

Lubjakivi survetugevuse sõltuvus niiskusesisaldusest

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Ekke Kõu Leitham

Üliõpilaskood: LARB223974

Juhendaja: Sander Kanter, Geoloogia instituut, lektor

Kaasjuhendaja: Siim Roov, Geoloogia instituut, magistrant

Õppekava: Maasüsteemid, 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: Ekke Kõu Leitham
allkiri ja 27.05.2026

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.
Juhendaja: Sander Kanter
allkirjastatud digitaalselt 27.05

Sisukord

Autorideklaratsioon.....	1
Sisukord	2
Annotatsioon.....	4
Abstract	5
Jooniste loetelu	6
1.Sissejuhatus.....	7
2. Lubjakivi üldiseloomustus	8
2.1 Väo karjääri lubjakivi	9
3. Teoreetilised alused	10
3.1 Kivimite tugevusomadused.....	10
3.1.1 Tugevusomaduste tähtsus	10
3.1.2. Tugevusomaduste määramine.....	11
3.2 Lubjakivi tugevusomadused.....	11
3.3 Niiskuse mõju.....	12
3.4 Üheteljeline survetugevuse katse.....	13
3.4.1. Survepress	14
3.5. Katse kriteeriumid.....	15
3.5.1. Üheteljelise survetugevuse standardid.....	15
3.5.2 ISRM-i soovitatud meetodika üheteljelise survetugevuse katseks.....	16
3.5.3. ISRM-i soovitatud meetodika veesisalduse jaoks	16
3.6 Varasemad UCS katsed lubjakividel	17
4. Proovide võtmine, ettevalmistus ja katsemetoodika.....	18
4.1. Proovide kogumine	18
4.2. Proovide ettevalmistus	20
4.3. Katseprotseduur.....	22
4.4. Niiskustingimused	25
4.4.1 Niisked proovid.....	27
5. Tulemused	28
5.1 Proovide parameetrid	28
5.2 Niiskusesisaldus.....	28
5.3 Survetugevus.....	29
6. Arutelu ja järeldused	31

6.1 ISRM-i soovitatud meetoditest kõrvalekalded	31
6.2 N-grupi niiskusesisalduse vähenemine toaõhu käes	31
6.3 Nõrkuskohad	32
6.4 Survetugevus sõltuvalt niiskusest	32
6.5 Võrdlus varasemate uuringutega.....	34
Kokkuvõte.....	35
Tänuavaldused	36
Kirjanduse loetelu.....	37

Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli uurida Vão V lubjakivikarjäärist pärineva lubjakivi üheteljelise survetugevuse sõltuvust niiskusesisaldusest. Töö käigus koguti Vão karjäärist lähtekivim, millest valmistati silindrilised katsekehad. Kokku valmistati 21 katsekeha, mis jagati kuivade, keskmise niiskusega ja küllastunud proovide gruppidesse. Katsekehade veesisaldus ning survetugevus määrati ISRM-i soovitatud metoodika alusel.

Katsetulemused näitasid selget seost niiskusesisalduse suurenemise ja survetugevuse vähenemise vahel. Kuivade proovide keskmine survetugevus oli 92,2 MPa, keskmise niiskusega proovidel 54,3 MPa ning küllastunud proovidel 49,1 MPa. Võrreldes kuivade proovidega vähenes küllastunud proovide survetugevus keskmiselt ligikaudu 46,8%.

Katsete käigus märgati, et suurema niiskusesisalduse korral toimus pragunemine sagedamini mööda savikelmeid ja kihipindu, mis näitab, et niiskuse juures muutuvad need kivimi peamisteks nõrkuskohtadeks. Tulemused olid üldiselt kooskõlas varasemate Vão maardla uuringutega, kuid käesolevas töös oli niiskuse mõju survetugevusele suurem kui varasemalt kirjeldatud.

Töö tulemused kinnitavad, et niiskus mõjutab märkimisväärselt lubjakivi mehaanilisi omadusi ning seda tuleb arvestada kivimi kasutamisel ehitus- ja mäendustingimustes.

Influence of moisture content on the compressive strength of limestone

Abstract

The aim of this bachelor's thesis was to investigate the dependence of the uniaxial compressive strength of limestone from the Vão V limestone quarry on moisture content. During the study, source rock material was collected from the Vão quarry and cylindrical test specimens were prepared from it. A total of 21 specimens were produced and divided into dry, moderately moist, and fully saturated groups. The moisture content and compressive strength of the specimens were determined according to the ISRM suggested methods.

