusuunaga maapinnas. Laine levimisel pinnas nihkub kõigepealt ühele ja siis teisele poole. Kiiruse poolest levivad S-lained 3 kilomeetrit sekundis maakoos ja 7 kilomeetrit sekundis tuumapiiri lähedal. Lained tuumas ei edastu kuna S-lained ei levi vedelikus.

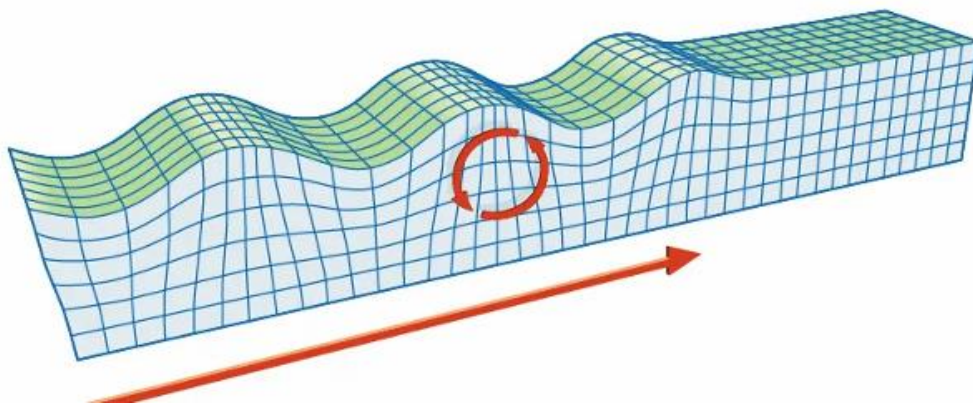


Joonis 2 Ristlained [The Editors of Encyclopaedia Britannica, i.a]

2.2. Pinnalained

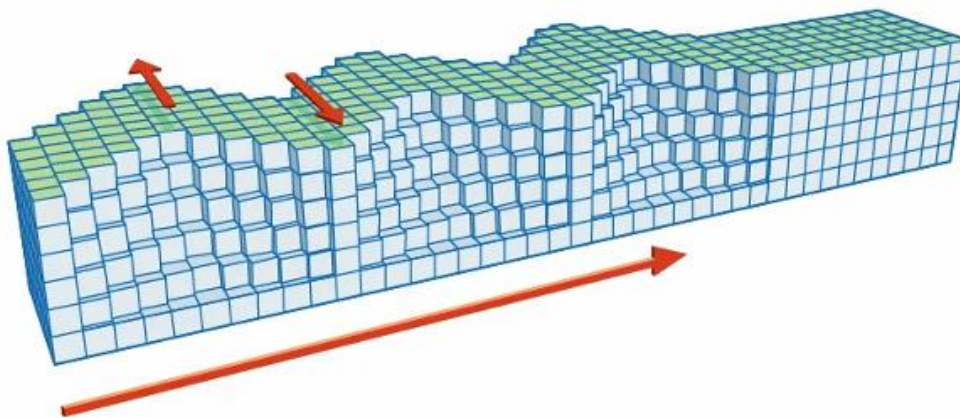
Pinnalained levivad üle kivimimasside piirpindade mitte läbi nendest. Laine mõju kivimimassile piirpinnast on mõõdetav tavaliselt ühe lainepikkusega. See lainetüüp põhjustab kõige suuremaid kahjustusi kuna tema poolt edasikantav energia on suur.[Konya & Walter, 1991]

Rayleigh lainete puhul toimub osakeste liikumine vertikaaltasandil elliptiliselt laine levimise suunas. Eri keskkondade piirpindadel on osakeste liikumine vastupidine laine leviku suunaga [Tomberg, 2017]. Rayleigh lained sumbuvad sügavuse kasvades kiiresti aga küllaltki aeglaselt kauguse kasvades. [„Rayleigh Wave“, 2024]



Joonis 3 Rayleigh lained [The Editors of Encyclopaedia Britannica, i.a]

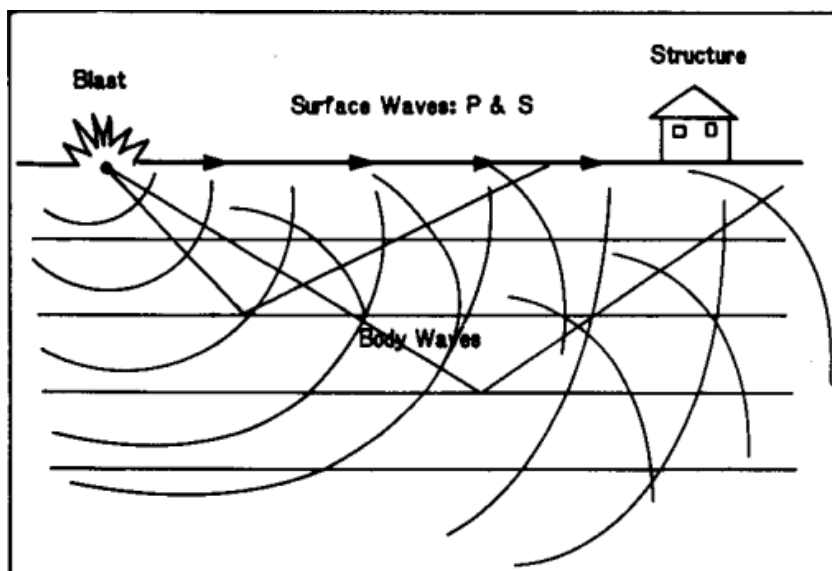
Love lained tekitavad horisontaalse edasi tagasi liikumise. Amplituud on sellel lainel suurim pinna peal ja sumbub kiirelt sügavuse kasvades [Michigan Technological University, i.a]. Nende lainete energia nagu ka teiste pinnalainete puhul levib kahes suunas mitte kolmes. Setõttu annavad nad seismilistes mõõtmispunktides tugevaid signaale isegi kui pärinevad väga kaugelt. [The Editors of Encyclopaedia Britannica, i.a]



Joonis 4 Love lained [The Editors of Encyclopaedia Britannica, k.p]

2.3. Lainete levik maapõues

Pikilained, ristlained ja pinnalained levivad maapõues mõõda erinevaid trajektoore. Elastsed lained kanduvad edasi sirgjooneliselt kui on tegemist ühtlase massiiviga. Kihipindadel lained peegelduvad ja murduvad geomeetrilise optika seaduste järgi. Niiviisi kaitstava objektini võivad levida lained otse, peegeldunult või murdunult.[Rosenthal & Morlock, 1987]



Joonis 5 Seismiliste lainete levik [Rosenthal & Morlock, 1987]

Seismiliste lainete levimiskiirus sõltub järgnevatest teguritest: lainetüübist, kivimimassiivi tihedusest ja häiritusest. Näiteks võib tuua tiheduse mõju lainete levikukiirusele. Mida tihedam on pinnas või massiiv seda kiiremini laine edasi levib[Earle, 2015].

Kivimites levivad pikilained kõige suurema suurema kiirusega võrreldes teiste lainetega. Ristilainete kiirus on see eest ligikaudu 60% pikilainete kiirusest[Tomberg, 2017].

Tabel 1 Risti - ja pikilainete kiirus erinevates pinnastes [Earle, 2015]

Pinnase liik	Ristlaine kiirus(m/s)	Pikilaine kiirus(m/s)
Kuiv liiv	100-400	400-1300
Savi	200-600	600-1600
Märg liiv	700-800	1500-2200
Moreen	800-1000	1900-2600
Mudakivid ja kildad	2100-2300	3000-4300
Liivakivi	1400-2500	3000-5000
Lubjakivi	2400-3100	4200-5800
Graniit	3000-3700	4900-5900
Basalt	3300-4000	5200-6200

2.4. Seismiliste lainete parameetrid

Laine liikumist kirjeldavaid põhiomadusi nimetatakse laineparameetriteks. Neid mõõdetakse ja kvantifitseeritakse kui on vaja rääkida laine liikumisest või vibratsioonist. Seismilisi laineid saab lihtsustatult iseloomustada harmoonilise võnkumisena mille parameetrid on järgmised: võnkeamplituud, võnkesagedus, võnkeperiood, võnkekiirus ja võnkekiirendus. [Konya & Walter, 1991]

Valem mis iseloomustab harmoonilist võnkumist on järgmine.

