



**Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite kivimmehaanilised
omadused ja nende varieeruvus**

Magistritöö

Üliõpilane: Reet Männik

Üliõpilaskood: 242161LARM

Juhendaja: PhD Bruno Grafe (Geoloogia instituut, järel doktor-teadur)

Õppekava: Maa süsteemid ja geotehnoloogia

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: Reet Männik

25.05.2026

[Digiallkiri]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: PhD Bruno Grafe

25.05.2026

[Digiallkiri]

Sisukord

Annotatsioon.....	d
Kasutatud lühendite loetelu.....	f
Tabelite loetelu.....	g
Jooniste loetelu.....	h
1. Sissejuhatus.....	1
2. Geoloogiline taust.....	2
3. Varasemad uuringud.....	3
4. Uuringuala.....	4
4.1. Väo V lubjakivikarjäär.....	4
4.2. Reinu lubjakivikarjäär.....	5
4.3. Lubja lubjakivikarjäär.....	6
5. Andmed ja meetodika.....	7
5.1. Stratigraafiliste üksuste litoloogiline kirjeldus.....	7
5.1.1. Väo V lubjakivikarjäär (VÄO1 - VÄO6).....	8
5.1.2. Reinu lubjakivikarjäär (RE2 - RE5).....	12
5.1.3. Lubja lubjakivikarjäär (LU1 - LU3).....	14
5.2. Proovikehade ettevalmistamine.....	16
5.3. Katsemetoodika.....	18
5.3.1. Üheteljeline survetugevus.....	18
5.3.2. Brasiilia tõmbetugevus.....	21
5.3.3. Abrasiivuse määramine.....	23
5.3.4. Ultraheli analüüs ja Poissoni tegur.....	27
5.4. Andmete töötlemine ja statistilised meetodid.....	28
6. Tulemused.....	29
6.1. Üheteljeline survetugevus ja E-moodul.....	29
6.2. Brasiilia tõmbetugevus.....	30
6.3. Abrasiivsuse määramine.....	31
6.3.1. CERCHARi abrasiivsusindeks ja Rosiwali kõvadus.....	31
6.3.2. XRD ja XRF.....	32
6.4. Ultraheli.....	33
7. Arutelu ja analüüs.....	35

7.1.	UCS ja BTS omavahelised seosed.....	35
7.2.	UCS-i, E-mooduli ja Poissoni arvu omavahelised seosed.....	36
7.3.	UCS, ultraheli kiiruse ja Poissoni teguri omavahelised seosed.....	37
7.4.	UCS, CAI ja mineraloogilise koostise omavahelised seosed.....	38
7.5.	Mehaaniliste ja mineraloogiliste omaduste vaheliste seoste koondanalüüs.....	39
8.	Järeldused.....	40
	Kokkuvõte.....	42
	Tänuavaldused.....	43
	Kirjanduse loetelu.....	44
	Lisa 1. Proovivõtukoordinaadid ja -kuupäev.....	48
	Lisa 2. Katsete ja analüüside jaotus proovigruppide lõikes.....	49
	Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsid kasutatud proovigrupid ja proovikoodid.....	50
	Lisa 4. UCS ja E-mooduli mõõtetulemused.....	51
	Lisa 5. BTS mõõtetulemused.....	54
	Lisa 6. CERCHARi katse nõelte kulumispinna mõõtmistulemused.....	57
	Lisa 7. XRD analüüsi tulemused kihtide lõikes.....	61
	Lisa 8. XRF analüüsi tulemused kihtide lõikes.....	62
	Lisa 9. UH Mõõtetulemused.....	65

Annotatsioon

Käesolev magistritöö käsitleb Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite mehaanilis-füüsikalisi omadusi ning nende varieeruvust erinevate stratigraafiliste üksuste lõikes. Karbonaatkivimid moodustavad olulise osa Eesti aluspõhjast ning on majanduslikult tähtis maavara, mida kasutatakse laialdaselt ehituskillustiku, teedehituse ja betoonitööstuse toorainena. Vaatamata kivimite geoloogilise ehituse põhjalikule uuritusele on nende mehaanilis-füüsikaliste omaduste süstemaatiline käsitlus Eestis seni piiratud olnud — olemasolevad andmed on killustunud ning erinevatel meetodilistel alustel kogutud, mis raskendab eri leiukohtade ja stratigraafiliste üksuste omavahelist võrdlust.

Uuringumaterjal koguti kolmest aktiivsest lubjakivikarjäärist: Väo V (Kesk-Ordoviitsium), Reinu (Ülem-Ordoviitsium) ja Lubja (Alam-Silur) lubjakivikarjäärist. Katsed viidi läbi 13 erinevat stratigraafilist üksust esindava proovigrupi kivimitega, millele määrati üheteljeline survetugevus (UCS), Brasiilia tõmbetugevus (BTS), abrasiivus CERCHARi meetodil, ultrahelikiirused ja Poissoni tegur, samuti mineraalne ja keemiline koostis röntgendifraktsiooni (XRD) ja röntgenfluorestsentsi (XRF) analüüside abil. Mehaanilised katsed viidi läbi kolmes erinevas proovisuunas, et hinnata kivimite võimalikku anisotroopsust.

Tulemused näitavad, et uuritud karbonaatkivimite mehaanilis-füüsikalised omadused varieeruvad märkimisväärselt nii stratigraafiliste üksuste kui karjääride lõikes ning on tihedalt seotud kivimite mineraloogilise koostise ja mikrostruktuuriga. UCS ja CAI vahel ilmnes mõõdukas positiivne korrelatsioon, samas kui mineraloogiline koostis üksi ei osutunud abrasiivuse usaldusväärseks ennustajaks. UCS ja ultraheli kiiruse vaheline seos oli ootamatult nõrgem kui rahvusvahelises kirjanduses täheldatud, mis viitab, et üldised empiirilised korrelatsioonid ei pruugi Eesti karbonaatkivimitele otse rakenduda. Proovikehade puurimise suunal ilmnes mõõdetav mõju mitmete parameetrite väärtustele, mis viitab kihilisusest tingitud anisotroopsusele. Töö tulemused loovad aluse ühtse ja võrreldava andmestiku kujunemisele Eesti karbonaatkivimite kohta, omades praktilist väärtust kaevandus-, ehitus- ja geotehnilistes rakendustes.

Märksõnad: karbonaatkivimid, lubjakivi, dolokivi, kivimmehaanika, survetugevus, tõmbetugevus, abrasiivus, Ordoviitsium, Silur, Eesti

CERCS kood: T340 Kaevandamine/mäendus

Mechanical and Physical Properties of Carbonate Rocks in Northern and Central Estonia and Their Variability

Abstract

This master's thesis investigates the mechanical and physical properties of carbonate rocks in Northern and Central Estonia and their variability across different stratigraphic units. Carbonate rocks form a significant part of the Estonian bedrock and represent an economically important mineral resource, widely used as raw material for construction aggregate, road construction and the concrete industry. Despite the detailed knowledge of the geological structure of these rocks, the systematic characterisation of their mechanical and physical properties has remained limited in Estonia — existing data are fragmented and collected on varying methodological bases, which hampers comparison between different localities and stratigraphic units.

Rock samples were collected from three active limestone quarries: Vão V (Middle Ordovician), Reinu (Upper Ordovician) and Lubja (Lower Silurian). Laboratory tests were carried out on samples representing 13 distinct stratigraphic units, including determination of uniaxial compressive strength (UCS), Brazilian tensile strength (BTS), abrasivity using the CERCHAR method, ultrasonic wave velocities and Poisson's ratio, as well as mineralogical and chemical composition using X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF). Mechanical tests were conducted in three different sample orientations to assess the potential anisotropy of the rocks.

The results indicate that the mechanical and physical properties of the studied carbonate rocks vary considerably across stratigraphic units and quarries, and are closely related to the mineralogical composition and microstructure of the rocks. A moderate positive correlation was observed between UCS and the CERCHAR abrasivity index, whereas mineralogical composition alone proved insufficient for reliably predicting abrasivity. The relationship between UCS and P-wave velocity was weaker than typically reported in international literature, suggesting that general empirical correlations may not be directly applicable to Estonian carbonate rocks. The drilling orientation of the test specimens had a measurable effect on several parameters, suggesting anisotropy induced by rock layering. The findings contribute to building a unified and comparable dataset on Estonian carbonate rocks, with practical value in mining, construction and geotechnical applications.

Keywords: carbonate rocks, limestone, dolostone, rock mechanics, compressive strength, tensile strength, abrasivity, Ordovician, Silurian, Estonia

CERCS code: T340 Mining

Kasutatud lühendite loetelu

Lühend	Ingliskeelne nimetus	Eestikeelne nimetus	Ühik
A	<i>Cross-sectional area</i>	Ristlõike pindala	[mm ²]
Br	<i>Brittleness index</i>	Rabeduse indeks	[1]
BTS	<i>Brazilian Tensile Strength</i>	Brasiilia tõmbetugevus	[MPa]
CAI	<i>CERCHAR abrasivity index</i>	CERCHARi abrasiivsusindeks	[1]
D	<i>Diagonal (drilling direction)</i>	Diagonaalsuund (puurimissuund)	-
E	<i>E-modulus (Young's modulus)</i>	Elastsusmoodul; E-moodul	[MPa]
F	<i>Force</i>	Jõud	[N]
FEQ	<i>Equivalent quartz content</i>	Kivimi ekvivalentne kvartsisisaldus	[1]
F _{max}	<i>Maximum force</i>	Maksimaalne jõud	[N]
H	<i>Horizontal (drilling direction)</i>	Horisontaalsuund (puurimissuund)	-
HR	<i>Rosival hardness (normalised to quartz)</i>	Rosivali kõvadus (normaliseeritud kvartsile)	[1]
HRC	<i>Rockwell Hardness Scale C</i>	Rockwelli kõvadusskaala C	[1]
L/D	<i>Length-to-diameter ratio</i>	Pikkuse ja diameetri suhe	[1]
LOI	<i>Loss on Ignition</i>	Kaokadu kuumutamisel	[%]
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>	Kivimassiivi kvaliteedi klassifikatsioon	[1]
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>	Kivi kvaliteedinäitaja	[1]
UCS	<i>Uniaxial compressive strength</i>	Üheteljeline survetugevus	[MPa]
V	<i>Vertical (drilling direction)</i>	Vertikaalsuund (puurimissuund)	-
V _p	<i>P-wave velocity</i>	Pikilaine kiirus	[m/s]
V _s	<i>S-wave velocity</i>	Ristlaine kiirus	[m/s]
XRD	<i>X-ray diffraction</i>	Röntgendifraktsioon	[wt.%] [wt.% /
XRF	<i>X-ray Fluorescence</i>	Röntgenfluorestsents	ppm]
v	<i>Poisson's ratio</i>	Poissoni tegur	[1]

Tabelite loetelu

Tabel 1. Katsetatud proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu.	8
Tabel 2. Proovikehade koguarv erinevate proovigruppide lõikes.	17
Tabel 3. Katsete ja analüüside koguarv.....	18
Tabel 4. FEQ arvutamisel kasutatud mineraalide normaliseeritud Rosiwali kõvaduse väärtused	27

Jooniste loetelu

Joonis 1. Eesti geoloogiline ehitus ning uuritud karjääride asukohad	2
Joonis 2. Väo V karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega	4
Joonis 3. Reinu karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega	5
Joonis 4. Lubja karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega	6
Joonis 5. VÄO1 UCS proovikeha	9
Joonis 6. VÄO2 UCS proovikeha	9
Joonis 7. VÄO3 UCS proovikeha	10
Joonis 8. VÄO4 UCS proovikeha	11
Joonis 9. VÄO5 UCS proovikeha	11
Joonis 10. VÄO6 UCS proovikeha	12
Joonis 11. RE2 UCS proovikeha	12
Joonis 12. RE3 UCS proovikeha	13
Joonis 13. RE4 UCS proovikeha	13
Joonis 14. RE5 UCS proovikeha	14
Joonis 15. LU1 UCS proovikeha	14
Joonis 16. LU2 UCS proovikeha	15
Joonis 17. LU3 UCS proovikeha	15
Joonis 18. Foto rusumaterjalist võetud kivimplokist Reinu lubjakivikarjäärist.....	16
Joonis 19. Puursüdame valmistamine ja ettevalmistatud katsekehad	16
Joonis 20. UCS standardsete proovikehade ($L/D = 2$) illustreeriv pilt.....	19
Joonis 21. Elastusmooduli graafiline määramine	19
Joonis 22. Näide UCS katsekehast enne ja pärast katset.....	21
Joonis 23. BTS standardsete proovikehade ($L/D = 0,5$) illustreeriv pilt	22
Joonis 24. Näide Brasiilia tõmbetugevuse katsekehadest enne ja pärast katset.	23
Joonis 25. CERCHARi katse käigus tehtud kriimustused kivimi pinnal.....	23
Joonis 26. CERCHARi katse käigus kulunud terasnoelte otste dokumenteerimine mikroskoobiga ...	24
Joonis 27. Mikroskoobipildid proovidest.	26
Joonis 28. Ultraheli mõõteseadme Pundit Lab+ katseeadistus koos proovikehaga	27
Joonis 29. Ultraheli mõõtmise tulemused tarkvaras Pundit Lab+ (P- ja S-lained, Poissoni tegur).	28
Joonis 30. Üheteljelise survetugevuse (UCS) väärtuste jaotus kihtide lõikes	29

Joonis 31. E-mooduli väärtuste jaotus kihtide lõikes.....	30
Joonis 32. BTS väärtuste jaotus kihtide lõikes	31
Joonis 33. Abrasiivsusanäitajate tulemused kihtide lõikes.....	32
Joonis 34. Mineraloogiline ja keemiline koostis kihtide lõikes	33
Joonis 35. Ultraheli kiiruse väärtuste jaotus kihtide lõikes.....	34
Joonis 36. UCS, BTS ja rabaduse indeksi keskmised väärtused kihtide ja suundade lõikes.....	35
Joonis 37. UCS, E-moodul ja Poissoni arv kihtide lõikes ning omavahelised seosed.	36
Joonis 38. UCS, ultraheli kiirus ja Poissoni tegur kihtide ja suundade lõikes.....	37
Joonis 39. UCS, CAI ja XRF kihtide lõikes.....	38
Joonis 40. Korrelatsioonimaatriks.....	39

1. Sissejuhatus

Kivimite füüsikalise-mehaanilised omadused on olulised paljude inseneritehniliste otsuste tegemisel, alates kaevandamise planeerimisest kuni taristu rajamiseni. Karbonaatkivimid, eelkõige lubjakivid, moodustavad Põhja- ja Kesk-Eestis märkimisväärse osa aluspõhjast ning kuuluvad Eesti majanduslikult olulisemate maavarade hulka. Neid kasutatakse laialdaselt ehituskillustiku, teedeehituse ja betoonitööstuse toorainena, mistõttu on nende omaduste tundmine oluline nii kaevandamisettevõtete kui ka riiklike institutsioonide jaoks.

Eesti Ordoviitsiumi ja Siluri karbonaatkivimite geoloogilist ehitust, stratigraafiat ja levikut on uuritud põhjalikult juba aastakümneid. Võrdlemisi vähe tähelepanu on aga pööratud nende kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste. Senised uuringud on sageli keskendunud üksikutele leiukohtadele või konkreetsete kaevanduslike probleemide lahendamisele ega võimalda erinevate stratigraafiliste üksuste usaldusväärset omavahelist võrdlust. Seetõttu puudub Eestis siiani ühtne ja võrreldav alusandmestik, millele saaks inseneritehniliste ja kaevandamisalaste otsuste tegemisel kindlalt tugineda. Samal ajal kasvab surve kaevandamise keskkonna- ja sotsiaalsete mõjude vähendamiseks ning vajadus ehitustoorme kestlikuma kasutamise järele. Kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste täpsem tundmine on eelduseks selektiivsemale kaevandamisele, primaartoorme paremale väärindamisele ning jääkide tekke vähendamisele.

Käesolevas töös uuriti kolme aktiivset lubjakivikarjääri — Vao V, Reinu ja Lubja lubjakivikarjääri, mis paiknevad Põhja- ja Kesk-Eestis ning esindavad erinevaid Ordoviitsiumi ja Siluri stratigraafilisi üksusi. Töö käigus määrati kivimite peamised füüsikalise-mehaanilised omadused ühtsete meetodikate alusel, et hinnata nende varieeruvust nii karjääride kui ka stratigraafiliste üksuste lõikes ning analüüsida võimalikke seoseid kivimite koostise ja mehaaniliste omaduste vahel.

Probleemipüstitus ja töö eesmärk

Sellest tulenevalt on inseneritehniliste küsimuste lahendamine keeruline, kuna puudub ühtne ja usaldusväärne alusandmestik. Kivimite omaduste varieeruvus erinevate stratigraafiliste üksuste lõikes suurendab ebakindlust nii projekteerimisel ja kaevandamisel ning raskendab põhjendatud otsuste tegemist nii riiklikul tasandil ning erasektoris.

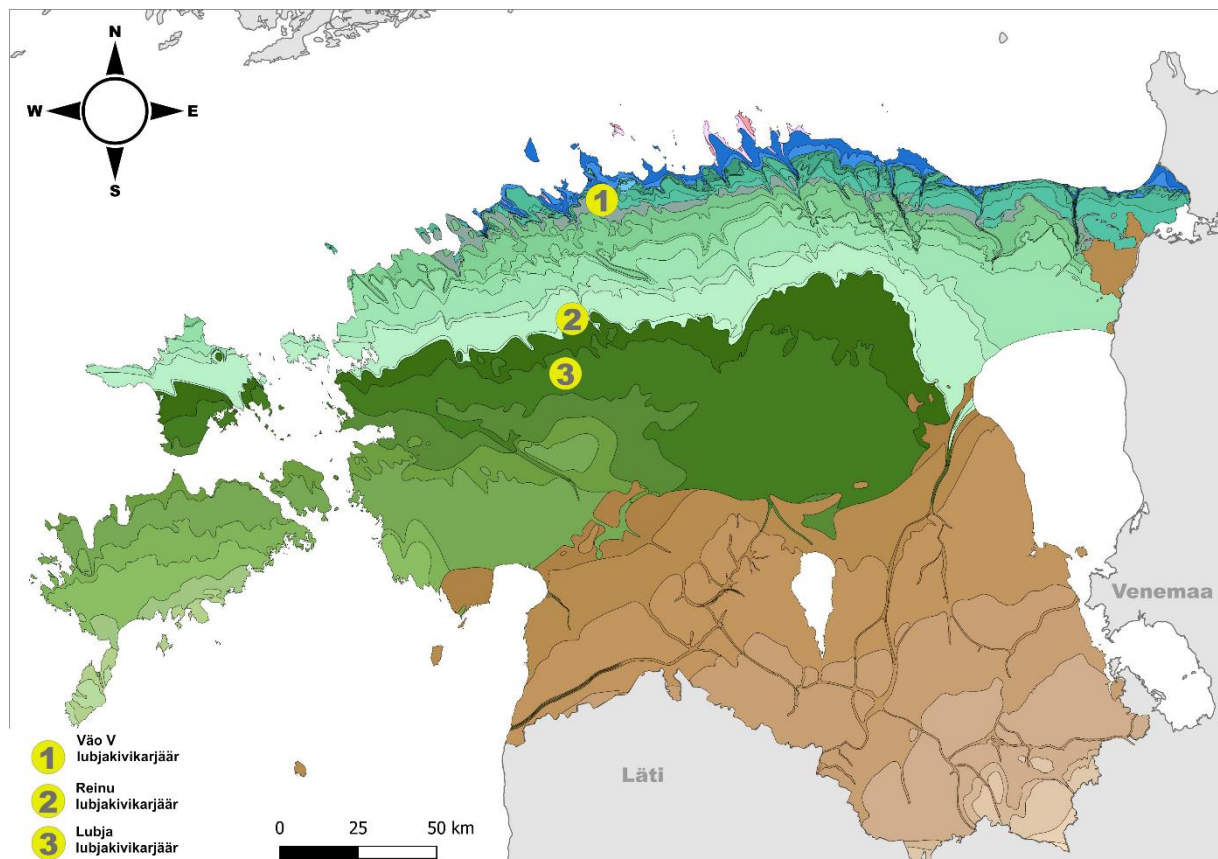
Käesoleva töö eesmärk on määrata ja analüüsida Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite füüsikalise-mehaanilisi omadusi ühtse meetodika alusel ning hinnata nende varieeruvust erinevate stratigraafiliste üksuste lõikes. Töö tulemused omavad praktilist väärtust mitmel tasandil. Kaevandamisettevõtete jaoks võimaldavad need teha kiiremaid ja põhjendatumaid otsuseid, eelkõige seoses kivimi purustatavuse, raimatavuse ning teiste töötlusomadustega. Riiklike institutsioonide jaoks pakub töö alusandmestikku maavarade hindamiseks ja kontrolliks. Teaduslikus kontekstis aitab töö kaasa sidusa ja võrreldava andmestiku kujunemisele, parandades edasiste uuringute kvaliteeti ja võrreldavust.

Käesolev töö valmis TEM-TA143 projekti „Ehitusmaavarade kestlik kaevandamine“ raames, mille eesmärk on leida uusi lahendusi ehitusmaavarade kestlikumaks kasutamiseks ja alternatiivsete ehitusmaterjalide väljatöötamiseks

2. Geoloogiline taust

Eesti aluspõhi koosneb peamiselt Kambriumi, Ordoviitsiumi, Siluri ja Devoni ladestutest, millest karbonaatkivimid on valdavalt Ordoviitsiumi ja Siluri läbilõigetel (Rõõmusoks, 1983). Eesti aluspõhja geoloogiline ehitus on suhteliselt lihtne ning kihid on valdavalt peaaegu horisontaalsed (Meidla jt, 2014). Ordoviitsiumi kivimid on Eestis laialdaselt levinud, moodustades olulise osa aluspõhjast ning koosnedes peamiselt madalmerelises keskkonnas settinud lubjakividest, mille kujunemine oli seotud Baltika paleokontinendi arenguga ja paleokeskkondade muutustega. Ordoviitsiumi ladestu paksus varieerub ligikaudu 70–180 meetrini (Meidla jt, 2014).

Siluri kivimid on Eestis samuti laialt levinud ning koosnevad peamiselt karbonaatsetest settekivimitest. Siluri läbilõikes esinevad Eestis peamiselt lubjakivid, dolokivid ja merglid (Nestor ja Soesoo, 2006). Siluri karbonaatkivide ladestumine toimus samuti madalmerelistes tingimustes, kuid settetingimused olid võrreldes Ordoviitsiumiga muutlikumad, mille tulemusena esineb karbonaatkivides suurem litoloogiline varieeruvus (Nestor, 1997; Nestor ja Soesoo, 2006). Litoloogiline varieeruvus mõjutab omakorda kivimite koostist ja ehitust erinevates stratigraafilistes üksustes.



Joonis 1. Eesti geoloogiline ehitus kaart koos peamiste ladestute avamusalade ning uuritud karjääride (1-Väo, 2-Reinu ja 3-Lubja lubjakivikarjäär) asukohad.

3. Varasemad uuringud

Eesti Ordoviitsiumi ja Siluri karbonaatkivimid on olulised ehitusmaavarad, mida kasutatakse laialdaselt ehituskultuuri tootmisel, teedehituses ning betoonitööstuses (Notton ja Sõstra, 2010). Seetõttu on nende füüsikalise-mehaaniliste omaduste tundmine oluline nii materjali kvaliteedi hindamisel kui ka kaevandamistehnoloogiate valikul. Eestis olemasolevad andmed pärinevad valdavalt üksikute maardlate geoloogilistest uuringutest ja tehnilistest aruannetest, mistõttu on erinevate stratigraafiliste üksuste tulemuste otsene võrdlemine sageli keeruline. Lisaks on varasemates uuringutes kasutatud erinevaid katsetoodikaid ja proovigeomeetriaid, mis vähendab tulemuste omavahelist võrreldavust (ISRM, 2007; Tuncay ja Hasancebi, 2009)

Karbonaatkivimite, sealhulgas lubjakivide geoloogilist ehitust, koostist ja levikut on nii Eestis kui rahvusvaheliselt põhjalikult uuritud. Eestis on Ordoviitsiumi ja Siluri karbonaatkivimite stratigraafiline ja litoloogiline käsitlus hästi dokumenteeritud (Nõlvak, 1997; Nestor, 1997; Meidla jt, 2014; Nestor ja Soesoo, 2006), kuid nende füüsikalise-mehaanilise omadusi on käsitletud piiratumalt.

Varasemad tööd Eestis käsitlevad peamiselt karjäärade geotehnilisi tingimusi ning maavarade kaevandamist ja kasutamist, samas kui kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste detailne analüüs stratigraafiliste üksuste lõikes on jäänud väheseks (Reinsalu, 2019; Vares jt, 1961; Pyldme jt, 2003). Lisaks on karbonaatkivimite levikut ja ehitust uuritud geofüüsikaliste meetoditega, kuid sellised uuringud ei võimalda otseselt hinnata kivimite füüsikalise-mehaanilise omadusi ega nende varieeruvust stratigraafiliste üksuste lõikes ning keskenduvad tihti ühele karjäärile (Bastani jt, 2013). Kivimite füüsikalise-mehaanilise omadusi on Eestis käsitletud eeskätt maardlate geoloogilise luure uuringute ja ehitusmaavarade kasutusvõimaluste hindamise raames, seal hulgas üksikute leiukohtade detailsetes uuringutes (Vares jt, 1961; Pyldme jt, 2003).

Samas näitavad rahvusvahelised uuringud, et kivimite füüsikalise-mehaanilised omadused, eriti tugevus- ja deformatsiooniparameetrid ning nende seosed mehaaniliste ja füüsikaliste omadustega, on olulised kivimite iseloomustamisel ning neil on oluline roll geotehnilistes ja kaevandamislikes rakendustes (Aladejare, 2020; Grafe, 2022; Momeni jt, 2015). Neid omadusi on uuritud ulatuslikult, keskendudes eelkõige survetugevuse, tõmbetugevuse ja ultrahelikiiruste määramisele ning nende parameetrite omavaheliste seoste analüüsile (Altindag, 2012; Majstorović jt, 2019; Liu jt, 2022).

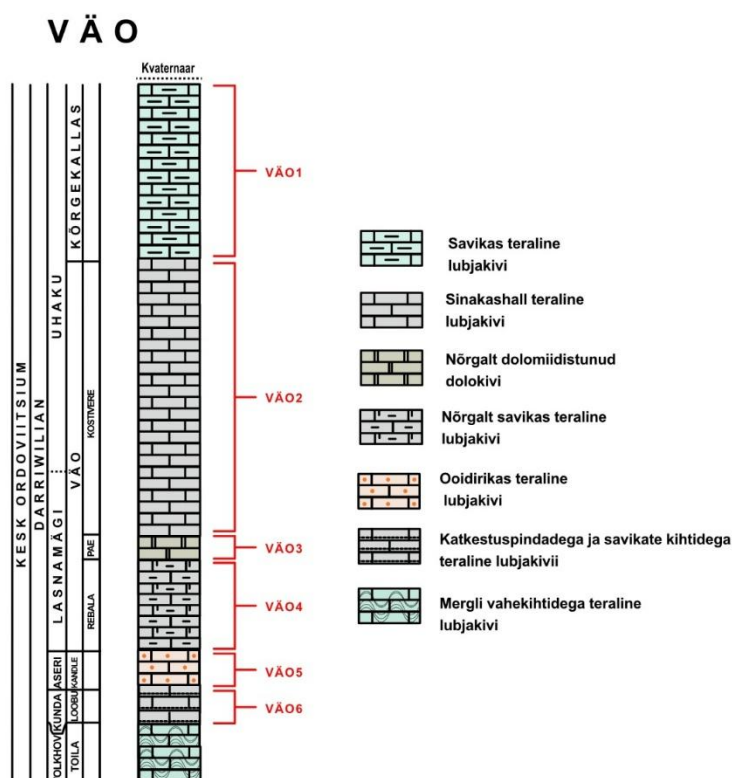
Rahvusvahelistes uuringutes on järjest rohkem tähelepanu pööratud kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste seostele kaevandamis- ja töötlusprotsessidega, kuna kivimite tugevus, rabadus ja abrasiivsus mõjutavad otseselt kivimite töödeldavust, tööriistade kulumist ning protsesside efektiivsust (Momeni jt, 2015; Meng jt, 2021; Alber jt, 2014). Mitmetes uuringutes on rõhutatud, et karbonaatkivimite füüsikalise-mehaanilised omadused sõltuvad lisaks mineraloogilisele koostisele ka kivimite tekstuurst, poorsusest ja struktuursetest iseärasustest (Palchik ja Hatzor, 2002; Karaca jt, 2025).

