



Lubjakivi abrasiivsuse võrdlus LCPC ja CERCHAR meetodil erinevatel niiskusesisaldustel

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Aleksandra Altmets

Üliõpilaskood: 233049LARB

Juhendaja: Sander Kanter, Geoloogia instituut, lektor

Kaasjuhendaja: Siim Roov, Geoloogia instituut, tehnik

Õppekava: Maa süsteemid, kliima ja tehnoloogiad

Autorideklaratsioon

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

Autor: Aleksandra Altmets

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Sander Kanter

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Annotatsioon	5
Abstract.....	6
Kasutatud lühendite loetelu.....	7
1. Sissejuhatus	9
2. Kirjanduslik ülevaade	10
2.1 CERCHAR meetod	10
2.1.1 CERCHAR katseseade	11
2.1.2 Nõel	11
2.1.3 Kivimipala.....	12
2.1.4 Katse läbiviimine	12
2.1.5 Nõela kulumise mõõtmine	13
2.1.6 Arvutus.....	14
2.1.6.1 Arvutus saetud pinnalt võetud tulemustega.....	15
2.1.7 Klassifikatsioon.....	15
2.2 LCPC	15
2.2.1 Katseseade.....	16
2.2.2 Katse ettevalmistus.....	16
2.2.3 Katse läbiviimine	17
2.2.4 Tuletatud omadused ja klassifikatsioon	17
2.2.4.1 LCPC abrasiivsuse koefitsient	17
2.2.4.2 LBC ehk <i>LCPC Breakability Coefficient</i>	18
2.3 Rosiwal, XRF ja XRD	19
2.4 Niiskusesisaldus.....	20
3. Uuringuala tutvustus.....	22
4. Andmed ja meetodika	24
4.1 LCPC katse	24
4.2 CERCHAR katse	24
4.3 Niiskusesisaldus.....	25
5. Tulemused	26
6. Arutelu ja järeldused.....	27
6.1 LCPC	27
6.2 CERCHAR	27
Kokkuvõte.....	29
Tänuavaldused.....	30

Kasutatud kirjandus.....	31
LISA 1 Näited kulumisest masinatel.....	33

Annotatsioon

Abrasiivsus on oluline parameeter, millega peab maavarade raimamisel arvestama, sest see on mõjuv tegur kivimiga kontaktis oleva tööorgani eluaja määramisel ja eelarve kujundamisel.

Käesolevas töös määratakse Väo V lubjakivikarjääril Rebala kihistikust pärineva lubjakivi abrasiivsus LCPC ja CERCHAR meetoditel. Abrasiivsuse määramist tehakse kolmel erineval niiskusesisaldusel:

- otse ahjust kuivana;
- otse veest ilma kuivatamata;
- veest võetult, aga kuivanud seni kuni pindmiselt niiske ei ole.

LCPC tulemuste hüpoteesiks on, et niiskusesisalduse suurenemisel, suureneb ka abrasiivsus, sest tekib segu, mis nõuab impellerilt rohkem tööd. CERCHAR tulemused, aga vähenevad ning vett sisaldavad proovid moodustavad potentsiaalselt 80% kuiva proovi väärtusest. Eestist pärineva lubjakiviga pole seda varem katsetatud ehk hüpoteesid põhinevad, vaid välismaa uuringute põhjal, kus lubjakivi ei ole samasugune nagu Eestis.

Katsetulemused näitasid, et LCPC suurused kasvasid veekoguse suurenedes ning CERCHAR tulemused vähenesid. Kuna CERCHAR katsed olid tehtud kivimi loomulikule murdepinnale ja olid oluliselt väiksemad, kui saetud pinnal tehtud katsed, siis oleksid edasised uuringud vajalikud, kui nende andmetega on soov edasisi töid teostada.

Abstract

Abrasivity is an important parameter for estimating tool wear in rock excavation, as it determines the life expectancy of tools and the project budget.

In this thesis paper, the abrasivity of limestone from the Rebala formation of the Vão V limestone quarry is determined using the LCPC and CERCHAR methods. The abrasivity is determined at three different moisture contents:

- directly from the oven dry;
- directly from water without drying;
- taken from water, but dried until it is not wet on the surface.

The LCPC results hypothesis is that as moisture content increases, abrasivity also increases because a more viscous mixture is created that requires more work from the impeller. The CERCHAR results, however, decrease, and samples containing water potentially account for 80% of the value of the dry sample. This has not been tested with limestone from Estonia before, so the hypotheses are based only on foreign studies, where the composition of limestone is not the same as that in Estonia.

The test results showed that LCPC sizes increased with increasing water content, and CERCHAR results decreased. Since the CERCHAR tests were performed on the natural fracture surface of the rock and were significantly smaller than those performed on the sawn surface, additional studies would be necessary if further work is desired with this data.

Jooniste loetelu

Joonis 1. Kahe katseseadme peamised mehhanismid. Vasakul, tüüp 1, originaal disainiga CERCHAR katseseade. Paremalt, tüüp 2, modifitseeritud CERCHAR katseseade. 1 raskus, 2 nõela kinnituspadrün, 3 nõel, 4 katsekeha, 5 kruustangid, 6 kang.....	11
Joonis 2. CERCHARI nõel.	12
Joonis 3. Mõõtmise külgvaates (a) ja pealtvaates (b,c). Meetodid näidatud (a) ja (b) pildil on soovitatud optilisteks mõõtmisteks ja (c) digitaalseks.....	13
Joonis 4. Külgvaade õigesti mõõdetud kulumispikkusest (a) ja pealtvaates ülehinnatud mõõtmise kulumispikkusest (b).	13
Joonis 5. Standardsed kulumisprofiilid (a,b), ebastandardne profiil (c), kus katset peab kordama.	14
Joonis 6. LCPC abrasiivsuse määramise katseseade. 1- mootor, 2- metallist impeller, 3- uhmer, 4- täitmislehter.	16
Joonis 7. Impellerid enne ja pärast LCPC katset. 1- kasutamata impeller, 2- lubjakivi (mitte abrasiivne), 3- kvartsirikas liivakivi (abrasiivne/väga abrasiivne), 4- dioriit (väga abrasiivne), 5- kvarts kvarsti soonest.....	17
Joonis 8. Korrelatsioon LCPC ja CAI tulemuste vahel kasutades Büchi et al (1995) tulemusi ja Thuro & Käsling 2009 tulemusi.	18
Joonis 9. LCPC katsete tulemused olenevalt niiskusesisaldusest.....	20
Joonis 10. Läbilõige puursüdamikust, kus Vão1-Vão6 tähistavad erinevate proovide asukohti. Antud töös kasutatud proovid on Vão4.	23
Joonis 11. Pilt kuiva proovi nõelast.....	25
Joonis 12. LCPC ja niiskusesisalduse suhte graafik.	27
Joonis 13. CAI ja niiskusesisalduse suhe.	28

Kasutatud lühendite loetelu

LCPC- *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

CERCHAR- *Centre d'Etudes et Recherches des Charbonages de France*

SAT- *Soil abrasivity test*

RIAT- *Rolling Indentation Abrasion Test*

RSAI- *Rock and Soil Abrasivity Index*

AGH- AGH ülikooli poolt väljatöötatud katse abrasiivsuse määramiseks

NTNU- *Norwegian University of Science and Technology*

EQC- *Equivalent Quartz Content*

XRF- Röntgenfluorestsents

XRD- Röntgenkiirte difraktsioon

HRC- *Hardness Rockwell C*

ISRM- *International Society for Rock Mechanics*

LAC- *LCPC Abrasivity Coefficient*

LBC- *LCPC Breakability Coefficient*

CAI- *Cerchar Abrasivity Index*

1. Sissejuhatus

Kivimid on kirjeldatavad erinevate omaduste ja tunnustega. Enamik tunnuseid saab jagada kahte rühma: omadused, mis kirjeldavad kivimi väliseid omadusi nagu värvus, struktuur ning omadused, mis iseloomustavad kivimi sisemust ja piire, näiteks tõmbetugevus, sitkus. Teise grupi omadused on füüsikalised-keemilised parameetrid ning nende hulka kuuluvad ka abrasiivsust määravad parameetrid (EBSCO, 2022).

Eesti keeles on tegemist ühe terminiga, „abrasiivsus“, aga ingliskeelsetes tekstides on tihti segamini terminid *abrasivity* ja *abrasiveness*. *Abrasiveness* võib olla defineeritud kui looduslike ja tehismaterjalide vastuvõtlikkus kulumisele/abrasiivsusele (*abrasivity*). Saab öelda, et *abrasiveness* näitab, kui palju materjali kulub. *Abrasivity* defineeritakse kui kivimite (mineraalide) omadust kulutada teisi materjale nendega kokkupuutel, peamiselt metalle, aga tingimata mitte. Paljudes töödes käsitletakse neid kui samu termineid, aga osades kui eelnevalt väljatoodud definitsioonide poolt erinevate mõistetena. Kirjutatud töös peetakse silmas abrasiivsuse all *abrasivity*'t (Mucha, 2023).

Abrasiivsuse määravad kivimi mehaanilised omadused, aga ka kvartsi sisaldus kivimis. Seepärast on sellega oluline arvestada, sest erinevates piirkondades maailmas need tunnused erinevad, olenemata sellest, et tegemist võib olla sama kivimitüübiga. Käesolevas töös käsitletakse lubjakivi, mille abrasiivsus võib ulatuda kuni 2,31 CAI (Külekiçi & Yurtsever, 2025).

Kivimite abrasiivsus on oluline parameeter kivimite raimamisel, sest see mõjutab kivimiga kontaktis olevat tööorgani ja sellest tulenevalt mõjutab abrasiivsus tööorgani eluaega ja eelarvet tööorgani asendamisel või parandamisel. Näitena saab tuua tunnelite rajamise läbinduskiilbiga (TBM), mida kasutatakse maailmas 60% tunnelite rajamiseks. Varasemad uuringud on näidanud, et kui löökenergia on kõvade kivimite läbindamisel liialt suur, siis toimub väga kiire kulumine. Isegi kui tööorgani pidev vahetus toimub, siis väheneb päevase läbinduse pikkus ning seega suureneb nii aja kui ka rahaline kulu tunneline tegemisel. Kuni 20% projekti rahastusest võib minna lõiketerade asendamiseks ning ajaliselt võib selleks kuluda umbes 30% projekti kogu ekskaveerimise ajast (Gao jt., 2024).

Bakalaureusetöö „Lubjakivi abrasiivsuse võrdlus LCPC ja CERCHAR meetodil erinevatel niiskusesisaldustel“ eesmärgiks on võrrelda kahe erineva abrasiivsuse määramise meetodit erinevatel niiskusetasemetel, et näha kas tulemused langevad kokku hüpoteesidega. Katsed tehti lubjakiviga, mis pärinev Väo V lubjakivikarjäärist.