	$u = A \sin(\omega t)$	1
--	------------------------	---

u -hälbe väärtus ajahetkel t , (mm)

A -Võnkeamplituud, (mm)

ω -nurkkiirus, (rad/s)

t - aeg, (s)

Võnkekiirus saadakse aja tuletise järgi hálbest. Valemikuju mis tuletatakse harmoonilise võnkumise võrrandist näeb välja selline. [Vilipuu, i.a]

	$v = 2\pi f A$	2
--	----------------	---

v – võnkekiirus, (mm/s)

f – sagedus, (Hz)

A – võnkeamplituud, (mm)

Lisaks saab veel tuletada võnkekiirenduse. Selleks on siis võnkekiiruse tuletis aja järgi ja valem näeb välja järgnev. [Vilipuu, i.a]

	$a = 4\pi^2 f^2 A$	3
--	--------------------	---

a – kiirendus, (mm/s²)

f – sagedus, (Hz)

A – võnkeamplituud, (mm)

Võnkeperiood ja sagedus on omavahel seotud pöördvõrdeliselt. Valemikuju on järgnev.

	$f = \frac{1}{T}$	4
--	-------------------	---

T - võnkeperiood, (s)

f - sagedus, (Hz)

Lainepikkus λ iseloomustab kaugust kahe laineharja tipu või põhja vahel. Arvutuslikult on lainepikkus võrdne võnkeperioodi ja levimiskiiruse korrutisega.

	$\lambda = vT$	5
--	----------------	---

λ – lainepikkus, (mm)

v – võnkekiirus, (mm/s)

T – periood, (s)

3. Seismiliste lainete kahjustav mõju lõhketöödel

Seismilised lained, mis kaasnevad lõhketöödega võivad kahjustada ehitisi ja infrastruktuuri, mis asuvad karjääri või kaevanduse vahetus läheduses. Häirivat mõju võivad need ka põhjustada inimestele ja loomadele.

Mõjuirrkonda jäävate hoonete ja infrastruktuurini jõuavad lained mitut moodi. Lained mis levivad otse, objektini ja lisaks ka peegeldunud ning murdunud lained. Sellisel juhul on tegemist liitvõnkumisega, mille moodustavad ühinenud pinna - ja ruumilained. Selle liitlaine saab lahti harutada kolmeks eri lainekomponendiks, mille mõjud hoonetele ja infrastruktuurile on erinevad.[Tomberg, 2017]

Pikikomponent mida võib võrdsustada pikilainega, tekitab objektides korrapäraselt korduvaid horisontaalsuunalisi surve ja tõmbepingeid.

Vertikaalne ristikomponent, mida võib nimetada ristilaine ehk S-laine vertikaalkomponendiks, tekitab mõjualustes objektides korrapäraselt korduvaid vertikaalseid nihkepingeid.

Horisontaalne ristikomponent, mis tinglikult on ristilaine ehk S-laine horisontaalkomponent ja ta põhjustab objektides korrapäraselt korduvaid horisontaalseid nihkepingeid.

3.1 Mõju torustikele

Lainete levimise korral deformeeruvad maetud torustikud tavaliselt sarnaselt neid ümbritseva pinnasega. Mis määral torustik järgib pinnase deformatsiooni sõltub tugevalt toru enda ja teda ümbritseva keskkonna suhtelisest paindlikusest. Mida jäigem trass seda väiksem on deformatsioon võrreldes pinnasega [Gad jt, 2007].

Dowding(1985) kehtestas lihtsustatud avaldised, et hinnata seismiliste lainete poolt põhjustatavaid telg-painutus ja rõngaspingeid torudel mida on illustreeritud joonisel 7.

Telgpingeid põhjustab torudes pikilaine levik läbi pinnase paraleelselt toru suunaga. Valemikuju antakse tingimusel, et toru ja pinnase vahel on tugev haakumine.

	$\varepsilon_T = V_{max}/C_p$	6
--	-------------------------------	---

V_{max} – pikilaine poolt põhjustatud osakeste tippkiirus

C_p – pikilaine levimiskiirus

Painutuspingeid põhjustab torudes ristilaine levik läbi pinnase paraleelselt toru suunaga. Järgnev valemikuju antakse taas tingimusel, et toru ja pinnase vahel on tugev side mille tagajärjel toru deformeerub nihkelaine kuju järgi. Seda tüüpi deformatsioon võib piki toru toimuda nii vertikaal kui ka horisontaalsuunas.

	$\varepsilon_P = V_{max}2\pi fR/C_r^2$	7
--	--	---

V_{max} – ristilaine poolt põhjustatud osakeste tippkiirus maapinnal

f – ergutussagedus

R – toru raadius väliskihini

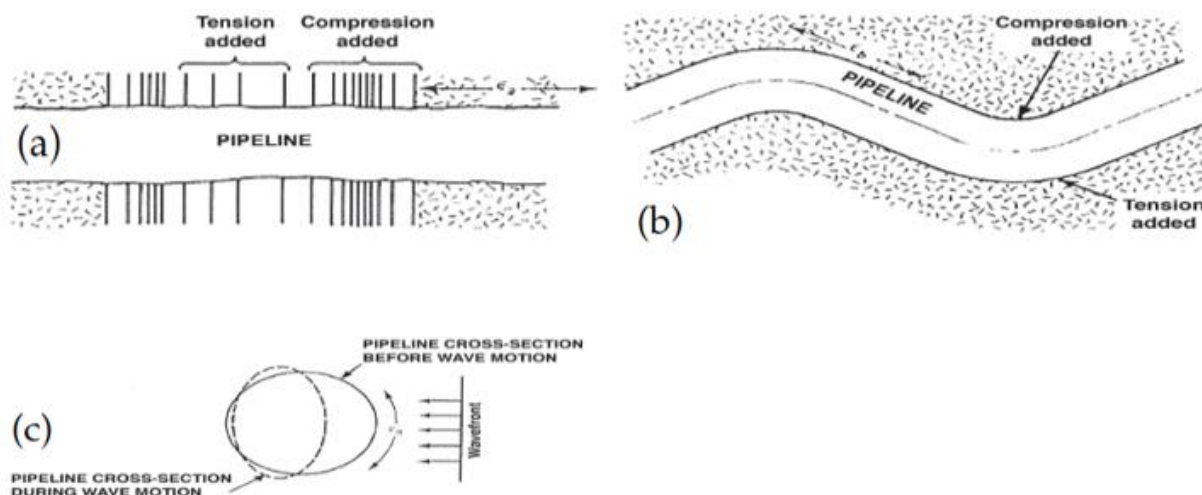
C_r – ristilaine levimiskiirus

Rõngaspinged tekivad torudes kui ristilaine levib läbi toru risti tema suunaga. Valem ei sõltu toru siidususest pinnasega ja tema kuju on järgnev.

	$\varepsilon_{rõngas} = V_{max}/2C_r$	8
--	---------------------------------------	---

V_{max} – ristilaine poolt põhjustatud osakeste tippkiirus

C_r – ristilaine levimiskiirus



Joonis 6 Maetud torude deformatsioon: (a) telgpinge puhul, (b) painutuspingete puhul, (c) rõngaspinge puhul.[Siskind jt, 1995]

3.2 Torude pingete ja maksimaalse vibratsiooni hindamine

Vibratsiooni piirväärtuseid mille puhul võib olla kindel, et torudele kahjustusi ei esine saab hinnata analüüsides toru pingeid ja deformatsiooni. PPV ehk vibratsiooniväärtused, mis võivad kahjustada eri tüüpi torusi on arvutatud kasutades võrrandeid 6 ja 7 ja on toodud välja tabelis 2. [Gad jt, 2007]

Erinevates torudes transporditakse erinevaid vedelikke ja rõhu all olevaid gaase, mis põhjustavad radiaalseid (rõngas) pingeid. Need pinged on piiratud kuni 70%-ni voolavuspiirist. Lisaks sellele tuleb lubada veel torudele esinevaid dünaamilisi radiaal pingeid 20%-ni voolavuspiirist, seda aga juhul kui uuritav trass peab taluma ka liikluskoormust [Siskind et al, 1995]. Eeldades, et toru peab kannatama radiaalpingeid kuni 90% ulatuseni voolavuspiirist ja on ebatõenäoline, et toru kannatab liikluskoormust ning lõhketoode tingitud koormust samal ajal saame tänu Huber-Hencky-Mises teooria võrrandiga (9) teada maksimaalse lubatava telg ja painutuspinge summa voolavuspiirist milleks on 20%. Ehk kui arvestame piki toru telg ja painutuspinge võrdseks on lubatav maksimaalne PPV 10% voolavuspiirist tabeli 2 järgi.