4. Uuringuala

Käesolevas töös analüüsitud kivimiproovid koguti Väo V, Reinu ja Lubja lubjakivikarjääridest, mis paiknevad Põhja- ja Kesk-Eestis ning esindavad erinevaid Ordoviitsiumi ja Siluri stratigraafilisi üksusi (Joonis 1. Eesti geoloogiline ehitus kaart koos peamiste ladestute avamusalade ning uuritud karjääride (1-Väo, 2-Reinu ja 3-Lubja lubjakivikarjäär) asukohad.). Proovide valikul lähtuti eesmärgist hõlmata võimalikult erinevaid karbonaatkivimite litoloogilisi ja stratigraafilisi tingimusi, et võimaldada nende karbonaatkivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste võrdlevat analüüsi. Proovivõtukohtade täpsed geograafilised koordinaadid on esitatud Lisa 1. Proovivõtukoordinaadid ja -kuupäev).

4.1. Väo V lubjakivikarjäär

Väo V lubjakivimaardla (maardla kood: MRD0000024) paikneb Põhja-Eestis Harjumaal Tallinna idaosas ning kuulub Kesk-Ordoviitsiumi karbonaatkivimite levialasse. Maardlas paljanduvad Kesk-Ordoviitsiumi lubjakivid, mille läbilõikes eristuvad mitmed lademe- ja kihistuüksused, sealhulgas Kunda, Aseri, Lasnamäe ja Uhaku lade. Nende üksuste lubjakivid moodustavad üle 12 m paksuse lasundi (Tammekänd, 2020; Bauert jt, 2014).



Joonis 2. Väo V karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega (VÄO1–VÄO6). Esitatud on uuritud kivimikihtide stratigraafia ja proovivõtukohtade paiknemine. Koostatud Bauert jt (2014) järgi.

Maardla piires paiknev Väo V lubjakivikarjäär (Joonis 1. Eesti geoloogiline ehitus kaart koos peamiste ladestute avamusalade ning uuritud karjääride (1-Väo, 2-Reinu ja 3-Lubja lubjakivikarjäär) asukohad.) on üks suuremaid aktiivseid karjääre piirkonnas. OÜ Väo Paas (äriregistrikood 10055887) kodulehe avalikust andmetest pärit info kohaselt kaevandatakse karjääris ehituslubjakivi, mida kasutatakse

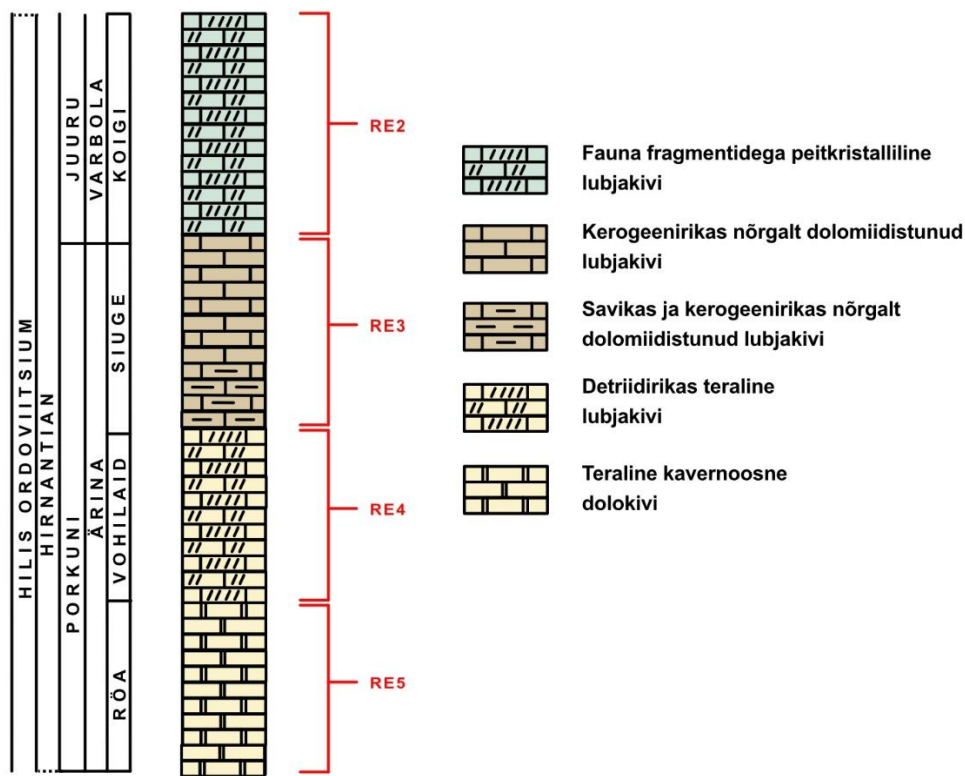
peamiselt ehituskilustiku ja -lubjakivi tootmiseks. Kaevandamistegevust viib läbi OÜ Vao Paas (Bauert jt, 2014).

Käesolevas töös analüüsitud proovid pärinevad Vao V karjäärialalt, kus avanevad Kesk-Ordoviitsiumi lubjakivid. Proovivõtukohtad ning uuritavad kivimid, mis kuuluvad Kõrgekalda, Vao, Kandle ja Loobu kihistusse ning moodustavad maardla majanduslikult perspektiivse osa, on esitatud Joonis 2. Vao V karjäärialala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega (VÄ01–VÄ06). Esitatud on uuritud kivimikihtide stratigraafia ja proovivõtukohtade paiknemine. Koostatud Bauert jt (2014) järgi. (Tammekänd, 2020).

4.2. Reinu lubjakivikarjäär

Reinu lubjakivimaardla (maardla kood: MRD0000755) paikneb Rapla maakonnas Rapla vallas Äherdi ja Koigi külade piiril (Joonis 1. Eesti geoloogiline ehitus kaart koos peamiste ladestute avamusalade ning uuritud karjääride (1-Vao, 2-Reinu ja 3-Lubja lubjakivikarjäär) asukohad.). Geoloogiliselt kuulub maardla ala Ordoviitsiumi ja Siluri piirikihtide levikualasse. Maardla läbilõikes on esindatud Pirgu, Porkuni ja Juuru lade ning nende koosseisus Adila, Ärina, Varbola ja Tamsalu kihistu kivimid (Hints jt, 2023). Piirkonna lubjakividele on iseloomulikud mitmesugused settejärgse päritoluga muutused, sealhulgas dolomiidistumine, karstumine ning tektooniliste rikkevöönditega seotud lõhelisus ja värvumisnähtused (Einasto jt, 2007).

REINU



Joonis 3. Reinu karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega (RE2–RE5). Esitatud on uuritud kivimikihtide stratigraafia ja proovivõtukohtade paiknemine. Koostatud Hints jt (2023) järgi.

Maardla piires paiknev Reinu lubjakivikarjäär on aktiivne kaevandamisala, kus toodetakse peamiselt ehituskillustikku. Karjääri haldab AS TREV-2 Grupp (äriregistrikood 10047362) ning toodangut kasutatakse valdavalt teedehituses (Hints jt, 2023).

Käesolevas töös analüüsitud proovid pärinevad Reinu karjäärialalt, kus avanevad Ärina ja Varbola kihistu lubjakivid. Uuritavad kivimid hõlmavad Rõa, Vohilau, Siuge ja Koigi kihistikku, on esitatud Joonis 3. Reinu karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega (RE2–RE5). Esitatud on uuritud kivimikihtide stratigraafia ja proovivõtukohtade paiknemine. Koostatud Hints jt (2023) järgi.

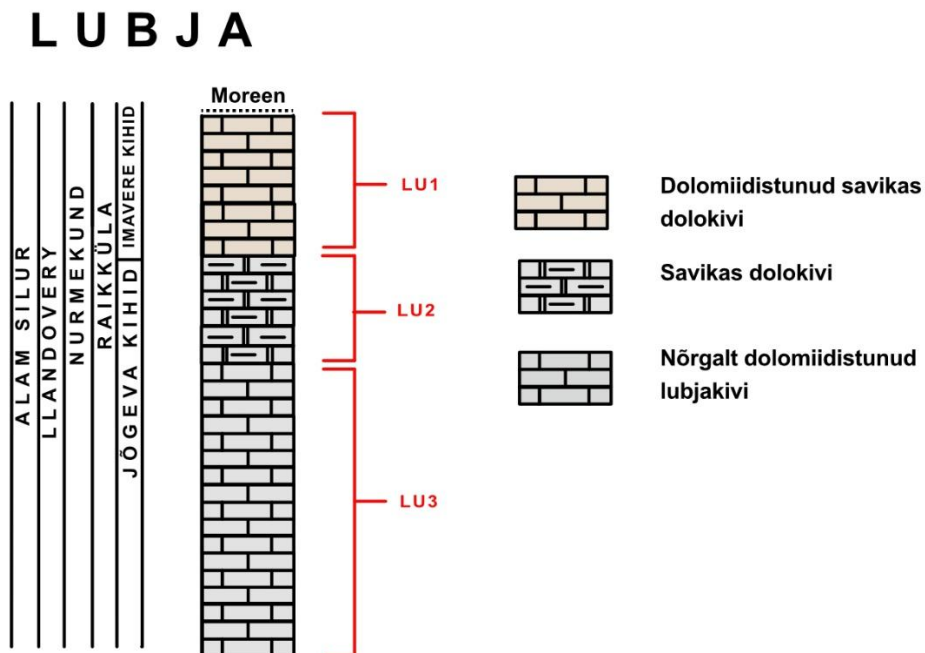
4.3. Lubja lubjakivikarjäär

Lubja lubjakivimaardla (maardla kood: MRD0000554) paikneb Rapla maakonnas Rapla vallas Lipametsa külas ning kuulub Alam-Siluri Raikküla lademe avamusalasse. Maardlas esineb kasulik kiht lubjakivi, savika dolokivi ja dolomiidistunud savika lubjakivina. Stratigraafilises läbilõikes eristuvad Imavere,

Jõgeva, Vändra ja Järva-Jaani kihid, mille kivimid on sobivad ehituskillustiku tootmiseks (Kotenjov jt, 2014).

Maardla piires paiknev Lubja lubjakivikarjäär on aktiivne kaevandamisala. Osühing Eesti Killustiku (äriregistri kood: 10126848) kodulehe avalikest andmetest pärit info kohaselt kaevandatakse karjääris lubjakivi, millest toodetakse ehituskillustiku ja toodangut kasutatakse peamiselt tee- ja taristuehituses ning betoonitööstuses.

Käesolevas töös analüüsitud proovid, mis pärinevad Lubja lubjakivikarjäärist, kus avanevad Raikküla lademe Nurmekundi kihistu karbonaatkivimid ning uuritavad kivimid hõlmavad Imavere kihti ning Jõgeva kihtide ülemist ja alumist osa, on esitatud Joonis 4. Lubja karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega (LU1–LU3). Esitatud on uuritud kivimikihtide stratigraafia ja proovivõtukohtade paiknemine. Koostatud Kotenjov jt (2014) järgi.



Joonis 4. Lubja karjääriala stratigraafiline läbilõige koos proovivõtukohtadega (LU1–LU3). Esitatud on uuritud kivimikihtide stratigraafia ja proovivõtukohtade paiknemine. Koostatud Kotenjov jt (2014) järgi.

5. Andmed ja meetodika

Käesolevas töös analüüsiti karbonaatkivimite proove Väo V, Reinu ja Lubja lubjakivikarjääridest. Uuritud proovide stratigraafiline kuuluvus ja geoloogiline taust on esitatud peatükis 4. Uuringuala ning Tabel 1. Katsetatud proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu. Proovide valikul lähtuti eesmärgist hõlmata erinevaid Ordoviitsiumi ja Siluri stratigraafilisi üksusi, et hinnata kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste varieeruvust. Kivimiplokid koguti uuritavatest karjääridest 2025. aasta suvel ning proovivõtukohtad dokumenteeriti täpsete geograafiliste koordinaatide alusel (Lisa 1. Proovivõtukoordinaadid ja -kuupäev).

Kogutud kivimiplokkidest puuriti puursüdamikud 2025. aasta septembris–oktoobris Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudi Särghaua õppekeskuses (Kurgja küla, Põhja-Pärnumaa vald, Pärnu maakond). Puursüdamikest valmistati katsekehad Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia kivitöötuslaboris (Ehitajate tee 5, Tallinn), kus need saeti mehaaniliste katsete jaoks sobivatesse mõõtmetesse. Mineraloogiliste ja keemiliste analüüside (XRD ja XRF) jaoks vajalikud proovipulbrid valmistas töö autor Tallinna Tehnikaülikooli settelaboris. XRD- ja XRF-analüüsid viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli geokeemia ja mineraloogialaboris vastavate spetsialistide poolt. Puursüdamike puurimise, katsekehade valmistamise, mehaaniliste katsete läbiviimise ning tulemuste dokumenteerimise, visualiseerimise ja analüüsi teostas töö autor.

Proovide füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramiseks viidi läbi mitmed laboratoorsed katsed, sealhulgas survetugevuse (UCS), Brasiilia tõmbetugevuse (BTS), ultraheli ning CERCHARi abrasiivsuse katsed. Lisaks teostati mineraal- ja keemilise koostise määramiseks röntgendifraktsiooni (XRD) ja röntgenfluorestsentsi (XRF) analüüsid. Katsete läbiviimisel kasutatud seadmed ja täpsed meetodikad on kirjeldatud vastavates alapeatükkides.

Katsetulemusi analüüsiti võrdlevalt, et hinnata kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste varieeruvust erinevate stratigraafiliste üksuste lõikes. Mehaaniliste katsete puhul viidi mõõtmised läbi kolmes erinevas suunas vastavalt puursüdamike orientatsioonile. CERCHARi abrasiivuskatse tulemusi analüüsiti eraldi, eristades mõõtmisi sõltuvalt kihilisuse suunast (paralleelselt ja risti kihilisusega). Analüüsi käigus hinnati erinevate katsemeetodite tulemuste omavahelisi seoseid ning nende sõltuvust kivimite mineraloogilisest koostisest, eesmärgiga analüüsida kivimite mehaaniliste omaduste varieeruvust ning nende sõltuvust proovide orientatsioonist ja stratigraafilisest kuuluvusest.

Töö koostamise käigus kasutati tehisintellektil põhinevat keeleabivahendit ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5, 2026). Kõik sisulised otsused, analüüsid ja järeldused on autori poolt iseseisvalt tehtud.

5.1. Stratigraafiliste üksuste litoloogiline kirjeldus

Uuritud stratigraafilised üksused esindavad Eesti Ordoviitsiumi ja Siluri karbonaatkivimeid ning pärinevad kolmest lubjakivikarjäärist. Väo V karjääris on esindatud Kesk-Ordoviitsiumi Kunda, Aseri, Lasnamäe ja Uhaku lade ning nendega seotud Väo, Kandle ja Loobu kihistud. Reinu karjääris hõlmavad proovid Ärina ja Varbola kihistu kivimeid, sealhulgas Rõa, Vohilaid, Siuge ja Koigi kihte. Lubja karjääris esindavad proovid Siluri Raikküla lademe kivimeid, sealhulgas Imavere kihti ning Jõgeva kivi ülemist ja alumist osa (Tammekänd, 2020; Bauert jt, 2014; Hints jt, 2023; Kotenjov jt, 2014). Uuritud

proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu on esitatud Tabel 1. Katsetatud proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu.

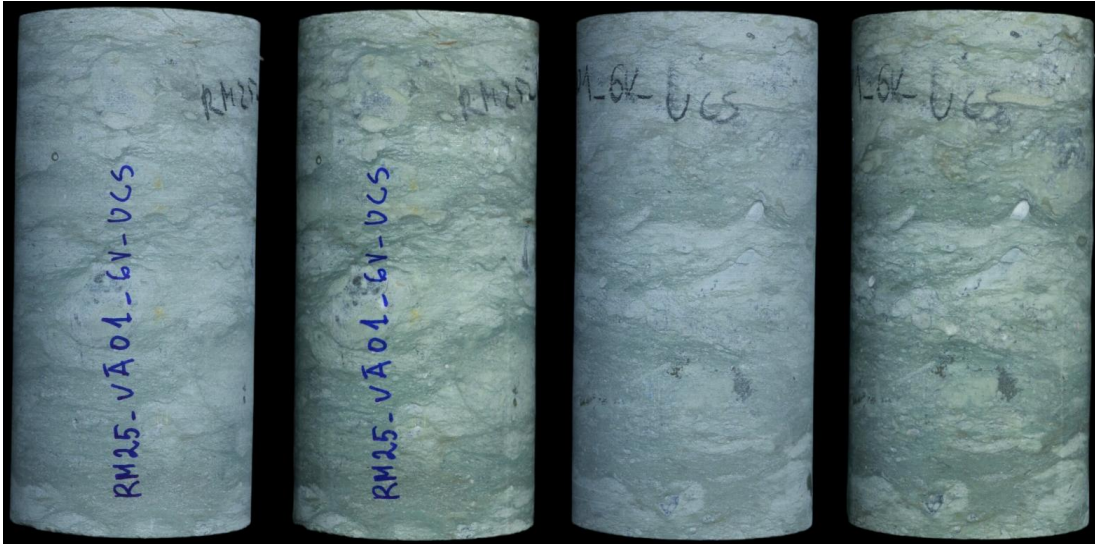
Tabel 1. Katsetatud proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu.

Proovigrupp	Ajastu	Lade (ajaline)	Kihistu	Kihistik (kihid)
LU1	Silur	Raikküla	Nurmekund	Imavere (kihid)
LU2	Silur	Raikküla	Nurmekund	Jõgeva (kihid) ülemine
LU3	Silur	Raikküla	Nurmekund	Jõgeva (kihid) alumine
RE2	Ordoviitsum	Juuru	Varbola	Koigi
RE3	Ordoviitsum	Porkuni	Ärina	Siuge
RE4	Ordoviitsum	Porkuni	Ärina	Vohilaid
RE5	Ordoviitsum	Porkuni	Ärina	Röa
VÄO1	Ordoviitsum	Uhaku	Kõrgekalda	-
VÄO2	Ordoviitsum	Lasnamägi/Uhaku	Väo	Kostivere
VÄO3	Ordoviitsum	Lasnamägi	Väo	Pae
VÄO4	Ordoviitsum	Lasnamägi	Väo	Rebala
VÄO5	Ordoviitsum	Aseri	Kandle	-
VÄO6	Ordoviitsum	Kunda	Loobu	-

Kõigi stratigraafiliste üksuste visuaalseks iseloomustamiseks valiti esinduslikud UCS katsekehad, mis on pildistatud neljas vaates (kuiv ja märg pind nii esi- kui tagaküljelt). Valitud proovikehad ei esinda konkreetset proovivõtu suunda, vaid on valitud selliselt, et need võimalikult hästi iseloomustaksid vastava kihi litoloogilisi ja tekstuuriomadusi (Joonised 5–17).

5.1.1. Väo V lubjakivikarjäär (VÄO1 - VÄO6)

VÄO1 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Uhaku lademest ja Kõrgekalda kihistust (Tabel 1. Katsetatud proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu.). VÄO1 proovigrupi kivimid on rohekashallid lubjakivid, mis on suhteliselt savikad. Proovid on visuaalselt üsna homogeensed, kuid esineb nõrk kihilisus ning üksikuid katkestuspindu. Kohati esinevad tumedamad vahekihid, mis viitavad savikamale koostisele või orgaanilise aine sisaldusele. Mõnes proovis on märgata orgaanilise aine suuremat kontsentratsiooni, mis avaldub tumedamate toonidena. Üldiselt on kivim tekstuuriühtlane. Katkestuspindade läheduses esinevad kohati tumedamad toonid, mis viitavad suuremale savikusele. Kohati on näha ussikäike ja makrofossiilide fragmente. Esinevad savikad, ebaselgelt piiritletud vahekihid (Joonis 5. VÄO1 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R.Männik).).



Joonis 5. VÄ01 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R.Männik).

VÄ02 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Lasnamäe lademest ja Vão kihistust Kostivere kihistikust (Tabel 1. Katsetatud proovigruppide stratigraafiline kuuluvus ja päritolu.). VÄ02 proovigrupi kivimid on helehallid peeneteralised lubjakivid, mis on visuaalselt suhteliselt ühtlased, kuid sisaldavad selgelt eristatavaid katkestuspindu. Proovides esineb nõrgalt arenenud kihilisus ning üksikuid tumedamaid vahekihte. Esinevad savikad, ebaselgelt piiritletud vahekihid.

Silmatorkevaimaks tunnuseks on hästi väljendunud katkestuspinnad, millel esineb ebatasasusi. Nende ümbruses on kivimi tekstuur kohati ebaühtlasem ning võib sisaldada peenemat purd- või täitematerjali, mis võivad olla makrofossiilide fragmendid (trilobiidid, käsijalgsed, peajalgsed, ostrakoodid jt). Kohati on täheldatavad ussikäigud, mis on täitunud tumeda dolomiidistunud lubjakiviga, andes kivimile iseloomuliku mustri. Mergli kelmed esinevad kohati lainjate, õhukeste ja teravapiiriliste vahekihtidena (kuni mõni mm) (Joonis 6).



Joonis 6. VÄ02 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R. Männik).

VÄO3 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Lasnamäe lademest, Vão kihistust ja Pae kihistikust (Tabel 1). VÄO3 proovigrupi kivimid on hallid ja valdavalt massiivse iseloomuga, kus kihilisus on nõrgalt väljendunud või praktiliselt puudub. Visuaalselt on materjal ühtlane ja kompaktne.

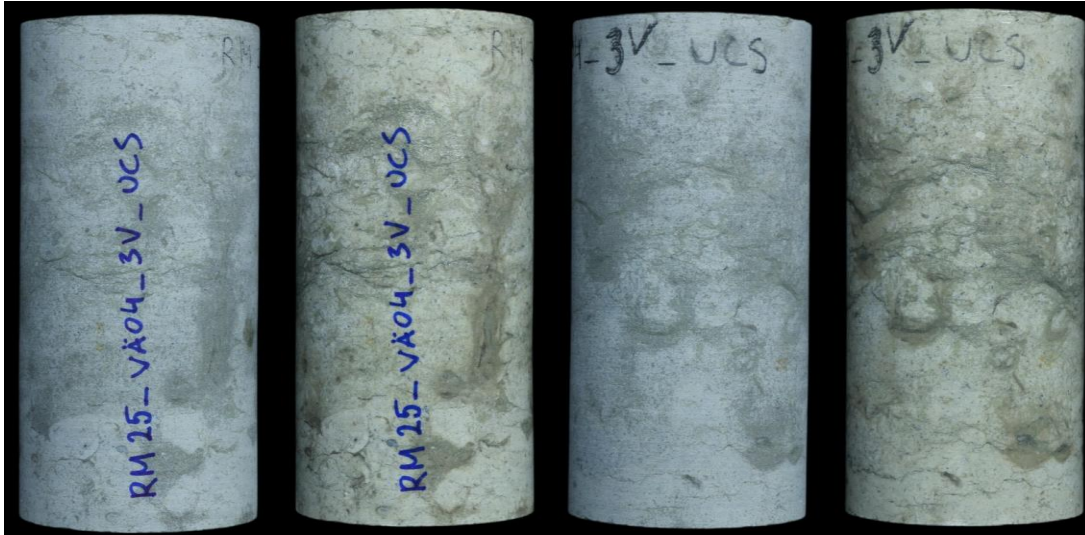
Puursüdamik es ei ole selgelt eristatavaid katkestuspindu ning kivimi tekstuuri on suhteliselt homogeenne kogu proovikeha ulatuses. Paljandis on kiht pruun ning visuaalselt eristatav, et tegemist on porsunud dolokiviga (vt peatükk 6.Tulemused), kuid värskest puuritud proovikehade puhul seda visuaalselt ei eristu. Mergli kelmed praktiliselt puuduvad või on ebaselged (Joonis 7).



Joonis 7. VÄO3 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R.Männik).

VÄO4 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Lasnamäe lademest, Vão kihistust ja Rebala kihistikust (Tabel 1). VÄO4 proovigrupi kivimid on helehallid kuni hallid. Kivimis esineb nõrgalt väljendunud kihilisus ning kohati on märgata õhukesi, ebaselgeid tumedamaid vahekihte.

Puursüdamik esineb ümardunud heledamaid struktuure ning lokaalset tekstuuri varieeruvust, mille tõttu on kivim visuaalselt heterogeenne. Kohati on täheldatavad nõrgalt arenenud katkestuspinnad, mis võivad olla seotud dolomiidistumisega. Esinevad nõrgalt savikad, ebamäärased pesad dolomiidistunud lubjakivis (Joonis 8).



Joonis 8. VÄ04 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R.Männik).

VÄ05 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Aseri lademest ja Kandle kihistust (Tabel 1). VÄ05 proovigrupi kivimid on helehallid kuni hallid, kergelt pruunika varjundiga. Kivimi iseloomulikuks tunnuseks on rohked götiitsed ooidid, mis esinevad kogu proovikeha ulatuses ning annavad kivimile täpilise ja tekstuurselt heterogeense ilme.

Götiitsed ooidid on valdavalt ümardunud ning jaotunud tihedalt kivimi massis, kohati moodustades kontsentreeritumaid tsoone. Lisaks esineb kivimis õhukesi vahekihte ning üksikuid tumedamaid katkestuspindu (Joonis 9).



Joonis 9. VÄ05 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R.Männik).

VÄ06 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Kunda lademest ja Loobu kihistust (Tabel 1). VÄ06 proovigrupi kivimid on helehallid kuni hallid ja valdavalt massiivse ehitusega. Kohati esineb kivimis rohekamat varjundit ning üksikuid pruunikaid laike.

Kivimis leidub rohkelt organismide jäänuseid, mis on kaltsiidistunud ning annavad kivimile bioklastilise iseloomu. Lisaks esineb vähesel määral glaukoniiditerakesi ja impregnatsiooni. Kohati on märgatavad

ka õrnad katkestuspinnad ning peenemad savikamad vaheosad. Esinevad tihedad fosfaatsed katkestuspinnad sügavate taskutega (Joonis 10).



Joonis 10. VÄO6 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (11.02.2026 R.Männik).

5.1.2. Reinu lubjakivikarjäär (RE2 - RE5)

RE2 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Juuru lademest, Varbola kihistust ja Koigi kihistikust (Tabel 1). RE2 puursüdamikü proovikehad on helehallid kuni kollakad beežikad, mille tekstuur on kohati ebaselgelt poolmuguljas. Kivimis esineb selgelt välja kujunenud kihilisus, mis on lainjaskihiline ning visuaalselt hästi jälgitav.

Lubjakivi vahele jäävad tumedamad mergli kihid, mis moodustavad teravapiirilisi ja lainjaid merglilisi vahekihte. Detritse materjali sisaldus on vähene ega mõjuta oluliselt kivimi üldilmet. Proovikehad on peitkristallilised ehk afaniitsed (Joonis 11).



Joonis 11. RE2 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

RE3 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Porkuni lademest ja Ärina kihistust Siuge kihistikust (Tabel 1). RE3 puursüdamikuvimid on helehallid kuni pruunikashallid, kus pruuni värvuse annab orgaanilise materjali sisaldus. Kivimid on nõrgalt dolomiidistunud ja kompaktsed.

Kivimis esineb ebaselge kihilisus, mida katkestavad kohati poolafaniitsed vahekihid. Fossiilidest leidub üksikuid terveid rugoose ning stromatopooride fragmente (Joonis 12).



Joonis 12. RE3 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

RE4 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Porkuni lademest, Ärina kihistust ja Vohilaiu kihistikust (Tabel 1). RE4 puursüdamikuvim on kollakashall dolomiit, mis on valdavalt keskmisekristalliline ning terakivimilise tekstuuriga. Kivim on ülemises osas porsunud, kusjuures värvitoon muutub selgelt heledamaks.

Esinevad merglikelmed on väga ebaterved ja hajusad, andes kivimile ebaühtlase ilme. Kohati on märgata tumedamaid, terisemaid alasid, mis rõhutavad kivimi heterogeensust (Joonis 13).



Joonis 13. RE4 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

RE5 proovigrupi kivimid pärinevad Ordoviitsiumi ajastust, Porkuni lademest, Ärina kihistust ja Rõa kihistikust (Tabel 1). RE5 puursüdamikuvim on kollakashall dolokivi, mille tekstuur on ühtlane ja

terakivimiline. Kivimis leidub rohkelt makrofossiilide fragmente, sealhulgas meriliiliate varrelülisid ja nende fragmente.