2. Kirjanduslik ülevaade

Abrasiivsus on kõige korreleeruvam omadus kivimil, mis määrab töömasinate kulumise (Piazzetta jt, 2018). Kontakt kivimi ja metalli vahel toimub: kaevamisel (tööorganid kaevamisel nagu kopp), tunnelite läbindamisel (läbinduskilp, edasipidi TBM), puuraukude puurimisel, kaevise laadimisel ning kaevise transportimisel (konveierid), lisa 1. Samuti on abrasiivsel materjalil mõju ka töötlemises ja rikastamises kasutatavatel masinatel (Mucha, 2023).

Abrasiivsuse määramist saab West'i (1981) klassifitseerimise järgi teha laboratoorsete katsetega või kivimi petrograafia põhjal. Meetodid, mis kasutavad kivimi petrograafilist koostist on näiteks:

- Mohsi skaala;
- Rosiwali meetod;
- räni (Si) sisaldus;
- Shimazek;
- kvartsi protsentuaalne sisaldus;
- EQC;
- terasuurus (Piazzetta jt, 2018).

Laboratoorsed katsed on, aga näiteks:

- CERCHAR'i katse;
- LCPC;
- SAT;
- RIAT;
- RSAI;
- AGH;
- *modified Schmidt hammer test*;
- NTNU (Mucha, 2023; Piazzetta jt, 2018).

Kõige levinum meetod abrasiivsuse määramiseks on CERCHAR meetod, see on laialdaselt levinud ning rahvusvaheliselt mitme autori (Suana & Peters 1982, Atkinson 1986, West 1986, Kasling & Thuro 2010, Fowel & Abu Bakar 2007, Rostami jt 2014, Alber jt 2014) poolt loetud usaldusväärseks meetodiks abrasiivsuse määramisel (Piazzetta jt, 2018). Aga laialdaselt on hinnatud ka LCPC meetod (Kaesling & Thuro, 2010). Siinses töös on kasutatud CERCHAR ja LCPC meetodeid abrasiivsuse määramiseks. Samuti on väljatoodud samade proovide Rosiwali, XRD, XRF tulemused, mis pärinevad Reet Männiku magistritööst „Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite kivimmehaanilised omadused ja nende varieeruvus“.

2.1 CERCHAR meetod

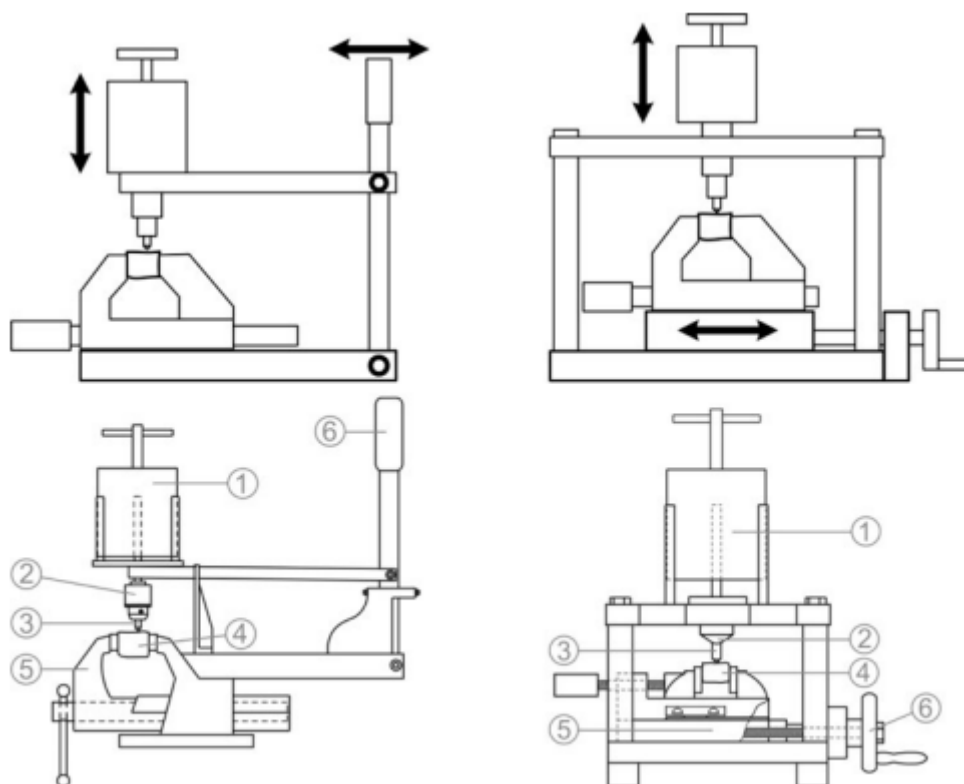
CERCHAR abrasiivsuse test töötati välja 1970ndatel aastatel *Centre d'Etudes et Recherches des Charbonages (CERCHAR) de France* poolt sütt sisaldavate kivimite jaoks. Hiljem, 1989. aastal, töötati välja modifitseeritud versioon. Kivimi abrasiivsus on väljendatud selle meetodi puhul CAI ehk CERCHAR abrasiivsuse indeksina (*Cerchar abrasivity index*). See meetod on määratud kahe standardi järgi, AFNOR NF P 94-430-1 (2000) ja ASTM D7625-10 (2010) (Alber jt, 2014).

Katsemeetod määrab ära kulumise nõela otsal, mille Rockwelli kõvadus on HRC 55. Esmalt paigutatakse kivimipala katseseadme lõugade vahele, kinnitatakse ning ettevaatlikult langetatakse nõel vastu kivimit. Nõel asetseb kivimipalal ning sellele mõjub ülevalt alla 70N jõud ja külgsuunas

eraldi jõudu ei rakendata. Seejärel liigutatakse nõela, umbes 70N jõuga, 10,0 mm kivimipinnal. Nõela otsa mõõdetakse 0,01mm täpsusega, et kulunud osa väärtusest arvutada välja CAI. Katset korratakse minimaalselt viis korda ühel kivipalal (Alber jt, 2014).

2.1.1 CERCHAR katseseade

Katseseadmehel on olemas kaks fundamentaalselt erinevat viisi, kuidas nõela ja kivimi vahelised liikumised toimuvad. Originaalil liikusid nõel ja raskus koos mööda seisvat kivimipala, kujutatud Joonis 1. Westi modifitseeritud versioonis liigub kivimipala ning seisavad nõel ja raskus. Erinevate disainide vahe seisneb ajakulus, mis katse tegemisele läheb. Algne versioon kulutab kordades vähem aega, kui Westi versioonis (Alber jt, 2014).



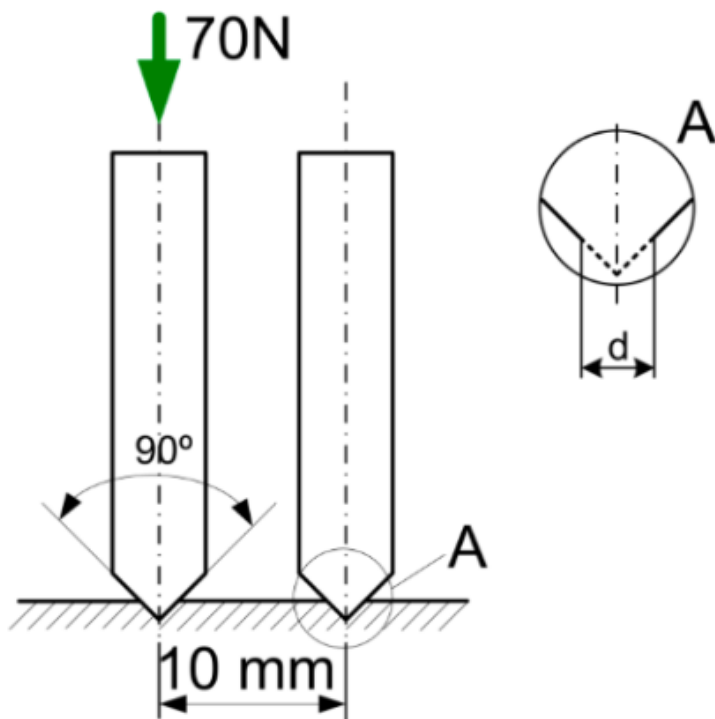
Joonis 1. Kahe katseseadme peamised mehhanismid. Vasakul, tüüp 1, originaal disainiga CERCHAR katseseade. Paremalt, tüüp 2, modifitseeritud CERCHAR katseseade. 1 raskus, 2 nõela kinnituspadrun, 3 nõel, 4 katsekeha, 5 kruustangid, 6 kang. (Alber jt, 2014)

Mõlemad seadmed hoiavad kivimipala paigal, sest proovi liikumise minimeerimine on katse sooritamise ajal väga oluline. Kui kivimipala on stabiilselt kinnitatud, siis asetatakse nõel (*stylus*) ettevaatlikult kivimipalale ning olenemata katseseadme tüübist tehakse 10,0 mm pikkune tõmme. Esimest tüüpi seadmega, algse disainiga, peaks katse kestma 1 ± 0.5 s ning hilisema disainiga 10 ± 2 s (Alber jt, 2014).

2.1.2 Nõel

CERCHAR nõel peaks soovitatavalt olema valmistatud standardsest kroom-vanaadium terasest (Cr-V), mis on noolutatud kindla kõvaduseni. Soovitatavalt peaksid nõelad olema noolutatud kõvadusega $HRC 55 \pm 1$. Valmistamise käigus ei pruugi kõik nõelad seda kõvadust saavutada ning

väärtused, mis ületavad $HRC 55 \pm 1$, ei tohiks kasutusse minna (Alber jt, 2014). Nõela diameeter peab olema vähemalt 6mm ning pikkus piisav, et nõela kinnituspadruni ja kivimipala vahel oleks vähemalt 15mm. Nõela ots on koonuse kujuga ning 90 kraadi, näidatud Joonis 2. Peale igat katset tuleb nõelad teritada ja otsa kraadi mikroskoobi all kontrollida (Alber jt, 2014).