	$(\sigma_c/\sigma_y)^2 + (\sigma_c/\sigma_y)(\sigma_A/\sigma_y) + (\sigma_A/\sigma_y)^2 = 1$	9
--	--	---

Kus σ_c , σ_A ja σ_y on radiaal-, telgpinged ja voolavuspiir vastavalt.

Tabel 2 hinnagulised pinnaseosakeste vibratsiooniväärtused, mis kahjustab torusi. [Gad jt, 2007]

Toru materjal	Malm		Asbestbetoon		Betoon		PVC		Teras (250)	
Youngi moodul Voolavuspiir	10 GPa 0.00160		24 GPa 0.00088		21 GPa 0.00017		2,8 GPa 0.00860		200 GPa 0.00125	
Pikilaine kiirus (m/s)	PPV(mm/s)		PPV(mm/s)		PPV(mm/s)		PPV(mm/s)		PPV(mm/s)	
	100%	10%	100%	10%	100%	10%	100%	10%	100%	10%
400 (liivpinnas)	650	65	350	35	70	7	340	34	500	50
800 (savipinnas)	1300	130	700	70	140	14	680	68	1000	100
1600 (lubjakivi)	2600	260	1400	140	280	28	1360	136	2000	200

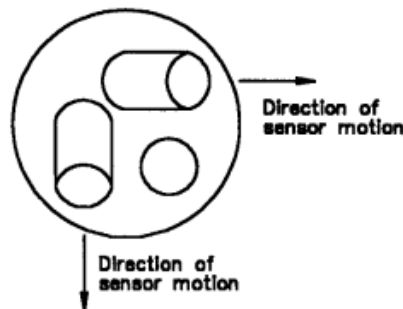
Torudele hinnatava vibratsiooni määramisel tasub ka silmas pidada kuidas on nad paigutatud lõhketööde mõjualas. Maetud torujuhtmete puhul on täheldatud pinnasevibratsiooni väärtuse langust ligi 40% ulatuses võrreldes meetri sügavuselt toru pealt saadud väärtusega. [Gad jt, 2007]

4. Vibratsiooni mõõteseadmed

Vibratsiooni mõõteseadmeid kasutatakse, et mõõta ja salvestada maa liikumist seismiliste sündmuste puhul. Tüüpiline seismograaf koosneb seismoandurist ja mõõteseadmest.

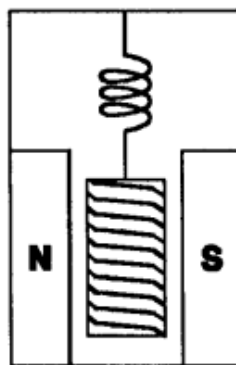
4.1 Seismoandur

Seismoandur koosneb kolmest iseseisvast andurist, mis on paigutatud üksteise suhtes täisnurkselt eri suundades. Üks andur on paigutatud mõõtma vertikaalsuunalisi vibratsioone ja ülejäänud kaks on horisontaaltasandil üksteise suhtes täisnurkselt. Iga andur mõõdab vibratsioone oma telje suunas ja kolme andurit on vaja maa liikumise mõistmiseks. Paigutatud on nad kaitstud kesta sisse ja joonisel 8 on kujutatud seismoanduri komponendid [Konya & Walter, 1991].



Joonis 7 seismoanduri ehitus [Konya & Walter, 1991]

Andurid on tavaliselt elektromagnetilised muundurid, mis muudavad maa liikumise elektriliseks pingeks. Anduri mehhanism koosneb liikumatust magnetist, mis põhjustab püsिमagnetvälja ja rippuvast traatmähisest, mis on võimeline liikuma (joonis 8). Traatmähise liikumine magnetväljas maavibratsiooni puhul tekitab elektripinget, mis on proportsionaalne mähise liikumise kiirusega. Mähise kiire liikumine suhteliselt anduriga tähendab suurt pinget ja aeglane liikumine väikest pinget. Tüüpiliselt maapinna vibratsiooni puhul liigub andurikest traatmähise suhtes kuna ta jääb inertsuse tõttu liikumatuks. [Konya & Walter, 1991]



Joonis 8 anduri mehhanism [Konya & Walter, 1991]

Mõõteseadme võtab vastu andurite pingeväljundid ja muudab need arv ja visuaalandmeteks millest on võimalik välja lugeda maa liikumist ning vibratsiooni. Kuna seismoandur koosneb kolmest iseseisvast andurist saadakse kolm erinevat lugemist. Piki -, Risti – ja vertikaalkomponent.

4.2 Vibratsiooni parameetrid

Maa liikumise kirjeldamiseks seismilise sündmuse korral kasutatakse vibratsiooni parameetreid. Need parameetrid on nihkumine, kiirus, kiirendus ja sagedus. Seismilise laine läbimisel pinnasest hakkavad pinnaseosakesed vibreerima ehk liiguvad puhkeasendist ja seda saabki nimetada nihkumiseks. Osakese nihkumisel on tal ka kiirus ja võime avalda jõudu, mis on proportsionaalne tema kiirendusega.[Konya & Walter, 1991]

- Kiirus näitab osakeste asukoha muutmist ajaühikus (mm/s)
- Kiirendus näitab osakese kiiruse muutumise kiirust (mm/s²)
- Sagedus näitab ühes sekundis toimunud täisvõngete arvu (Hz)
- Nihe näitab osakese liikumise kaugust puhkeasendist (mm)

Siinpuhul tasub arvestada, et seismograafid tavaliselt mõõdavad osakeste nihkumise kiirust seda põhjusel, et enamus lubatava vibratsiooni standardid on arvutatud kasutades seda parameetrit. Siiski kui on spetsiifiline vajadus mõõta teisi parameetreid on see võimalik tänu tänapäevaste seismograafide modulaarsusele [Konya & Walter, 1991].

4.3 Mõõtetulemuste tõlgendamine

Igasuguste seismiliste sündmuste mõõtmisel jõuab seismograafini kolme erinevat tüüpi lained: piki-, rist- ja pinnalained. Nende vaheline energia jagunemine on toodud tabelis 3.

Tabel 3 Lainete energia [Tomberg, 2017]

Laineliik	Energia jagunemine (%)
Pikilained	5-20%
Ristlained	15-50%
Pinnalained	45-80%

Seismograafini jõuavad lained otse, peegeldunult ja murdunult. Sellisel juhul on tegemist ebakorrapärase liitvõnkumisega. Lainete liitumisel tekkiv interferents võib võnkeamplituudi suurendada või vähendada sõltuvalt lainete faasidest [Konya & Walter, 1991].

5. Ohutute laengusuuruste arvutusmeetod Eestis

Eestis kasutatakse ohutute laengute määramiseks Lõhkematerjaliseadust(2017). Selle seaduse alusel on loodud dokument „Lõhketööde projektile esitatavad nõuded“ kus on välja toodud meetod ohutute laengusuuruste arvutamiseks ja prognoosimiseks.

Torudele seismiliselt ohutuid laengusuuruseid Eestis veel määratud pole küll aga on T. Tombergi ja A. Toomiku poolt töötatud välja valemid seismiliselt ohutute laengute määramiseks põlevkivikarjäärides ja kaevandustes. Need on välja toodud ka määruses „Lõhketöö projektile esitatavad nõuded”.

5.1 Seismiliselt ohutute laengute määramine

Lõhketööde projekteerimisel arvutatakse ehitiste maksimaalne lubatud võnkekiirus järgmise valemi abil.