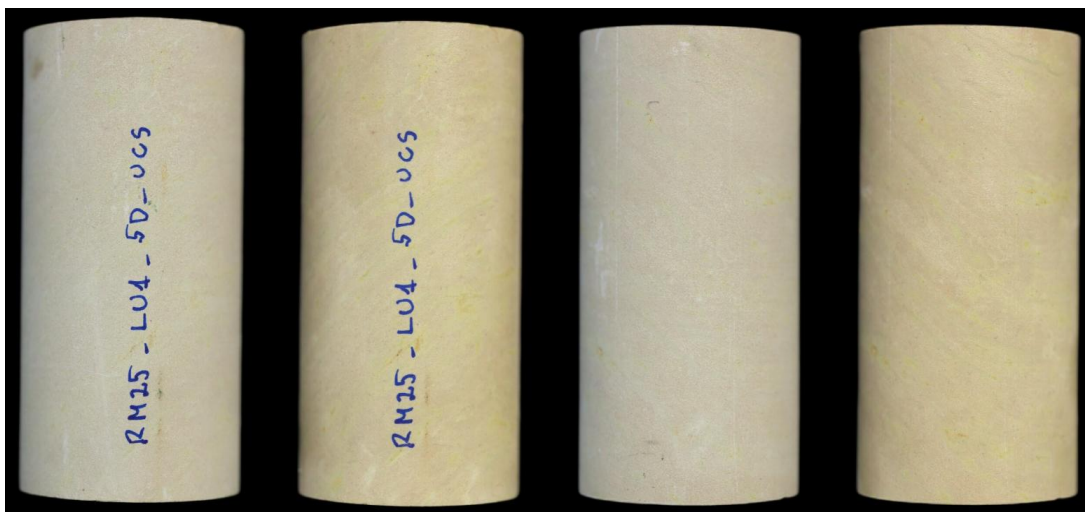
Osaliselt on fossiilsed komponendid lahustunud, mille tulemusena on tekkinud kavernid läbimõõduga kuni 3 mm. Kavernid on valdavalt ümarad, kuid harva esineb ka iseloomulikke viienurkseid vorme. Fossiilide hulk on võrreldes teiste RE proovidega suurem ning kaverne esineb rohkem, mis viitab tugevamale dolomiidistumisele. Makrofossiilide fragmendid on ränistunud (Joonis 14).



Joonis 14. RE5 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

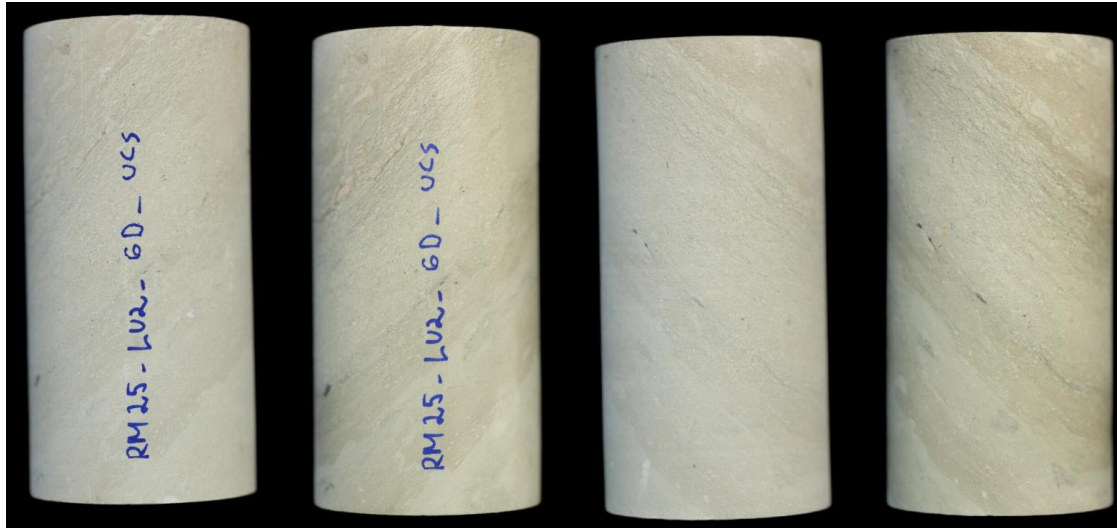
5.1.3. Lubja lubjakivikarjäär (LU1 - LU3)

LU1 proovigrupi kivimid pärinevad Siluri ajastust, Raikküla lademest, Nurmekundi kihistust ja Imavere kihtidest (Tabel 1). LU1 puursüdamiku kivim on roosaka varjundiga massiivne ja ühtlane dolokivi. Tekstuurilt on kihilisus ebamäärane ja varjatud, kohati nõrgalt lainjas ning väga ebateravate piiridega. Fauna fragmendid puuduvad, mis võib viidata primaarsele dolomiidile (Joonis 15).



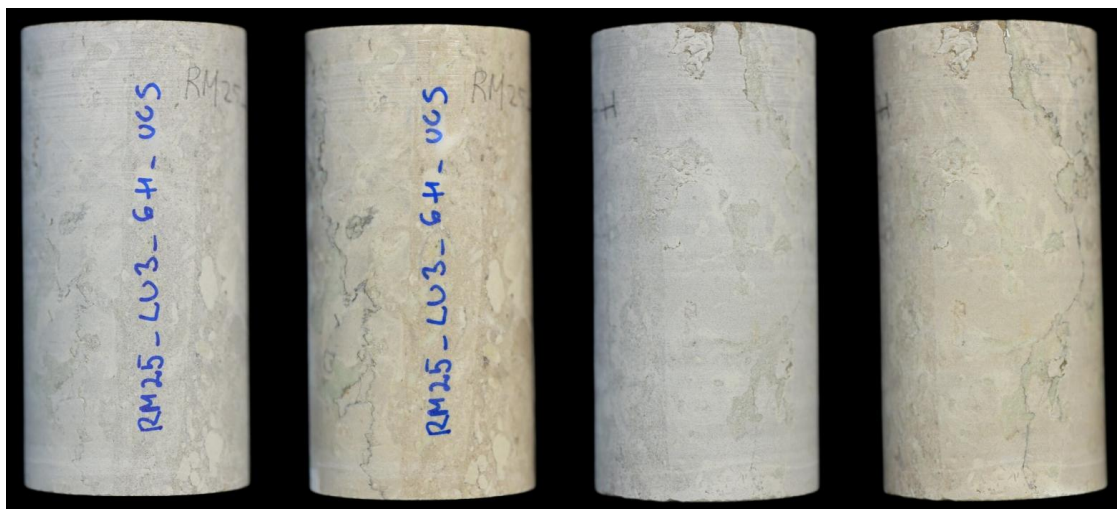
Joonis 15. LU1 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

LU2 proovigrupi kivimid pärinevad Siluri ajastust, Raikküla lademest, Nurmekundi kihistust ja Jõgeva kihtide ülemisest osast (Tabel 1). LU2 puursüdamiku kivim on helehall dolokivi, mis on peeneteraline ja ühtlase teralisusega. Kivim on valdavalt massiivne ning kihilisus ei ole selgelt eristatav, kuid on mõnevõrra paremini jälgitav kui LU1 puhul. Detritse materjali sisaldus on väga väike või puudub üldse (Joonis 16).



Joonis 16. LU2 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

LU3 proovigrupi kivimid pärinevad Siluri ajastust, Raikküla lademest, Nurmekundi kihistust ja Jõgeva kihtide alumisest osast (Tabel 1). LU3 puursüdamiku kivim on helehall kuni kergelt pruunikas lubjakivi, mis on valdavalt ühtlane. Kivimis esineb stüoliitpindu ning lainjalt lamelliline kihilisus, mis on kohati nõrgalt väljendunud. Ebamäärased tumedamad pesad võivad olla tingitud dolomiidistumisest (Joonis 17).



Joonis 17. LU3 UCS proovikeha, mõõtmetega $d \approx 54$ mm ja $h \approx 108$ mm (05.03.2026 R.Männik).

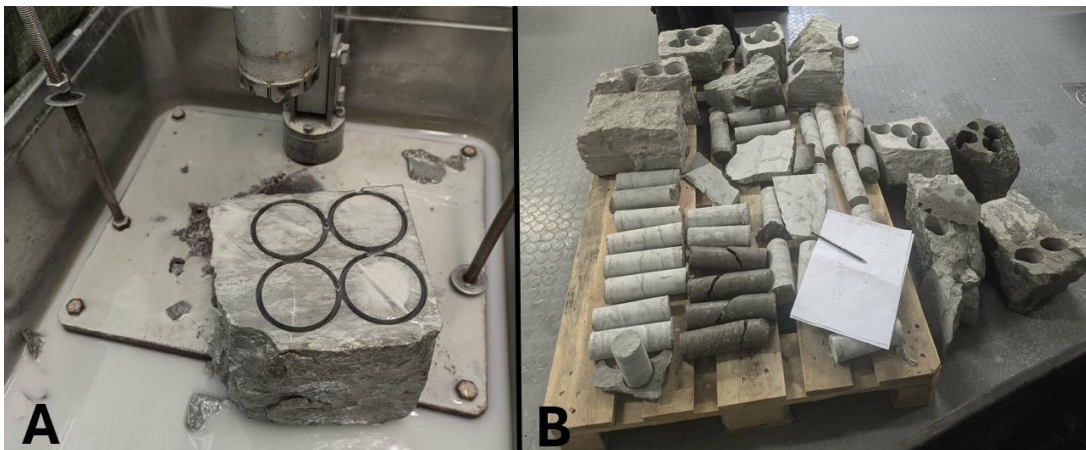
5.2. Proovikehade ettevalmistamine

Proovikehade valmistamiseks kasutati karjääridest kogutud kivimiplokke (Joonis 18), mis pärinesid karjääriseintest ja osaliselt rusumaterjalist, mille stratigraafiline päritolu oli usaldusväärselt määratav. Karjääriseintest eraldati kivimiplokid käsitsi vasara abil. Kivimiplokkidest puuriti puursüdamikud, millest omakorda valmistati proovikehad vastavalt teostatavate katsete eesmärkidele.



Joonis 18. Foto rusumaterjalist võetud kivimiplokkist Reinu lubjakivikarjäärist (R.Männik 13.06.2025)

Kokku valmistati 118 puursüdamikku, mille läbimõõt oli umbes 54 mm ja pikkus varieerus vahemikus 73–253 mm (Joonis 19). Suhteliselt suur proovide arv oli vajalik, et tagada piisav hulk katsekehi erinevate mehaaniliste ja füüsikaliste katsete läbiviimiseks, võimaldada kordusmõõtmiste ja duplikaatkatsete tegemist ning vähendada kivimite heterogeensusest tulenevat mõju katsetulemustele.



Joonis 19. Puursüdamike valmistamine ja ettevalmistatud katsekehad; A – puursüdamike puurimine, B – valmistatud puursüdamikud, dokumenteerimine ja proovide jääkmaterjal (R. Männik 09.09. 2025).

Puursüdamikud puuriti kivimiplokkidest erinevates suundades – vertikaalsuunas (V), horontaalsuunas (H) ja diagonaalsuunas (D) – eesmärgiga hinnata kivimite suunast sõltuvaid

omadusi. Kõikidele puursüdamikele omistati unikaalne tähistus, mis sisaldas infot töö autori, proovigrupi, proovivõtukohta, puursüdamiku järjekorranumbri ja puurimissuuna kohta. Tähistuses kasutatud „RM“ viitab töö autori initsiaalidele, sellele järgnev number proovigrupile, proovivõtukohta tähis karjäärile, puursüdamiku järjekorranumber konkreetsele proovile ning tähed „H“, „V“ ja „D“ vastavalt horisontaal-, vertikaal- ja diagonaalsuunalisele puurimisele.

Puursüdamike pikkus sõltus peamiselt kivimi litoloogilistest omadustest ning harvem kivimiploki ebapiisavast stabiilsusest puurimise käigus, mille tulemusena võisid tekkida ebastandardse kujuga või deformeerunud puursüdamikud. Sellisel juhul eemaldati ettevalmistuse käigus ebasobivad või defektsed puursüdamiku osad ja katesete puhul kasutati ainult nõuetele vastavaid proovikehi. Puursüdamike jaotus karjääride, proovigruppide ja proovivõtu suuna lõikes on esitatud Tabel 2.

Tabel 2. Proovikehade koguarv erinevate proovigruppide lõikes.

Proovigrupp	Karjäär	V	H	D	Kokku
RM25_VAO1	Väo V lubjakivikarjäär	4	4	4	12
RM25_VAO2	Väo V lubjakivikarjäär	3	3	4	10
RM25_VAO3	Väo V lubjakivikarjäär	3	5	10	18
RM25_VAO4	Väo V lubjakivikarjäär	3	3	3	9
RM25_VAO5	Väo V lubjakivikarjäär	5	3	2	10
RM25_VAO6	Väo V lubjakivikarjäär	4	4	6	14
RM25_RE2	Reinu lubjakivikarjäär	2	2	3	7
RM25_RE3	Reinu lubjakivikarjäär	2	2	2	6
RM25_RE4	Reinu lubjakivikarjäär	2	2	2	6
RM25_RE5	Reinu lubjakivikarjäär	2	1	2	5
RM25_LU1	Lubja lubjakivikarjäär	2	2	2	6
RM25_LU2	Lubja lubjakivikarjäär	2	2	2	6
RM25_LU3	Lubja lubjakivikarjäär	5	2	2	9
Kokku:		39	35	44	118

Proovikehade valmistamine lähtus otseselt saadaval olevate puursüdamike mõõtmetest, terviklikkusest ja kvaliteedist, kuna kõigi katsete puhul tuli järgida kindlaid geomeetrilisi nõudeid, mis on vajalikud usaldusväärsete ning võrreldavate katsetulemuste saamiseks (Ulusay, 2015). Nendest puursüdamikest valmistati proovikehad vastavalt erinevate katsete ja analüüside vajadustele, kusjuures prioriteediks seati UCS-katsete proovikehade valmistamine, kuna tegemist on ühe olulisema ning suurimaid mõõtmeid nõudva katsemeetodiga. Proovikehade arvud ei ole omavahel otseselt liidetavad, sest osa analüüse viidi läbi samadel proovikehadel. Katsete ja analüüside koguarv on esitatud Tabel 3. Kokku tehti 431 katset ja analüüsi. Katsete ja analüüside detailne jaotus proovigruppide lõikes on esitatud Lisa 2. Katsete ja analüüside jaotus proovigruppide lõikes

Tabel 3. Katsete ja analüüside koguarv

Katse / analüüs	Arv
UCS	103
BTS	121
UH	103
CERCHAR	26
Õhik	26
XRD	26
XRF	26
Kokku	431

5.3. Katsemetoodika

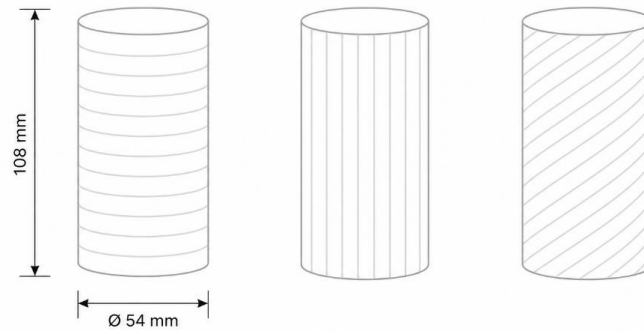
5.3.1. Üheteljeline survetugevus

Üheteljeline survetugevus (UCS) on üks olulisemaid kivimimehaanilisi parameetreid, mida kasutatakse kivimi tugevusomaduste iseloomustamiseks ning mis on laialdaselt rakendatav geotehnilistes uuringutes. Katse põhineb silindrilise proovikeha üheteljelisel koormamisel kuni purunemiseni, mille käigus määratakse kivimi maksimaalne survetugevus ning hinnatakse selle käitumist koormuse all. Käesolevas töös viidi katsed läbi vastavalt ISRM (2007) standarditele.

Antud töös kasutati silindrilisi puursüdamikest valmistatud proovikehi läbimõõduga umbes 54 mm ja pikkusega 108 mm. Proovikehade otsapinnad lihviti, et tagada koormuse ühtlane jaotus katse käigus. Üheteljelise survetugevuse katsed viidi läbi kokku 103 proovikehal, mis pärinesid 13 stratigraafilisest üksusest ning olid puuritud erinevates suundades (Joonis 20). Katsetatud proovikehade hulgas esines lisaks standardmõõtmetega silindritele, mille pikkuse ja diameetri suhe (L/D) oli 2, ka lühemaid proovikehi suhtega ligikaudu $L/D = 1$.

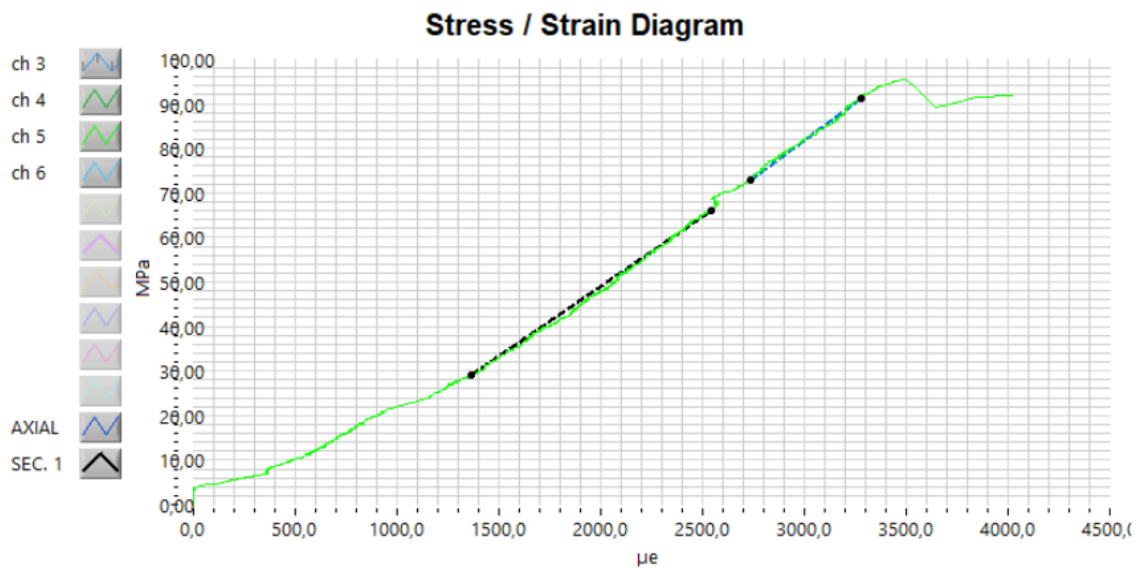
Proovikehad dokumenteeriti fotode abil enne mehaaniliste katsete läbiviimist. Kõik UCS katsekehad pildistati kahelt poolt nii kuivalt kui märjalt, et talletada nende litoloogilised tunnused ja makroskoopilised iseärasused. Fotod koos proovide päritolu ja stratigraafilise kuuluvusega talletatakse TEMTA 143 projekti raames andmebaasis (<https://geoloogia.info/>), mis võimaldab siduda proovid nende täpse asukohaga ning toetab mehaaniliste omaduste tõlgendamist.

Kõik proovikehad mõõdeti enne katseid täpsusega kuni 0,1 mm. Tulemuste tõlgendamisel arvestati proovigeomeetriast tulenevaid võimalikke mõjusid geomeetriliselt mittesobivad proovikehad jäeti andmetöötlusest välja.



Joonis 20. UCS standardsete proovikehade ($L/D = 2$) illustreeriv pilt: proovisuunad (vasakult paremale) vertikaalsuund (V), horisontaalsuund (H) ja diagonaalsuund (D); proovikeha pikkus 108 mm ja diameeter 54 mm.

Katsete läbiviimiseks kasutati pressi AUTOMAX PRO-M Compact-Line Compression Machine (CONTROLS), mille abil registreeriti katse käigus rakendatud koormus ja deformatsioonid. Koormus rakendati ühtlase kiirusega 0,5 MPa/s kuni proovikeha purunemiseni. Katseandmete töötlemiseks kasutati tarkvara CONTROLS DATAMANAGER, mille abil visualiseeriti pinge-deformatsiooni diagrammid ja määrati survetugevus. Elastsusmoodul määrati töö autori poolt pinge-deformatsiooni diagrammide lineaar-elastse osa tõusu põhjal käsitsi (Joonis 21).



Joonis 21. Elastsusmooduli graafiline määramine pinge-deformatsiooni diagrammi lineaar-elastse osa tõusu põhjal proovil RM25_VAO4_8H_UCS tarkvaras CONTROLS DATAMANAGER

Katse käigus registreeriti proovikehale rakendatud koormus (F , N), teljeline ja külgmise deformatsioon ($\mu\epsilon$) ning arvutati vastav pinge (MPa). Survetugevus arvutati maksimaalse jõu ja proovikeha ristlõike pindala suhtena:

$$UCS = \frac{F_{max}}{A},$$

Valem 1

kus

UCS on survetugevus (MPa),

F_{max} on maksimaalne purunemisel registreeritud jõud (N),

A on proovikeha ristlõike pindala (mm^2).

Käesolevas töös arvestati andmetöötluses proovikehade geomeetria mõju survetugevusele, kuna survetugevus sõltub proovikeha pikkuse ja diameetri suhtest. Varasemate uuringute põhjal annavad väiksema L/D suhtega proovikehad kõrgemaid survetugevuse väärtusi ning tugevus väheneb L/D suurenedes (Tuncay ja Hasancebi, 2009). Käesolevas töös kasutati võrdlusbaasina $L/D = 2$ proovikehi, mistõttu $L/D = 1$ proovide tulemused teisendati ligikaudselt standardtingimustele, kasutades empiirilist seost:

$$UCS_{2:1} = UCS_{1:1} \times 0,889, \quad \text{Valem 2}$$

kus

$UCS_{2:1}$ on korrigeeritud survetugevus,

$UCS_{1:1}$ on mõõdetud väärtus $L/D = 1$ proovikehadel.

Tegemist on lihtsustatud lähenemisega ning korrigeerimine võib sõltuda kivimi omadustest (Tuncay ja Hasancebi, 2009). Seetõttu võib korrigeerimiskoeffitsiendi kasutamine põhjustada teatud määral ebakindlust tulemuste tõlgendamisel, mida tuleb saadud väärtuste analüüsimisel arvesse võtta.

Katse käigus registreeritud pinge ja deformatsiooni andmete põhjal määrati kivimi elastsusmoodul, mis iseloomustab materjali jäikust elastses deformatsioonipiirkonnas. Elastsusmoodul määrati pinge-deformatsiooni kõvera lineaarse osa põhjal, mille tõusnurk määrati graafiliselt pressiga kaasanevas tarkvaras:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad \text{Valem 3}$$

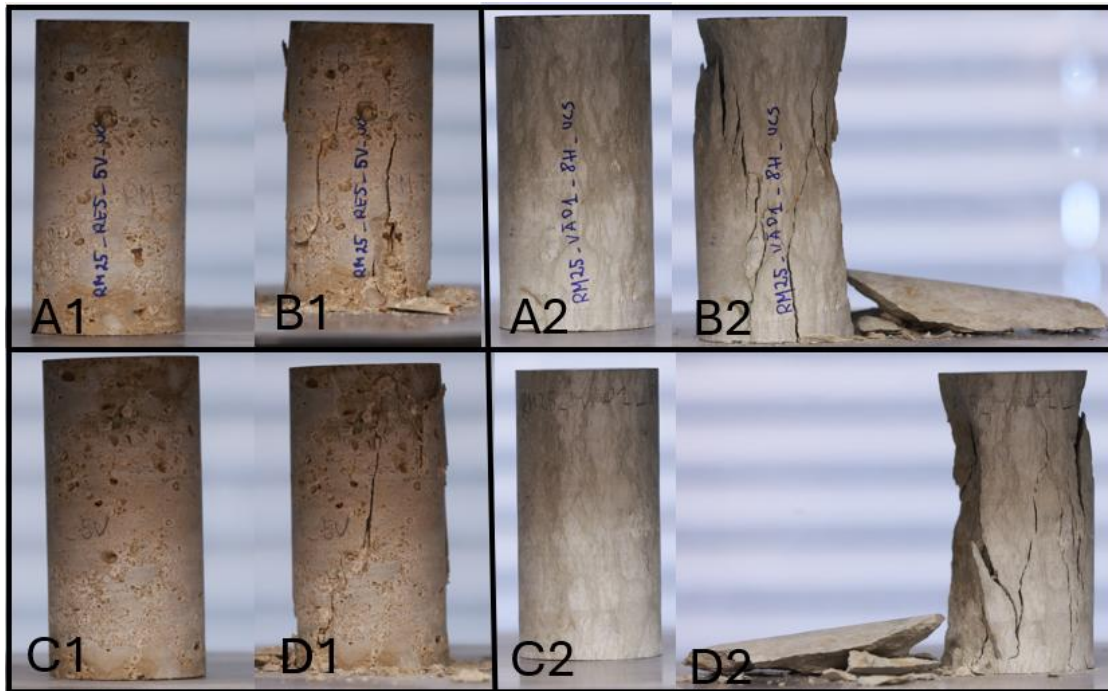
kus

E on elastsusmoodul (MPa),

$\Delta\sigma$ on pinge muutus,

$\Delta\varepsilon$ on vastav deformatsiooni muutus elastses piirkonnas.

Survetugevuskatsete käigus dokumenteeriti proovikehade purunemine täiendavate fotodega. Proovikehi pildistati pressis enne katset ja pärast purunemist mõlemalt poolt, et dokumenteerida purunemismuster ning hinnata katse õnnestumist (Joonis 22).

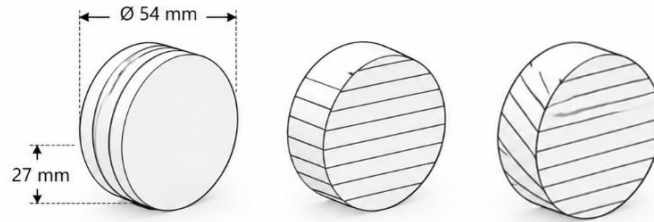


Joonis 22. Näide UCS katsekehast enne (A1,C1; A2-C2) ja pärast (B1-D1; B2-D2) purunemist pressis (R. Männik 13.02.2026).

5.3.2. Brasiilia tõmbetugevus

Brasiilia tõmbetugevuse katse (BTS) on laialdaselt kasutatav meetod kivimite kaudse tõmbetugevuse määramiseks. Katse põhineb silindrilise proovikeha diametraalsel koormamisel, mille tulemusena tekivad proovikeha keskosas tõmbepinged risti koormuse suunaga. Koormuse suurenemisel toimub proovikeha purunemine tavaliselt mööda keskosa läbivat tasapinda, mis on paralleelne rakendatud koormuse suunaga. Käesolevas töös viidi katsed läbi vastavalt ISRM (2007) standarditele.

Käesolevas töös kasutati puursüdamikest valmistatud silindrilisi proovikehi läbimõõduga 54 mm ja kõrgusega 27 mm, mis vastab pikkuse ja diameetri suhtele $L/D = 0,5$. Proovikehad asetati katseseadmesse nii, et koormus rakendus diametraalselt proovikeha külgpinnale. Horisontaalselt ja diagonaalselt puuritud puursüdamikud paigutati alati risti kihilisusega koormuse suunaga. Vertikaalsuunas puuritud proovikehadel on kihilisus risti proovikeha teljega, mistõttu koormus rakendub kihilisusega risti sõltumata proovikeha asetusest vormis (Joonis 23). Kõik proovikehad mõõdeti enne katseid täpsusega 0,1 mm. Tulemuste tõlgendamisel arvestati proovigeomeetriast tulenevaid võimalikke mõjusid ning geomeetriselt mittesobivad proovikehad jäeti andmetööstlusest välja.



Joonis 23. BTS standardsete proovikehade ($L/D = 0,5$) illustreeriv pilt: proovisuunad (vasakult paremale) vertikaalsuund (V), horontaalsuund (H) ja diagonaalsuund (D); proovikeha diameeter 54 mm ja paksus 27 mm.

Katsete läbiviimiseks kasutati sama katseseadet nagu üheteljelise survetugevuse katsetes – pressi AUTOMAX PRO-M Compact-Line Compression Machine (CONTROLS), mis võimaldas kontrollitud koormuse rakendamist ning katseandmete pidevat registreerimist. Proovikehade hoidmiseks kasutati spetsiaalset Brasiilia tõmbetugevuse katse vormi, mille vahele katsekeha paigutati. Koormust suurendati ühtlase kiirusega kuni proovikeha purunemiseni, rakendades konstantset koormamiskiirust 200 N/s. Erinevalt UCS-katsest, kus koormamiskiirus väljendatakse sageli pingekiirusena (MPa/s), kasutatakse BTS-katsetes tavaliselt jõupõhist koormamiskiirust (N/s), sest koormus rakendatakse proovikehale diametraalselt. Katse käigus registreeriti maksimaalne purunemisel saavutatud jõud F_{max} .