Joonis 2. CERCHARI nõel. (Mucha, 2023)

2.1.3 Kivimipala

Katsekeha võib olla ringikujuline või kujult ebakorrapärane. Soovitav on katsetada loomulikku murdepinda, aga alternatiivina võib ka saetud pinnal katsetada. Katsekeha võib olla veega küllastunud, loomuliku niiskustasemega, õhukäes kuivanud või ahjus kuivatatud. Nõelaga katsetamispiirkond ei tohiks sisaldada silmaga nähtavaid poore, aga terasuurus suurt rolli ei mängi. Küll aga katsekehade puhul, mille terasuurus ületab 2 mm on soovitatav suurendada katsekordusi, kuna nõelaga ületõmmatav piirkond võib olla domineeritud ühe mineraali poolt ning viiest „kriipsust“ ei piisa adekvaatseks ülevaateks. Katsekeha peab olema piisavalt suur, et oleks võimalik vähemalt viis katset, mis asuvad äärest vähemalt 5 mm kaugusel ning iga katse vahel peab olema vähemalt 5 mm pikkune vahe. Katsekehadel, kus esineb anisotroopsus, on vaja teha katsed mõlemas suunas. Minimaalselt viis katset risti ja viis katset piki. Katse asukoht katsekehal tuleb valida makroskoopiliste tunnuste järgi, et domineerivad mineraloogilised ja struktuurilised omadused oleks representeeritud tulemustes (Alber jt, 2014).

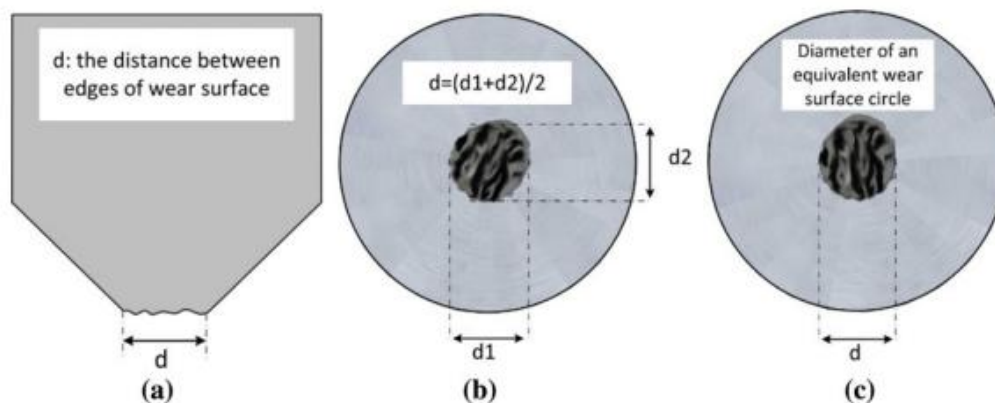
2.1.4 Katse läbiviimine

Katse läbiviimine algab nõela ja katseseadme kontrollist. Seejärel kinnitatakse katsekeha paika ning veendutakse, et see on kinni piisavalt tugevalt, et vältida liikumist. Järgmiseks määratakse katsetuspiirkond nii, et see vastaks nõuetele ja oleks servast piisavalt kaugel. Ettevaatlikult asetatakse nõel katsekehale, et esmasest kontaktist nõel ei kuluks. Nõel peab asetsema risti palaga ning tõmmatakse 10,0 mm pikkune kriips. Olenevalt disainist kestab ühe kriipsu tõmbamine 1s või 10s.

Katse ajal peab nõela ja katsekeha vahel olema kontakt, muidu peab katset uue nõelaga kordama, sest tulemused pole adekvaatsed. Katse lõppedes tuleb nõel ettevaatlikult üles tõsta ning eemaldada katseadme küljest ning asendada uue teritatud nõelaga. Katseid tuleb kivimipalal korrata minimaalselt viis korda ning viimase sammuna tuleb eemaldada ka katsekeha (Alber jt, 2014).

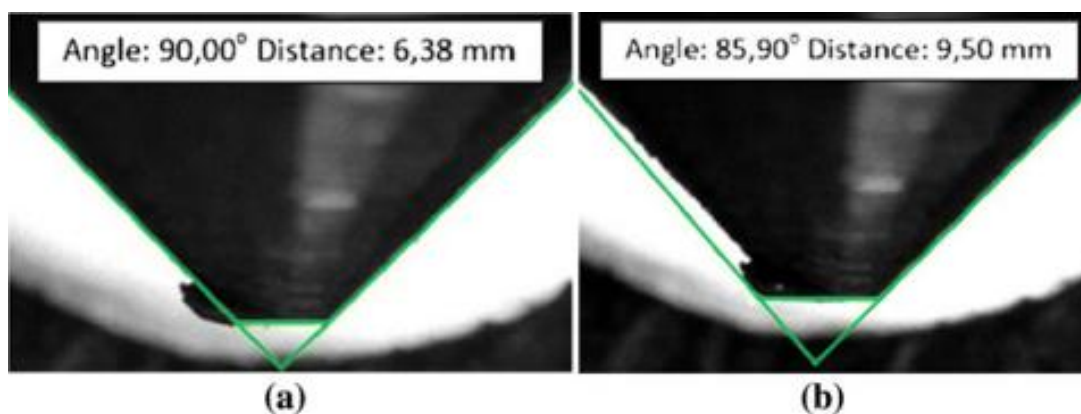
2.1.5 Nõela kulumise mõõtmine

Kulumise pikkust mõõdetakse mikroskoobi alla kasutades vähemalt 25x suurendust, kus resolutsioon peab olema vähemalt ± 0.005 mm ning täpsus 0,01 mm. Mõõtmisi võib teha nii külj- kui ka pealtvaates nagu on näidatud Joonis 3 (Alber jt, 2014).

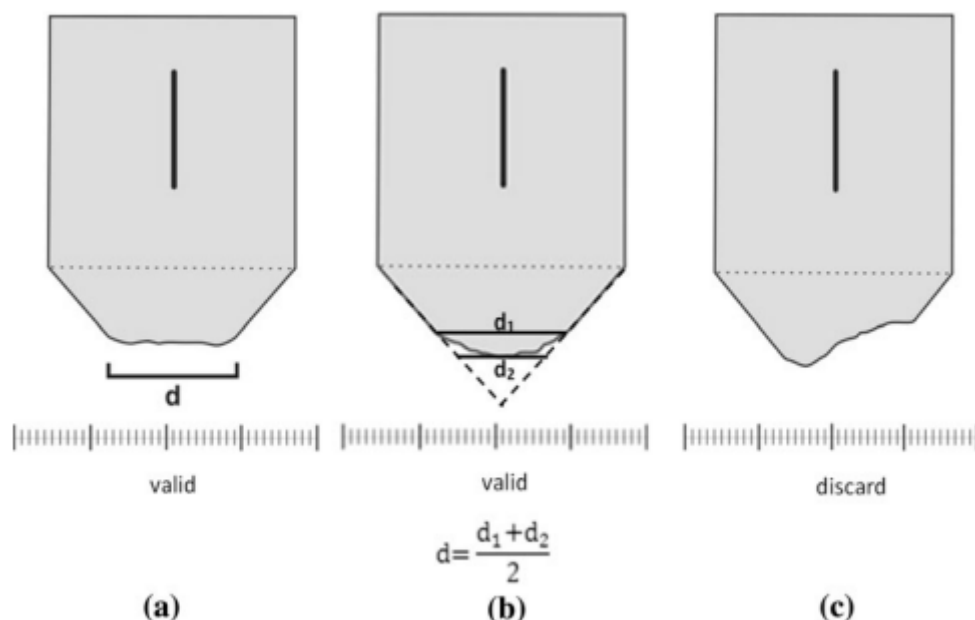


Joonis 3. Mõõtmine küljvaates (a) ja pealtvaates (b,c). Meetodid näidatud (a) ja (b) pildil on soovitatud optilisteks mõõtmisteks ja (c) digitaalseks. (Alber jt., 2014)

Tugevalt on soovitatud siiski küljvaates mõõtmised, sest värskel katsekehal, eriti suurema kõvadusega kivimitel, võib nõela kulumispind olla ebasümmeetriline ja tihti sisaldab killukesi ja metalliservi, mis ulatuvad kaugemale kui kulumispind nagu on näidatud Joonis 4. Sellest tulenevalt võivad pealtvaates tehtud mõõtmised olla suuremad, kui need tegelikult on (Alber jt, 2014).



Joonis 4. Küljvaade õigesti mõõdetud kulumispikkusest (a) ja pealtvaates ülehinnatud mõõtmine kulumispikkusest (b). (Alber jt, 2014)



Joonis 5. Standardsed kulumisprofiilid (a,b), ebastandardne profiil (c), kus katset peab kordama. (Albert jt., 2014)

Osade katsekehade profiilid teevad katsetamise keeruliseks ning seetõttu on oluline mõõtmiseks valida ainult standardile vastavad mõõtmised, näidatud Joonis 5. Kui nõelalt saadud tulemus ei vasta standardile tuleb katset korrata, ebasobiv tulemus näidatud joonisel 5c (Alber jt, 2014).

Külgvaates mõõtmisel on soovitatav nõel asetada V-soonega terahoidikusse või rakisesse ning teha neli mõõtmist, kus peale iga mõõtmist nõela keeratakse 90 kraadi. Pealtvaates mõõtmisel on soovitatav teha kaks mõõtmist, kui kasutusel on digitaalsed meetodid, siis piisab pealtvaates ühest mõõtmisest (Alber jt, 2014).

2.1.6 Arvutus

Iga mõõtmistulemus kantakse tabelisse, nagu on näidatud Tabel 1. Näide CERCHARI katse tulemustest viie korduse ning nelja külgvaates mõõtmistulemusega. (Albert jt., 2014). Seejärel kasutatakse valemit (1), et arvutada iga kulumise mõõdu, d , jaoks CAI.

Tabel 1. Näide CERCHARI katse tulemustest viie korduse ning nelja külgvaates mõõtmistulemusega. (Albert jt., 2014)

Test No.	1	2	3	4	5
Pin Hardness (HRC)	55	55	55	55	55
Measurement d_1 (mm)	0.40	0.42	0.42	0.40	0.39
Measurement d_2 (mm)	0.41	0.44	0.40	0.41	0.38
Measurement d_3 (mm)	0.40	0.42	0.41	0.40	0.39
Measurement d_4 (mm)	0.42	0.41	0.41	0.44	0.39
Mean reading d_M (mm)	0.41	0.42	0.41	0.41	0.39
Mean pin wear (mm)					0.41
CERCHAR-Abrasivity-Index (CAI) (-)					4.1
Standard deviation of CAI					0.11

$$CAI = d \times 10 \quad (1)$$

, kus d on nõela otsast mõõdetud kulumispikkus täpsusega 0,01 mm.

Ühikuteta suurus CAI on aritmeetiline keskmine viiest või enamast korduskatses, mida märgitakse koos CAI standardhälbega tulemuste tabelisse, nagu näitena on ka tabelis 1 tehtud.