	$V_{max} = v_1 F_k$	10
--	---------------------	----

V_{max} – maksimaalne võnkekiirus, cm/s

v_1 – kaitstava ehitise kaugusest ja tema aluspinnast sõltuv suurim lubatud võnkekiirus

F_k - Ehitise liigist sõltuv parandustegur

Tabel 4 Ehitise suurim lubatav võnkekiirus sõltuvalt kaugusest ja aluspinnasest [Lõhketöö projektile esitatavad nõuded, 2005]

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	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 5 Ehitise liigist sõltuv parandustegur [Lõhketöö projektile esitatavad nõuded, 2005]

Nr	Ehitise liik	Parandustegur F_k
1	Masked ehitised, sillad ja sadamakaid	2,00
2	Betoon-, radubetoon- ja teraskonstruksioonid, eelmainitud konstruktsioonidest tööstushooned, pritsbetooniga kaetud allmaarajatised	1,5
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 valubetoon eaga üle ühe nädala	1,00
5	Kergbetonehitised (ka kõik muud ehitised, milles on kasutatud kergbetooni). Kivistuv valubetoon eaga 3–7 ööpäeva	0,75
6	Eriti vibratsioonitundlikud ehitised, nagu muuseumid, kirikud ja teised kõrgete võlvide ja suurte pingeväljadega hooned, silikaattellistest hooned. Kivistuv valubetoon eaga kuni 3 ööpäeva	0,65
7	Varinguohtlikud ajaloo- ja arhitektuurimälestised, varemed	0,5

Maksimaalne seismiliselt ohutu laeng arvutatakse lõhketööde projekteerimisel valemiga [Lõhketöö projektile esitatavad nõuded, 2005]

	$Q_{max} = \frac{V_{max}^2 r^{2,7}}{K^2}$	11
--	---	----

Q_{max} – seismiliselt ohutu laeng, kg

V_{max} – maksimaalne võnkekiirus, cm/s

K – pinnase seismilisuse tegur

r – kaugus lõhkamispaigast, m

Tabel 6 Pinnase seismilisuse tegur [Lõhketöö projektile esitatavad nõuded, 2005]

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

Pinnase seismilisuse teguri maksimaalväärtust kasutatakse kui on vihmane ja suurveeperiood või kui töötamine toimub aastaringelt. Minimaalväärtust tohib kasutada suvisel kuival perioodil. [Lõhketöö projektile esitatavad nõuded, 2005]

Lühiviitlõhkamisel loetakse korraga plahvatavaks laenguks ühes viitegrupis olevat laengut, kui viitesamm on vähemalt 50ms. Väiksemate viitesammude korral tuleb arvutuslik seismiliselt ohutu ühes viitegrupis olev laeng jagada parandusteguriga, mille väärtus sõltub viitesammust.

1,2 kui viitesamm on 35-50 ms

1,4 kui viitesamm on üle 25 kuni 35 ms

1,5 kui viitesamm on all 25 ms

5.2 Torudele ohutute laengute määramine

Ohutute laengute määramisel torudele on tehtud mitmesuguseid erinevaid uuringuid ja suur hulk teadlasi on jõudnud maetud torustike kohapealt sarnasele arusaamisele. Lõhkamistest põhjustatud deformatsiooni ja stressi jälgimise protsess on küllaltki keeruline, raskelt teostatav ja kontrollitav. Seetõttu on mõistlik kasutada ohutuse hindamiseks osakeste vibratsiooni tippkiirust ehk PPV-d.[Jiang jt, 2021]

Maetud torustike ohutud vibratsioonikiirused on suure hajuvusega, ulatudes 20mm/s kuni 250mm/s. Selline hajuvus on tingitud tingimuste muutlikusest erinevates asukohtades ja ka torudest endast. Pinnasetingimused, torude materjal ja opereerimistingimused on põhilised muutujad. [Jiang jt, 2021]

Hea ohutusstandard vibratsiooni tippkiiruse jaoks torude puhul on saksa standard DIN_4150. Kui eeldada, et torud on toodetud ja maha laotud kasutades tänapäevaseid standardeid on PPV piirväärtused järgenevad.

Tabel 7 Juhendväärtused lühiajalise vibratsiooni hindamiseks maetud torudel.[DIN 4150-3, 2016]

NR	Toru materjal	Juhendväärtus $v_{i, \max}$ mm/s toru peal
1	Teras, keevitatud	100
2	klaasistatud savi, betoon, raudbetoon, eelpingestatud betoon, metall (äärikutega või ilma)	80
3	Müüritis, plastmass	50

6. Uuringuala tutvustus

Uuringuala asub Tallinnas Vao lubjakivikarjääris. Punase joonega on tähistatud C kategooria maagaasi jaotustorustik Tallinn-Kehra C12 mille peal viidi läbi seismograafiga mõõtmised. Sinise piirjoonega on tähistatud Vao V mäeeraldise ligikaudsed piirid, kus lõhkamised teostati.

Mäeeraldise põhjapoolne piir on ligikaudu 50m kaugusel gaasitrassist. Teenindusala ida-lõunaosas asub elektriõhuliin F. Kirdenurka läbivad 20 kV elektriõhuliinid IRU:LOO ja AS BALTIFALT:LOO. Alast ligikaudu 20 m lõunas asub Maardu-Ülemiste raudteetrass. Uuringuruumi teenindusalale jääb puurkaev 15075 ja hooned. Alal asuvad mitmed väiksemad kraavid. Uuringuruumi idaosa kattub 135 m ulatuses Rail Baltica 350 m laiuse trassikoridoriga.[Tammekänd, 2015]



Joonis 9. Vao lubjakivimaardla, kus viidi läbi töös tehtud seismilised katsed.

6.1 Geoloogiline ehitus

Ala asub Põhja-Eesti platool, mille moodustavad vähese kvaternaarse katendiga (suures osas moreen) kaetud Ordoviitsiumi ladestu karbonaatsed kihid. Uuringuruumi ala ja selle lähiümbrys on tasase reljeefiga, väikse kallakuga Pirita jõe suunas. Maapinna absoluutkõrgused ulatuvad 32 kuni 37 meetrini. Vao lubjakivimaardla kasuliku kihi moodustavad Kesk-Ordoviitsiumi ladestiku Uhaku, Lasnamäe, Aseri ja Kunda lademe lubjakivid. Kasuliku kihi lamamiks on Kesk-Ordoviitsiumi ladestiku Volhovi lademe savikas glaukoniitlubjakivi. Lamami üldine langus on jälgitav lõuna-kagu suunas abs kõrgusest 18 - 21 meetrini. Katendi paksus uuringuruumis on 0,3 - 5,0 m, olles esindatud moreeni ja kasvukihiga, mille paksus moodustab vaid 0,1 - 0,2 meetrit.[Tammekänd, 2015]

Kivimite lühikirjeldus kihistike kaupa ülalt alla liikudes on järgnev [Tammekänd, 2015]:

- **Uhaku lademe (O_2uh)** kivim on esindatud helehalli pruunika varjundiga peenekristallilise lubjakiviga, mis ülemistes kihtides on porsunud ja õhukesekihiline. Esinevad mõne millimeetri kuni 2 cm paksused savikad vahekihid.
- **Lasnamäe lademes (O_2ls)** on eraldatavad kolme erinevat kivimikompleksi:
 - Alumine õhukeste lainjate mergli vahekihtidega lubjakivi
 - Väikese paksusega dolomiidi kiht, mis on halli värvusega, peenekristalliline ja paksukihiline
 - Ülemine kõva paksukihiline, kohati õrnalt dolomiidistunud lubjakivi.
- **Aseri lademe (O_2as)** kihid on esindatud halli pruunika varjundiga peene- kuni mikrokristallilise oiidlubjakiviga. Lademe alumiseks piiriks on kolmik-fosfaatne katkestuspind, millest alumine on tugevalt püriidistunud.
- **Kunda lademe (O_1kn)** kivim on nõrgalt pruunikashall peendetriitjas lubjakivi, rohkete fosfaatsete lainjate katkestuspindadega. Kohati on peene- kuni mikrokristalliline kivim roheka varjundiga.

6.2 Hüdrogeoloogilised tingimused

Lubjakivimaardlas ja uuringuala piirkonnas moodustab hüdrogeoloogilise läbilõike Alam-Ordoviitsiumi veehorisont, mis levib Volhovi ja Kunda kihtides. Selle veehorisondi vettpidavaks kihiks on Hunnebergi lademe Leetse kihistu savirohked vahekihid. Veehorisont täitub peamiselt sademete mõjul ja veetase madaldub Pirita jõe suunas.