BTS arvutati maksimaalse jõu põhjal järgmise seose abil:

$$BTS = \frac{2F_{max}}{\pi \cdot D \cdot L},$$

Valem 4

kus

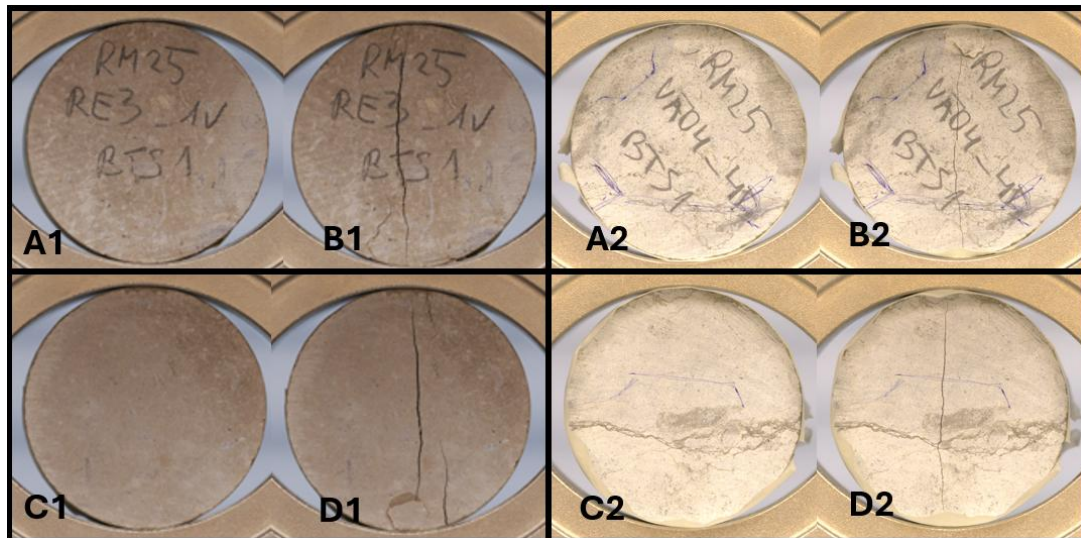
BTS on tõmbetugevus (MPa),

F_{max} on maksimaalne purunemisel registreeritud jõud (N),

D on proovikeha läbimõõt (mm),

L on proovikeha paksus (mm).

Katse käigus enne ja pärast purunemist pildistati proovikehi pressis mõlemalt poolt, et dokumenteerida purunemismuster ja hinnata katse õnnestumist (Joonis 24).

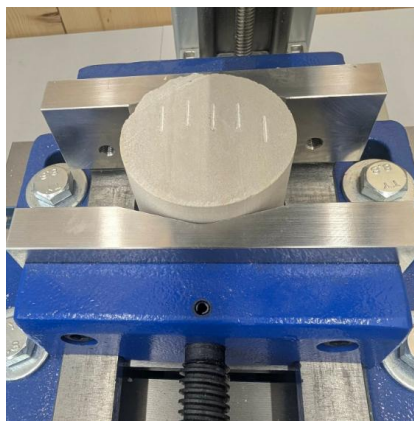


Joonis 24. Näide Brasiilia tõmbetugevuse katsekehadest enne purunemist (A1, C1; A2, C2) ja pärast purunemist (B1, D1; B2, D2) (R. Männik 10.03.2026; 27.01.2026).

5.3.3. Abrasiivuse määramine

5.3.3.1 CERCHARi abrasiivsuseindeks (CAI)

Kivimi abrasiivsuse määramiseks kasutati CERCHARi testi (CERCHAR Abrasivity Index, CAI), mis on otsene meetod kivimi kulutava mõju hindamiseks. Katse põhineb Rockwelli kõvadusega 55 HRC terasnõela liigutamisel konstantse 70 N normaaljõu all mööda kivimi pinda, mille tulemusena kulub nõela ots ning abrasiivsuse indeks määratakse tekkinud kulumispinna diameetri põhjal (ISRM, 2007; Alber et al., 2014). Katse viidi läbi ligikaudu 1 mm/s liikumiskiirusega ja kriimustuse pikkuseks oli 10 mm, vastavalt ISRM soovitatud katsemeetoodika juhiste (Alber jt, 2014). Iga proovikeha puhul tehti 10 kriimustust, millest 5 viidi läbi paralleelselt ja 5 risti kihilisusega, et hinnata kivimi struktuuri võimalikku mõju abrasiivsusele (Joonis 25). Terasnõelte tähistuses tähistab P paralleelselt kihilisusega tehtud kriimustusi ning R risti kihilisusega tehtud kriimustusi (nt VÄO4_7R = VÄO4 kihi seitsmes nõel risti kihilisusega).



Joonis 25. CERCHARi katse käigus tehtud kriimustused kivimi pinnal, kus terasnõel liigub konstantse koormuse all mööda proovikeha pinda (R. Männik 13.03.2026).

Katsete läbiviimiseks kasutati CERCHARi abrasiivsustesti seadet (West Cerchar Rock Abrasiveness Tester, Wille Geotechnik). Proovikehad valmistati samast puursüdamikust pärinevast materjalist, mida kasutati ka XRD, XRF ja õhikute analüüsid, tagamaks tulemuste võrreldavus (Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsid kasutatud proovigrupid ja proovikoodid) Pärast iga kriimustust dokumenteeriti nõela kulumispind mikroskoobi abil neljas suunas (0°, 90°, 180° ja 270°), kusjuures 0° vastas kriimustuse suunale. Nõela kulumispinna dokumenteerimine on esitatud Joonis 26.



Joonis 26. CERCHARi katse käigus kulunud terasnõelte otste dokumenteerimine mikroskoobiga (R. Männik 18.03.2026).

Proovikehad valmistati samadest puursüdamikest, mida kasutati ka järgnevalt kirjeldatud mineraloogilistes ja keemilistes analüüsid, et tagada tulemuste võrreldavus. CERCHARi katsetes kasutatud puursüdamike tähistused ja proovigrupid on esitatud Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsid kasutatud proovigrupid ja proovikoodid. Kulumispinna diameeter määrati digitaalse pildianalüüsi abil (Fiji/ImageJ ja GIMP), iga kriimustuse kohta arvutati mõõtmiste keskmine väärtus. Mõõtmised teostati mikromeetrites (μm).

Kuna katsed viidi läbi saetud pindadel, korrigeeriti mõõdetud kulumisdiameeter vastavalt ISRM soovitatud katsetejuhiste:

$$d = 1.14 \cdot d_s \qquad \text{Valem 5}$$

kus

d_s on saetud pinnal mõõdetud kulumisdiameeter,

d on korrigeeritud väärtus.

Korrigeeritud kulumisdiameetri põhjal arvutati CERCHAR abrasiivsuse indeks järgmise seose abil:

$$CAI = d \cdot 10 \quad \text{Valem 6}$$

kus

CAI on CERCHAR abrasiivsuse indeks,

d on korrigeeritud väärtus.

5.3.3.2 Ekvivalentne kvartsisisaldus Rosiwali kõvaduse põhjal

Ekvivalentne kvartsisisaldus (FEQ) on mineraalse koostise ja mineraalide suhtelise kõvaduse põhjal tuletatud parameeter, mida kasutatakse kivimi abrasiivsuse kaudseks hindamiseks. FEQ arvutamisel korrutatakse iga mineraali suhteline sisaldus vastava mineraali Rosiwali kõvadusega, mis on normaliseeritud kvartsile (HR = 100), ning saadud väärtused summeeritakse (Kaspar ja Latal, 2022):

$$FEQ = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \frac{HR_i}{100}, \quad \text{Valem 7}$$

kus

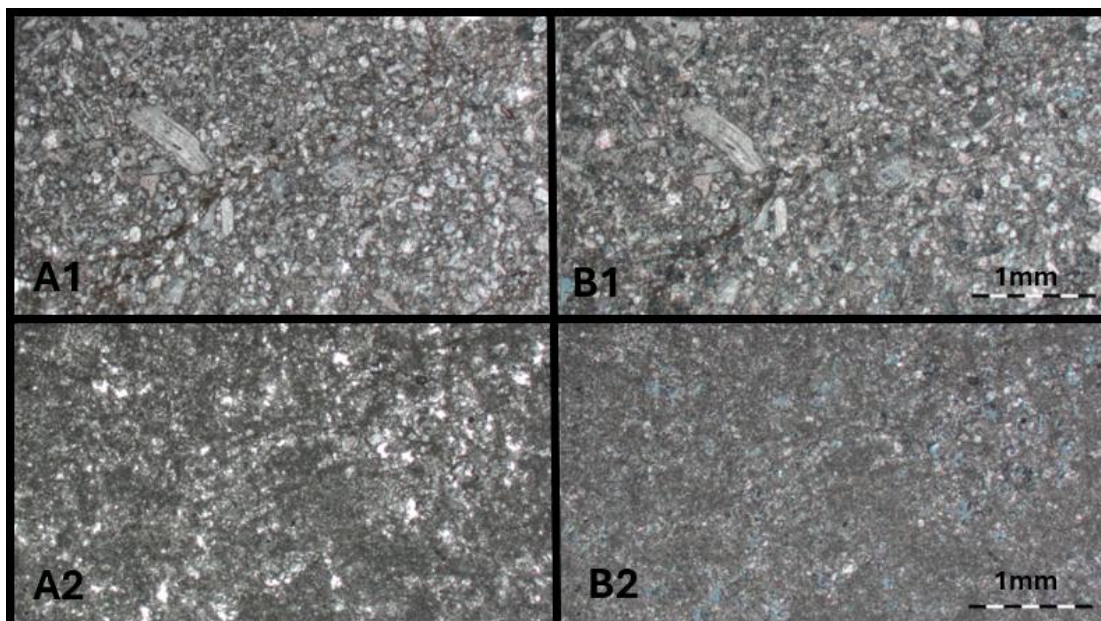
FEQ on kivimi ekvivalentne kvartsisisaldus;

A_i on mineraali i sisaldus kivimis (%);

HR_i on mineraali i Rosiwali kõvadus, normaliseerituna kvartsile.

Mineraalse koostise ja terasuure hindamiseks valmistati õhikud samadest kivimiproovidest, mida kasutati CERCHARi katsetes (Lisa 3. CERCHARi abrasiivuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsidest kasutatud proovigrupid ja proovikoodid, et tagada tulemuste võrreldavus. Proovid lõigati sobiva suurusega plokkideks, kinnitati klaasalusele liimiga ja lihviti mitmeetapilise protsessi käigus õhukesteks preparaate. Õhikute valmistamisel kasutati Buehler PetroThin õhikumasinat, Buehleri lihvimispinki, kuumutusplaati ja ultrahelivanni. Õhikute impregneerimisel ja liimimisel kasutati termokõvastuvat epoksiidvaiku. Lihvimine viidi läbi järjest peenemate abrasiividega, kuni saavutati ligikaudu 30–50 µm paksus. Lõppfaasis lihviti õhikud käsitsi, kasutades 3 µm abrasiivpulbrit, et tagada ühtlane ja piisavalt läbipaistev preparaat.

Õhikutest tehti mikroskoobipildid ning hinnati kivimi tekstuuri ja mineraalset koostist nii tavalises läbivas valguses kui polariseeritud valguses. Õhiku näidis on esitatud Joonis 27. Mikroskoopilise vaatluse käigus selgus, et ei ole võimalik mineraalseid komponente selgelt eristada, sest uuritud kivimite terasuurus oli väga peen ning mineraalterade piirid (eelkõige kvarts) ei eristunud piisava kontrastsusega.



Joonis 27. Mikroskoobipildid proovist RM25_VÄO2_6H: A1 – tavalises läbivas valguses, B1 – polariseeritud valguses; ning proovist RM25_LU2_6D: A2 – tavalises läbivas valguses, B2 – polariseeritud valguses (R. Männik 21.01.2026).

Kuna FEQ määramine Rosiwali meetodi põhjal eeldab mineraalsete komponentide usaldusväärset eristamist ja kvantifitseerimist, ei osutunud meetodi otsene rakendamine käesolevas töös otstarbekaks. Seetõttu kasutati abrasiivsuse kaudseks hindamiseks XRD- ja XRF-analüüside põhjal määratud mineraalset ja keemilist koostist.

XRD ja XRF analüüse kasutati kivimite mineraalse ja keemilise koostise määramiseks ning FEQ arvutamiseks. Analüüsiks valmistati kahte tüüpi proove. Esimesena kasutati samu puursüdamikest pärinevaid proovikehi, millest teostati CERCHARi katsed ja valmistati õhikud, tagamaks mineraloogiliste, keemiliste ja mehaaniliste omaduste otsene võrreldavus (Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsides kasutatud proovigrupid ja proovikoodid) Lisaks valmistati keskmistatud proovid, kasutades iga stratigraafilise üksuse BTS-katsetes juba kasutatud ja purunenud katsekehi, mis purustati lõugpurustiga, homogeniseeriti, jagati jaotusletri abil ning jahvatati peenpulbriks. Seega võimaldati hinnata üksikute proovide ja kogu kihi keskmist koostist.

XRF-analüüsi jaoks valmistati pressitud pulbertablette (~8 g proovi + 8 tilka sideainet), mis kuivatati temperatuuril 105 °C, ning sulatuskettad, mille valmistamisel kuumutati proovi ~950 °C põletuskao määramiseks ja sulatati seejärel liitium-metaboraadiga.

XRD-analüüsi jaoks kanti ligikaudu 0,1 g pulbrit etanooli abil proovialusele, kuivatati ning analüüsiti röntgendifraktsiooni meetodil. Mineraalne koostis määrati poolkvantitatiivse Rietveldi analüüsi abil, kus tulemusi korrigeeriti XRF-andmete põhjal, viies kaltsiumisisaldus vastavusse kaltsiidi ja dolomiidi määratud sisaldusega. XRD- ja XRF-analüüside prooviettevalmistus viidi läbi töö autori poolt, mõõtmised ja analüüsid teostasid Toivo Kallaste, Nata-Ly Pantšenko ja Erki Leht.

FEQ arvutamisel kasutatud mineraalide normaliseeritud Rosiwali kõvaduse väärtused põhinevad Kaspar ja Latal (2022) esitatud andmetel. XRD-analüüsi käigus määratud mineraalid ning nendele vastavad kasutatud Rosiwali kõvaduse väärtused on esitatud Tabel 4.

Tabel 4. FEQ arvutamisel kasutatud mineraalide normaliseeritud Rosiwali kõvaduse väärtused Kaspar ja Latal (2022) järgi.

Mineraal	Kvarts	Kaltsiit	Ortoklass	Götiit	Apatiit	Dolomiit	Püriit
Normaliseeritud Rosiwali kõvadus	100	3	45	25	14	4	55

5.3.4. Ultraheli analüüs ja Poissoni tegur

Ultraheli on kõrgsageduslikel elastsetel lainetel põhinev uurimismeetod, mida kasutatakse kivimite füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramiseks ning nende sisemise struktuuri hindamiseks mittepurustaval viisil (Shikhov ja Dunayeva, 2018).

Proovikehade elastsusomaduste hindamiseks viidi läbi ultraheli mõõtmised, mille käigus määrati pikilainete (P-lainete) ja ristlainete (S-lainete) levimise kiirus proovikehades. Mõõtmised teostati kõigil survetugevuse katseteks valmistatud 103-l proovikehal.

Mõõtmised viidi läbi seadmega Pundit Lab+, kasutades 500 kHz sagedusega transduktoreid (Joonis 28). Transduktorite ja proovipinna vahelise kontakti parandamiseks kasutati sidusainena mett, sest viskoossed sidusained tagavad efektiivse akustilise kontakti ning parandavad ultrahelilainete levikut kivimiproovides, eriti pikilainete korral (Couvreur ja Thimus, 1995). Mõõtmistulemused salvestati ja töödeldi seadmega kaasnevas tarkvaras Punditlink, mille abil määrati lainete levimiskiirused.



Joonis 28. Ultraheli mõõteseadme Pundit Lab+ katseseadistus koos proovikehaga; transduktorite ja proovipinna vahelise kontakti parandamiseks kasutati sidusainena mett (R. Männik 17.03.2026).

Saadud tulemusi kasutati kivimi elastsete omaduste hindamiseks. Poissoni tegur (ν), mis iseloomustab materjali ristisuunalise ja pikisuunalise deformatsiooni suhet, määrati P- ja S-lainete kiiruste põhjal seadmega kaasneva tarkvara abil (Joonis 29), kasutades järgmist seost:

$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{[2(V_p^2 - V_s^2)]}$$

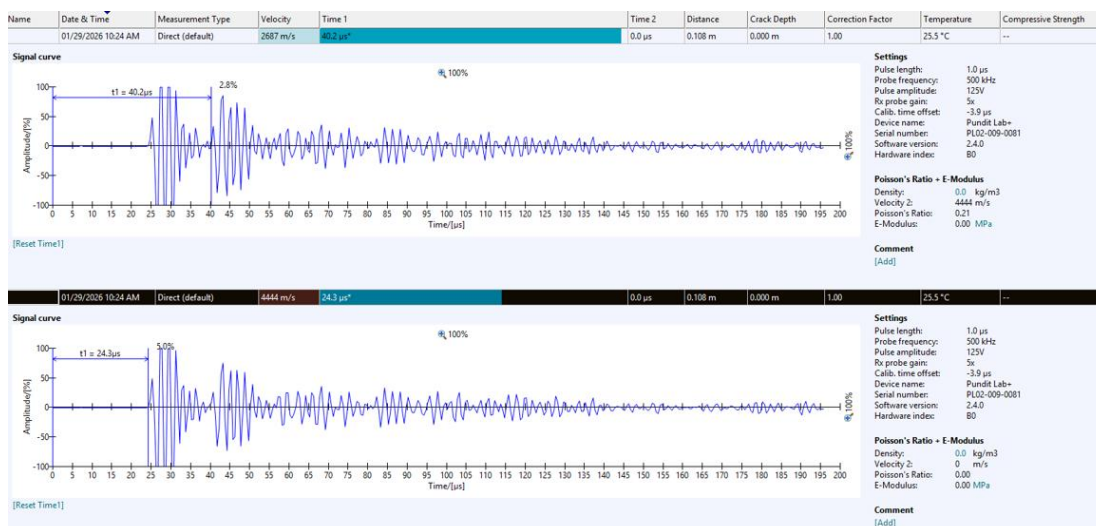
Valem 8

kus

V_p on pikilaine kiirus (m/s),

V_s on ristlaine kiirus (m/s),

ν on Poissoni tegur.



Joonis 29. Ultraheli mõõtmise tulemused tarkvaras Pundit Lab+ (P- ja S-lained, Poissoni tegur).

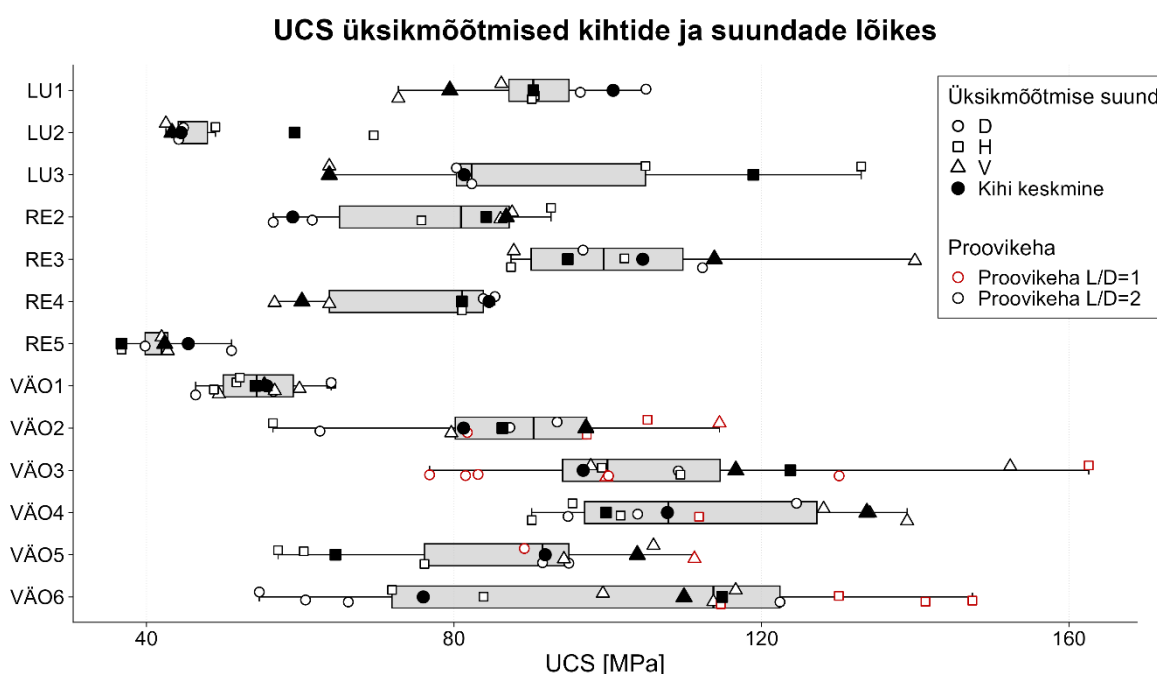
5.4. Andmete töötlemine ja statistilised meetodid

Katsete käigus saadud andmed korrastati ja analüüsiti tabelarvutusprogrammis Microsoft Excel. Andmete töötlemisel kontrolliti mõõtmistulemuste korrektsust ning vajadusel jäeti analüüsist välja üksikud väärtused, mis ei vastanud katsetingimustele või mille puhul esinesid kõrvalekalded proovikehade omadustes. Tulemuste esitamiseks koostati graafikud ja diagrammid, mis võimaldavad hinnata uuritud parameetrite varieeruvust ja omavahelisi seoseid. Lisaks kasutati andmete analüüsiks ja visualiseerimiseks R-programmeerimiskeelt ning tarkvara Affinity Designer jooniste ja visualiseerimiste viimistlemiseks.

6. Tulemused

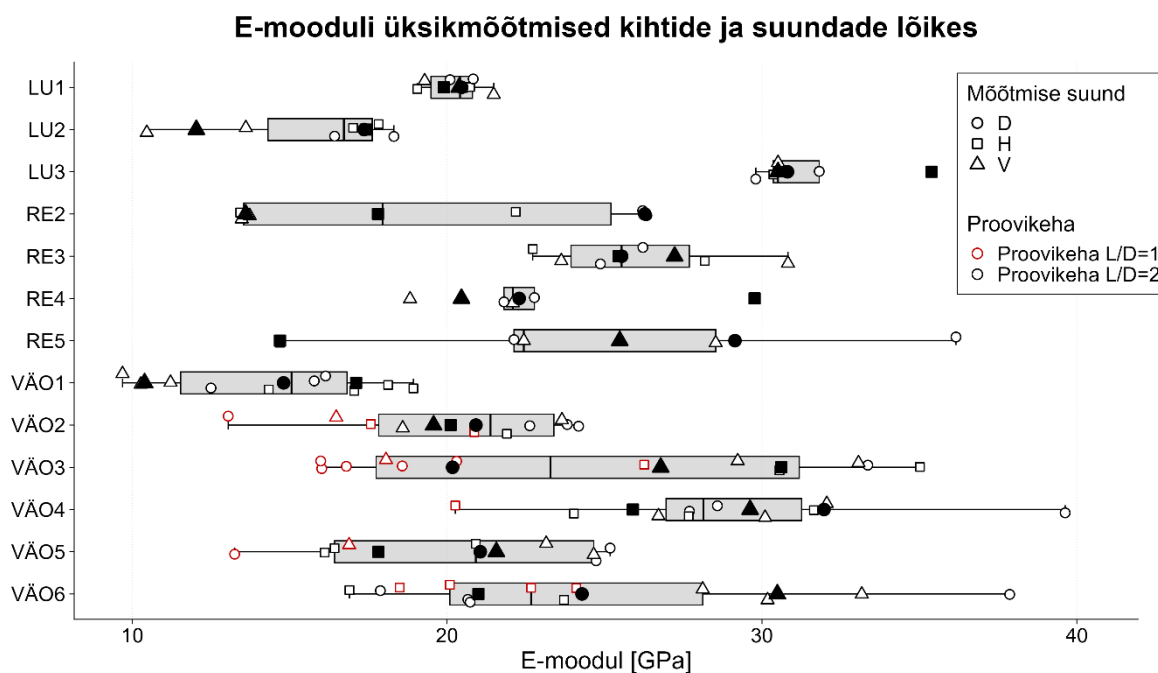
6.1. Üheteljeline survetugevus ja E-moodul

Joonis 30 kujutatud UCS tulemused näitavad märkimisväärset varieeruvust nii kihtide kui proovisuundade lõikes. Kõrgeimad tugevusväärtused esinevad VÄO3–VÄO6 kihtides, kus üksikmõõtmised ulatuvad kuni ~160 MPa-ni, samas kui madalaimad väärtused mõõdeti LU2 ja RE5 kihtides (~35–50 MPa). VÄO kihtides esineb suurem tulemuste hajuvus võrreldes LU ja RE kihtidega, mis viitab nende kihtide suuremale sisemisele varieeruvusele — tõenäoliselt seoses litoloogiliste erinevustega kihi piires. Proovisuundade mõju ei ole süstemaatiline — mõnes kihis (nt LU1, LU2, LU3) on vertikaalne suund nõrgem, teistes (nt RE2, RE3, VÄO4) aga hoopis tugevaim, mis viitab, et anisotroopia suund ja ulatus sõltuvad konkreetse kihi struktuurist ja kihilisuse iseloomust. Täpsed UCS mõõtetulemused on esitatud Lisa 4. UCS ja E-mooduli mõõtetulemused



Joonis 30. Üheteljelise survetugevuse (UCS) väärtuste jaotus kihtide lõikes karp-vurrud-diagrammina koos üksikmõõtmiste ja suunapõhiste keskmistega.

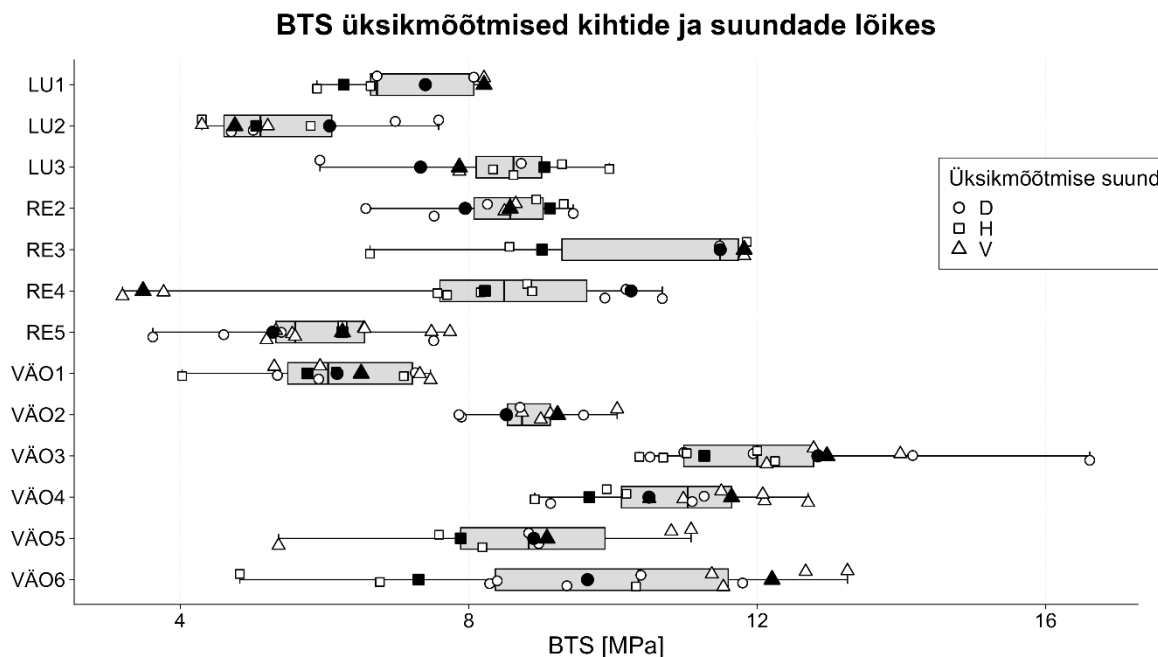
Joonis 31 kujutatud E-mooduli tulemused näitavad märkimisväärset varieeruvust nii kihtide kui proovisuundade lõikes. Kõrgeimad keskmised väärtused esinevad LU3 (~33 GPa) ja VÄO4 (~29 GPa) kihtides, kus üksikmõõtmised ulatuvad kuni ~40 GPa-ni, samas kui madalaimad väärtused mõõdeti VÄO1 (~14 GPa) ja LU2 (~16 GPa) kihtides. VÄO kihtides esineb üldiselt suurem tulemuste hajuvus võrreldes LU ja RE kihtidega, mis viitab nende kihtide suuremale sisemisele varieeruvusele. Proovisuundade mõju E-moodulile ei ole süstemaatiline — kõrgeima E-mooduliga suund varieerub kihtide lõikes ilma selge mustrita, mis on sarnane UCS tulemustega ja viitab kivimite heterogeensele struktuurile. Täpsed E-mooduli mõõtetulemused on esitatud Lisa 4. UCS ja E-mooduli mõõtetulemused



Joonis 31. E-mooduli väärtuste jaotus kihtide lõikes karp-vurrud-diagrammina koos üksikmõõtmiste ja suunapõhiste keskmistega.