Kui nõela kõvadus on midagi muud kui HRC 55 ± 1 , siis märgitakse see CAI asemel CAI_x , kus alaindeks x näitab, mis Rockwelli kõvadus 55 asemel on. Teise kõvadusega tehtud katsed saab viia valem (2) abil CAI peale üle.

$$CAI = 0,415 CAI_{(x)} / (1 - 0,0107x) \quad (2)$$

, kus $CAI_{(x)}$ on mõõdetud nõelaga, mille kõvadus on HRC x (Alber jt, 2014).

2.1.6.1 Arvutus saetud pinnalt võetud tulemustega

Kui katsetuspind on saetud ning mitte murdepind, siis tuleb kasutada valemit (3). Saetud pinnalt tehtud mõõtmised erinevad murdepinnast ning need tuleb korrigeerida CAI' saavutamiseks.

$$d = 1.14d_s \quad (3)$$

Valem (3) ei sobi kasutuseks, kui katsekehaks on kõva ja suure abrasiivsusega kivim (Alber jt, 2014).

2.1.7 Klassifikatsioon

Tabel 2 on näidatud klassifikatsioon vastavalt CAI-le. Väärtused sobivad CAI ja CAI' tulemustele, kus nõela kõvadus on Rockwelli HRC 55 ja kivimipind on töötlemata (*rough*) (Alber jt, 2014).

Tabel 2. CAI klassifikatsioon. (Alber jt, 2014)

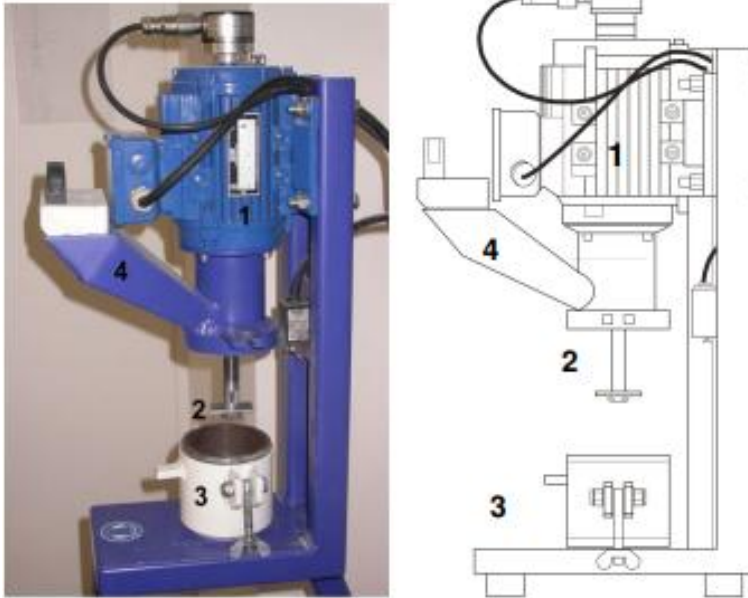
Mean CAI	Classification
0.1–0.4	Extremely low
0.5–0.9	Very low
1.0–1.9	Low
2.0–2.9	Medium
3.0–3.9	High
4.0–4.9	Very high
≥ 5	Extremely high

2.2 LCPC

LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) on 1980ndatel väljatöötatud katseseade, millega on võimalik määrata nii materjali abrasiivsust kui ka terasuuruse mõju. Katsematerjaliks sobivad nii pinnas, granuleeritud materjal kui ka erinevad kivimid, olenemata nurgelisusest. Erinevalt CERCHAR meetodist, millega on võimalik mõõta ühte konkreetset tükki ning väikese terasuurusega ja segunenud proove pole üldse võimalik kasutada, siis LCPC võimaldab katsetada väiksema terasuurusega, erinevate terasuurustega ning segunenud materjali. Hetkeseisuga puudub ISRM soovitatud meetodika, aga on Prantsuse Standard (*French Standard*) P18-579 (Thuro jt, 2007).

2.2.1 Katseseade

LCPC abrasiivsuse määramise katseseade, kujutatud Joonis 6, on 750W mootoriga, millele on kinnitatud terasest impeller ja uhmer, kus sees impeller pöörleb. Ristkülikukujuline impeller, mõõtudega $50 \times 25 \times 5$ mm, on tehtud standardsest terasest Rockwelli kõvadusega B 60-75 (Thuro jt, 2007).



Joonis 6. LCPC abrasiivsuse määramise katseseade. 1- mootor, 2- metallist impeller, 3- uhmer, 4- täitmislehter. (Thuro jt, 2007)

2.2.2 Katse ettevalmistus

Prantsuse standardi järgi peab proov olema terasuurusega 4-6,3 mm, suurema terasuurusega materjali peab enne purustama ja sõeluma. See tuleneb uhmri ja impelleri suurusest, mille suurust on kaalutud suurendada suurema terasuurusega materjali katsetamiseks, aga tehnoloogilise kompleksuse ja maksumuse tõttu siiski pole tehtud. Suurendused oleks olnud kümnekordsed ehk uhmri diameeter oleks 1 m, impeller $50 \times 25 \times 5$ cm. Kuna impellerit peab iga katse järel vahetama oleks see maksumuselt liiga kõrge. Teisalt puuduksid andmed tulemuste interpreteerimiseks, sest katseseadme suurenemisega suureneksid ka proovide suurused ehk proov oleks terasuurusega 40-63 mm (Thuro jt, 2007).

Pinnase või muu granuleeritud materjali katsetusteks on kaks meetodit, et katsetused saavutaksid adekvaatsed tulemused, millega on võimalik määrata materjali abrasiivsust:

- Kogu materjali katsetamine, mis annab tulemuse kõikide terasuuruste kohta
- Erinevate fraktsioonide eraldi katsetamine (näiteks 4/8, 8/16, 16/32, 32/64, >64 mm). Iga fraktsiooni tulemuste summeerimine vastavalt terasuurusele annab kogu materjali abrasiivsuse (Thuro jt, 2007).

Esimese meetodi puhul on võimalik kolm alameetodit:

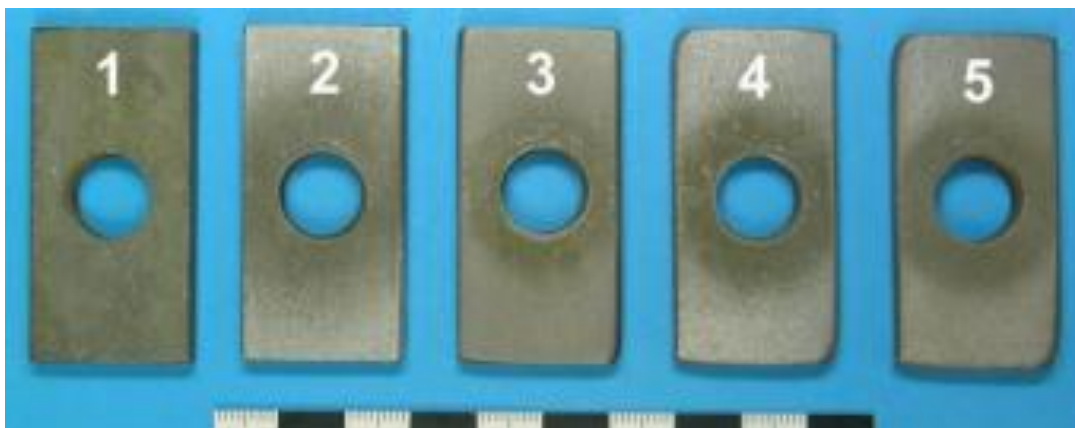
- Katsetamine materjaliga, mille terasuurus on 4-6,3 mm nagu algselt määratud. Tulemused annavad madala abrasiivsuseväärtuse, mis ei kirjelda tegelikult kogu materjali abrasiivsust.

- Katsetamine materjaliga, mille terasuurus on <6,3 mm. Tulemused näitavad jällegi madalat abrasiivsuseväärtust, kuna LCPC pole peeneteralise materjali jaoks loodud (<4mm).
- Kogu materjali katsetamine, aga terad suuremad kui 6,3 mm purustatakse ning valikuliselt jäetakse <4 mm katsepalad välja (Thuro jt, 2007).

Olenemata meetodist peab enne katsetamist terasuurse analüüsi tegema ning ka peale katsetamist, et näha kui palju materjal puruneb (Thuro jt, 2007).

2.2.3 Katse läbiviimine

Kui on tehtud materjali ettevalmistamine, milleks on >6,3 mm materjali purustamine ning sõelumine, mille käigus eemaldatakse terasuused, mis on <4mm. Siis järgmiseks sammuks on materjal kuivatada ning kaaluda. Seejärel kaalutakse ka eelnevalt kasutamata impeller ja kinnitatakse see katsemasina külge. Ühes katses on vaja 500 g ± 2 g materjali, mis valatakse peale kaalumist eelnevalt kinnitatud metallist uhmrisse läbi täitmislehtri. Seejärel käivitatakse masin, mis pöörleb 5 minutit kiirusel 4500 rpm või mõnel teisel kiirusel nii, et vastav arv pöördeid oleks siiski tehtud. Peale katset võetakse masina küljest impeller ning see kaalutakse uuesti. Enne ja pärast katset kaalutud impelleri kaaluvahe annabki materjali abrasiivsuse, samuti näitab materjali abrasiivsust impelleri deformatsioon, mis olenevalt materjalist ja impelleri pööramisunast on väike või suur, Joonis 7 on näidatud erinevad kulumised. Väga oluline on järgmise katse puhul kasutada kulumata impellerit, sest muidu pole deformatsiooni näha ning abrasiivsuse väärtus pole sama, mis kulumata impelleriga mõõtes (Thuro jt, 2007).



Joonis 7. Impellerid enne ja pärast LCPC katset. 1- kasutamata impeller, 2- lubjakivi (mitte abrasiivne), 3- kvartsirikas liivakivi (abrasiivne/väga abrasiivne), 4- dioriit (väga abrasiivne), 5- kvarts kvarsti soonest. (Thuro jt., 2007)

2.2.4 Tuletatud omadused ja klassifikatsioon

2.2.4.1 LCPC abrasiivsuse koefitsient

LAC ehk LCPC abrasiivsuse koefitsient (*LCPC Abrasivity Coefficient*) arvutatakse impelleri masside erinevusest ja proovimaterjali massist valemi (4) järgi.