Veetaseme absoluutkõrgus varasemate uuringute ajal oli maardla piirkonnas 32-37 meetrit. 2015 aastaks oli veetase alanenud mäetööde tõttu 20-22 meetrini, mis on napilt madalamal kui karjääri põhi. Kogunev vesi pumbatakse vajadusel veekogujast äravoolukraavi ning sealt edasi juhitakse Pirita jõkke.[Tammekänd, 2015]

7. Mõõtmised Vao V lubjakivikarjääris

7.1 Vönkekeskond

Paekivikarjäärides lõhkamisel levivad plahvatusimpulsi mõjul seismilised lained sfääriliselt igas suunas kuni lainete sumbumiseni. Piirpindadel toimub lainete murdumine ja peegeldumine. Vönkekeskonna füüsikalised ja mehaanilised omadused mõjutavad oluliselt seismiliste lainete levikut massiivis. Ühtlase ehitusega tugevates ja elastsetes massiivides levivad seismilised lained kiiremini võrreldes pehmete ja plastsete massiividega [Tomberg, 2017].

Antud gaasitoru uuringualal lõhkamisi teostatakse vönkekeskonnas, mis on tugev ja elastne. See eest ehituse poolest pole väga ühtlane kuna lubjakivid on reeglina kihilised ja esineb savi ja mergli vahekihte. Lisaks esineb ka kohati lõhesi, mis võivad olla täitunud muude pudedate setete või veega. Gaasitoru on ümbritsetud 1-2 meetri ulatuses tagasitäitematerjaliga, mis on segu liivast, savist ja lubjakivitükkidest.

7.2 Mõõteseadmed

Mõõtmisi tehti kasutades NOMIS seismographs poolt USA-s valmistatud Mini-Supergraph II elektroonilisi seismomeetreid (joonis 10). Seadme tehnilised andmed on tabelis 8.



Joonis 10 Mini supergraph II seismomeetrid (Vao V, 12.03.2025)

Tabel 8 Seismomeeter Mini Supergraph II tehnilised parameetrid [NOMIS Seismographs, 2018]

Tehnilised andmed	Mini supergraph II (seismika)
Seismoandur	standardne Kolmeteljeline
Mõõtevahemik	0-254 mm/s
Täpsus	+/- 3%
Sagedusulatus	2-400 Hz
Mälu	65 tuhat 1 sekundilist seismilist sündmust

7.3 Metoodika

Väo V lubjakivikarjääris toimuvate lõhkamiste mõju uurisin gaasitrassile Tallinn-Kehra C12. Peamine parameter millele keskendus oli maksimaalne aineosakeste võnkekiirus. Määrati võnkekiiruste kolm komponenti: piki-, vertikaal- ja horisontaalsuunaline.

Seismilised mõõtmised karjääris teostati kasutades ühte asukohta, kus gaasitoru oli osaliselt välja kaevatud, et tagada juurdepääs torule. Piirduti ühe kaevatud sektsiooniga kuna gaasitorusi kaevandaja ise ei või lahti kaevata. Kasutatav alltöövõtja määratakse gaasitrassi haldaja poolt ja seetõttu majanduslikult ei olnud soositav mitut sektsiooni lahti kaevata.

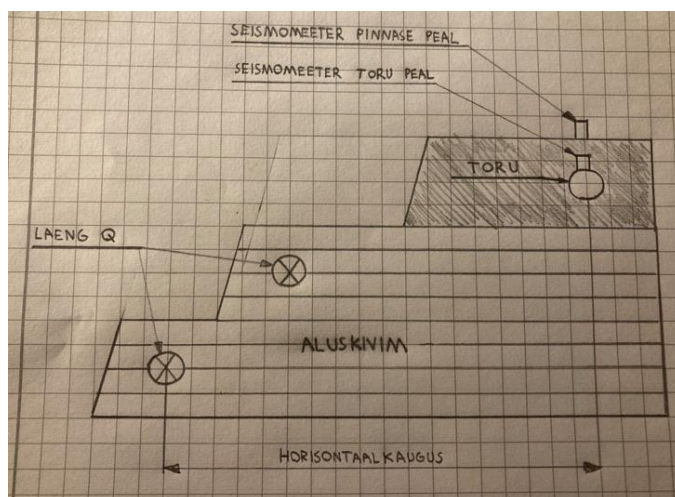
Seismograafide paigutus gaasitoru ümbruses oli järgmine. Kõige rohkem mõõtmisi teostati paigutades seismoandur toru peale, ning peale lisati raskuseks lisaklotse, et tagada hea kontakt toru pinnaga. Lisaks viidi läbi ka üksikud mõõtmised paigutades seismoandurid, kas toru kõrvale pinnasesse või täpselt toru pealasuvasse pinnasesse. Seismoandurid paigutati alati tootja poolt täpsustatud suunaga seismilise allika poole. (joonis 11 ja 12). Vibratsioonimõõtmiste skeem on toodud välja joonisel 13.



Joonis 11 Seismograafide paigutus (Väo V, 05.03.2025)



Joonis 12 Seismograaf pinnasel (Väo V, 12.03.2025)



Joonis 13 Seismiliste mõõtmiste skeem Väo V (Birnbäum, 19.05.2025)

Toru pealseid mõõtmisi viidi läbi kogu uuringuperioodi jooksul, küll aga muudeti teisest mõõtmiste prioriteete. Gaasi ülekandeliini kõrvale paigutamise asemel hakati seismoandureid paigutama torupealsele pinnasele, et leida potentsiaalne seos pinnase ja toru vibratsiooniväärtuste vahel mida varasemates uurimustes teistes riikides on täheldatud.

Mõõtmisel kolmeteljelise seismomeetriga fikseeritakse vertikaal-, horisontaal-, ja pikisuunaliste komponentide maksimumid. Ajaliselt need komponendid ei lange kunagi kokku kuna lainete levimiskiirused on erinevad. Lisaks mõjutab veel tulemusi lainete peegeldumine ja murdumine. Seepärast kasutatakse uuringutes võnkekiiruse maksimaalset vektorsummat.[Tomberg, 2017]

	$v_{VS} = \max \sqrt{v_P^2 + v_{SH}^2 + v_{SV}^2}$	12
--	--	----

v_{VS} - võnkekiiruse vektorsumma, mm/s

v_P^2 – pikisuunaline komponent, mm/s

v_{SH}^2 – horisontaalsuunaline komponent, mm/s

v_{SV}^2 – vertikaalsuunaline komponent, mm/s

Vektorsumma valem sisaldab endas täiendavat ohutusvaru, kuna liidetakse kolme komponendi maksimaalväärtused ilma ajalist tegurit arvestamatta. Üldiselt on saadud summa 5-10% suurem kui kõige suurema väärtuse andnud komponent.[Tripathy jt, 2016]

7.4 Tulemused

Mõõtmised toimusid töö raames alates 06.02.2025 kuni 09.04.2025 ja toimuvad Balrocki poolt veel ka edasi, et suurendada andmete hulka. Kokku mõõdeti torupealseid seismikaväärtusi kaheksal korral ja nulltulemus esines ühel korral kus väärtust ei saadud. Pinnase pealseid mõõtmisi võeti kahel korral ja toru kõrval viiel korral. Mõõtekauguste vahemik oli 60-107 meetrit. Viitegruppide maksimaalväärtused on vahemikus 11,9-21,6 kg. Põhilaenguna kasutati lõhkamisel ANFO-t ja lõõkpadrunina padrundatud emulsioonlõhkeainet Senatel. Mõõtetulemused on esitatud Lisa 1.

8. Seismiliste lainete intensiivsuse prognoos

Prognoosi leidmine seisneb seismiliste lainete intensiivsuseparameetrite määramises. Vaja on teada võnkekeskonna omadusi, vabanenud energia hulka ja kaitstava objekti kaugust lõhkamiskohast.

Hindamise peamiseks parameetrik on võnkekeskonna aineosakeste võnkekiirus. Seda sama parameetrit peamise hindamiskriteeriumina seismiliselt kahjustava mõju hindamiseks.

Lõhkamistööl vabanenud energia hulk sõltub korraga plahvatavast lõhkeainekogusest ehk laengu või viitegrupi suuruselt. Lisaks on vaja teada ka kasutatava lõhkeaine omadusi. Vao V lubjakivikarjääris kasutatakse lõhkeainena ANFO-t. Kuna üksiklaengute plahvatusenergia on suhteliselt väike, siis lainete intensiivsus sõltub laengu või viitegrupi suuruselt Q .