6.2. Brasiilia tõmbetugevus

Joonis 32 kujutatud Brasiilia tõmbetugevuse (BTS) tulemused näitavad märkimisväärset varieeruvust nii kihtide kui ka proovisuundade lõikes. Kõrgeimad keskmised väärtused esinevad VÄO3 (~11,6 MPa) ja VÄO4 (~10,9 MPa) kihtides, kus üksikmõõtmised ulatuvad kuni ~16–17 MPa-ni, samas kui madalaimad väärtused mõõdeti LU2 (~5,5 MPa), RE5 (~6,0 MPa) ja VÄO1 (~6,2 MPa) kihtides. Erandlikult suur suundade vaheline erinevus ilmneb RE4 kihis, kus vertikaalsuuna keskmine BTS (~3,5 MPa) on diagonaalsuunaga võrreldes ligi kolm korda madalam (~10,3 MPa) — see on suurim täheldatud anisotroopia kogu andmestikus ning viitab tugevalt väljendunud kihilisuse mõjule selles kihis. RE4 koosneb valdavalt dolomiidist (~67%) ning vahelduvate kaltsiidi- ja dolomiidikihtide olemasolu võib selgitada vertikaalsuuna erandlikult madalaid tõmbetugevuse väärtusi. VÄO kihtides esineb üldiselt suurem tulemuste hajuvus võrreldes LU ja RE kihtidega, mis viitab nende kihtide suuremale sisemisele varieeruvusele. Proovisuundade mõju BTS-ile ei ole süstemaatiline — kõrgeima tõmbetugevusega suund varieerub kihtide lõikes ilma selge mustrita, mis on sarnane UCS ja E-mooduli tulemustega ning viitab kivimite heterogeensele struktuurile. Täpsed BTS mõõtetulemused on esitatud Lisa 5. BTS mõõtetulemused



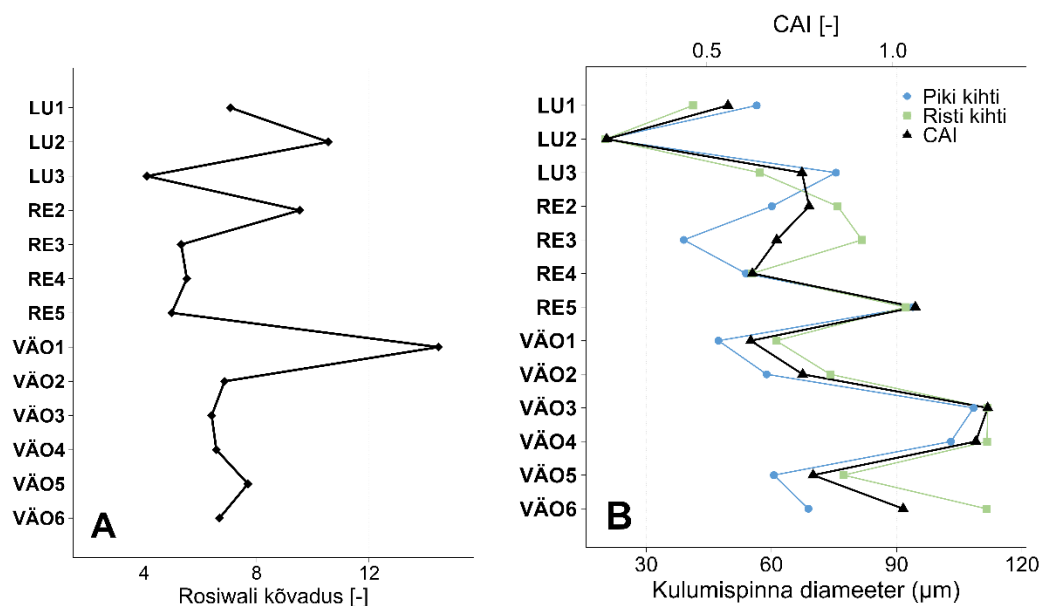
Joonis 32. BTS väärtuste jaotus kihtide lõikes karp-vurrud-diagrammina koos üksikmõõtmiste ja suunapõhiste keskmistega.

6.3. Abrasiivsuse määramine

6.3.1. CERCHARi abrasiivsusindeks ja Rosiwali kõvadus

Joonis 33 kujutatud CAI ja Rosiwali indeksi tulemused näitavad suurt varieeruvust kihtide lõikes. CAI väärtused jäävad vahemikku 0,230 (LU2) kuni 1,255 (VÄO3). Kõrgeimad CAI väärtused esinevad VÄO3 (~1,255), VÄO4 (~1,223) ja VÄO6 (~1,028) kihtides, samas kui madalaimad väärtused mõõdeti LU2 (~0,230) ja LU3 (~0,756) kihtides. Kulumispinna diameetri võrdluses ilmneb tendents, et risti kihilisusega mõõdetud väärtused on enamikes kihtides suuremad kui piki kihilisusega — eriti selgelt on see näha RE3 (~43 μm) ja VÄO6 (~43 μm) kihtides, mis viitab kivimite anisotroopsele abrasiivuskäitumisele sõltuvalt kihilisuse orientatsioonist. Tähelepanuväärne on RE5 kõrge CAI väärtus (~1,061) võrreldes teiste RE kihtidega, mis ei järgi UCS ja BTS tulemuste trendi, kus RE5 oli madalate väärtustega.

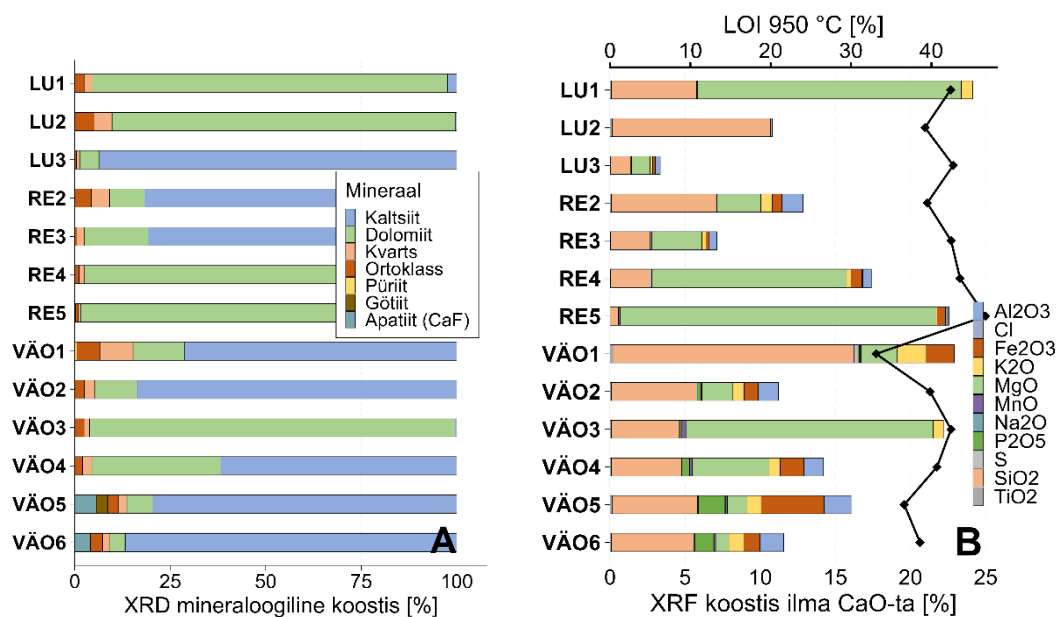
Rosiwali indeksi väärtused jäävad vahemikku 4,643 (LU3) kuni 10,665 (VÄO1). Kõrgeimad väärtused esinevad VÄO1 (~10,67) ja LU2 (~10,27) kihtides, madalaimad mõõdeti LU3 (~4,64) ja RE5 (~4,86) kihtides. Rosiwali indeksi trend ei järgi CAI trendi — näiteks VÄO1 ja LU2 on kõrge Rosiwali indeksiga, kuid keskmise CAI väärtusega, samas kui VÄO3 on kõrge CAI-ga, kuid keskmise Rosiwali indeksiga, mis viitab, et mineraloogiline koostis üksi ei seleta abrasiivust täielikult. Täpsed CERCHAR üksikmõõtmised on esitatud Lisa 6. CERCHARi katse nõelte kulumispinna mõõtmistulemused ning katsetes kasutatud puursüdame tühistused Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsid kasutatud proovigrupid ja proovikoodid



Joonis 33. Abrasiivsusnäitajate tulemused kihtide lõikes: A) Rosiwali kõvadusindeks; B) korrigeeritud CERCHARi abrasiivsusindeks (CAI) koos kulumispinna diameetriga piki- ja ristisuunaliste mõõtmiste ning üldkeskmiste põhjal.

6.3.2. XRD ja XRF

Joonis 34 kujutatud XRD ja XRF analüüside tulemused näitavad märkimisväärset varieeruvust uuritud kihtide mineraloogilises ja keemilises koostises. XRD analüüs näitab, et uuritud kivimites domineerib peamiselt kaltsiit või dolomiit, mille suhe varieerub kihtide lõikes märkimisväärselt. Kaltsiidirikkad kihid on LU3 (~94%), VÄO6 (~87%), VÄO5 (~85%) ja VÄO2 (~82%), mis viitab tüüpilistele lubjakivilistele kihtidele. Dolomiit domineerib RE5 (~99%), VÄO3 (~96%), LU1 (~93%) ja LU2 (~90%) kihtides, mis viitab tugevale dolomiidistumisele. Erineva koostisega kihid, kus esineb nii kaltsiiti kui dolomiiti märkimisväärses kogustes, on RE4 (~30% kaltsiit, ~67% dolomiit) ja VÄO4 (~62% kaltsiit, ~34% dolomiit). Kõrvalmineraalidest esineb kvartsi enamikes kihtides alla 5%, olles kõrgeim VÄO1 kihis (~9%). Püriiti ja götiiti esineb vaid üksikutes kihtides väikeste lisanditena. Tähelepanuväärne on VÄO5 ja VÄO6 kihtide kõrgem P_2O_5 sisaldus (vastavalt ~1,8% ja ~1,3%), mis ühtib XRD andmetel tuvastatud apatiidi esinemisega nendes kihtides — see viitab fosfaatriikka materjali kogunemisele settimise käigus. VÄO5 kihis esineb lisaks ka kõrgeim Fe_2O_3 sisaldus (~4,2%), mis on seotud götiidi esinemisega XRD andmetel.

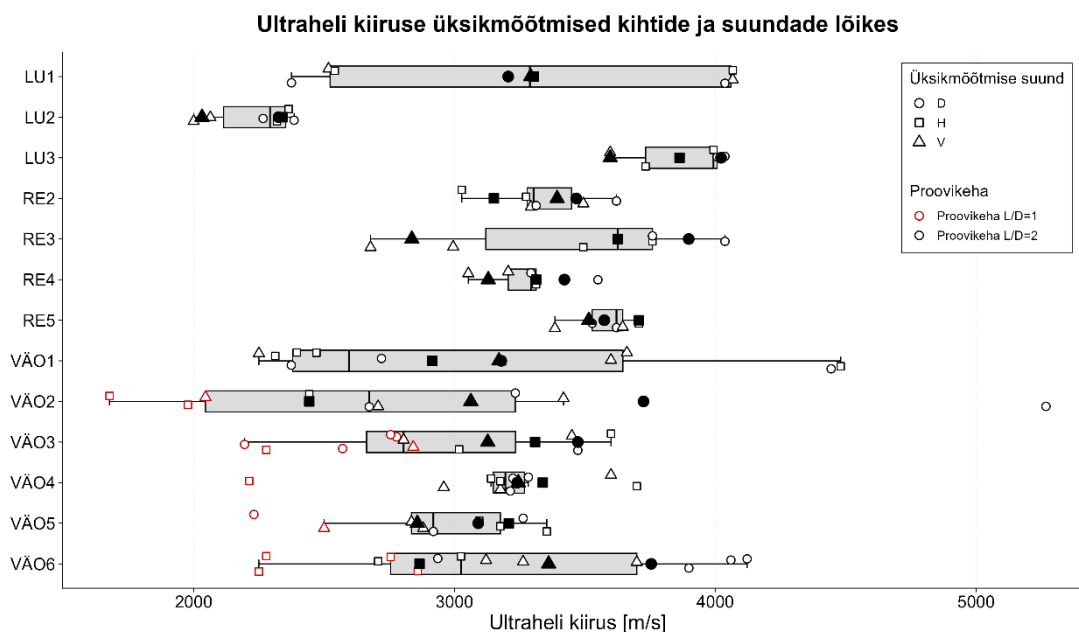


Joonis 34. Mineraloogiline ja keemiline koostis kihtide lõikes. A) XRD mineraalne koostis; B) XRF keemiline koostis ilma CaO-ta koos kuumuskaoga (LOI 950°C).

XRF analüüs kinnitab XRD tulemusi — CaO ja MgO on domineerivad oksiidid, peegeldades kaltsiidi ja dolomiidi vahekorda. SiO₂ sisaldus on kõrgeim VÄO1 kihis, mis ühtib XRD kõrgema kvartsisisaldusega ning viitab suuremale terrigeense materjali osakaalule selles kihis. LOI 950°C väärtused jäävad vahemikku ~38–46%, olles kõrgeimad RE5 ja RE4 kihtides, mis on seotud dolomiidi kõrgema CO₂ sisaldusega ning madalaimad VÄO1 kihis, mis ühtib selle kihi väiksema karbonaatse komponendi sisaldusega. Täpsed XRD analüüside tulemused on esitatud Lisa 7. XRD analüüsi tulemused kihtide lõikes, XRF analüüside tulemused Lisa 8. XRF analüüsi tulemused kihtide lõikes ning katsetes kasutatud puursüdämike tähistused Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsides kasutatud proovigrupid ja proovikoodid

6.4. Ultraheli

Joonis 35 kujutatud ultraheli kiiruse tulemused näitavad märkimisväärset varieeruvust nii kihtide kui proovisuundade lõikes. Graafikul kujutatud keskmised väärtused põhinevad ainult L/D=2 proovikehadel. Üksikmõõtmiste väärtused jäävad vahemikku ~2000–5268 m/s, üldkeskmisega ~3247 m/s. Kõrgeimad keskmised ultraheli kiirused esinevad LU3 (~3873 m/s) ja RE5 (~3577 m/s) kihtides, samas kui madalaimad väärtused mõõdeti LU2 kihis (~2233 m/s). VÄO1 ja VÄO2 kihtides esineb suurim hajuvus (standardhälve ~893–1036 m/s), mis viitab nende kihtide suuremale sisemisele varieeruvusele. Proovisuundade võrdluses ilmneb tendents, et vertikaalsuunas (V) mõõdetud ultraheli kiirused on enamikes kihtides madalaimad — eriti selgelt on see näha LU2 (V: 2032 vs D: 2326 m/s), RE3 (V: 2836 vs D: 3898 m/s) ja VÄO2 (V: 3062 vs D: 3725 m/s) kihtides — mis viitab nende kivimite anisotroopsele ehitusele. L/D=1 proovikehadel mõõdetud ultraheli kiiruse väärtusi keskmiste arvutamisel ei kasutatud, sest lühema proovikeha geomeetria võib mõjutada mõõtmistulemusi ning tulemuste võrreldavuse tagamiseks kasutati ühtse alusena ainult L/D=2 proovikehade andmeid. Täpsed ultraheli kiiruse mõõteandmed on esitatud Lisa 9. UH Mõõtetulemused



Joonis 35. Ultraheli kiiruse väärtuste jaotus kihtide lõikes karp-vurrud-diagrammina koos üksikmõõtmiste ja suunapõhiste keskmistega.

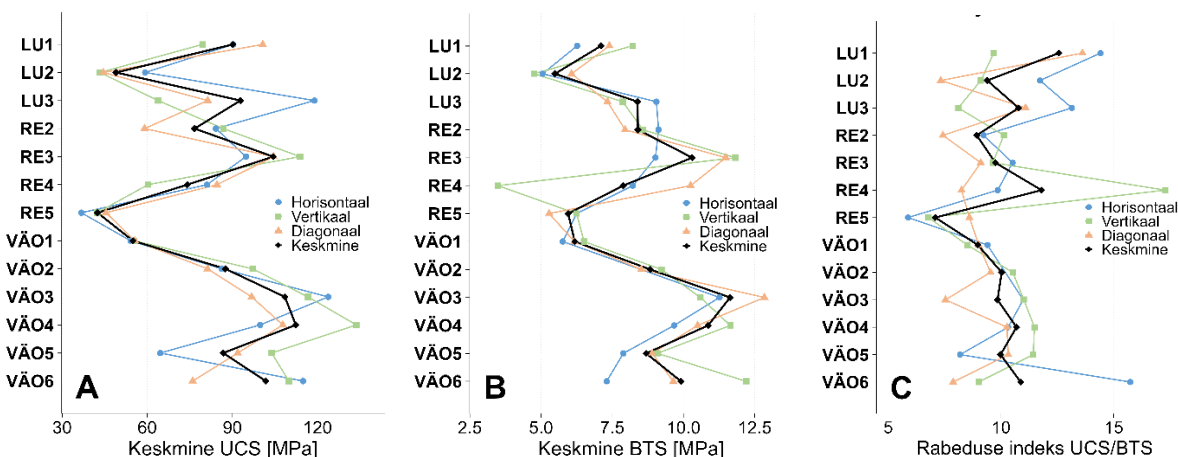
Märkimisväärne erand üldisest suundade mustrist ilmneb LU1 ja VÄO4 kihtides, kus vertikaalsuuna ultraheli kiirus ületab diagonaalsuuna oma — see on vastupidine enamike kihtide käitumisele ning võib viidata nende kihtide erinevale mikrostruktuurile või kihilisuse suunale. Tähelepanuväärne on ka VÄO2 horisontaalsuuna erandlikult madal ultraheli kiirus (~2443 m/s) võrreldes diagonaalsuunaga (~3725 m/s) — üle 50% erinevus — mis ühtib selles kihis täheldatud ussikäikude ja fossiilsete katkestuspindade esinemisega horisontaalsuunas.

Joonis 35 on selgelt näha, et L/D=1 proovikehadel mõõdetud ultraheli kiiruse väärtused erinevad kohati märkimisväärselt L/D=2 proovikehadel mõõdetutest — eriti VÄO2 ja VÄO6 kihtides. Lühemad proovikehadel on suurem tõenäosus, et mõõdetud väärtus peegeldab lokaalset litoloogilist varieeruvust, mitte kihi üldist omadust — eriti heterogeensetes kihtides, kus katkestuspinnad, savikad vahekihid ja tekstuuriline varieeruvus on sagedased. Seetõttu kasutati kihtide keskmiste arvutamisel ühtse alusena ainult L/D=2 proovikehade andmeid, tagamaks tulemuste omavaheline võrreldavus.

7. Arutelu ja analüüs

7.1. UCS ja BTS omavahelised seosed

Joonis 36 esitatud UCS, BTS ja rabaduse indeksi tulemuste põhjal ilmneb üldine positiivne seos survetugevuse ja tõmbetugevuse vahel, kus kõrgema survetugevusega kihid omavad valdavalt kõrgemat tõmbetugevust. Uuritud kihtide BTS/UCS suhe jääb vahemikku 0,079 (LU1) – 0,140 (RE5), üldkeskmisega 0,102, mis on kooskõlas lubjakividel kirjanduses täheldatud survetugevuse ja tõmbetugevuse suhetega (Nazir jt, 2013; Rostami jt, 2016). Kõrgeimate mehaaniliste näitajatega eristuvad peamiselt VÄO3–VÄO6 kihid, mis toetab nende kihtide käsitlemist kõrgemargilise lubjakivina (Tammekänd, 2020), samas kui LU2 ja VÄO1 kihtides mõõdeti üldiselt madalamaid väärtusi.



Joonis 36. UCS, BTS ja rabaduse indeksi keskmised väärtused kihtide ja suundade lõikes. A) Keskmine survetugevus (UCS); B) Keskmine Brasiilia tõmbetugevus (BTS); C) Rabaduse indeks (UCS/BTS).

UCS-i ja BTS-i väärtuste põhjal on võimalik hinnata ka kivimite rabadust, mis kirjeldab kivimi purunemiskäitumist mehaanilise koormuse all. Selleks kasutati rabaduse indeksit B_r , mis põhineb UCS-i ja BTS-i suhtel ning on üks levinumaid lihtsustatud rabaduse näitajaid kivimite mehaanilise käitumise ja raimatavuse hindamisel (Meng jt, 2021; Özfirat jt, 2016).

$$B_r = \frac{UCS}{BTS'} \quad \text{Valem 9}$$

kus

B_r on rabaduse indeks.

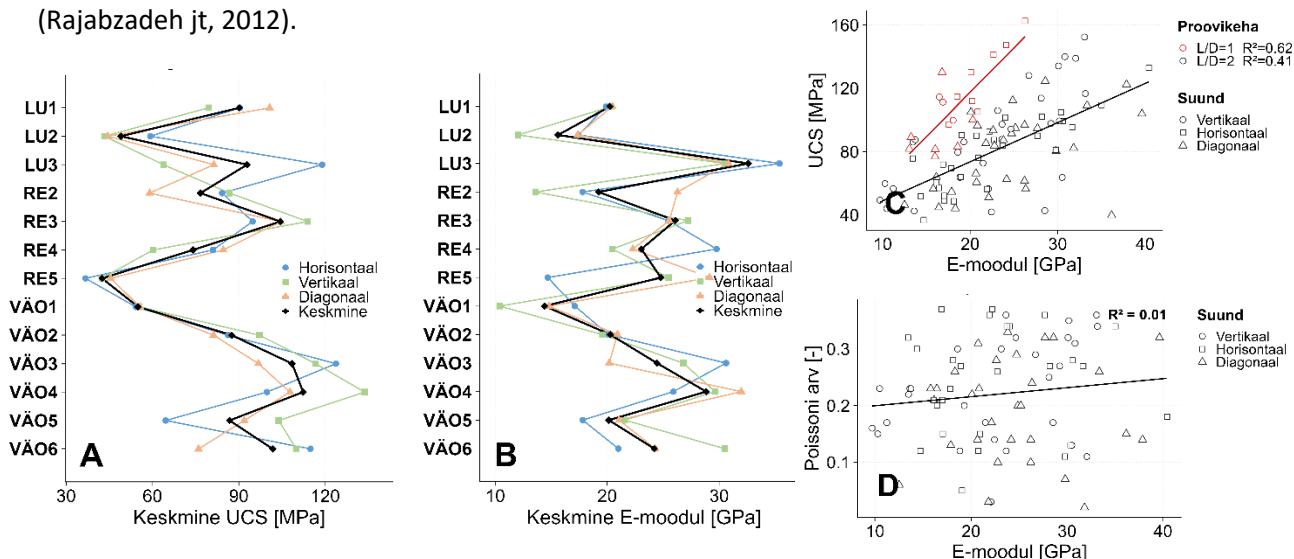
Tulemused näitavad rabaduse indeksi varieeruvust nii kihtide kui ka mõõtesuundade lõikes (Joonis 36C). Mõnes kihis esines vertikaalsuunal märgatavalt kõrgem rabaduse indeks võrreldes teiste mõõtesuundadega, mis viitab kivimi anisotroopsele ehitusele ja kihilisuse mõjule purunemiskäitumisel. Rabadamad kivimid purunevad tavaliselt kergemini ning vajavad väiksemat energiakulu purustamisel ja kaevandamisel (Meng jt, 2021), samuti võivad neil olla kõrgemad LA-väärtused ja väiksem kulumiskindlus (Sengun jt, 2025), kuid käesolevas töös neid seoseid otseselt ei uuritud.

Mõnede kihtide mehaaniline käitumine peegeldab otseselt nende litoloogilisi iseärasusi. VÄO2 kihis täheldati suurt mõõtesuundade vahelist hajuvust nii UCS-is kui BTS-is, mis on geoloogiliselt seletatav selles kihis esinevate ussikäikude ja makrofossiilide fragmentidega, mis paiknevad kihilisusega paralleelselt ning loovad horisontaalsuunas mehaaniliselt nõrgemaid tsoone (Joonis 6). RE5 kihis on olukord teistsugune — vaatamata madalale UCS-ile (~42 MPa) ja BTS-ile (~6 MPa) püsib rabeduse indeks kõrge. Seda seletab RE5 litoloogia (Joonis 14): fossiilsete komponentide lahustumisel tekkinud kavernid vähendavad kivimi tugevust oluliselt — poorsuse suurenemisega kaasneb üldjuhul kivimite jäikuse ja survetugevuse vähenemine (Palchik ja Hatzor, 2002), kuid dolomiidi kristalliline struktuur säilitab rabeda purunemiskäitumise. LU1 kihis on täheldatav vastupidine trend — vaatamata kõrgele dolomiidisaldusele (~93%) on UCS suhteliselt madal (~79 MPa). Litoloogilise kirjelduse põhjal puuduvad LU1-s fauna fragmendid, mis viitab primaarsele dolomiidile — see on peenekristallilisem ja ühtlasema tekstuuriga kui sekundaarne dolomiit (Joonis 15), mis võib selgitada madalamaid tugevusväärtusi võrreldes ootustega (Pyldme jt, 2003).

Tulemused viitavad, et kivimite mehaanilist käitumist mõjutavad lisaks tugevusnäitajatele olulisel määral ka kivimi sisemine ehitus, poorsus ja anisotropia, mis väljendub mõõtesuundade erinevustes.

7.2. UCS-i, E-mooduli ja Poissoni arvu omavahelised seosed

Joonis 37 esitatud UCS ja E-mooduli vahelise seose analüüs näitab üldist positiivset korrelatsiooni mõlema proovikeha geomeetria puhul — L/D=2 proovikehadel saadi $R^2=0,41$ ($n=85$) ja L/D=1 proovikehadel $R^2=0,62$ ($n=18$). Positiivne seos UCS ja E-mooduli vahel on karbonaatkivimite puhul ootuspärane — jäigemad kivimid taluvad tavaliselt suuremat koormust enne purunemist, kuna nii tugevus kui jäikus sõltuvad suuresti kivimi mineraloogilisest koostisest, poorsusest ja terakoostisest (Rajabzadeh jt, 2012).



Joonis 37. UCS, E-moodul ja Poissoni arv kihtide lõikes ning omavahelised seosed. A) UCS; B) E-moodul; C) UCS vs E-moodul; D) E-moodul vs Poissoni arv.