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M} \quad (4)$$

, kus LAC = LCPC abrasiivsuse koefitsient (g/t);

m_0 = impelleri mass enne LCPC katset (g);

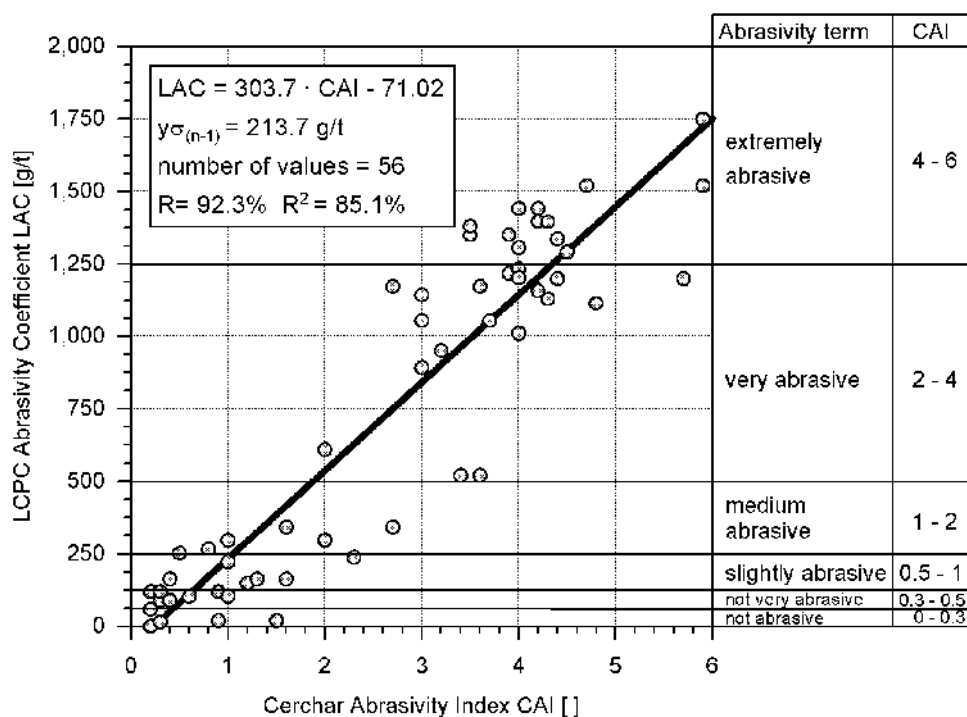
m = impelleri mass pärast LCPC katset (g);

M = proovi mass (0,0005 t) (Thuro et al., 2007).

LAC väärtused pinnase ja looduslike kivimite puhul jäävad vahemikku 0-2000 g/t. See vahemik jagatakse viieks eraldi klassiks ning kuna on lineaarne sarnasus CERCHAR CAI-ga, siis on klassid samanimelised. Seetõttu on soovitatav kasutada Tabel 3, mis sisaldab mõlemaid väärtuseid. Joonis 8 on kujutatud LCPC ja CERCHAR tulemuste korrelatsiooni (Thuro jt, 2007).

Tabel 3. Korrelatsioon CAI ja LAC vahel. (Thuro jt., 2007)

LAC [g/t]	CAI [0.1]	Abrasivity classification	Examples
0-50	0.0-0.3	not abrasive	organic material,
50-100	0.3-0.5	not very abrasive	mudstone, marl
100-250	0.5-1.0	slightly abrasive	slate, limestone
250-500	1.0-2.0	(medium) abrasive	schist, sandstone
500-1250	2.0-4.0	very abrasive	basalt, quartzitic sdst.
1250-2000	4.0-6.0	extremely abrasive	amphibolite, quartzite



Joonis 8. Korrelatsioon LCPC ja CAI tulemuste vahel kasutades Büchi et al (1995) tulemusi ja Thuro & Käsling 2009 tulemusi. (Thuro jt, 2010)

2.2.4.2 LBC ehk LCPC Breakability Coefficient

Tänu LCPC abrasiivuskatsele on võimalik määrata ka LBC ehk peenestatavustegur. LBC määratakse ära vaadates kui palju materjalist peale LCPC katse sooritamist on terasuurusega alla 1,6 mm ning selle arvutamiseks on kujutatud valem (5) (Thuro jt, 2007).

$$LBC = 100 \times M_{1,6} / M \quad (5)$$

, kus $M_{1,6}$ = peale LCPC katse sooritust tekkinud <1,6 mm fraktsiooni mass (g);

M = proovi mass enne LCPC katsed (g) (=0,0005 t) (Thuro jt, 2007).

LBC väärtused looduslike kivimite ja pinnaste puhul varieerub 0-100% ning seda vahemikku on võimalik samuti jagada viieks erinevaks klassiks, kus üks on üle 100% väärtusega (Tabel 4). Peenestatavusteguri väärtus sõltub suuresti proovikeha mineraloogilisest koostisest (Thuro jt, 2007).

Tabel 4. LCB klassifikatsioon. (Thuro jt., 2007)

LBC [%]	Breakability classification
0-25	very low
25-50	low
50-75	medium
75-100	high
> 100	very high

2.3 Rosiwal, XRF ja XRD

Rosiwali kõvadus põhineb katsel, kus 100mg purustatud korundit, terasuurusega 0,2 mm, uhmerdati 4 cm² suurusel katsetatava mineraaliga alal, jõuga 6,8 N 8 minutit, kiirusel 170 rpm. Katsetatava mineraali ruumala muutus annabki Rosiwali kõvaduse. Tänapäeval on Rosiwali kõvadus kasutusel EQC/ F_{EQC} (*equivalent quartz content*) ehk samaväärse kvartsi sisalduse leidmisel, kus kvartsi väärtus vastvalt Rosiwali kõvadusele on 100, näidatud valemis (6) (Kaspar & Latal, 2022).

$$F_{EQC} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \times H_{Ri}}{100} \quad (6)$$

, kus F_{EQC} on samaväärne kvartsi sisaldus protsentides (%);

A_i on mineraali sisaldus protsentides (%);

H_{Ri} on mineraali Rosiwali kõvadus, kus kvarts = 100 % (Kaspar & Latal, 2022).

Käesoleva bakalaureusetöö lubjakivi proovide EQC on 0,46 % (Männik, 2026).

Mineraalide sisalduse protsente saab teada XRDA ehk röntgendifraktsioonianalüüsi abil. XRD analüüsi põhimõtte seisneb selles, et röntgenkiirte difragreerumise abil on võimalik analüüsida kristalliliste materjalide molekulaarset või atomaarset struktuuri (Ali jt, 2022).

Käesoleva bakalaureusetöö lubjakivi proovide XRD analüüsi tulemused näitasid, et proov sisaldab 2,5% kvartsi, 61,8% kaltsiiti, 2,0% ortoklassi ja 33,7% dolomiiti (Männik, 2026).

Peale XRD uuringu on ka XRF ehk röntgenfluorestsents on lihtne viis analüüsida proovi keemilist koostist elementide tasandil. XRF töötab põhimõttel, et elemendid proovis kiirgavad tagasi sekundaarseid röntgenkiiri ning kuna igal elemendil on oma karakteristik kiirgus on võimalik eristada erinevaid elemente proovis (Sokolov jt, 2025).

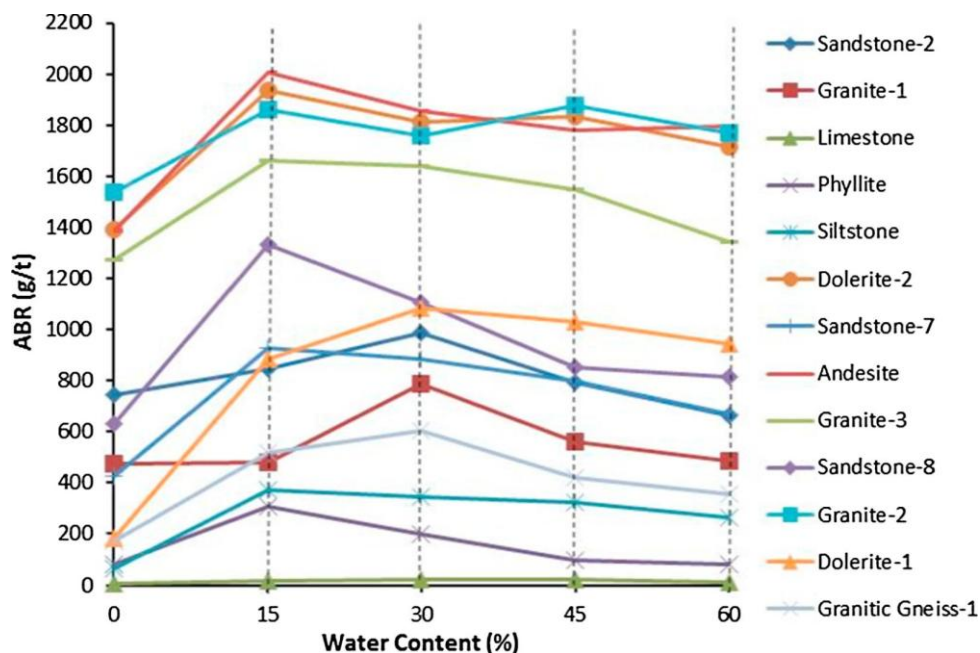
Käesoleva bakalaureusetöö lubjakivi proovide XRF analüüsi tulemused näitasid, et proov sisaldab: 4,672% SiO₂, 0,084% TiO₂, 1,295% Al₂O₃, 1,573% Fe₂O₃, 0,163% MnO, 5,119% MgO, 45,29% CaO, 0,019% Na₂O, 0,726% K₂O, 0,504 P₂O₅, 0,027% S, 0,021% Cl ja 0,103 % F. Väiksemas koguses esines puhtaid elemente: 0,6 ppm As, 13,8 ppm Ba, 3,2 ppm Br, 17,4 ppm Ce, 0,7 ppm Co, 5,6 ppm Cr, 10 ppm Cu, 0,1 ppm Ga, 12,9 ppm La, 4,1 ppm Mo, 2,4 ppm Nb, 7,8 ppm Ni, 2,9 ppm

Pb, 12,2 ppm Rb, 137,3 ppm Sr, 2,9 ppm Th, 0,3 ppm U, 7,3 ppm V, 50,6 ppm W, 16,1 ppm Y, 5,4 ppm Zn ja 15,3 ppm Zr (Männik, 2026).

2.4 Niiskusesisaldus

Niiskusesisaldus kivimites on oluline aspekt abrasiivsuse määramisel, sest realistlikes oludes, näiteks kaevandamine, allmaarajatiste ehitamine või muus olukorras, kus on kasutusel masinad, mis kuuluvad kivimite abrasiivsuse tõttu, ei ole niiskusesisaldus üldiselt nii madal nagu on laboris katsetamisel. Samuti on küllastatud proovidega saadud abrasiivsuse väärtused olulised situatsioonideks, kus kulutav tegevus toimub veekeskonnas nagu veelune puurimine, sadama ehitus, veeluste rajatiste rajamisel või kui toimub veega jahutamine, näiteks teemantkettaga saagimisel. Nii CERCHAR kui ka LCPC abrasiivsuse väärtused on varasemates töödes (Abu Bakar jt, 2018; Mammen jt, 2009) niiskusesisalduse suurenemisega mingist piirist muutunud (Abu Bakar jt, 2018).