Lõhketööstest põhjustatud seismiliste lainete intensiivsuse prognoosimiseks on vaja leida võnkekiiruse sõltuvus laengu või viitegrupi suuruselt Q ja mõõtmispunkti kaugusest d . Intensiivsuse prognoosimiseks tuleb leida seos.[Tomberg, 2017]

	$v = f(Q, d)$	13
--	---------------	----

v – osakeste võnkekiirus, mm/s

Q – viitegrupi suurus, kg

d – kaugus objektini lõhkamiskohast, m

8.1 Taandatud kaugus

Lõhkamistööl varieeruvad paljud muutujad ja seetõttu kasutatakse taandatud kaugust erinevate laengusuurusete, mõõtmiskauguste, võnkekeskondade ja lõhkamissituatsioonide võrdlemiseks. Taandatud kaugus leitakse kasutades valemit.[Tomberg, 2017]

	$d_s = dQ^n$	14
--	--------------	----

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

d – kaugus, m

Q – viitegrupi suurus, kg

n – astendaja

Astendaja n väärtus sõltub kasutatava lõhkeaine omadustest ja laengu plahvatuse mõjukaugusest. Määratakse tavaliselt astendaja plahvatuse mõjukauguse järgi kui kasutatavad lõhkeained on lähedaste omadustega.

Kasutatakse sõltuvalt mõjukaugusest kahte erinevat astendajat milleks on $n = -1/3$ ja $n = -1/2$. Alla 6 meetrise mõjukauguse puhul on hea kasutada astendajat $n = -1/3$ ja seismiliste lainete fronti on võimalik kirjeldada sfäärina. Üle 31 meetrise mõjukauguse puhul kasutatakse astendajat $n = -1/2$, mis puhul lainete fronti saab kirjeldada tasapinnana. Kauguste puhul, mis jäävad 6 ja 31 meetri vahele võib valemis rakendada mõlemat astendajat.[Dowding, 1985]

Käesolevas uurimuses olid lõhkamistöode kaugused gaasitorust alati suuremad kui 31 meetrit seega kasutasin taandatud kauguse määramisel astendajat $n = -1/2$. Taandatud kauguse valem seismilise mõju hindamiseks, kasutades seda astendajat on järgnev.

	$d_s = \frac{d}{\sqrt{Q}}$	15
--	----------------------------	----

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

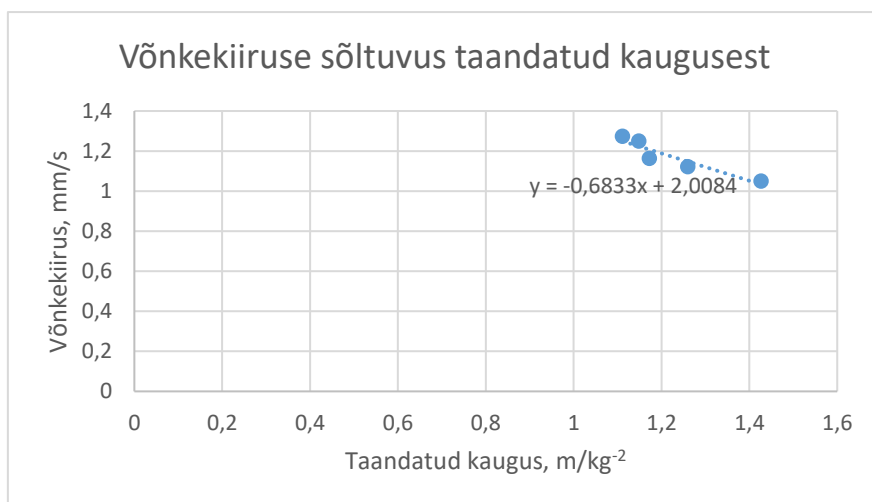
d – kaugus, m

Q – viitegrupi suurus, kg

Taandatud kauguse kasutamine võimaldab siduda omavahel viitegrupi suuruse ja lõhkamiskauguse üheks muutujaks ning aitab võrrelda erinevatel lõhkamistel kogutud tulemusi.[Tomberg, 2017]

8.2 Võnkekiiruse prognoos

Võnkekiiruse prognoosimiseks kasutasin Microsoft Exceli tabelitöötluste tarkvara. Prognoosi leidmiseks sisestati arvatud taandatud kaugused ja võnkekiirused hajuvustabelisse. Kõik joonisel 14 leitavad väärtused on logaritmitud.



Joonis 14 Võnkekiiruse sõltuvus taandatud kaugusest

Hajuvustabelis on näha võnkekiiruse sõltuvust taandatud kaugusest. Tabelis on märgatav, et punktid koonduvad hajuvusega sirge ümber, mille järgi võib järeldada, et logaritmitud võnkekiiruse ja taandatud kauguse vahel on lineaarne sõltuvus. Seda sõltuvust kirjeldatakse lineaarse regressiooni võrrandiga. Seda tüüpi regressioonianalüüs on üldlevinud viis üle maailma, et prognoosida lõhketööde tagajärjel tekkivat vibratsiooni.[Agrawal & Mishra, 2019]

	$\log(v) = A \cdot \log(d_s) + \log B$	16
--	--	----

Sellest võrrandist avaldub võnkekiirus kujul.

	$v = B \cdot d_s^A$	17
--	---------------------	----

v – võnkekiirus, mm/s

d_s – taandatud kaugus

A – regressioonivõrrandi kordaja

B – regressioonivõrrandi vabaliige

Regressioonianalüüsis kasutasin ainult toru pealt saadud mõõtetulemusi kuna pinnasepealseid ja toru kõrval asuvaid mõõtepunkte polnud piisav kogus, et nendele eraldi regressioonianalüüs teostada. Määrata oli vaja kordaja A, vabaliige $\log(B)$, korrelatsioonikordaja R ja standardhälve. Analüüsi tulemused on esitatud Tabel 10 ja parameetrid Tabel 9.

Tabel 9 Regressioonivõrrandi parameetrid

Vabaliige ($\log(B)$)	2,008
Standardhälve	0,03
Korrelatsioonikordaja ruut	0,879
Korrelatsioonikordaja	-0,937
Mõõtmiste arv	5
Regressioonivõrrandi kordaja (A)	-0,683

Ohutute laengute arvutamiseks on vaja regressioonivõrrandile lisada ohutusvaru kuna oma olemasoleval kujul esitab ta vibratsiooni keskvaartust. Keskvaartuse problem on see, et pooltel juhtudel ületab võnkekiirus prognoosi keskvaartust seega ohutusvaru jääb liiga väikeseks. Lahendatakse see problem leides kahe standardhälbe reegli abil võrrandi 95% usalduspiir. Usalduspiir leitakse lisades regressioonivõrrandile selle kahekordne standardhälve.

	$\log(v_{97,5\%}) = A \cdot \log(d_s) + \log B + 2\sigma$	18
--	---	----

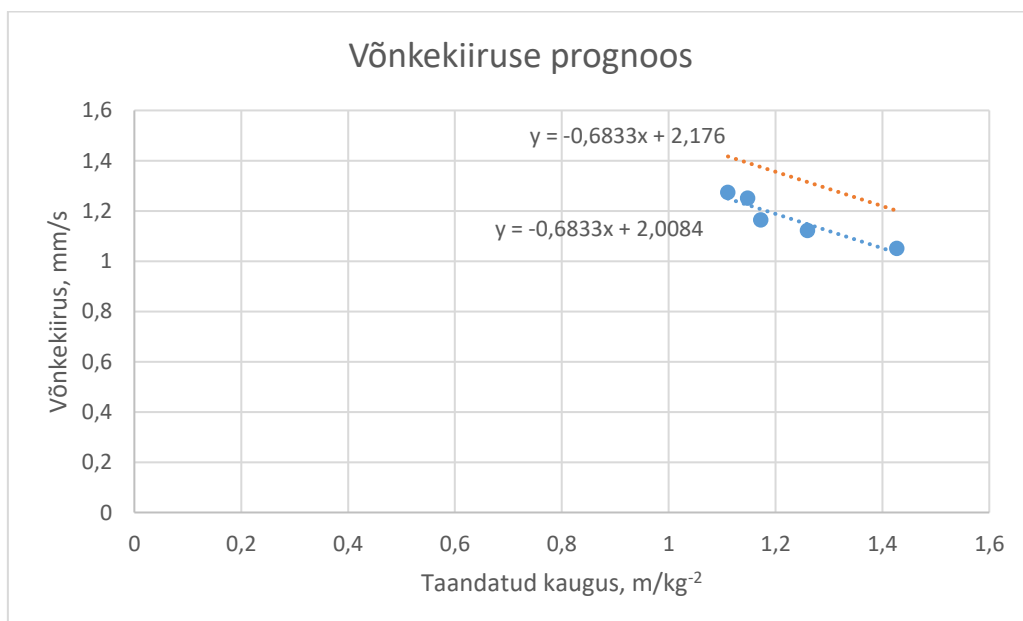
Seda võrrandit kasutades võib eeldada, et 97.5% lõhkamiste puhul ei ületa võnkekiirus prognoosväärtust ja võnkekiirus sellest avaldub järgnevalt.