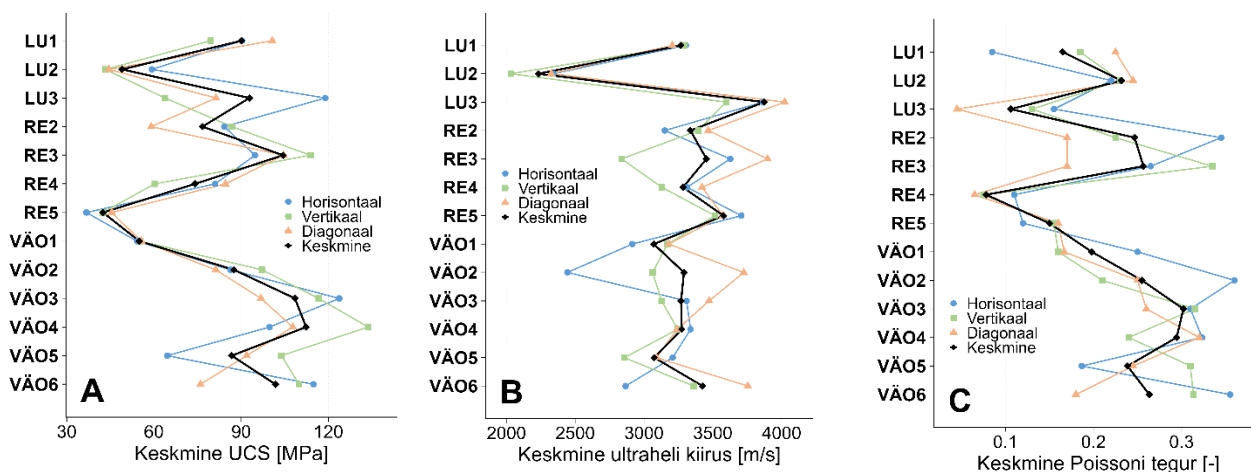
L/D=1 proovikehadel saadi tugevam korrelatsioon ($R^2=0,62$ vs $0,41$), mis on seletatav kahe teguriga. Esiteks on L/D=1 valim märkimisväärselt väiksem ($n=18$ vs $n=85$), mistõttu suurem R^2 ei pruugi peegeldada tugevamat tegelikku seost, vaid võib olla tingitud väiksema valimi madalamast hajuvusest. Teiseks on lühemad proovikehad litoloogiliselt homogensemamad — vähem katkestuspindu mahub

proovikeha sisse, mistõttu UCS ja E-moodul varieeruvad koos ühtlasemalt. L/D=2 proovikehadel on suurem tõenäosus, et proovikehasse jääb katkestuspind või savikam kiht, mis suurendab hajuvust ja nõrgestab korrelatsiooni (Tuncay ja Hasancebi, 2009). Lisaks tuleb arvestada, et L/D=1 proovikehadel mõõdetud UCS väärtused on korrigeeritud Tuncay ja Hasancebi (2009) empiirilise teguri abil, et viia need L/D=2 tasemele — seega kõrgem R^2 L/D=1 puhul võib osaliselt peegeldada korrigeerimise enda lineaarset iseloomu, mitte kivimi tegelikku käitumist. Kuna korrigeerimistegur on välja töötatud erinevate kivimitüüpide keskmise põhjal ega pruugi olla universaalselt rakendatav karbonaatkivimitele, tuleks L/D=1 tulemuste tõlgendamisel olla ettevaatlik.

Lisaks E-moodulile määrati samadel proovikehadel ultrahelimõõtmiste põhjal ka Poissoni arv, mille seos E-mooduliga on praktiliselt olematu ($R^2=0,01$, Joonis 37D). Jäigematel kivimitel ei esine süstemaatilist suuremat ega väiksemat Poissoni arvu, mis viitab, et Poissoni arvu varieeruvust mõjutavad rohkem kivimi kihilisus ja anisotroopia kui üldine jäikus (Ademović ja Kurtović, 2020).

7.3. UCS, ultraheli kiiruse ja Poissoni teguri omavahelised seosed

Joonis 38 esitatud UCS, ultraheli kiiruse ja Poissoni teguri tulemuste põhjal ilmneb, et uuritud karbonaatkivimite elastsed ja mehaanilised omadused on omavahel seotud, kuid seoste tugevus varieerub parameetrite lõikes. UCS ja ultraheli kiiruse vahel täheldati nõrka positiivset seost ($R^2=0,042$). See erineb kirjanduses lubjakividel täheldatust, kus UCS ja Vp vahel on tavaliselt mõõdukas kuni tugev korrelatsioon (Yasar ja Erdogan, 2004; Kurtulus jt, 2016; Aladejare, 2020). Nõrka seost võib seletada uuritud kivimite heterogeenne koosseis — kaltsiitrikkad lubjakivid ja dolomiidistunud kihid käituvad mehaaniliselt ja akustiliselt erinevalt, mis suurendab tõenäoliselt hajuvust.

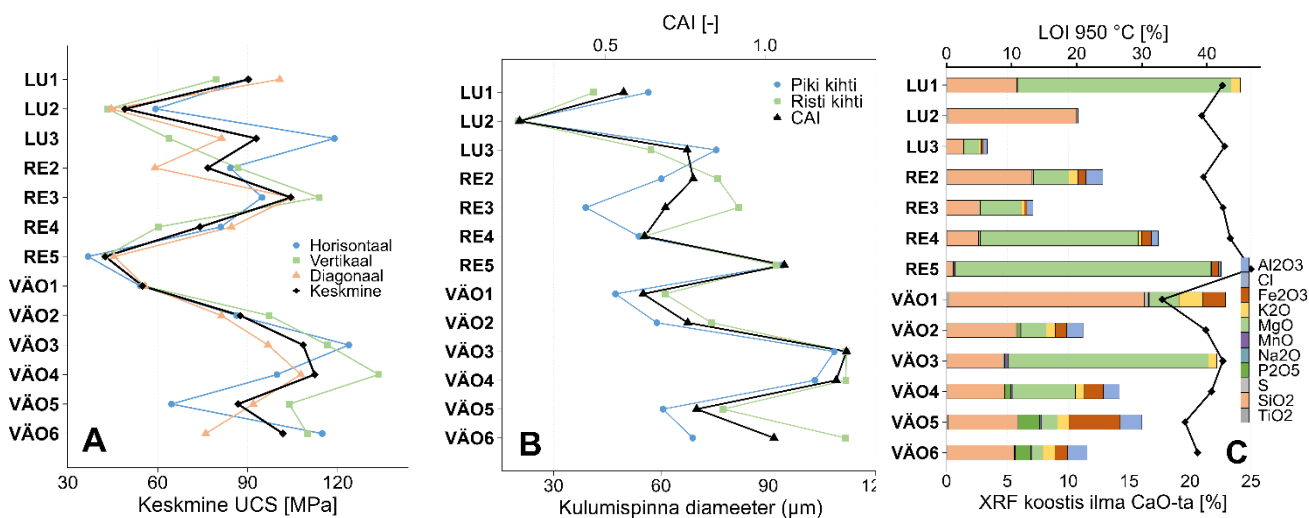


Joonis 38. UCS, ultraheli kiirus ja Poissoni tegur kihtide ja suundade lõikes. A) Keskmise survetugevus (UCS); B) Keskmise ultraheli kiirus; C) Keskmise Poissoni tegur.

Mõõtesuundade võrdluses on diagonaalsuund enamikes kihtides kiirem, mis on seletatav sellega, et diagonaalsuund lõikab kihilisuspindu nurga all, vältides nende pärssivat mõju lainete levikule. Lubja karjääri kihtides (LU1–LU3) on suundadevaheline erinevus aga väiksem, mis ühtib nende kihtide litoloogiaga — peeneteraline, ühtlase tekstuuriga kivim ebamäärase või varjatud kihilisusega (Joonised 15-17).

7.4. UCS, CAI ja mineraloogilise koostise omavahelised seosed

Joonis 39 esitatud UCS, CAI ja XRF tulemuste võrdlus võimaldab hinnata abrasiivuse, tugevuse ja mineraloogilise koostise omavahelisi seoseid. Põhimõtteliselt võiks eeldada, et tugevamad kivimid on ka abrasiivsemad — mõlemad omadused sõltuvad kivimi mikrostruktuurist, terasuurusest ja mineraalsest koostisest ning seetõttu peaks UCS ja CAI olema omavahel positiivses seoses.



Joonis 39. UCS, CAI ja XRF kihtide lõikes. A) Keskmine UCS; B) CAI ja kulumispinna diameeter; C) XRF koostis.

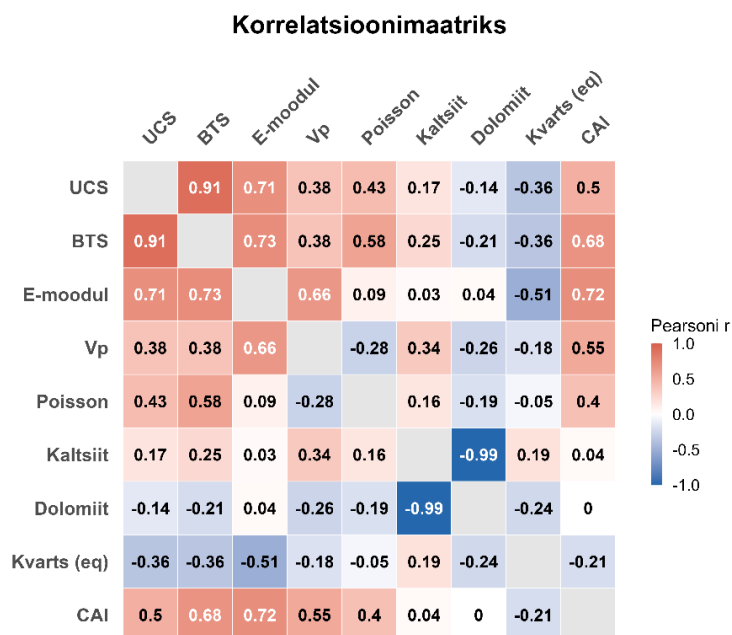
Üldiselt see eeldus kehtib — UCS ja CAI vahel ilmneb mõõdukas positiivne korrelatsioon ($R^2=0,25$). Kõrgeima CAI-ga kihid VÄO3 (~1,255) ja VÄO4 (~1,223) on ühtlasi ka kõrgeima keskmise UCS-iga (~114 ja ~112 MPa), samas kui madalaima CAI-ga LU2 (~0,230) on ka madala UCS-iga (~49 MPa). Siiski esineb mitmeid olulisi erandeid, mis viitavad sellele, et abrasiivust ja tugevust mõjutavad osaliselt erinevad tegurid. RE5 on selgeim erand — madal UCS (~43 MPa) kuid kõrge CAI (~1,061). Fossiilsete komponentide lahustumisest tekkinud kavernid vähendavad tugevust oluliselt.

XRF andmetest näib esmapilgul, et kõrgema SiO₂ sisaldusega kihid on madalaima CAI-ga — LU2 (~10,5% SiO₂, CAI ~0,230) ja VÄO1 (~16,0% SiO₂, CAI ~0,618). See tekitab vastuolu, sest kõrge kvartsisisaldus peaks suurendama abrasiivust, ning avaldab CAI-le domineerivat mõju (Suana ja Peters, 1982; Kaspar ja Latal, 2022). XRD andmete põhjal on LU2 domineerivaks mineraaliks dolomiit (~90%) ning VÄO1-s kaltsiit (~71%) — mõlemad on suhteliselt pehmed karbonaadid (Mohsi kõvadus 3–4). Kvarts (~5% ja ~9%) ning ortoklass (~5% ja ~6%) esinevad hajusalt pehmesse karbonaatses materjalis, mistõttu nende abrasiivne mõju jääb piiratuks.

Ülejäänud XRF parameetrite korrelatsioon CAI-ga on nõrk — SiO₂ ($R^2=0,18$), Al₂O₃ ($R^2=0,13$), Fe₂O₃ ($R^2=0,06$), MgO ($R^2=0,003$), mis kinnitab, et CAI-d ei saa ühegi üksiku keemilise komponendi põhjal usaldusväärselt ennustada. Üllatuslikult tugev täheldatud seos on UCS ja CAI vahel ($R^2=0,25$), mis viitab, et mehaanilised omadused peegeldavad abrasiivust paremini kui keemiline koostis.

7.5. Mehaaniliste ja mineraloogiliste omaduste vaheliste seoste koondanalüüs

Joonis 40 esitatud korrelatsioonimaatriks võimaldab hinnata uuritud parameetrite vahelisi seoseid kihipõhiste keskmiste alusel. Mehaaniliste omaduste vahel ilmneb selge positiivne korrelatsioon — UCS ja BTS ($r=0,91$) ning UCS ja E-moodul ($r=0,71$), mis kinnitab et tugevamad kihid on ühtlasi ka jäigemad ja raskemini purunevad, mis on karbonaatkivimitele ootuspärane tulemus (Rajabzadeh jt, 2012)



Joonis 40. Korrelatsioonimaatriks uuritud kivimite mehaaniliste, elastsete ja mineraloogiliste omaduste vahel (kihipõhised keskmised, $n=13$).

Huvitav leid on Vp ja ekvivalentse kvartsisisalduse nõrk negatiivne seos ($r=-0,18$) — kõrgema kvartsiekvivalendiga kihtides on ultraheli kiirus pigem aeglasem. See viitab, et uuritud kihtides (<10% kvartsi) ei domineeri kvarts lainekiirust ning Vp-d mõjutavad rohkem poorsus, poorigeomeetria, tekstuur ja anisotroopia, nagu on näidatud karbonaatkivimite uuringutes (Karaca jt, 2025). Sama muster ilmneb FEQ ja CAI vahelises nõrgas seoses ($r=-0,21$) ning mineraloogiline koostis tervikuna — nii XRD kui XRF andmete põhjal — ei korreleeru CAI-ga usaldusväärselt. Samas tuleb arvestada, et CERCHAR katse ise on kõrge varieeruvusega meetod — isegi sama kihi piires on CAI mõõtmistulemused märkimisväärselt hajuvad, mis raskendab korrelatsioonide tuvastamist ja võib selgitada nõrku seoseid mineraloogilise koostisega. Sellest hoolimata on otsene CERCHAR katse kaevandusmasinate tööriistade kulumise hindamiseks asendamatu (Zhang jt 2025) ja abrasiivsus on üks peamisi parameetreid kaevandamismasina tööorgani kulumise hindamisel (Grafe, 2022).

E-mooduli ja CAI vaheline positiivne seos ($r=0,72$) on praktiline leid — E-moodul määratakse standardse UCS katse käigus kiiresti, samas kui CERCHAR katse on aeganõudev eraldiseisev protseduur. Eestis puuduvad karbonaatkivimite abrasiivuse süstemaatilised andmed, mistõttu E-moodul võib olla kasulik esialgne indikaator abrasiivuse hindamisel.

8. Järeldused

Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite füüsikalise-mehaaniliste, elastsete ja abrasiivsete omaduste uuring kolme aktiivse lubjakivikarjääri näitel näitas, et kivimite käitumine sõltub olulisel määral mineraloogilisest koostisest, poorsusest, tekstuurst, kihilisusest ja anisotroopiast. Stratigraafiliste üksuste vahel esineb märkimisväärne varieeruvus nii tugevus-, deformatsiooni- ja abrasiivsuse näitajates.

Kõige kõrgemate mehaaniliste näitajatega eristusid VÄO3–VÄO6 kihid, mille puhul mõõdeti kõrged UCS-i, BTS-i ja CAI väärtused. Tulemused toetavad nende kihtide käsitlemist kõrgemargilise lubjakivina ning viitavad nende paremale sobivusele kasutuseladel, kus on vajalik kõrge survetugevus, kulumiskindlus ja hea mehaaniline vastupidavus. Madalama tugevusega kihtidest paistsid silma LU2 ja RE5, mille nõrgemaid omadusi seostati suurema poorsuse, kavernoilisuse ning heterogeense sisemise ehitusega. Tulemused kinnitavad, et kivimi litoloogilised iseärasused mõjutavad otseselt selle mehaanilist käitumist.

UCS-i ja BTS-i vahel ilmnes üldine positiivne seos ning BTS/UCS suhted jäid lubjakividele kirjanduses iseloomulikkude vahemikku. Rabaduse indeksi analüüs näitas, et kivimite purunemiskäitumine sõltub tugevalt kihilisusest ja mõõtesuunast — mõnes kihis oli vertikaalsuunaline rabadus märgatavalt kõrgem kui teistes suundades, mis viitab anisotroopiale ja kihilispindade olulisele mõjule purunemisel. Rabaduse praktilist tähendust hinnates tuleb arvestada konkreetset kasutuseesmärki, kuna rabadus mõjutab nii kaevandamise energiakulu kui killustiku toodangu kvaliteeti vastupidises suunas.

Jäigemate ehitusega kihid osutusid üldiselt ka tugevamaks — UCS ja E-mooduli vahel ilmnes selge positiivne korrelatsioon. Samas olid Poissoni arvu seosed nii UCS kui E-mooduliga nõrgad, mis viitab, et Poissoni arvu kujunemine sõltub rohkem kivimi sisemisest ehitusest ja anisotroopiast kui üldisest jäikusest. Ultraheli kiiruse ja UCS vaheline seos osutus ootamatult nõrgaks — tõenäoliselt kivimite heterogeensuse ja erineva dolomiidistumise astme tõttu, mis näitab, et rahvusvahelises kirjanduses kasutatavad empiirilised seosed ei pruugi Eesti karbonaatkivimite puhul otse rakenduda.

CAI ja UCS-i vahel ilmnes mõõdukas positiivne seos, kuid abrasiivsust ei olnud võimalik usaldusväärset ennustada üksikute keemiliste komponentide põhjal. Tulemused näitasid, et abrasiivsust mõjutavad lisaks keemilisele koostisele ka mineraalide jaotus, tekatuur ning kivimi mikrostruktuur. Seetõttu ei piisa tehnoloogiliste omaduste hindamisel ainult XRF või XRD analüüsist, vaid vajalikud on ka otsesed mehaanilised ja abrasiivsus katsed.

Erinevate parameetrite vahelised korrelatsioonid olid üldiselt nõrgad kuni mõõdukad — ükski üksik parameeter ei olnud piisav teiste omaduste usaldusväärseks ennustamiseks. See kinnitab, et erinevad katsed kirjeldavad kivimite käitumise eri aspekte ning testid tuleks valida vastavalt kavandatavale kasutuselale. Kaevandamise ja raimatavuse hindamisel on olulisemad UCS ja rabaduse indeks, ehitusmaterjalide puhul aga abrasiivsus, kulumiskindlus ja deformatsiooniomadused. Lisaks ilmnes, et omaduste varieeruvus võib olla märkimisväärne juba ühe karjääri piires, mis viitab võimalikule selektiivsele kaevandamise vajalikkusele.

Tulemused viitavad, et Eesti karbonaatkivimite puhul ei pruugi rahvusvahelises kirjanduses kasutatavad üldised empiirilised korrelatsioonid olla otseselt rakendatavad — näiteks UCS ja ultraheli

kiiruse vaheline seos osutus ootamatult nõrgaks võrreldes kirjanduses täheldatuga. See rõhutab kohaliku alusandmestiku kogumise olulisust nii teaduslikust kui praktilisest vaatenurgast ning käesolev töö aitab kaasa ühtsema ja võrreldavama andmestiku kujunemisele Eesti karbonaatkivimite kohta.

Töö piiranguid arvestades tuleb märkida, et katsed põhinesid terviklikel puursüdamikest saadud proovikehadel, mistõttu kirjeldavad tulemused eelkõige intaktse kivimi omadusi. Karjääris kohapeal võib kivimmassiivi käitumine erineda laboratoorsetest tulemustest märkimisväärselt, kuna looduslikud lõhed, kihilisus, murenemine ja muud katkestuspinnad mõjutavad massiivi käitumist viisil, mida väikesed proovikehadel ei kajasta. Samuti tuleb ettevaatlikult tõlgendada $L/D=1$ proovikehade tulemusi, kuna UCS väärtused korrigeeriti empiirilise teguri abil, mis ei pruugi karbonaatkivimitele täielikult sobida. Lisaks tuleb arvestada CERCHAR katse meetodiliste piirangutega — mõõtmistulemuste kõrge varieeruvus ja suhteliselt madalad CAI väärtused raskendavad trendide tuvastamist, ning tulevikus võiks kaaluda pehmemate standardterade kasutamist madala abrasiivusega kivimite täpsemaks eristamiseks.

Edasised uuringud võiksid siduda laboratoorsed tulemused kivimmassiivi klassifikatsioonidega nagu RQD ja RMR, mis võimaldaks hinnata kivimite tegelikku käitumist kaevandamisel ja ehituses terviklikumalt. Samuti oleks väärtuslik uurida, kuidas laboratoorsed tugevusnäitajad seostuvad tegelike kaevandamisnäitajatega — purustamise energia, toodangu kvaliteedi ja killustiku pikaajalise vastupidavusega. Käesolev töö loob esimese meetodiliselt järjepideva alusandmestiku Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste kohta, millele saab tulevikus kindlalt tugineda nii kaevandus-, ehitus- kui geotehniliste otsuste tegemisel.

Kokkuvõte

Käesolevas magistritöös uuriti Põhja- ja Kesk-Eesti Ordoviitsiumi ja Siluri karbonaatkivimite füüsikalise mehaanilise omadusi ning nende varieeruvust erinevate stratigraafiliste üksuste lõikes. Uuringu eesmärk oli määrata kivimite peamised mehaanilised ja elastsed omadused ühtse meetodika alusel ning analüüsida nende seoseid litoloogiliste, mineraloogiliste ja tekstuuriiliste iseärasustega. Töö hõlmas kolme aktiivset lubjakivikarjääri — Vao V, Reinu ja Lubja lubjakivikarjääri —, mis esindavad Kesk- ja Ülem-Ordoviitsiumi ning Alam-Siluri karbonaatkivimeid. Kokku uuriti 13 stratigraafilist üksust ning viidi läbi 431 laboratoorset katset.

Töö käigus määrati kivimite üheteljeline survetugevus (UCS), Brasiilia tõmbetugevus (BTS), CERCHARi abrasiivsusindeks (CAI), ultraheli lainekiirused, Poissoni tegur ning mineraloogiline ja keemiline koostis XRD- ja XRF-analüüside abil. Katsed viidi läbi kolmes proovisuunas, et hinnata kihilisuse mõju katsetel.

Tulemused näitasid, et karbonaatkivimite mehaanilised omadused varieeruvad märkimisväärselt nii karjääride kui stratigraafiliste üksuste lõikes. UCS väärtused jäid vahemikku 42–114 MPa ning tugevamateks osutusid valdavalt kompaksemad kihid. BTS/UCS suhte väärtused jäid vahemikku 0,079–0,140, mis vastab kirjanduses lubjakividele iseloomulikele väärtustele. Mõõdukas positiivne korrelatsioon UCS-i ja E-mooduli vahel viitab sellele, et jäigemad kihid on üldjuhul ka mehaaniliselt tugevamad.

Oluliseks tulemuseks oli asjaolu, et UCS-i ja ultraheli pikilaine kiiruse (V_p) vaheline seos osutus nõrgaks. Kuigi rahvusvahelises kirjanduses käsitletakse V_p väärtust sageli survetugevuse kaudse indikaatorina, näitavad käesoleva töö tulemused, et Eesti karbonaatkivimite puhul ei pruugi see seos olla universaalselt rakendatav. Tõenäoliselt mõjutavad V_p väärtusi lisaks tugevusele dolomiidistumine, mikropragulisuus, poorsus ja tekstuuriiline heterogeensus. See rõhutab kohalikel tingimustel põhineva alusandmestiku vajadust ning näitab, et rahvusvahelisi empiirilisi korrelatsioone ei saa Eesti karbonaatkivimitele alati otseselt üle kanda.

Abrasiivsuse analüüs näitas, et CAI väärtuste seosed mineraloogilise ja keemilise koostisega olid nõrgad. Kvartsisisalduse ja abrasiivsuse vahel ei ilmnenud tugevat korrelatsiooni, mis viitab, et abrasiivsust mõjutavad lisaks mineraloogiale ka kivimi tekstuuri, tsementeeritus ja struktuurne terviklikkus. Samas ilmnes tugev seos CAI ja E-mooduli vahel, mis viitab, et abrasiivsust peegeldab paremini kivimi üldine jäikus ja kompaktnen struktuur. Tulemused kinnitavad, et tööriistade kulumise ja raimatavuse hindamisel on otsesed CERCHARi katsed jätkuvalt vajalikud.

Mitmetes proovigruppides ilmnes selge anisotroopsus, mis väljendus survetugevuse, tõmbetugevuse ja ultraheli kiiruste erinevustes sõltuvalt proovikeha puurimissuunast. Kõige selgemini avaldus see kihilisemate ja tekstuuriilistelt heterogeensematest kivimite puhul, viidates kihilisuse olulisele mõjule kivimite mehaanilisele käitumisele. Kihitide vaheline suur varieeruvus ühe karjääri piires viitab selektiivse kaevandamise potentsiaalile.

Käesoleva töö tulemused aitavad kaasa ühtse ja võrreldava alusandmestiku kujunemisele Eesti karbonaatkivimite füüsikalise mehaaniliste omaduste kohta. Töö omab praktilist väärtust kaevandamis-, ehitus- ja geotehnilistes rakendustes, võimaldades paremini hinnata kivimite tugevust, abrasiivsust ja raimatavust erinevate stratigraafiliste üksuste lõikes. Tulemused toetavad ka TEM-TA143 projekti eesmärke kestlikumate kaevandamismeetodite arendamisel.

Tänuavaldused

Täna siiralt kõiki inimesi ja ettevõtteid, kes olid mulle magistritöö valmimise jooksul suureks abiks ja toeks.

Käesoleva magistritöö valmimist toetas osaliselt projekt „Ehitusmaavarad ja mineraalsed jäätmed: kestliku kaevandamise ning ringse väärindamise võimalused Eestis“ (TEM-TA143).

Eelkõige soovin tänada oma juhendajat dr. Bruno Grafet, kes oli kogu töö vältel igakülgse abiks, toetas nõu ja teadmistega ning aitas keerulistel hetkedel edasi liikuda.

Suur tänu dr. Ursula Toomile, kes aitas proove valida õigest stratigraafilisest üksusest, ning dr. Jaak Nõlvakule geoloogia ja stratigraafiaga seotud abi eest. Täna ka Sander Kanterit, kes aitas proovide transportimise ja toomisega.

Eriline tänu kuulub Siim Roovile, kes aitas katsete tegemisel ning oli kogu protsessi jooksul suureks toeks. Tema nutikus, tehniline taip ja oskus leida lahendusi ka keerulisemates olukordades olid suureks abiks. Siimu põhjalik arusaam seadmete ja katsete toimimisest ning tema abivalmidus jätab mulje inimesest, kellel on erialaselt väga suur potentsiaal ja tugev tulevik ees.

Samuti tänan Birgit Pankseppa ja Jaanis Tomsonit, kes aitasid motivatsiooni üleval hoida ja raskematel hetkedel julgustasid edasi minema.

Täna AS TREV-2 Grupp mõistvat töökollektiivi toetava suhtumise ning paindlikkuse eest magistriõpingute ja töö ühendamisel.

Samuti soovin tänada Väo Paas OÜ ning Eesti killustik OÜ ja AS Trev-2 Gruppi, kes võimaldasid proovide võtmist oma karjääridest ja andsid sellega olulise panuse käesoleva töö valmimisse.

Kõige südamlikum tänu kuulub minu kolmele vahvale lapsele, kes elasid kogu selle teekonna koos minuga läbi, olid kannatlikud ja andsid jõudu ka kõige pingelisematel perioodidel.

Aitäh kõigile, kes selle töö valmimisele kaasa aitasid ja mind sellel teekonnal toetasid.

Kirjanduse loetelu

- Aladejare, A. E. (2020). Evaluation of empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock using measurements from index and physical tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.08.001>
- Aladejare, A. E., Alofe, E. D., Onifade, M., ja Lawal, A. I. (2021). Empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock: Database of simple, multiple, and artificial intelligence-based regressions. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 567–590. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01772-5>
- Alber, M., Yarali, O., Dahl, F., Bruland, A., Käsling, H., Michalakopoulos, T. N., Cardu, M., Hagan, P., Aydin, H., ja Özarslan, A. (2014). *ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 261–266. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0518-0>
- Altindag, R. (2012). Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(3), 229–237.
- Bastani, M., Persson, L., Beiki, M., ja Harinen, R. (2013). A radio magnetotelluric study to evaluate the extents of a limestone quarry in Estonia. *Geophysical Prospecting*, 61, 678–687. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2012.01101.x>
- Bauert, H., Einasto, R., ja Nõlvak, J. (2014). Stop A5: Vão quarry. In H. Bauert, O. Hints, T. Meidla, ja P. Männik (Eds.), *The Early to Middle Paleozoic Revolution: Estonia, 10–19 June 2014. Abstracts & Field Guide* (pp. 151–154). Tartu.
- Couvreur, J.-F., ja Thimus, J.-F. (1995). *The properties of coupling agents in improving ultrasonic transmission*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(4), 417–424. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00074-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00074-7)
- Eesti Killustik. (2026). Kasutatud 27.04.2026. <https://www.eestikillustik.ee/karjaar/lubja-raikkula/>
- Einasto, R., Kestlane, Ü., ja Rähni, A. (2007). Reinu paekarjäär Seli-Koigis Raplamaal on geoloogiliselt kõige huvitavam Juuru lademe paljand Eestis. *Keskkonnatehnika*, (1), 48–49.
- Grafe, B. (2022). *Cutting force component-based rock differentiation utilising machine learning* (Doctoral dissertation). Tallinn University of Technology. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10463.88484>
- Hints, O., Ainsaar, L., Meidla, T., Nõlvak, J., ja Toom, U. (2023). Stop 8: Reinu quarry. In O. Hints ja U. Toom (Eds.), *ISOS-14 Field Guide: The Ordovician of Estonia. 14th International Symposium on the Ordovician System, Estonia, July 19–21, 2023. Pre-conference field excursion, July 15–18, 2023*. TalTech; University of Tartu; Geological Survey of Estonia.
- ISRM (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*.