LCPC meetodi puhul on uuringud tehtud materjalile vett lisades, mitte küllastunud materjaliga katsetades ning suuremate veekoguste juures abrasiivsus suurenenud (Joonis 9), sest tekib pasta, mis raskendab impelleri pöörlemist. Seetõttu pole need tulemused üldiste olukordade juures kõige paremad, sest abrasiivsuse väärtused suurenevad tulenevalt ruumivähesuse tõttu ja ei kajasta katsetatava kivimi tõelist abrasiivsust suurema niiskusesisalduse korral.



Joonis 9. LCPC katsete tulemused olenevalt niiskusesisaldusest. (Abu Bakar jt., 2018)

CERCHAR meetodi puhul on lubjakivi abrasiivsus küllastunud kivimis väiksem, kui kuivas. Varasemas uuringus (Abu Bakar jt, 2016) on pakutud korrelatsioon, et küllastunud kivimi abrasiivsuse väärtus on umbes 80% kuiva väärtusest (Abu Bakar jt, 2016). Küllastunud kivimi abrasiivsuse vähenemine CERCHAR meetodi katses võib olla tuletatud sellest, et vesi nõrgendab kivimi maatriksit ja mineraaliterad ei ole enam nii tugevalt koos. Väiksemad väärtused võivad tuleneda ka sellest, et vesi vähendab hõõrdumist nõela ja kivimiproovi vahel. Teisisõnu kivimi veesisaldus jahutab nõela otsa ja vähendab seeläbi kulumist. Sarnast nähtust on täheldatud kivimi lõikamisel (Phillips, 1975), kus veega küllastunud kivimi lõikamisel ei tekkinud volframkarbiidi terade termiline väsimus aga kuivas situatsioonis tekkis. Samuti märgati, et küllastunud proovide CAI võib olla oodatust kõrgem, sest nõela asetamisel proovile võib ülevalt alla 70N jõust tekkida

kulumine kontakti näol, mitte kriipsu tõmbamisel kivimi abrasiivsusest. Pehmemate ja abrasiivsemate materjalide puhul läheb esmase kontakti saavutamisel nõel 70N mõjul sügavamale ning kriipsude tõmbamine põhjustab ka seetõttu suuremat kulumist nõelale. Teisalt kui puuduvad abrasiivsed mineraalid, siis kulumine ei suurene peale esimest kontakti (Abu Bakar jt, 2016).

3. Uuringuala tutvustus

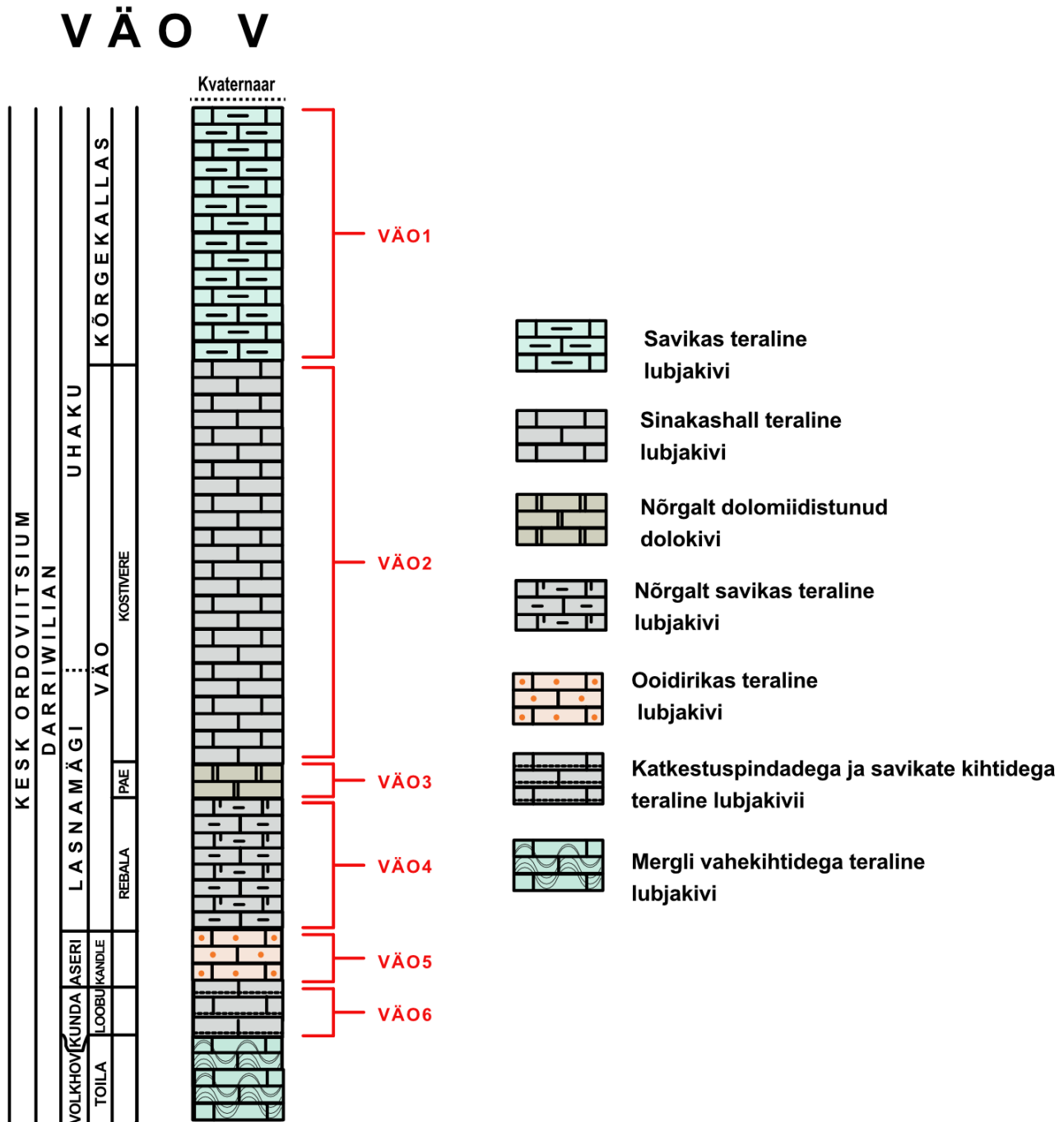
VÄO 4 proovid on võetud Väo V lubjakivikarjäärist ning kuulub Ordoviitsiumi ajastu Lasnamäe lademe Väo kihistu Rebala kihistikku, kujutatud Joonis 10.

Mäeeraldises nimega Väo V lubjakivikarjäär, kus kuni 2028. aastani kehtib kaevandamisluuba nr. KMIN-137, kaevandab Väo Paas OÜ, kus väljamine toimub kombineeritult lõhketööde ja hüdrovasaratega ning sealt kaevandatav kõrgemargiline ehituslubjakivi on kasutatav viimistlus- ja seinakivina, killustikuna betooni valmistamiseks, teekateteks ning täitematerjaliks (Tamm jt, 2018).

Väo maardlas on Väo kihistu keskmiselt 8,4 m paksusega ning kasuliku kihi moodustav lubjakivi on mikro- kuni peenkristalliline, eri tasemetel võib lubjakivi olla savikas. Kihistu koosneb valkjashallist, detriitjast kuni detriitsest, pisi- kuni mikrokristalsest, keskmise- kuni paksukihilisest, merglikelmeid ja stüloliitpindude sisaldavast lubjakivist. Katendi keskmine paksus on 2,0 m ja maksimaalne 4,1 m, lisaks esineb kasvukiht paksusega kuni 0,8 m. Maardla lõunaosas levib Kvaternaari setete all Kõrgekalda kihistu savikas lubjakivi, mis moodustab katendi alumise osa (Suuroja jt, 2002; Tamm jt, 2018).

Rebala kihistik, indeksiga C_{1b}-cV'R või O₂väR, koosneb hallist, rohkem või vähem savikast mergli kihtidega õhukesekihilisest lubjakivist (Rõõmusoks, 1983). Kihistiku paksus on 1,3 – 2,5 m ning suureneb ida suunas. Kihistiku ülemine osa on eriti savikas ning kihistiku alumises osas on võimalik leida fosfaadi ja götiidi ooiide sisaldavat oiidset lubjakivi, mis märgib piiri Kandle kihistuga (Männil & Meidla, 1994; Raukas & Teedumäe, 1997).

Kirjeldus Reet Männiku magistritööst: „VÄO 4 proovigrupi kivimid on helehallid kuni hallid. Kivimis esineb nõrgalt väljendunud kihilisus ning kohati on märgata õhukesi, ebaselgeid tumedamaid vahekihte. Puursüdamikes esineb ümardunud heledamaid struktuure ning lokaalset tekstuuret 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.” (Männik, 2026)



Joonis 10. Läbilõige puursüdamikust, kus Väo1-Väo6 tähistavad erinevate proovide asukohti. Antud töös kasutatud proovid on Väo4. (Männik, 2026)

4. Andmed ja meetodika

Töös kasutatud proovid olid varasemalt (27.05.2025) kogutud Reet Männiku magistritöö „Põhja- ja Kesk-Eesti karbonaatkivimite kivimmehaanilised omadused ja nende varieeruvus“ raames, siis eraldi karjääris polnud vaja käia. Proovide ettevalmistus TTÜ geoloogia instituudi laboris ning mäendustingimuste laboris, kus mõlema katsemeetodi jaoks esmalt saeti suuremad palad väiksemateks ning seejärel algasid mõlema meetodi spetsiifilised ettevalmistused.

Katsete teostamiseks kasutati Wille Geotechnik katseeadmeid. LCPC katseade vastab prantsuse standardile P18-579 ning CERCHAR katseade ISRM standardile. CERCHAR meetodi raames kasutati ka Wille Geotechnik teritajat nõelte teritamiseks.

4.1 LCPC katse

LCPC meetodiga mõõdetakse abrasiivsust kolme niiskusesisaldusega:

- otse ahjust kuivana (K);
- otse veest ilma kuivatamata (M);
- veest võetult, aga kuivanud seni kuni pindmiselt niiske ei ole (N).

LCPC katseks valmistati ette üheksa 500g proovi, esmalt saeti suuremad tükid väiksemaks ning seejärel purustati lõugpurustis ning sõeluti käsitsi, et saavutada proov terasuurusega 4-6,3 mm. Kogu materjal läks ka läbi proovijaoturi, et vähendada proovide varieeruvust. Seejärel kuivatati proov ahjus keskmiselt 105° juures üle 24h ning seejärel kaaluti välja kuiva materjali 500g. Kuivad proovid katsetati koheselt, kui ahjust võetud materjal oli kaalutud. Teised proovid asetati peale kaalumist ja jahtumist vette, nii et igal proovil oli oma nõu, kus liguneda.