	$v = B \cdot d_s^A \cdot 10^{2\sigma}$	19
--	--	----

$v_{97,5\%}$ - võnkekiiruse tõenäosuse 97.5% ülemine usalduspiir, mm/s

σ – standardhälve

Võnkekiiruse nomogramm on toodud Joonis 15. Oranži värviga on tähistatud võnkekiiruse ülemine usalduspiir, sinised punktid on mõõdetud ppv väärtused ja sinise joonega on märgitud regressioonivõrrandi lahend.



Joonis 15 Võnkekiiruse prognoosimise nomogramm

Tabel 10 Regressioonvõrrandi lahendid

Taandatud kaugus		Võnkekiirus Vektorsumma		Regressioonivõrrand, mm/s	
m/kg ⁻²	log	mm/s	log	Lahend	Ülempiir 97.5%
12.91	1.111	18.79	1.274	1.249	1.323
14.06	1.148	17.79	1.250	1.224	1.298
14.88	1.173	14.58	1.164	1.206	1.28
18.19	1.259	13.26	1.122	1.147	1.221
26.72	1.427	11.23	1.050	1.033	1.107

Tabel 11 võnkekiiruse prognoosimise võrrand

Lõhketöö tüüp	Seismoanduri asukoht	n	R	Kiiruse võrrand	
				Mõõtmistulemuste keskväärtsusel	Ülemisel usalduspiiril
Pealmaalõhkamine	Toru peal	5	-0.937	$v = 101 \cdot d_s^{-0.683}$	$v = 150 \cdot d_s^{-0.683}$

9. Ohutute laengute arvutused gaasitorule

Ohutuks laengusuuruseks peetakse sellist laengut, mis võnkekeskkonnas plahvatades ei põhjusta lubatust suurema intensiivsusega võnkeliikumist/vibratsiooni.

Taandatud kaugus avaldub võrandist (17) järgnevalt.

	$d_s = \left(\frac{B}{v}\right)^{-\frac{1}{A}}$	20
--	---	----

Kaugusel üle 31 meetri avaldub taandatud kaugus valemi (15) järgi.

	$d_s = \frac{d}{\sqrt{Q}}$	21
--	----------------------------	----

Järelikult võrdsustades need valemis saame.

	$\frac{d}{\sqrt{Q}} = \left(\frac{B}{v}\right)^{-\frac{1}{A}}$	22
--	--	----

Võrdsustatud taandatud kauguste valemitest saame avaldada laengusuuruse Q.

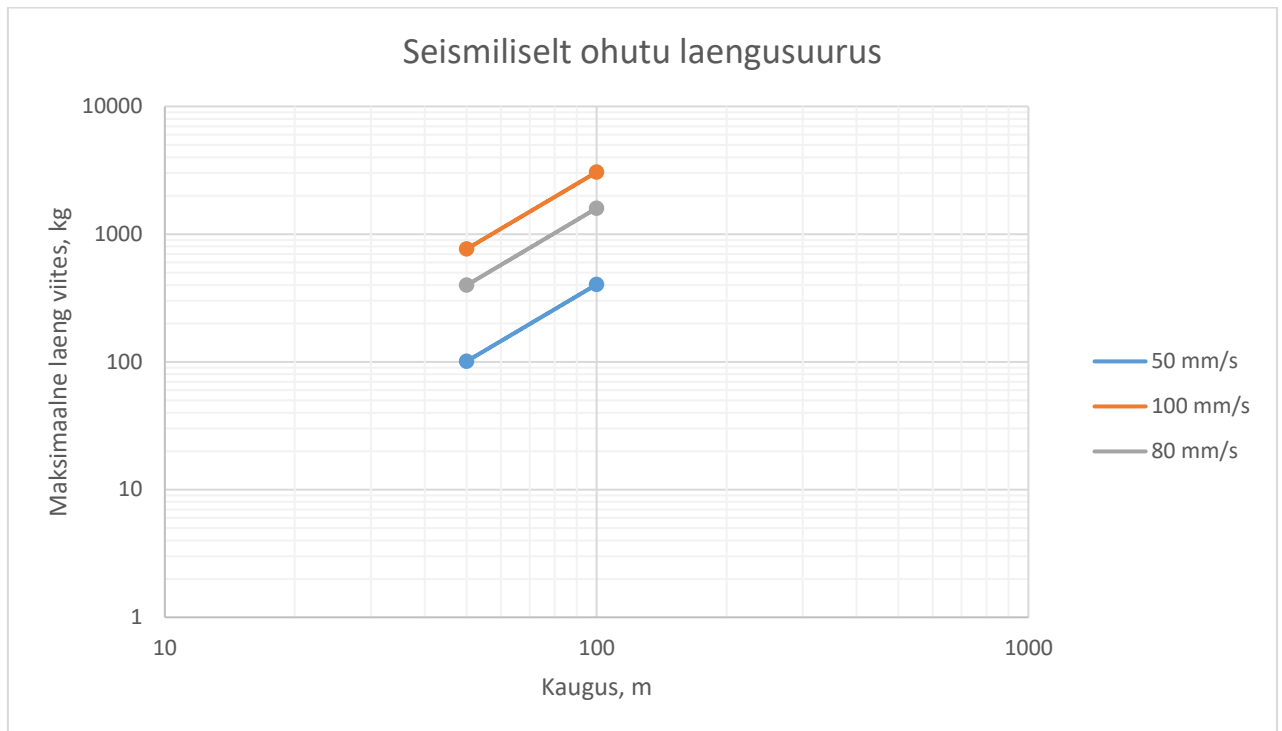
	$Q = \left[\frac{d}{\left(\frac{B}{v}\right)^{-\frac{1}{A}}} \right]^2$	23
--	--	----

Seismiliselt ohutu laengusuuruse valem gaasitoru jaoks.

	$Q_{ohutu} = \left[\frac{d}{\left(\frac{150}{v_{lubatud}}\right)^{1.46}} \right]^2$	24
--	--	----

Viimase valemi tuletamiseks kasutati tabelis 11 toodud regressioonivõrrandi lahendi 97.5% usalduspiiri ning ohutu laengu arvutamiseks kasutatakse $v_{lubatud}$ väärtuste asemel DIN 4150 poolt määratud juhendväärtusi.

Ohutu laengusuuruse nomogrammi koostamise jaoks arvutasin erinevatel võnkekiirustel ja kaugustel ohutud laengud ja tulemused on joonisel 16.



Joonis 16 Seismiliselt ohutu laengusuuruse nomogramm

10.Arutelu ja Järeldused

Käesoleva töö käigus uurisin lõhketöödega seotud seismiliste lainete mõju gaasitorustikele. Selle raames sai ka kogutud seismoandmeid Tallinn-Kehra C12 maetud gaasi ülekandeliini lahtikaevatud sektsioonist Vão lubjakivikarjääris. Kogutud andmete põhjal leiti korrelatiivne seos lõhketööde parameetrite ning nendega kaasnevate seismiliste mõjude intensiivsuse vahel.

Uuringu eesmärgiks oli leida, kas võimalik on suurendada lõhketööde mahtu Vão lubjakivikarjääris gaasitoru läheduses leides ohutu laengusuurus.