- Karaca, E., Eberli, G. P., ja Weger, R. J. (2025). Quartz content and its impact on acoustic velocity of microbialites: Examples from Hamelin Pool, Western Australia. *Marine Geophysical Research*, 46, 34. <https://doi.org/10.1007/s11001-025-09593-4>
- Kaspar, M., ja Latal, C. (2022). Der äquivalente Quarzgehalt – Historischer Rückblick und seine Zukunft in der Anwendung der Abrasivitätsprognose. *geotechnik*, 45(2), 86–97. <https://doi.org/10.1002/gete.202100023>
- Kotenjov, R., Sööt, M., ja Schvede, H. (2014). *Lubja lubjakivimaardla Lubja III ja IV uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.01.2014)*. OÜ Inseneribüroo STEIGER.
- Kurtulus, C., Cakir, S., ja Yoğurtcuoğlu, A. C. (2016). Ultrasound study of limestone rock physical and mechanical properties. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52(6), 348–354. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9352-1>
- Liu, P.-H., Wu, J.-H., ja Lee, D.-H. (2022). New rock strength-based UCS–Vp correlation equation for different rock types by statistical regression methods. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 31, 100403. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100403>
- Majstorović, J., Gligorić, M., Lutovac, S., Negovanović, M., ja Crnogorac, L. (2019). Correlation of uniaxial compressive strength with the dynamic elastic modulus, P-wave velocity and S-wave velocity of different rock types. *Underground Mining Engineering*, 34, 11–25. <https://doi.org/10.5937/PodRad1934011M>
- Meidla, T., Ainsaar, L., ja Hints, O. (2014). The Ordovician System in Estonia. In H. Bauert, O. Hints, T. Meidla, ja P. Männik (Eds.), *4th Annual Meeting of IGCP 591: The Early to Middle Paleozoic Revolution, Estonia, 10–19 June 2014* (pp. 116–122). Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu; Institute of Geology at Tallinn University of Technology; Geological Survey of Estonia.
- Meng, F., Wong, L. N. Y., ja Zhou, H. (2021). Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1), 221–247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>
- Momeni, E., Nazir, R., Armaghani, D. J., Amin, M. F. M., ja Mohamad, E. T. (2015). Prediction of unconfined compressive strength of rocks: A review paper. *Jurnal Teknologi*, 77(11), 1–8. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6393>
- Nestor, H. (1997). Silurian. In A. Raukas ja A. Teedumäe (Eds.), *Geology and Mineral Resources of Estonia* (pp. 89–106). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Nestor, H., ja Soesoo, A. (2006). *Silur Eestis*. MTÜ GEOGuide Baltoscandia. ISBN 9985-9675-7-7.
- Notton, A., ja Sõstra, Ü. (2010). The geological perspectives for Paleozoic carbonate raw material mining in Harjumaa County, Estonia. In *9th International Symposium Pärnu* (pp. 14-19).
- Nõlvak, J. (1997). Ordovician. In A. Raukas ja A. Teedumäe (Eds.), *Geology and Mineral Resources of Estonia* (pp. 52–86). Tallinn: Estonian Academy Publishers.

- OpenAI. (2026). ChatGPT (versioon ChatGPT-5o). Kasutatud 11.05.2026, <https://chatgpt.com/>
- OÜ Vão Paas. (2026). Kasutatud 27.04.2026. <https://vaopaas.ee/>
- Palchik, V., ja Hatzor, Y. H. (2002). Crack damage stress as a composite function of porosity and elastic matrix stiffness in dolomites and limestones. *Engineering Geology*, 63(3–4), 233–245. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00084-9)
- Pyldme, M., Kallavus, U., Schvede, J., ja Traksmäa, R. (2003). Properties of dimension (facing) stone from Estonian dolostone. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 9(2).
- Rajabzadeh, M. A., Moosavinasab, Z., & Rakhshandehroo, G. (2012). *Effects of rock classes and porosity on the relation between uniaxial compressive strength and some rock properties for carbonate rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 113–122. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0169-y>
- Reinsalu, E. (2019). *Eesti mäendus II*. TTÜ mäeinstituut. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/5d42b9b4-21ff-4777-aca1-74085cbc0dfd>
- Rostami, J., Kahraman, S., Yu, X., Copur, H., Balci, C., Bamford, W., & Asbury, B. (2016). *The relation between uniaxial compressive and Brazilian tensile strength*. In R. Ulusay, M. A. Hindistan, E. Tuncay, Ö. Aydan, & H. Gerçek (Eds.), *Rock mechanics and rock engineering: From the past to the future* (Vol. 1, pp. 147–152). CRC Press/Balkema. <https://doi.org/10.1201/9781315388502-24>
- Röömusoks, A. (1983). *Eesti aluspõhja geoloogia*. Valgus. <http://hdl.handle.net/10062/16511>
- Shikhov, A. I., ja Dunayeva, E. N. (2018). *Ultrasound methods and means for examination of physical and mechanical properties of rocks*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 194, 062030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062030>
- Suana, M., ja Peters, T. (1982). The Cerchar Abrasivity Index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Rock Mechanics*, 15, 1–8. <https://doi.org/10.1007/BF01239473>
- Zhang, G., Thuro, K., Song, Z., Dang, W., ja Bai, Q. (2025). Cerchar abrasivity test and its applications in rock engineering: A review. *International Journal of Coal Science & Technology*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-024-00731-8>
- Tammekänd, M. (2020). *Väo lubjakivimaardla Lõuna-Väo II ja Tondi-Väo II uuringuruumide geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.11.2020)*. OÜ Inseneribüroo STEIGER.
- Tuncay, E., ja Hasancebi, N. (2009). *The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68, 491–497. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0227-9>
- Ulusay, R. (Ed.). (2015). *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014*. Springer.
- Vares, M., Elvre, I., ja Kikas, V. (1961). *Aruanne Kingissepa rajooni Tagavere dolomiidimaardla detailise geoloogilise luuretoõ tulemustest: Kingissepa raj. Tagavere leiukoha dolomiitide füüsikalise*

mehaaniliste omaduste uurimus (Geoloogiafond, EGF:1400). Geoloogiafond.
<https://kirjandus.geoloogia.info/en/reference/43045>

Özfırat, M. K., Yenice, H., Şimşir, F., ja Yaralı, O. (2016). A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability. *Journal of African Earth Sciences*, 119, 94–101.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.017>

Yasar, E., ja Erdogan, Y. (2004). Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 871–875. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.01.012>

Lisa 1. Proovivõtukoordinaadid ja -kuupäev

Proovigrupp	Karjäär	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)	Proovivõtu kuupäev
RM25_VA01	Väo V lubjakivikarjäär	59,426466	24,904076	27.05.2025
RM25_VA02	Väo V lubjakivikarjäär	59,426512	24,910146	27.05.2025
RM25_VA03	Väo V lubjakivikarjäär	59,426516	24,910143	27.05.2025
RM25_VA04	Väo V lubjakivikarjäär	59,426516	24,910143	27.05.2025
RM25_VA05	Väo V lubjakivikarjäär	59,426366	24,912193	27.05.2025
RM25_VA06	Väo V lubjakivikarjäär	59,426366	24,912193	27.05.2025
RM25_RE2	Reinu lubjakivikarjäär	59,086398	24,741164	13.06.2025
RM25_RE3	Reinu lubjakivikarjäär	59,086398	24,741164	13.06.2025
RM25_RE4	Reinu lubjakivikarjäär	59,088057	24,740138	13.06.2025
RM25_RE5	Reinu lubjakivikarjäär	59,087884	24,74114	13.06.2025
RM25_LU1	Lubja lubjakivikarjäär	58,931082	24,698338	05.06.2025
RM25_LU2	Lubja lubjakivikarjäär	58,930294	24,696945	05.06.2025
RM25_LU3	Lubja lubjakivikarjäär	58,931912	24,702119	05.06.2025

Lisa 2. Katsete ja analüüside jaotus proovigruppide lõikes

Proovigrupp	UCS	BTS	UH	CERCHAR	Õhik	XRD	XRF	Kokku
VÄ01	10	10	10	2	2	2	2	38
VÄ02	10	9	10	2	2	2	2	37
VÄ03	12	14	12	2	2	2	2	46
VÄ04	10	12	10	2	2	2	2	40
VÄ05	9	7	9	2	2	2	2	33
VÄ06	13	12	13	2	2	2	2	46
RE2	6	8	6	2	2	2	2	28
RE3	6	6	6	2	2	2	2	26
RE4	5	10	5	2	2	2	2	28
RE5	5	13	5	2	2	2	2	31
LU1	6	5	6	2	2	2	2	25
LU2	6	8	6	2	2	2	2	28
LU3	5	7	5	2	2	2	2	25
Kokku	103	121	103	26	26	26	26	431

Lisa 3. CERCHARi abrasiivsuskatsetes, õhikute valmistamisel ning XRD- ja XRF-analüüsid kasutatud proovigrupid ja proovikoodid

Proovigrupp	Puursüdamiku nimi
VÄ01	RM25_VÄ01_1D
VÄ02	RM25_VÄ02_6H
VÄ03	RM25_VÄ03_15D
VÄ04	RM25_VÄ04_5D
VÄ05	RM25_VÄ05_2D
VÄ06	RM25_VÄ06_14D
RE2	RM25_RE2_3H
RE3	RM25_RE3_6D
RE4	RM25_RE4_3H
RE5	RM25_RE5_2D
LU1	RM25_LU1_3H
LU2	RM25_LU2_6D
LU3	RM25_LU3_7H

Lisa 4. UCS ja E-mooduli mõõtetulemused

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	E-moodul [GPa]	Max jõud [kN]	Nihe [μm]	UCS [Mpa]
RM25_LU1_1V_UCS	LU1	V	19,3	197,3	4849	86,1
RM25_LU1_2V_UCS	LU1	V	21,5	166,6	4185	72,8
RM25_LU1_3H_UCS	LU1	H	19,1	207,2	6093	90,5
RM25_LU1_4H_UCS	LU1	H	20,7	206,4	4946	90,1
RM25_LU1_5D_UCS	LU1	D	20,1	240,4	5587	105,0
RM25_LU1_6D_UCS	LU1	D	20,8	220,8	5239	96,4
RM25_LU2_1H_UCS	LU2	H	17,8	159,3	4522	69,6
RM25_LU2_2H_UCS	LU2	H	17	112,1	2758	49,0
RM25_LU2_3V_UCS	LU2	V	13,6	97,4	3177	42,5
RM25_LU2_4V_UCS	LU2	V	10,5	101,0	4352	44,1
RM25_LU2_5D_UCS	LU2	D	16,4	102,6	3838	44,8
RM25_LU2_6D_UCS	LU2	D	18,3	101,2	2966	44,2
RM25_LU3_2V_UCS	LU3	V	30,5	146,0	2180	63,8
RM25_LU3_6H_UCS	LU3	H	40,4	304,5	3441	133,0
RM25_LU3_7H_UCS	LU3	H	30,4	240,2	2646	104,9
RM25_LU3_8D_UCS	LU3	D	29,8	183,9	3865	80,3
RM25_LU3_9D_UCS	LU3	D	31,8	188,5	2930	82,3
RM25_RE2_1V_UCS	RE2	V	13,5	197,0	7378	86,0
RM25_RE2_2V_UCS	RE2	V	13,7	200,5	6287	87,6
RM25_RE2_3H_UCS	RE2	H	22,2	212,1	4362	92,6
RM25_RE2_4H_UCS	RE2	H	13,4	173,5	6567	75,8
RM25_RE2_5D_UCS	RE2	D	26,2	141,0	2398	61,6
RM25_RE2_7D_UCS	RE2	D	26,3	129,3	2380	56,5
RM25_RE3_1V_UCS	RE3	V	30,8	320,5	4889	140,0
RM25_RE3_2V_UCS	RE3	V	23,6	201,0	3109	87,8
RM25_RE3_3H_UCS	RE3	H	22,7	200,2	3936	87,4
RM25_RE3_4H_UCS	RE3	H	28,2	234,0	5562	102,2
RM25_RE3_5D_UCS	RE3	D	26,2	221,6	3944	96,8
RM25_RE3_6D_UCS	RE3	D	24,9	257,2	5180	112,3
RM25_RE4_1V_UCS	RE4	V	18,8	146,1	4575	63,8
RM25_RE4_2V_UCS	RE4	V	22,1	129,8	2946	56,7
RM25_RE4_3H_UCS	RE4	H	29,8	185,6	3168	81,0
RM25_RE4_5D_UCS	RE4	D	22,8	191,9	3718	83,8
RM25_RE4_6D_UCS	RE4	D	21,8	195,4	5282	85,3
RM25_RE5_1H_UCS	RE5	H	14,7	84,2	3344	36,7
RM25_RE5_2D_UCS	RE5	D	36,2	91,2	1725	39,8
RM25_RE5_3D_UCS	RE5	D	22,1	116,9	2630	51,1
RM25_RE5_4V_UCS	RE5	V	28,5	97,9	1819	42,8
RM25_RE5_5V_UCS	RE5	V	22,4	96,1	4386	42,0

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	E-moodul [GPa]	Max jõud [kN]	Nihe [µm]	UCS [Mpa]
RM25_VÄ01_11D_UCS	VÄ01	D	12,5	106,2	4023	46,4
RM25_VÄ01_12D_UCS	VÄ01	D	15,8	129,4	4208	56,5
RM25_VÄ01_2D_UCS	VÄ01	D	16,1	146,6	4391	64,0
RM25_VÄ01_4V_UCS	VÄ01	V	9,7	113,2	6106	49,4
RM25_VÄ01_5V_UCS	VÄ01	V	10,3	137,2	5705	59,9
RM25_VÄ01_6V_UCS	VÄ01	V	11,2	129,8	6154	56,7
RM25_VÄ01_7H_UCS	VÄ01	H	14,3	118,4	3460	51,7
RM25_VÄ01_8H_UCS	VÄ01	H	17	119,4	3076	52,1
RM25_VÄ01_9H_UCS	VÄ01	H	18,1	111,7	3043	48,8
RM25_VÄ02_10D_UCS	VÄ02	D	23,8	199,8	4463	87,3
RM25_VÄ02_1V_UCS_1:1	VÄ02	V	18,5	295,0	8253	128,8
RM25_VÄ02_2V_UCS	VÄ02	V	18,6	182,4	4480	79,6
RM25_VÄ02_3V_UCS	VÄ02	V	23,6	222,8	4951	97,3
RM25_VÄ02_4H_UCS_1:1	VÄ02	H	19,8	250,6	7279	109,4
RM25_VÄ02_5H_UCS	VÄ02	H	21,9	129,3	3934	56,4
RM25_VÄ02_6H_UCS_1:1	VÄ02	H	23,5	270,9	5880	118,3
RM25_VÄ02_7D_UCS	VÄ02	D	22,6	213,9	4050	93,4
RM25_VÄ02_9D_UCS	VÄ02	D	24,2	143,3	2682	62,6
RM25_VÄ02_9D_UCS_1:1	VÄ02	D	14,7	210,5	6682	91,9
RM25_VÄ03_12D_UCS_1:1	VÄ03	D	18,9	335,1	9581	146,3
RM25_VÄ03_14D_UCS_1:1	VÄ03	D	20,9	214,1	6015	93,5
RM25_VÄ03_15D_UCS_1:1	VÄ03	D	18	209,9	6387	91,7
RM25_VÄ03_16D_UCS	VÄ03	D	33,4	250,0	4053	109,2
RM25_VÄ03_17H_UCS	VÄ03	H	35	250,6	3194	109,4
RM25_VÄ03_18H_UCS	VÄ03	H	30,6	227,2	3982	99,2
RM25_VÄ03_1V_UCS	VÄ03	V	33,1	348,9	5319	152,3
RM25_VÄ03_2V_UCS_1:1	VÄ03	V	20,3	257,1	9492	112,3
RM25_VÄ03_3V_UCS	VÄ03	V	29,2	223,9	4373	97,8
RM25_VÄ03_5H_UCS_1:1	VÄ03	H	29,5	418,7	7005	182,9
RM25_VÄ03_8D_UCS_1:1	VÄ03	D	18	197,9	7190	86,4
RM25_VÄ03_9D_UCS_1:1	VÄ03	D	22,8	257,8	7796	112,6
RM25_VÄ04_1V_UCS	VÄ04	V	26,7	293,3	5689	128,1
RM25_VÄ04_2V_UCS	VÄ04	V	32,1	318,2	4827	138,9
RM25_VÄ04_3V_UCS	VÄ04	V	30,1	307,1	5271	134,1
RM25_VÄ04_4D_UCS	VÄ04	D	27,7	217,2	4067	94,8
RM25_VÄ04_5D_UCS	VÄ04	D	28,6	285,2	4960	124,6
RM25_VÄ04_6D_UCS	VÄ04	D	39,6	237,9	3381	103,9
RM25_VÄ04_7H_UCS	VÄ04	H	27,7	206,4	3651	90,1
RM25_VÄ04_8H_UCS	VÄ04	H	31,6	218,5	3481	95,4
RM25_VÄ04_8H_UCS_1:1	VÄ04	H	22,8	288,2	8199	125,8
RM25_VÄ04_9H_UCS	VÄ04	H	24	232,8	4951	101,7
RM25_VÄ05_1D_UCS	VÄ05	D	24,7	209,6	4089	91,5
RM25_VÄ05_1D_UCS_1:1	VÄ05	D	14,9	229,6	6364	100,3
RM25_VÄ05_2D_UCS	VÄ05	D	25,2	217,4	4267	94,9

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	E-moodul [GPa]	Max jõud [kN]	Nihe[μm]	UCS [Mpa]
RM25_VÄ05_3H_UCS	VÄ05	H	20,9	174,4	3709	76,2
RM25_VÄ05_5H_UCS	VÄ05	H	16,1	138,4	4769	60,5
RM25_VÄ05_6V_UCS	VÄ05	V	24,7	215,9	5473	94,3
RM25_VÄ05_7V_UCS	VÄ05	V	23,1	242,6	5154	105,9
RM25_VÄ05_8V_UCS_1:1	VÄ05	V	19	286,6	7852	125,2
RM25_VÄ06_10H_UCS	VÄ06	H	16,9	164,7	4299	71,9
RM25_VÄ06_12D_UCS	VÄ06	D	37,9	280,3	4317	122,4
RM25_VÄ06_13D_UCS	VÄ06	D	17,9	125,2	3304	54,7
RM25_VÄ06_14D_UCS	VÄ06	D	20,7	151,7	3055	66,2
RM25_VÄ06_1V_UCS	VÄ06	V	28,1	260,5	4751	113,7
RM25_VÄ06_3V_UCS	VÄ06	V	30,2	227,6	3780	99,4
RM25_VÄ06_4V_UCS	VÄ06	V	33,2	267,1	3872	116,6
RM25_VÄ06_5H_UCS_1:1a	VÄ06	H	25,5	364,0	7456	159,0
RM25_VÄ06_5H_UCS_1:1b	VÄ06	H	22,6	335,0	8942	146,3
RM25_VÄ06_5H_UCS_1:1c	VÄ06	H	27,1	379,8	6689	165,8
RM25_VÄ06_6H_UCS	VÄ06	H	23,7	192,0	5120	83,8
RM25_VÄ06_7H_UCS_1:1	VÄ06	H	20,8	295,5	9740	129,0
RM25_VÄ06_8D_UCS	VÄ06	D	20,7	139,0	4632	60,7

Lisa 5. BTS mõõtetulemused

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	Max jõud [kN]	Nihe [µm]	BTS [MPa]
RM25_LU1_1V_BTS1	LU1	V	18,98	3146	8,2
RM25_LU1_3H_BTS1	LU1	H	13,6	2694	5,9
RM25_LU1_4H_BTS1	LU1	H	15,29	3401	6,6
RM25_LU1_5D_BTS1	LU1	D	15,55	2484	6,7
RM25_LU1_5D_BTS2	LU1	D	18,72	2592	8,1
RM25_LU2_1H_BTS1	LU2	H	9,99	1766	4,3
RM25_LU2_2H_BTS1	LU2	H	13,57	3039	5,8
RM25_LU2_3V_BTS1	LU2	V	9,94	3521	4,3
RM25_LU2_4V_BTS1	LU2	V	12,05	2860	5,2
RM25_LU2_5D_BTS1	LU2	D	11,52	2185	5,0
RM25_LU2_5D_BTS2	LU2	D	10,98	2212	4,7
RM25_LU2_5D_BTS3	LU2	D	15,93	2212	7,0
RM25_LU2_6D_BTS1	LU2	D	17,59	3271	7,6
RM25_LU3_3V_BTS1	LU3	V	18,09	2141	7,9
RM25_LU3_6H_BTS1	LU3	H	21,44	2052	9,3
RM25_LU3_6H_BTS2	LU3	H	20,47	2467	8,3
RM25_LU3_7H_BTS1	LU3	H	23,04	3889	9,9
RM25_LU3_7H_BTS2	LU3	H	19,96	1713	8,6
RM25_LU3_8D_BTS1	LU3	D	20,21	2533	8,7
RM25_LU3_9D_BTS1	LU3	D	13,67	1966	5,9
RM25_RE2_1V_BTS1	RE2	V	19,53	2872	8,5
RM25_RE2_2V_BTS1	RE2	V	19,96	2248	8,7
RM25_RE2_3H_BTS1	RE2	H	21,26	2123	9,3
RM25_RE2_4H_BTS1	RE2	H	20,35	3485	8,9
RM25_RE2_6D_BTS1	RE2	D	21,44	2306	9,4
RM25_RE2_6D_BTS2	RE2	D	18,95	3235	8,3
RM25_RE2_7D_BTS1	RE2	D	17,38	2913	7,5
RM25_RE2_7D_BTS2	RE2	D	15,08	4343	6,6
RM25_RE3_1V_BTS1	RE3	V	27,17	3069	11,8
RM25_RE3_3H_BTS1	RE3	H	15,1	5755	6,6
RM25_RE3_4H_BTS1	RE3	H	19,65	1769	8,6
RM25_RE3_4H_BTS2	RE3	H	27,35	2498	11,9
RM25_RE3_5D_BTS1	RE3	D	26,23	2623	11,5
RM25_RE3_6D_BTS1	RE3	D	26,19	3372	11,5

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	Max jõud [kN]	Nihe [µm]	BTS [MPa]
RM25_RE4_1V_BTS1	RE4	V	8,68	1412	3,8
RM25_RE4_2V_BTS1	RE4	V	7,38	874	3,2
RM25_RE4_4H_BTS1	RE4	H	17,39	2462	7,6
RM25_RE4_4H_BTS2	RE4	H	18,84	2087	8,2
RM25_RE4_4H_BTS3	RE4	H	17,96	7457	7,7
RM25_RE4_4H_BTS4	RE4	H	20,29	2073	8,8
RM25_RE4_4H_BTS5	RE4	H	20,71	2070	8,9
RM25_RE4_5D_BTS1	RE4	D	24,74	2837	10,7
RM25_RE4_5D_BTS2	RE4	D	23,79	3199	10,2
RM25_RE4_5D_BTS3	RE4	D	22,73	2944	9,9
RM25_RE5_1H_BTS1	RE5	H	14,31	3657	6,2
RM25_RE5_2D_BTS1	RE5	D	17,24	3593	7,5
RM25_RE5_2D_BTS2	RE5	D	12,55	1844	5,4
RM25_RE5_3D_BTS1	RE5	D	10,54	1374	4,6
RM25_RE5_3D_BTS2	RE5	D	8,58	1055	3,6
RM25_RE5_4V_BTS1	RE5	V	17,2	1499	7,5
RM25_RE5_4V_BTS2	RE5	V	15,05	5905	6,5
RM25_RE5_4V_BTS3	RE5	V	12,13	1823	5,3
RM25_RE5_4V_BTS4	RE5	V	11,88	965	5,2
RM25_RE5_5V_BTS1	RE5	V	12,69	2270	5,6
RM25_RE5_5V_BTS2	RE5	V	17,66	3693	7,7
RM25_RE5_5V_BTS3	RE5	V	15,29	4014	6,6
RM25_RE5_5V_BTS4	RE5	V	12,69	1662	5,6
RM25_VÄ01_10H_BTS1	VÄ01	H	16,29	4700	7,1
RM25_VÄ01_11D_BTS1	VÄ01	D	13,63	4700	5,9
RM25_VÄ01_1D_BTS1	VÄ01	D	12,36	3080	5,3
RM25_VÄ01_2D_BTS1	VÄ01	D	16,47	4415	7,3
RM25_VÄ01_3V_BTS1	VÄ01	V	13,5	2176	5,9
RM25_VÄ01_3V_BTS2	VÄ01	V	12,19	3674	5,3
RM25_VÄ01_3V_BTS3	VÄ01	V	17,17	3371	7,5
RM25_VÄ01_3V_BTS4	VÄ01	V	16,86	3735	7,3
RM25_VÄ01_7H_BTS1	VÄ01	H	14,11	3549	6,2
RM25_VÄ01_9H_BTS1	VÄ01	H	9,34	2412	4,0
RM25_VÄ02_1V_BTS1	VÄ02	V	23,12	4673	10,1
RM25_VÄ02_1V_BTS2	VÄ02	V	21,65	3365	9,1
RM25_VÄ02_2V_BTS1	VÄ02	V	20,57	2984	9,0
RM25_VÄ02_3V_BTS1	VÄ02	V	19,94	2925	8,7
RM25_VÄ02_7D_BTS1	VÄ02	D	18,09	2497	7,9
RM25_VÄ02_7D_BTS2	VÄ02	D	22,05	3086	9,6
RM25_VÄ02_8D_BTS1	VÄ02	D	20,06	3752	8,7
RM25_VÄ02_8D_BTS2	VÄ02	D	19,37	2805	8,5
RM25_VÄ02_8D_BTS3	VÄ02	D	18,21	3068	7,9
RM25_VÄ03_10D_BTS1	VÄ03	D	37,76	5440	16,6
RM25_VÄ03_11D_BTS1	VÄ03	D	25,06	3407	11,0

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	Max jõud [kN]	Nihe [µm]	BTS [MPa]
RM25_VÄ03_16D_BTS2	VÄ03	D	27,2	3556	11,9
RM25_VÄ03_17H_BTS1	VÄ03	H	23,65	5120	10,4
RM25_VÄ03_18H_BTS1	VÄ03	H	27,38	3777	12,0
RM25_VÄ03_1V_BTS1	VÄ03	V	29,22	4860	12,8
RM25_VÄ03_2V_BTS1	VÄ03	V	31,91	3549	14,0
RM25_VÄ03_2V_BTS2	VÄ03	V	7,95	2216	3,5
RM25_VÄ03_3V_BTS1	VÄ03	V	27,99	4529	12,1
RM25_VÄ03_4H_BTS1	VÄ03	H	25,43	2747	11,0
RM25_VÄ03_4H_BTS2	VÄ03	H	24,5	3496	10,7
RM25_VÄ03_6H_BTS1	VÄ03	H	27,84	4209	12,2
RM25_VÄ03_7D_BTS1	VÄ03	D	23,81	3992	10,5
RM25_VÄ04_1V_BTS1	VÄ04	V	23,92	2877	10,5
RM25_VÄ04_1V_BTS2	VÄ04	V	28,83	3234	12,7
RM25_VÄ04_2V_BTS1	VÄ04	V	27,87	3663	12,1
RM25_VÄ04_2V_BTS2	VÄ04	V	28,17	4031	12,1
RM25_VÄ04_3V_BTS1	VÄ04	V	26,78	3788	11,5
RM25_VÄ04_3V_BTS2	VÄ04	V	25,51	4584	11,0
RM25_VÄ04_4D_BTS1	VÄ04	D	26,37	4120	11,3
RM25_VÄ04_4D_BTS2	VÄ04	D	25,7	4031	11,1
RM25_VÄ04_5D_BTS1	VÄ04	D	21,27	3985	9,1
RM25_VÄ04_7H_BTS1	VÄ04	H	23,63	3395	10,2
RM25_VÄ04_7H_BTS2	VÄ04	H	23,04	4120	9,9
RM25_VÄ04_9H_BTS1	VÄ04	H	20,53	5039	8,9
RM25_VÄ05_10V_BTS1	VÄ05	V	25,1	3938	11,1
RM25_VÄ05_10V_BTS2	VÄ05	V	24,8	3270	10,8
RM25_VÄ05_1D_BTS1	VÄ05	D	20,15	3300	8,8
RM25_VÄ05_2D_BTS1	VÄ05	D	20,24	2658	9,0
RM25_VÄ05_3H_BTS1	VÄ05	H	18,65	4074	8,2
RM25_VÄ05_4H_BTS1	VÄ05	H	17,28	4503	7,6
RM25_VÄ05_9V_BTS1	VÄ05	V	12,51	4639	5,4
RM25_VÄ06_10H_BTS1	VÄ06	H	23,5	3788	10,3
RM25_VÄ06_11D_BTS1	VÄ06	D	26,67	3735	11,8
RM25_VÄ06_13D_BTS1	VÄ06	D	21,24	3860	9,4
RM25_VÄ06_2V_BTS1	VÄ06	V	25,8	3967	11,4
RM25_VÄ06_2V_BTS2	VÄ06	V	26,26	3824	11,5
RM25_VÄ06_2V_BTS3	VÄ06	V	30,18	3967	13,3
RM25_VÄ06_3V_BTS1	VÄ06	V	28,7	5120	12,7
RM25_VÄ06_6H_BTS1	VÄ06	H	15,47	4038	6,8
RM25_VÄ06_6H_BTS2	VÄ06	H	11,03	1876	4,8
RM25_VÄ06_9D_BTS1	VÄ06	D	19,02	3163	8,3
RM25_VÄ06_9D_BTS2	VÄ06	D	19,19	4199	8,4
RM25_VÄ06_9D_BTS3	VÄ06	D	23,57	3770	10,4