Proovid, kus oli oluline saavutada maksimaalne niiskusesisaldus, ligunesid vees üle kahe nädala. Otse veest ilma kuivatamata (edaspidi märjad) proovid kaaluti kohe peale veest välja võtmist ära ning seejärel toimus katse teostamine. Veest võetud, aga kuivanud seni kuni pindmiselt niisked ei olnud (edaspidi niisked) proovid võeti veest välja, asetati alusele ning lasti õhu käes kuivada seni kuni need polnud enam väliselt niisked. Selleks kulus 3h, peale mida nad kaaluti ning teostati katse.

Enne kõiki katsetusi kaaluti ära ka impellerid ning peale katset kaaluti impellerid samuti ära, sest impelleri kaalumuutus määrab ära lubjakivi abrasiivsuse LCPC meetodil.

4.2 CERCHAR katse

CERCHAR katseks saeti suurematest tükkidest välja piisavalt suured tükid, mis vastaksid nõuetele: ääre kaugus kriipsust vähemalt 5 mm ning iga kriipsu vahel vähemalt 5 mm. Pärast tükkide saagimist läksid need ahju kuivama, kus nad olid üle seitsme päeva, et tagada minimaalne niiskusesisaldus. Nii nagu LCPC katses oli ka CERCHAR meetodil abrasiivsuse mõõtmise kolmel erineval niiskusesisaldusel:

- otse ahjust kuivana (K);
- otse veest ilma kuivatamata (M);
- veest võetult, aga kuivanud seni kuni pindmiselt niiske ei ole (N).

Ahjust võetuna kaaluti kõik proovid ära ning kuivade proovidega sooritati katsed. Proovid, millel mõõdeti ka niiskusesisaldus kõigepealt jahtusid ning seejärel asetati nad samuti veega anumasse, kus need ligunesid üle kahe nädala, et saavutada maksimaalne niiskusesisaldus.

CERCHAR katse teostati vastavalt ISRM standardile, kriipsu kaugus äärest oli üle 1 mm ning kriipsude vahe oli 1 mm. Igal niiskusesisaldusel teostati kolm katset ehk kokku oli proovipalasisid üheksa. Iga katses koosnes viie nõelaga viie kriipsu tõmbamisest, mida hiljem pildistati mikroskoobi all 31,5x suurendusega. Igat nõela pildistati neli korda, keerates nõela 90°, et kulumist mõõta igalt küljelt. Peale pildistamist kasutati programmi Fiji, et piltidelt mõõta kulumise pikkust mikromeetrites, mis hiljem teisendati millimeetrideks, et saada CAI, näitena Joonis 11.



Joonis 11. Pilt kuiva proovi nõelast.

4.3 Niiskusesisaldus

Niiskusesisalduse mõõtmiseks kaaluti mõlema katse puhul proovid kuivadena, kui need ahjust välja tulid ning vees seisnud proovid kaaluti enne katseteostamisi samuti ära. Niiskusesisaldus arvutati proovi masside erinevuse põhjal.

5. Tulemused

Lubjakivi LCPC katse tulemused ja niiskusesisalduse väärtused on kajastatud Tabel 5. CERCHAR abrasiivsuse väärtused ja niiskusesisaldused on kajastatud Tabel 6 .

Tabel 5. LCPC tulemused ja niiskusesisaldused.

	LAC (g/t)	NIISKUSESISALDUS (%)
KUIV1	86	0
KUIV2	36	0
KUIV3	46	0
NIISKE1	242	2,59
NIISKE2	328	2,19
NIISKE3	398	2,68
MÄRG1	342	6,68
MÄRG2	436	8,83
MÄRG3	332	6,00

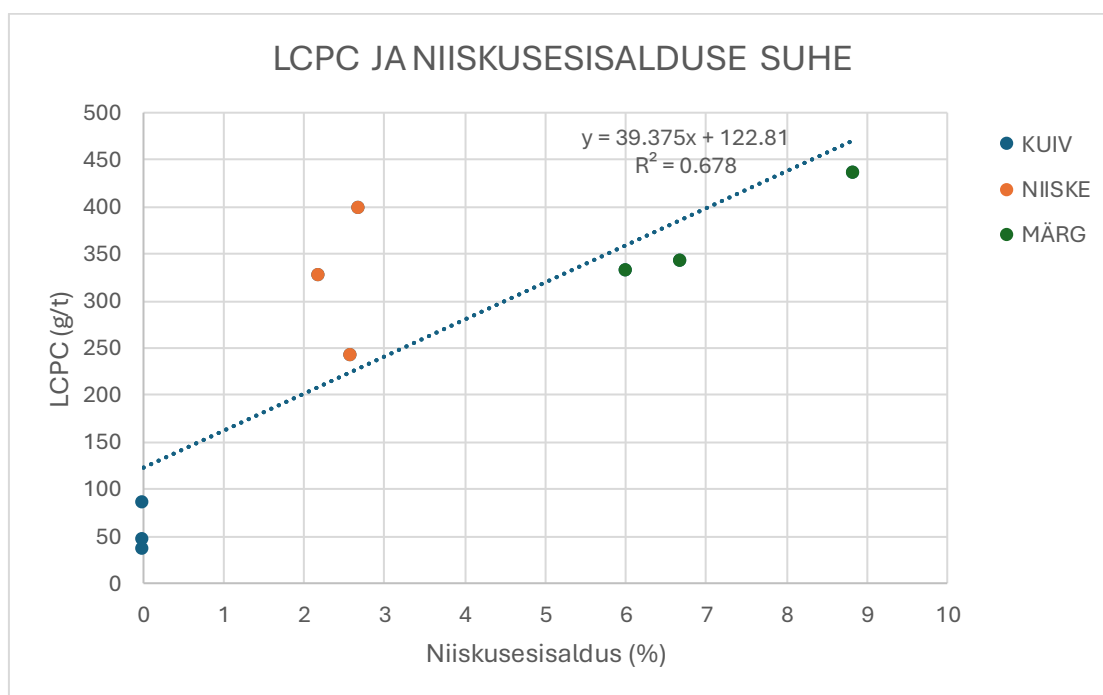
Tabel 6. CERCHAR tulemused ja niiskusesisaldus.

	CAI KESKMINE	CAI VAHEMIK	NIISKUSESISALDUS(%)
KUIV1	0,42	0,36-0,53	0
KUIV2	0,62	0,40-0,85	0
KUIV3	0,63	0,36-0,85	0
NIISKE1	0,41	0,28-0,55	1,41
NIISKE2	0,39	0,36-0,43	1,81
NIISKE3	0,41	0,26-0,56	1,91
MÄRG1	0,43	0,35-0,48	1,32
MÄRG2	0,44	0,27-0,58	1,83
MÄRG3	0,42	0,34-0,50	1,98
KUIV KESKMINE	0,56	0,42-0,63	0
NIISKE KESKMINE	0,40	0,39-0,41	1,71
MÄRG KESKMINE	0,43	0,42-0,44	1,71

6. Arutelu ja järeldused

6.1 LCPC

Lubjakivi LCPC kuivad tulemused on keskmiselt 56 g/t ning kuuluvad *not very abrasive* ehk mitte väga abrasiivsesse kategooriasse. Niiskusesisalduse kasvades kasvab ka abrasiivsuse väärtus, mis tuleneb sellest, et uhmris tekkis sitke pasta, mis takistas impelleri pöörlemist ning suurendas abrasiivsust. Reaalsuses võib selline situatsioon tekkida näiteks puurimisel, kui purunenud materjal ei pääse puurinstrumendi juurest välja. Samuti võib sarnane olukord freeskombaini trumlis, kui abrasiivsuse vähendamise eesmärgil kivimi niiskusesisaldust suurendatakse. Freesimise käigus võib kontaktil kivimiga abrasiivsus väheneda, aga selle tulemusel tekib sitkem segu, mille abrasiivsus avaldab mõju järgmistele tööorganitele. Tulemustest näeb, et vee sisalduse suurenemisel ei muutu abrasiivsus järk-järgult, vaid niiskuse suurenemisel suure hüppega.



Joonis 12. LCPC ja niiskusesisalduse suhte graafik.

Joonis 12 on näha, et abrasiivsuse väärtuse ja niiskusesisalduse vahel on tugev positiivne korrelatsioon. Kirjeldusvõrrand $y = 39.375x + 122.81$ näitab, et umbes ühe protsendi niiskuse suurenemisel suureneb ka abrasiivsuse väärtus 39.375 ühiku võrra. Joonis 9 on näha, et lubjakivi abrasiivsuse väärtus kasvab 0-15% veekoguse juures väga aeglaselt ehk niisked ja märjad tulemused võivad olla nii sarnased, sest piisab vaid väikesest veekogusest, et tekiks sitkem segu, mis saavutab kuivast proovist kõrgemad tulemused.

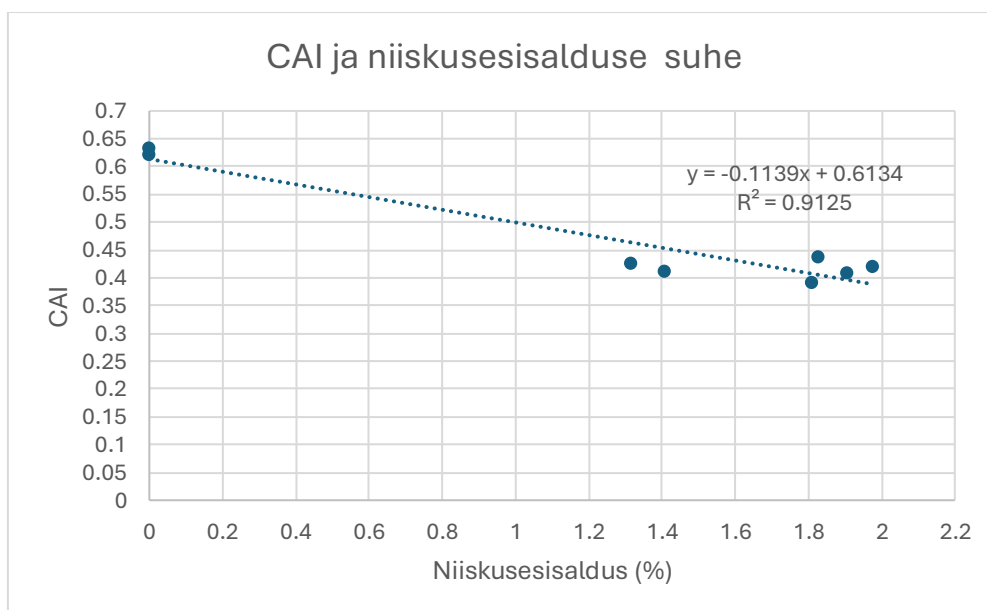
6.2 CERCHAR

CERCHAR kuivad tulemused on keskmiselt 0,56 ning kuuluvad klassifikatsiooni poolest samasse kategooriasse (Tabel 3) nagu LCPC kuivad tulemused ehk *not very abrasive*. Sama proovi saetud pinnalt tehtud katsetest, Reet Männiku magistritöös (Männik, 2026), on see väiksem, saetud pinna keskmise väärtus on 1,07. Need erinevad potentsiaalselt seetõttu, et katsed on tehtud loomuliku murdepinna pealt. Loomulik murdepind, aga tekib kohtades, kivim on pehmem ja nõrgem ehk

konkreetses proovi puhul võib põhjus olla selles, et murdepind tekkis savika kihi juures. Samuti võivad tulemused erineda seetõttu, et loomulik murdepind oli liialt krobeline ning kulumine toimus nõ ülesmäge liikudes rohkem nõela küljel, kui otsas. Edasiste uuringute jaoks peaks katseid kordama ning hoolikalt valima, et loomulik murdepind oleks võimalikult tasane. Samuti võib kaaluda kivimi mehhaaniliselt murdmisele, et mängiks vähem rolli loomuliku murdepinna pehmus.