Uuringu tulemuseks sain võrrandi seismilise efekti peamise intensiivsuse parameetri määramiseks. Võrrandiga on võimalik prognoosida võnkekiirust gaasitorule lubjakivikarjääris kaugustel 50-100 meetrit. Sama võrrandi alusel ja DIN 4150 määratud juhendväärtuste abil töötasin välja arvutusmetoodika seismiliselt ohutute laengusuuruste määramiseks gaasi ülekande infrastruktuurile. Saadud ohutud laengud tulid kaugustel 50-100 m oluliselt suuremad kui praegu kasutusel olevad laengusuurused seega olemasolevate tulemuste põhjal võiks suuremaid lõhkamisi teostada küll.

Probleemiks töös leitud arvutusmetoodika rakendamisel on fakt, et kasutatavaid mõõtepunkte millest metoodika välja töötati on vähe, seega selle täpsus ei pruugi olla piisav.

Edasised soovitused:

- Teostada edasi Vão karjääris seismilise mõõtmisi gaasitorule, et oluliselt suurendada mõõtmispunktide arvu ja seeläbi saada täpsemaks ohutu laengusuuruse ja vibratsiooni prognoos.
- Leida edasiste uuringutega pealmaakaevandustes lihtsam ja majanduslikult vähem koormav meetod gaasitorudele vibratsiooni hindamiseks.
- Kaaluda DIN 4150 kasutuselevõttu Eestis

Kokkuvõte

Lõhketööd on maavarade kaevandamisel väga olulisel kohal, kuna on kuluefektiivne ja kiire meetod kivimite väljamisel. Asulate ja tähtsate infrastruktuuriobjektide vahetus läheduses on tavaliselt lõhketööde mahule pandud peale piirangud, mis määravad maksimaalse lubatud seismilise mõju.

Käesoleva töö eesmärgiks oli leida ohutu laengusuurus lõhkamistöodel, et tagada Tallinn-Kehra C12 gaasitoru terviklikus Vão lubjakivikarjääri lõhkamiste mõjuala tsoonis ja võimalusel leida mõistlikum ohutus standard, mis rahuldab nii opereerijat kui ka kaevandajat.

Välitööde käigus mõõdeti Vão V lubjakivikarjääris seismilise efekti intensiivsust gaasitoru pealt võetud vibratsiooniväärtuste abil. Kasutatakse vibratsiooniväärtusi kuna lõhkamistest põhjustatud deformatsiooni ja stressi jälgimise protsess on maetud torustike puhul küllaltki keeruline, raskelt teostatav ja kontrollitav.

Uuringu tulemuseks saadi võrrand seismilise efekti peamise intensiivsuse parameetri määramiseks. Võrrandiga on võimalik prognoosida võnkekiirust gaasitorule. Sama võrrandi alusel ja DIN 4150 määratud juhendväärtuste abil töötati välja arvutusmetoodika seismiliselt ohutute laengusuuruste määramiseks.

Arvutusmetoodika rakendamine ohutu laengusuuruse määramisel pole selle väljatöötamisel kasutatud andmete vähesuse tõttu veel kõige täpsem. Edaspidi on otstarbekas jätkata mõõtmistega ja andmepunktide kogumisega ning lisaks leida lihtsam meetod vibratsiooniväärtuste hindamiseks gaasitorudele.

Tänuavaldused

Tänan enda lõputöö juhendajat lektor Tõnu Tombergi, heade nõuannete ja abivalmiduse eest. Mäeettevõtte OÜ Vao Paas pakkus uuringuprobleemi. Koostöös Balrock OÜ juhatuse liikme Jüri Järvetiga sai teostatud seismilised mõõtmised asukohal.

Kasutatud kirjandus

1. Agrawal, H. & Mishra, A.K. (2019). *Modified scaled distance regression analysis approach for prediction of blast-induced ground vibration in multi-hole blasting*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(1), 202-207.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.07.004>
2. Dowding, C. H. (1985). *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice-Hall.
3. Earle, S. (2015). *Understanding Earth Through Seismology*. Academia.
https://www.academia.edu/89728771/9_1_Understanding_Earth_Through_Seismology
4. Gad, E. F., Wilson, J. L., Balendra, T., Moore, A. J. & Richards, A. B. (2007). *Response of Pipelines to Blast Loading*, Australian Journal of Structural Engineering, 7(3), 197-207.
<https://doi.org/10.1080/13287982.2007.11464976>
5. German Institute for Standardization. (2016). *Vibration in Buildings – Part 3: Effects on Structures* (DIN 4150-3:2016-12) <https://dx.doi.org/10.31030/2579353>
6. Jiang, N., Zhu, B., Zhou, C., Li, H., Wu, B., Yao, Y. & Wu, T. (2021). *Blasting vibration effect on the buried pipeline: A brief overview*. Engineering Failure Analysis, 129.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105709>
7. Konya, C. J. & Walter, E. J. (1991). *Rock Blasting and Overbreak Control*. s.l. National Highway Institute.
8. *Lõhkematerjaliseadus*. (2017). RT I, 21.06.2017, 1.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/112122024009>
9. *Lõhketöö projekte esitatavad nõuded*. (2005). RTL 2005, 63, 910.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/121062017015?leiaKehtiv>
10. Michigan Technological University. (kuupäev puudub). Seismology. Loetud 10. aprill 2025 aadressil <https://www.mtu.edu/geo/community/seismology/learn/seismology-study/>
11. NOMIS Seismographs. (2018). *Mini-Supergraph II User Guide*. <https://nomis.com/wp-content/uploads/2019/07/Mini-Supergraph-II-User-Manual-.pdf>
12. Olofsson, S. O. (1990) *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Applex.
13. Rayleigh wave. (2024, 13. detsember). Wikipedia. Loetud 3. aprill 2025 aadressil https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rayleigh_wave&oldid=1262752739
14. Rosenthal, M. F & Morlock, G. L. (03.1987). *Blasting Guidance Manual*. s.l. United States Department of the Interior.
15. Schwaradt, M., Pilger, C., Gaebler, P. (2022). Natural and Anthropogenic Sources of Seismic, Hydroacoustic, and Infrasonic Waves: Waveforms and Spectral Characteristics (and Their Applicability for Sensor Calibration). *Surveys in Geophysics*, 43, 1265–1361.
<https://doi.org/10.1007/s10712-022-09713-4>

16. Siskind, D. E., Stagg, M. S., Wiegand, J. E. & Schultz, D. L. (1995). *Surface Mine Blasting Near Pressurized Transmission Pipelines*. U.S Bureau of Mines.
17. Tammekänd, M. (2015). *Väo lubjakivimaardla Väo V uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne* (Töö nr 11/0733-2) . OÜ Inseneribüroo STEIGER. [https://fond.egt.ee/fond/get-file/8682/92853/Uuringuaruanne-\(Vao-V\)-2015.pdf](https://fond.egt.ee/fond/get-file/8682/92853/Uuringuaruanne-(Vao-V)-2015.pdf)
18. The Editors of Encyclopaedia Britannica. (kuupäev puudub). Seismic wave. *Encyclopaedia Britannica*. Loetud 10. aprill 2025 aadressil <https://www.britannica.com/science/seismic-wave>
19. Tomberg, T. (2017). *Lõhketööde vibratsiooni uuring*. Taltech Geoloogia instituut.
20. Tripathy, G.R., Shirke, R.R. & Kudale, M.D. (2016). *Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(2), 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.007>
21. Vilipuu, M. (k.p). [Füüsika täiendõppe materjalide loeng nr 8 slaidiesitus]. <https://taltech.ee/persoon/marek-vilipuu#p45152>

Lisa 1. Mõõtmiste tulemused

Kuupäev	Lõhkeaugud tk	Kokku kg	Viites kg	Kaugus m	Toru peal mm/s	Toru kõrval mm/s	Pinnasel mm/s
12.02.2025	18	292	16,25	60	14,58	16,69	
05.03.2025	36	611	17	75	13,26	21,32	
12.03.2025	40	731	18,2	60	17,79	19,95	
13.03.2025	32	692	21,6	60	18,79	0	
19.03.2025	21	295	14	100	11,23		16,77
27.03.2025	38	595	15,6	107	0	0	0
09.04.2025	21	250	11,9	93	17,49		28,48