Lisa 6. CERCHARi katse nõelte kulumispinna mõõtmistulemused

Proovi_ID	0° [µm]	90° [µm]	180° [µm]	270° [µm]
LU1_1P	36	29	65	48
LU1_2P	88	79	89	59
LU1_3P	49	76	37	87
LU1_4P	68	50	73	41
LU1_5P	29	39	28	59
LU1_6R	32	29	44	31
LU1_7R	10	39	0	39
LU1_8R	25	31	31	22
LU1_9R	48	58	55	130
LU1_10R	65	37	53	44
LU2_1P	15	19	14	15
LU2_2P	14	18	12	33
LU2_3P	16	12	21	21
LU2_4P	8	16	0	15
LU2_5P	43	34	28	48
LU2_6R	33	0	32	0
LU2_7R	12	17	16	15
LU2_8R	0	32	22	24
LU2_9R	31	26	40	17
LU2_10R	25	11	28	22
LU3_1P	108	101	101	102
LU3_2P	60	81	68	79
LU3_3P	78	68	77	66
LU3_4P	78	60	87	82
LU3_5P	53	38	68	54
LU3_6R	79	57	65	66
LU3_7R	53	59	75	63
LU3_8R	32	22	40	45
LU3_9R	27	61	42	51
LU3_10R	90	52	88	77
RE2_1P	36	61	51	46
RE2_2P	108	43	108	57
RE2_3P	59	72	69	70
RE2_4P	68	51	71	64
RE2_5P	36	47	40	46
RE2_6R	113	72	135	80
RE2_7R	125	49	117	90
RE2_8R	43	42	110	64
RE2_9R	72	29	68	35
RE2_10R	84	50	85	53

Proovi_ID	0° [μm]	90° [μm]	180° [μm]	270° [μm]
RE3_1P	47	39	49	51
RE3_2P	10	26	17	33
RE3_3P	46	42	55	57
RE3_4P	21	61	27	55
RE3_5P	40	31	32	41
RE3_6R	126	47	126	72
RE3_7R	65	76	71	86
RE3_8R	87	73	72	73
RE3_9R	121	46	130	64
RE3_10R	85	67	78	69
RE4_1P	58	50	77	55
RE4_2P	33	54	36	43
RE4_3P	36	32	23	32
RE4_4P	30	129	18	114
RE4_5P	65	74	58	61
RE4_6R	35	57	23	73
RE4_7R	35	59	43	105
RE4_8R	61	64	66	76
RE4_9R	50	50	67	51
RE4_10R	54	36	52	51
RE5_1P	121	128	120	129
RE5_2P	27	27	28	23
RE5_3P	78	69	88	79
RE5_4P	126	117	114	122
RE5_5P	107	131	108	135
RE5_6R	65	51	57	50
RE5_7R	71	93	83	90
RE5_8R	89	91	77	91
RE5_9R	176	72	210	65
RE5_10R	96	110	90	118
VÄO1_1P	69	45	70	45
VÄO1_2P	55	50	32	48
VÄO1_3P	7	31	15	41
VÄO1_4P	63	40	65	75
VÄO1_5P	42	41	59	54
VÄO1_6R	56	48	72	37
VÄO1_7R	41	52	47	38
VÄO1_8R	83	43	93	76
VÄO1_9R	60	59	45	61
VÄO1_10R	61	59	55	138

Proovi_ID	0° [μm]	90° [μm]	180° [μm]	270° [μm]
VÄO2_1P	67	41	72	40
VÄO2_2P	50	36	48	48
VÄO2_3P	48	34	50	36
VÄO2_4P	59	126	78	115
VÄO2_5P	64	53	63	49
VÄO2_6R	51	48	46	31
VÄO2_7R	70	34	75	73
VÄO2_8R	38	68	71	69
VÄO2_9R	153	35	62	59
VÄO2_10R	111	133	112	144
VÄO3_1P	154	140	146	144
VÄO3_2P	112	52	117	110
VÄO3_3P	82	115	88	93
VÄO3_4P	121	88	120	101
VÄO3_5P	102	82	109	93
VÄO3_6R	115	107	95	109
VÄO3_7R	131	112	132	116
VÄO3_8R	110	109	112	102
VÄO3_9R	130	83	121	97
VÄO3_10R	111	115	113	116
VÄO4_1P	100	95	121	100
VÄO4_2P	61	95	82	87
VÄO4_3P	106	102	128	79
VÄO4_4P	109	126	122	138
VÄO4_5P	90	117	106	95
VÄO4_6R	128	123	127	128
VÄO4_7R	83	102	94	93
VÄO4_8R	133	125	148	133
VÄO4_9R	100	78	81	99
VÄO4_10R	112	118	117	110
VÄO5_1P	49	52	98	45
VÄO5_2P	69	70	82	73
VÄO5_3P	62	42	69	34
VÄO5_4P	53	36	50	28
VÄO5_5P	70	99	49	85
VÄO5_6R	40	42	38	56
VÄO5_7R	66	88	75	83
VÄO5_8R	112	75	82	106
VÄO5_9R	62	79	59	63
VÄO5_10R	124	78	134	84

Proovi_ID	0° [μm]	90° [μm]	180° [μm]	270° [μm]
VÄO6_1P	93	77	94	67
VÄO6_2P	67	61	69	42
VÄO6_3P	84	75	88	56
VÄO6_4P	74	84	85	72
VÄO6_5P	37	46	47	59
VÄO6_6R	154	150	171	121
VÄO6_7R	71	53	69	57
VÄO6_8R	68	99	74	96
VÄO6_9R	142	149	142	147
VÄO6_10R	108	102	153	103

Lisa 7. XRD analüüsi tulemused kihtide lõikes

Mineraal	LU1 YLD	LU2 YLD	LU3 YLD	RE2 YLD	RE3 YLD	RE4 YLD	RE5 YLD	VÄO1 YLD	VÄO2 YLD	VÄO3 YLD	VÄO4 YLD	VÄO5 YLD	VÄO6 YLD
Kvarts	2,1	4,6	0,9	4,8	2,0	1,4	0,6	8,8	2,8	1,5	2,5	2,3	1,9
Kaltsiit	2,4	0,3	93,6	81,6	80,8	30,4	0,0	71,2	83,7	0,5	61,8	79,6	86,8
Ortoklass	2,6	5,1	0,4	4,3	0,6	1,1	0,8	6,0	2,5	2,4	2,0	2,7	3,2
Dolomiit	92,9	89,9	5,1	9,3	16,7	67,1	98,5	13,4	11,0	95,6	33,7	6,8	4,0
Püriit	0,0	0,0	0,1				0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Götiit												3,1	0,0
Apatiit (CaF)												5,6	4,1

Mineraal	LU1 C	LU2 C	LU3 C	RE2 C	RE3 C	RE4 C	RE5 C	VÄO1 C	VÄO2 C	VÄO3 C	VÄO4 C	VÄO5 C	VÄO6 C
Kvarts	1,8	4,8	0,9	4,3	3,6	1,3	0,7	5,6	3,4	1,9	1,6	1,8	1,4
Kaltsiit	5,3	3,6	92,0	75,6	59,7	13,5	0,0	81,6	85,5	2,0	40,3	80,1	90,7
Ortoklass	2,4	4,0	0,7	3,2	1,9	1,2	0,2	4,5	2,8	2,5	2,2	3,2	1,6
Dolomiit	90,0	87,2	5,2	16,3	34,4	83,3	98,7	6,9	7,6	92,8	55,0	1,2	1,2
Püriit	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Götiit	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,0	5,1	0,0
Apatiit (CaF)	0,3	0,1	0,3	0,2	0,4	0,5	0,0	1,1	0,6	0,6	0,8	8,6	5,0

Lisa 8. XRF analüüsi tulemused kihtide lõikes

Proovi_ID	LOI (%)	SiO2 (%)	TiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na2O (%)	K2O (%)	P2O5 (%)	S (%)	Cl (%)
RM25 LU1 C	39,65	5,161	0,079	1,557	0,944	0,037	17,956	33,727	-0,003	0,672	0,011	0,013	0,02
RM25 LU1 YLD	42,38	5,676	0,087	1,485	1,019	0,036	17,541	30,855	0,013	0,749	0,011	0,013	0,022
RM25 LU2 C	41,02	10,506	0,148	2,482	1,085	0,026	16,194	26,22	0,015	1,316	0,014	0,037	0,03
RM25 LU2 YLD	39,2	10,523	0,149	2,537	1,204	0,019	16,709	27,24	0,024	1,357	0,011	0,105	0,022
RM25 LU3 C	44,69	1,249	0,016	0,292	0,756	0,007	0,993	49,861	0,008	0,162	0,002	0,532	0,018
RM25 LU3 YLD	42,71	1,369	0,021	0,316	0,171	0,007	1,228	53,449	0,007	0,177	0,002	0,026	0,024
RM25 RE2 C	46,83	5,921	0,075	1,161	0,529	0,012	2,561	41,704	0,012	0,718	0,006	0,082	0,014
RM25 RE2 YLD	39,48	6,936	0,084	1,405	0,617	0,013	2,906	47,46	0,008	0,759	0,006	0,091	0,014
RM25 RE3 C	42,89	6,049	0,053	1,089	0,398	0,024	6,878	41,796	0,024	0,566	0,013	0,094	0,018
RM25 RE3 YLD	42,45	2,65	0,025	0,487	0,221	0,023	3,319	49,984	0,014	0,263	0,013	0,074	0,016
RM25 RE4 C	39,38	1,96	0,019	0,381	0,796	0,032	17,702	38,936	0,009	0,199	0,006	0,122	0,031
RM25 RE4 YLD	43,56	2,604	0,028	0,583	0,742	0,025	12,931	38,663	0,01	0,293	0,005	0,14	0,035
RM25 RE5 C	41,53	0,929	0,007	0,161	0,582	0,107	23,321	33,345	-0,003	0,09	0,007	0,024	0,113
RM25 RE5 YLD	46,75	0,537	0,005	0,1	0,561	0,106	21,019	30,698	0,01	0,059	0,011	0,019	0,131
RM25 VÄO1 C	35,54	11,071	0,166	2,534	1,355	0,086	1,457	44,392	0,033	1,435	0,369	0,4308	0,014
RM25 VÄO1 YLD	33,11	16,02	0,233	3,77	1,854	0,081	2,381	39,446	0,035	1,96	0,1	0,244	0,017
RM25 VÄO2 C	39,26	6,753	0,11	1,725	0,884	0,064	1,463	48,474	0,02	0,922	0,133	0,052	0,017
RM25 VÄO2 YLD	39,83	5,649	0,087	1,356	0,915	0,075	2,059	48,372	0,018	0,741	0,229	0,064	0,018
RM25 VÄO3 C	41,29	4,96	0,095	1,394	3,605	0,287	16,125	30,097	0,004	0,786	0,127	0,3984	0,034
RM25 VÄO3 YLD	42,44	4,528	0,084	1,26	3,051	0,293	16,426	30,811	0,002	0,685	0,118	0,055	0,038
RM25 VÄO4 C	41,59	4,563	0,07	1,353	2,2	0,222	8,829	40,435	0,019	0,657	0,206	0,028	0,027
RM25 VÄO4 YLD	40,69	4,672	0,084	1,295	1,573	0,163	5,119	45,29	0,019	0,726	0,504	0,027	0,021
RM25 VÄO5 C	34,41	6,412	0,157	2,047	5,281	0,118	0,702	46,335	0,048	1,086	2,996	0,041	0,017
RM25 VÄO5 YLD	36,62	5,692	0,133	1,774	4,194	0,123	1,32	47,111	0,03	0,934	1,781	0,048	0,015
RM25 VÄO6 C	38,87	3,661	0,07	1,037	1,019	0,132	0,57	51,756	0,02	0,622	1,921	0,088	0,018
RM25 VÄO6 YLD	38,58	5,482	0,096	1,586	1,059	0,115	0,87	49,772	0,024	0,987	1,264	0,055	0,016

Reet Männik, Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite omadused

Proovi_ID	Ba											
	As (PPM)	(PPM)	Br (PPM)	Ce (PPM)	Co (PPM)	Cr (PPM)	Cu (PPM)	F (%)	Ga (PPM)	La (PPM)	Mo (PPM)	Nb (PPM)
RM25 LU1 C	0	17,3	2,1	11,8	0	5,4	4,4	0,068	3,4	7	2,2	3,1
RM25 LU1 YLD	0	16,5	1	0	0	6,7	3,1	0,078	1,9	5,2	2,1	2,3
RM25 LU2 C	1,4	48,4	2,3	9,9	1,6	14,3	5,2	0,084	3,8	10,6	1,3	3,8
RM25 LU2 YLD	0,4	47	3,1	29,3	0,4	15,6	5,3	0,089	2,1	9,8	0,2	2,7
RM25 LU3 C	1,3	0	1,1	6,5	0	0	4,9	0,02	2,7	0,4	4,1	1,4
RM25 LU3 YLD	0	0	1,5	0	0	0	5,1	0,027	3,6	3,2	2,5	1,6
RM25 RE2 C	2,3	8,7	2,2	0	2,6	3,6	3,9	0,048	1,4	1,3	2,4	1,1
RM25 RE2 YLD	0,7	18,3	2,2	3	4,8	6	9,5	0,054	1,8	7,1	4,4	1,7
RM25 RE3 C	0	8,2	1,4	5,4	3,7	3,5	4,6	0,075	0,2	12,8	3,2	2,5
RM25 RE3 YLD	0	0	0,4	8,8	2	2,4	8,8	0,045	3,1	7,3	3,6	1,4
RM25 RE4 C	0,6	0	2,3	15,4	3,9	2,1	7,2	0,032	1,8	2,3	3,7	0,5
RM25 RE4 YLD	0,1	0	3,9	0	13,7	3,4	4,4	0,053	1,5	0	2,6	1,7
RM25 RE5 C	1	0	18,5	0,8	14,6	0,3	6,9	0,031	0,6	0,2	2,5	1,4
RM25 RE5 YLD	1,1	0	21,3	0	11,3	0	4,2	0,026	1,7	0	2,8	0,9
RM25 VÄO1 C	4,8	46,7	2,1	21,5	0	12,2	9,8	0,098	3,7	5,5	2,2	4,1
RM25 VÄO1 YLD	6,1	69,8	2,5	22,1	4,9	20,6	7,6	0,078	5,8	13,6	2,6	4,5
RM25 VÄO2 C	0	1,6	1,7	11,6	0	10,3	8,8	0,056	4,1	6	2,9	1,9
RM25 VÄO2 YLD	1,6	4,5	1,7	16,6	8,6	7	6,5	0,072	4,1	1,4	3,1	1,4
RM25 VÄO3 C	1,3	18	3	17,5	1,4	8,4	7,1	0,059	2,9	12,5	2,6	3
RM25 VÄO3 YLD	0,3	24,4	3,3	20,1	2,8	8,8	6,6	0,03	1,3	14,2	1,8	1,7
RM25 VÄO4 C	0,2	9,8	2,8	9,9	0	3,8	10,6	0,062	2,3	6,3	2	1,5
RM25 VÄO4 YLD	0,6	13,8	3,2	17,4	0,7	5,6	10	0,103	0,1	12,9	4,1	2,4
RM25 VÄO5 C	9,7	35,2	2,1	44,6	3,6	31,7	8,8	0,474	3,6	23,5	2	5,5
RM25 VÄO5 YLD	6,5	24,3	4,1	34,1	0	21,2	11,7	0,277	1,1	17,5	1,6	4
RM25 VÄO6 C	3,8	3,7	1,5	35	0,6	3	9,4	0,285	3,2	28,2	4,1	1,8
RM25 VÄO6 YLD	4,1	10,8	1,6	23,2	10	5,7	7,8	0,197	1,7	19,7	1,6	1,6

Reet Männik, Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite omadused

Proovi_ID	Ni (PPM)	Pb (PPM)	Rb (PPM)	Se (PPM)	Sr (PPM)	Th (PPM)	U (PPM)	V (PPM)	W (PPM)	Y (PPM)	Zn (PPM)	Zr (PPM)
RM25 LU1 C	2,7	2,7	18,6	0,7	57,3	4,1	4,7	7,8	38,2	4,8	7	16,7
RM25 LU1 YLD	2,3	3,7	18,1	0	52,5	4,7	0	10,4	33,8	4,9	7,6	18,2
RM25 LU2 C	3,5	0	28,5	0	82,6	5	1,9	14,2	55,1	6,5	13,6	35,7
RM25 LU2 YLD	5,2	1,2	29,7	0,8	115,7	3,5	1,3	11,8	34,1	7,1	13,6	34,1
RM25 LU3 C	0,4	0,9	3,2	0	146,3	3,8	0	2,7	46,2	4,1	1,1	1,2
RM25 LU3 YLD	0	7	5,2	0	153,8	6,5	0,2	2,6	53,7	2,8	3	2,7
RM25 RE2 C	5,5	0	14,8	0	144,5	0,3	5,3	6,4	47,2	7,2	6,5	18,2
RM25 RE2 YLD	4,7	3,4	15,6	0	164	5,6	1,1	8,9	52,5	7,1	9,1	18,4
RM25 RE3 C	2	5,3	10,9	0	275,8	3,1	0	6,8	37	4,4	5,7	11,8
RM25 RE3 YLD	2,3	1,1	5,5	1,1	316	4,6	0,7	0,5	53,9	2,9	5,7	2,7
RM25 RE4 C	1,9	10,5	5,8	0,3	85	3,9	5,4	1,4	54	3,8	19,9	4,2
RM25 RE4 YLD	4,5	5,7	5,9	0,6	96,6	2,1	1,6	1,9	48,8	4,6	31,6	6,7
RM25 RE5 C	3,8	14,1	3,6	0	46,3	2,4	1,8	8,2	61	1,9	81,7	2,4
RM25 RE5 YLD	0,5	1,6	1,4	0	48,2	3	0	7,5	45,9	4,1	86,4	1,4
RM25 VÄO1 C	8	5,8	26,9	0	194,4	5,6	1,6	14	45,7	13	9,5	38,3
RM25 VÄO1 YLD	6,5	6,3	40,4	0	164	7,8	0	23,1	49,9	10,8	11,6	62,5
RM25 VÄO2 C	2,1	7	19,1	0	177,5	9	4	9,4	35,5	9,4	4,5	22,1
RM25 VÄO2 YLD	2	5,1	14,1	0	169,9	4,2	1,6	6,5	46,5	10,7	6,5	19,3
RM25 VÄO3 C	2,7	0,5	14,9	0,3	61,4	3,6	5	8,8	49,4	14,5	5,2	21,3
RM25 VÄO3 YLD	5,7	0	13,5	0,5	63,4	2,1	3,6	6,8	48,8	14,6	8,4	16,6
RM25 VÄO4 C	1,2	1	14	0,4	107,1	4,7	5,3	6	34,9	12,4	3,4	11,9
RM25 VÄO4 YLD	7,8	2,9	12,2	0	137,3	2,9	0,3	7,3	50,6	16,1	5,4	15,3
RM25 VÄO5 C	3,6	7,3	20,7	0,4	268,7	8,6	15,8	66,1	45,5	50,8	10,9	22,5
RM25 VÄO5 YLD	7,5	9,3	17,8	0	251,9	8,7	6,5	41,4	55,5	44,9	10,6	21,8
RM25 VÄO6 C	8	8	12,9	1,3	239	12,5	7,6	9,8	56,6	50,1	9,2	8,2
RM25 VÄO6 YLD	7	2,5	16,8	0	242,9	5,9	8,9	15,3	43,9	29,2	6,5	16,3

Lisa 9. UH Mõõtetulemused

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	Lainekiirus [m/s]	Poissoni tegur
RM25_LU1_1V_UCS	LU1	V	2517	0,2
RM25_LU1_2V_UCS	LU1	V	4067	0,17
RM25_LU1_3H_UCS	LU1	H	4067	0,05
RM25_LU1_4H_UCS	LU1	H	2541	0,12
RM25_LU1_5D_UCS	LU1	D	4037	0,22
RM25_LU1_6D_UCS	LU1	D	2375	0,23
RM25_LU2_1H_UCS	LU2	H	2319	0,23
RM25_LU2_2H_UCS	LU2	H	2364	0,21
RM25_LU2_3V_UCS	LU2	V	2064	0,23
RM25_LU2_4V_UCS	LU2	V	2000	0,23
RM25_LU2_5D_UCS	LU2	D	2385	0,23
RM25_LU2_6D_UCS	LU2	D	2266	0,26
RM25_LU3_2V_UCS	LU3	V	3597	0,13
RM25_LU3_6H_UCS	LU3	H	3733	0,18
RM25_LU3_7H_UCS	LU3	H	3993	0,13
RM25_LU3_8D_UCS	LU3	D	4007	0,07
RM25_LU3_9D_UCS	LU3	D	4037	0,02
RM25_RE2_1V_UCS	RE2	V	3494	0,22
RM25_RE2_2V_UCS	RE2	V	3293	0,23
RM25_RE2_3H_UCS	RE2	H	3028	0,37
RM25_RE2_4H_UCS	RE2	H	3274	0,32
RM25_RE2_5D_UCS	RE2	D	3621	0,1
RM25_RE2_7D_UCS	RE2	D	3313	0,24
RM25_RE3_1V_UCS	RE3	V	2995	0,31
RM25_RE3_2V_UCS	RE3	V	2678	0,36
RM25_RE3_3H_UCS	RE3	H	3759	0,26
RM25_RE3_4H_UCS	RE3	H	3494	0,27
RM25_RE3_5D_UCS	RE3	D	3759	0,14
RM25_RE3_6D_UCS	RE3	D	4037	0,2
RM25_RE4_1V_UCS	RE4	V	3053	0,12
RM25_RE4_2V_UCS	RE4	V	3206	0,03
RM25_RE4_3H_UCS	RE4	H	3313	0,11
RM25_RE4_5D_UCS	RE4	D	3293	0,1
RM25_RE4_6D_UCS	RE4	D	3550	0,03
RM25_RE5_1H_UCS	RE5	H	3707	0,12
RM25_RE5_2D_UCS	RE5	D	3621	0,15
RM25_RE5_3D_UCS	RE5	D	3528	0,17
RM25_RE5_4V_UCS	RE5	V	3385	0,17
RM25_RE5_5V_UCS	RE5	V	3645	0,14
RM25_VÄO1_10H_UCS	VÄO1	H	2471	0,27
RM25_VÄO1_11D_UCS	VÄO1	D	2720	0,06
RM25_VÄO1_12D_UCS	VÄO1	D	2374	0,23
RM25_VÄO1_2D_UCS	VÄO1	D	4444	0,21

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	Lainekiirus [m/s]	Poissoni tegur
RM25_VÄO1_4V_UCS	VÄO1	V	3661	0,16
RM25_VÄO1_5V_UCS	VÄO1	V	3600	0,15
RM25_VÄO1_6V_UCS	VÄO1	V	2250	0,17
RM25_VÄO1_7H_UCS	VÄO1	H	2313	0,3
RM25_VÄO1_8H_UCS	VÄO1	H	4481	0,15
RM25_VÄO1_9H_UCS	VÄO1	H	2395	0,28
RM25_VÄO2_10D_UCS	VÄO2	D	2673	0,33
RM25_VÄO2_1V_UCS_1:1	VÄO2	V	2045	0,41
RM25_VÄO2_2V_UCS	VÄO2	V	2707	0,3
RM25_VÄO2_3V_UCS	VÄO2	V	3418	0,12
RM25_VÄO2_4H_UCS_1:1	VÄO2	H	1677	0,45
RM25_VÄO2_5H_UCS	VÄO2	H	2443	0,36
RM25_VÄO2_6H_UCS_1:1	VÄO2	H	1978	0,43
RM25_VÄO2_7D_UCS	VÄO2	D	5268	0,28
RM25_VÄO2_9D_UCS	VÄO2	D	3233	0,14
RM25_VÄO2_9D_UCS_1:1	VÄO2	D	5573	0,39
RM25_VÄO3_12D_UCS_1:1	VÄO3	D	2778	0,43
RM25_VÄO3_14D_UCS_1:1	VÄO3	D	2571	0,35
RM25_VÄO3_15D_UCS_1:1	VÄO3	D	2195	0,41
RM25_VÄO3_16D_UCS	VÄO3	D	3473	0,26
RM25_VÄO3_17H_UCS	VÄO3	H	3018	0,34
RM25_VÄO3_18H_UCS	VÄO3	H	3600	0,28
RM25_VÄO3_1V_UCS	VÄO3	V	2805	0,36
RM25_VÄO3_2V_UCS_1:1	VÄO3	V	2842	0,36
RM25_VÄO3_3V_UCS	VÄO3	V	3450	0,27
RM25_VÄO3_5H_UCS_1:1	VÄO3	H	2278	0,44
RM25_VÄO3_8D_UCS_1:1	VÄO3	D	6506	0,39
RM25_VÄO3_9D_UCS_1:1	VÄO3	D	2755	0,38
RM25_VÄO4_1V_UCS	VÄO4	V	2959	0,29
RM25_VÄO4_2V_UCS	VÄO4	V	3600	0,11
RM25_VÄO4_3V_UCS	VÄO4	V	3176	0,32
RM25_VÄO4_4D_UCS	VÄO4	D	3283	0,32
RM25_VÄO4_5D_UCS	VÄO4	D	3224	0,32
RM25_VÄO4_6D_UCS	VÄO4	D	3214	0,32
RM25_VÄO4_7H_UCS	VÄO4	H	3176	0,36
RM25_VÄO4_8H_UCS	VÄO4	H	3699	0,27
RM25_VÄO4_8H_UCS_1:1	VÄO4	H	2213	0,45
RM25_VÄO4_9H_UCS	VÄO4	H	3140	0,34
RM25_VÄO5_1D_UCS	VÄO5	D	2919	0,29
RM25_VÄO5_1D_UCS_1:1	VÄO5	D	2231	0,44
RM25_VÄO5_2D_UCS	VÄO5	D	3263	0,2
RM25_VÄO5_3H_UCS	VÄO5	H	3354	0,15
RM25_VÄO5_4H_UCS	VÄO5	H	3095	0,2

Proovikeha_ID	Kihi nimi	Suund	Lainekiirus [m/s]	Poissoni tegur
RM25_VÄO5_5H_UCS	VÄO5	H	3176	0,21
RM25_VÄO5_6V_UCS	VÄO5	V	2880	0,32
RM25_VÄO5_7V_UCS	VÄO5	V	2835	0,3
RM25_VÄO5_8V_UCS_1:1	VÄO5	V	2500	0,41
RM25_VÄO6_10H_UCS	VÄO6	H	2707	0,37
RM25_VÄO6_12D_UCS	VÄO6	D	4122	0,14
RM25_VÄO6_13D_UCS	VÄO6	D	4060	0,13
RM25_VÄO6_14D_UCS	VÄO6	D	3899	0,14
RM25_VÄO6_1V_UCS	VÄO6	V	3699	0,25
RM25_VÄO6_3V_UCS	VÄO6	V	3121	0,35
RM25_VÄO6_4V_UCS	VÄO6	V	3263	0,34
RM25_VÄO6_5H_UCS_1:1a	VÄO6	H	2278	0,45
RM25_VÄO6_5H_UCS_1:1b	VÄO6	H	2250	0,46
RM25_VÄO6_5H_UCS_1:1c	VÄO6	H	2859	0,43
RM25_VÄO6_6H_UCS	VÄO6	H	3025	0,34
RM25_VÄO6_7H_UCS_1:1	VÄO6	H	2755	0,43
RM25_VÄO6_8D_UCS	VÄO6	D	2936	0,31

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Reet Männik

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite kivimmehaanilised omadused ja nende varieeruvus“, mille juhendaja on Bruno Grafe,
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

25.05.2026

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.