Niiskusesisaldus mõjutab tulemusi nagu eelnevalt kirjanduslikus ülevaates väljatoodult ehk suurema niiskusesisaldusega proov on abrasiivsuse väärtuselt väiksem. Hüpoteesi järgi oleks see 80%, aga käesolevas töös on see arv väiksem tulenevalt just ebaühtlasest kulumisest mööda nõela külge. Samuti ei ole niiskusesisalduse võrdluses kasutatavad niisked proovid, sest mõõdeti proovide kogu niiskust, mitte pinnapealset. Sellest saab aga järeldada, et isegi kui pind on kuiv, siis abrasiivsuse väärtused on siiski sarnased märgade proovidega ning niiskuse mõju on suur.

Joonis 13 on näha CAI väärtuse ja niiskusesisalduse suhe, ja kordaja R^2 näitab tugevat seost niiskusesisalduse suurenemise ja CAI väärtuse langemise vahel. Kirjeldav võrrand näitab samuti, et niiskusesisalduse langemisel (x), tõuseb CAI väärtus. Täpsemini näitab x , et iga niiskuseprotsendiga väheneb CAI 0,11 ühiku võrra.



Joonis 13. CAI ja niiskusesisalduse suhe.

Absoluutväärtustena on tulemused siiski väga madalad ning nii suurt rolli tööorgani kulutamisel ei mängi. Tulemustes esinev viga, tulenevalt ebaühtlasest kulumisest, on samuti niivõrd väike võrreldes absoluutsete abrasiivsuse väärtustega, et mõju tööorganile pole märgatav. Niiskusesisalduse suurendamine, et raimamisel abrasiivsust vähendada ei ole nii madalate väärtuste juures vajalik ning võib kokkuvõttes suurendada kulusid.

Kui kaevandamisprotsessid toimuvad oludes, kus kivim on juba küllastunud, siis on abrasiivsuse mõju väiksem, aga selle suuruse määramiseks oleks vaja edasised uuringud teha, et määrata kui palju vähem nt terad kuluvad.

Kokkuvõte

Abrasiivsus on parameeter, mida peab kivimite raimamisel arvestama, sest see mõjutab tööorgani eluiga ja kogu projekti eelarvet juhul kui tööorganit peab parandama või välja vahetama.

Käesoleva töö eesmärgiks oli määrata Vao V lubjakivikarjäärist võetud lubjakivi abrasiivsus CERCHAR ja LCPC meetodil erinevatel niiskusesisaldustel. Kolmeks erinevaks niiskusesisalduseks oli kuiv proov, niiske proov ja märg proov. Tööd viidi läbi vastavalt ISRM ja prantsuse standardile P18-579.

Tulemused LCPC meetodil läksid kokku hüpoteesiga, sest niiskusesisalduse juures tõusid väärtused kordades suuremaks, kui need olid kuivade proovide puhul. Põhjuseks sitkema segu tekkimine, mis raskendas impelleri pöörlemist. CERCHAR meetodi tulemused läksid hüpoteesiga kokku nii palju, et olid kuivadest väärtustest väiksemad. Küll aga mitte pakutud protsendi poolest, mis võis tuleneda nõela ebaühtlasest kulumisest ning murdepinna koostisest.

Edasistes uuringutes on soovitatav kasutada rohkem kordusi, CERCHAR meetodi puhul, kui mõõtmised teostatakse murdepinnal, tuleb veenduda, et pind ei oleks liiga ebatasapinnaline, sest oluline on vältida nõela kulumist külgedelt. Samuti on CERCHAR meetodi puhul oluline, et mõõtmised tehakse murdepinnalt, mis kajastab kihitiku peamiselt koostist, mitte seal esinevaid nõrgemaid vahekihte.

Tänuavaldused










Kõige suurema tänu pälvib lõputöö juhendaja Sander Kanter, kes oli väga motiveeriva suhtumise ning heade nõuannete allikas. Samuti suur tänu kaasjuhendajale Siim Roovile, kes aitas töö praktilise osa juhendamisel kaasa. Eraldi tänu soovin avaldada ka Reet Männikule, kes lahkelt jagas oma magistritöö raames saadud tulemusi.

Kasutatud kirjandus

- Abu Bakar, M. Z., Majeed, Y., & Rostami, J. (2016). Effects of rock water content on CERCHAR Abrasivity Index. *Wear*, 368–369, 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.007>
- Abu Bakar, M. Z., Majeed, Y., & Rostami, J. (2018). Influence of moisture content on the LCPC test results and its implications on tool wear in mechanized tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.07.021>
- Alber, M., Yaralı, O., Dahl, F., Bruland, A., Käsling, H., Michalakopoulos, T. N., Cardu, M., Hagan, P., Aydın, H., & Özarlan, 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>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2), 205. <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- EBSCO. (2022). *Physical properties of rocks*. EBSCO. <https://www.ebsco.com>
- Gao, K., Wang, X., Wei, H., Wang, S., Xu, W., Li, X., Sun, L., & Jiang, H. (2024). Abrasivity database of different genetic rocks based on CERCHAR Abrasivity Test. *Scientific Data*, 11(1), 630. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03470-2>
- Kaesling, H., & Thuro, K. (2010). *Determining rock abrasivity in the laboratory*.
- Kaspar, M., & Latal, C. (2022). Der äquivalente Quarzgehalt – Historischer Rückblick und seine Zukunft in der Anwendung der Abrasivitätsprognose. *geotechnik*, 45(2), 86–97. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gete.202100023>
- Külekcı, G., & Yurtsever, C. C. (2025). Statistical Analysis of CAI Variability Among Rock Types. *Aspects in Mining & Mineral Science*, 13(3), 1593–1600. <https://crimsonpublishers.com/index.php>
- Mammen, J., Saydam, S., & Hagan, P. (2009). *A Study on the Effect of Moisture Content on Rock Cutting Performance*. https://ro.uow.edu.au/articles/conference_contribution/A_Study_on_the_Effect_of_Moisture_Content_on_Rock_Cutting_Performance/27685842/1
- Mucha, K. (2023). Application of Rock Abrasiveness and Rock Abrasivity Test Methods—A Review. *Sustainability*, 15(14), 11243. <https://doi.org/10.3390/su151411243>
- Männil, R., & Meidla, T. (1994). Estonia, Latvia, Lithuania, Byelorussia, parts of Russia, the Ukraine and Moldova (East European Platform). In *The Ordovician System of the East European Platform and Tuva (southeastern Russia). Correlation charts and explanatory notes (A; Vol. 28, pp. 1–52)*. International Union of Geological Sciences.

- Phillips, H. R. (1975). *Rock cutting mechanics related to the design of primary excavation systems*. The University of Newcastle.
- Piazzetta, G. R., Figueira, I. F. R., & Gonçalves, M. A. (2018). *Cerchar Abrasiveness Test – The Portability Between Rock Abrasiveness Laboratory Test and Real Excavation Projects*. Field Measurements in Geomechanics 2018
- Raukas, A., & Teedumäe, A. (1997). *Geology and mineral resources of Estonia*.
- Rõõmusoks, A. (1983). *Eesti aluspõhja geoloogia*. Tallinn „Valgus“.
- Sokolov, A., Kuzmovs, V., Ordóñez, U. M., & Gostilo, V. (2025). Online XRF Analysis of Elements in Minerals on a Conveyor Belt. *Mining*, 5(4), 77.
<https://doi.org/10.3390/mining5040077>
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., & Vahtra, T. (2002). *Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 6343 Maardu. Seletuskiri (EGF:7475)*. [Seletuskiri]. Geoloogiafond.
- Tamm, J., Liivamägi, S., Bauert, H., Hade, S., Kaasik, T., Kattai, V., & Eesti Geoloogiateenistus (EGT) (with Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium). (2018). *Ehitusmaavarade levik, kaevandamine ja kasutamine Harju maakonnas (Version 1.0)*. Geoloogiafond. <https://doi.org/10.23679/994>
- Thuro, K., Singer, J., Kaesling, H., & Bauer, M. (2007). Determining abrasivity with the LCPC test. *Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium - Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands*, 1, 827–834.
<https://doi.org/10.1201/NOE0415444019-c103>

LISA 1 Näited kulumisest masinatel

LÄBIDAMINE	<p>LÄBINDUSKILP</p>  <p>LÖIKETERA</p>	<p>LÄBINDUSKOMBAIN</p>  <p>LÖIKETERA</p>
PUURIMINE	<p>LÖÖKPUURIMINE</p>  <p>PUURIPEA</p>	<p>MEISEL</p>  <p>TERA</p>
RAIMAMINE	<p>KOMBAIN</p>  <p>LÖIKETERA</p>	<p>FREESKOMBAIN</p>  <p>LÖIKETERAD</p> 
TÖÖTLEMINE	<p>LÕUGPURUSTI</p>  <p>PLAAT</p>	<p>KUULVESKI</p>  <p>KUULID</p>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Aleksandra Altmets

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Lubjakivi abrasiivsuse võrdlus LCPC ja CERCHAR meetodil erinevatel niiskusesisaldustel,

mille juhendaja on Sander Kanter

- 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.

_____ (27.05.2026)

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 tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.