The test results showed a clear relationship between increasing moisture content and decreasing compressive strength. The average compressive strength of the dry specimens was 92.2 MPa, while the moderately moist and saturated specimens had average strengths of 54.3 MPa and 49.1 MPa, respectively. Compared to the dry specimens, the compressive strength of the saturated specimens decreased by approximately 46.8% on average.

During the tests, it was observed that at higher moisture contents, cracking occurred more frequently along clay seams and bedding planes, indicating that under moist conditions these structures become the main weak points of the rock. The results were generally consistent with previous studies conducted on the Vão deposit, although the effect of moisture on compressive strength was greater in this study than previously reported.

The results of this study confirm that moisture significantly affects the mechanical properties of limestone and should therefore be taken into account when using limestone in construction and mining conditions.

Jooniste loetelu

Joonis 1. Lubjakivi, dolokivi ja savikivi liigitamine	8
Joonis 2. Kaudsed meetodid üheteljelise survetugevuse hindamiseks	14
Joonis 3. Üheteljelise survepressi lihtsustatud skeem.....	15
Joonis 4. Laiali paisatud kivitükid Väo V lubjakivi karjääris.....	19
Joonis 5. Välja valitud kivitükk.	19
Joonis 6. Kivitüki saagimine väiksemateks tükkideks.....	20
Joonis 7. Kivitükist puursüdame välja puurimine.....	21
Joonis 8. Lähtekivimi ja proovide indekseerimine.	21
Joonis 9. Ebatasaste proovikehade otsade lihvimine.	22
Joonis 10. Kuivatusahjust välja võetud proovide kaalumise	23
Joonis 11. K-grupi proovi 1B pildid eest ja tagant enne katset.....	23
Joonis 12. K-grupi proovi 1B pildid eest ja tagant pärast katset.....	24
Joonis 13. M-grupi proovi 3C pildid eest ja tagant enne katset.....	24
Joonis 14. M-grupi proovi 3C pildid eest ja tagant pärast katset.....	24
Joonis 15. N-grupi proovi 4B pildid eest ja tagant enne katset.	25
Joonis 16. N-grupi proovi 4B pildid eest ja tagant pärast katset.	25
Joonis 18. N-grupi proovid jäetud vett imama	26
Joonis 19. M-grupi proovid jäetud vett imama.....	26
Joonis 20. N-grupi katsekehade veesisaldused alates katseprotseduuride algusest.....	32
Joonis 21. Survetugevuse sõltuvuse graafik, kasutades lineaarset seost. Lillad punktid tähistavad K-grupi proove, punased N-grupi proove ja rohelised M-grupi proove.....	33
Joonis 22. Survetugevuse sõltuvuse graafik, kasutades eksponentsiaalset seost. Lillad punktid tähistavad K-grupi proove, punased N-grupi proove ja rohelised M-grupi proove.....	33

1.Sissejuhatus

Ehituslubjakivi on Eestis üks olulisemaid ehitusmaavarasid, mida kasutatakse peamiselt killustiku tootmiseks teedehituse ja muude ehitustööde tarbeks. Lubjakivi väljatavus ja kasutusvõimalused sõltuvad suurel määral kivimi füüsikalise-mehaanilistest omadustest, millest üks olulisemaid on survetugevus (Isakar, 2011; Reinsalu jt, 2014).

Eesti karbonaatkivimid toimivad põhjavee kandvate kivimitena ning sisaldavad looduslikes tingimustes poori- ja lõhesüsteemides vett. Varasemates uuringutes on leitud, et niiskus võib vähendada kivimite survetugevust poorivee rõhu suurenemise, mineraalide vaheliste sidemete nõrgenemise ning lõhepindade vahelise hõõrde vähenemise tõttu. Lisaks mõjutavad lubjakivi niiskustundlikkust poorsus, mikropragude esinemine ja savimineraalide sisaldus. . (Goodman, 1989; Kliimaministerium, i.a., Pells, 1993).

Väo lubjakivimaardla on üks Eesti olulisemaid ehituslubjakivi maardlaid ning seal kaevandatav Lasnamäe lademe lubjakivi on tuntud hea survetugevuse ja külmakindluse poolest (Pirrus, 1999). Kuigi Väo maardla lubjakivi füüsikalise-mehaanilise omadusi on varasemalt uuritud, on niiskusesisalduse mõju survetugevusele käsitletud piiratud ulatuses.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida Väo V lubjakivikarjäärist pärineva Lasnamäe lademe lubjakivi survetugevuse sõltuvust niiskusesisaldusest ning hinnata niiskuse mõju kivimi mehaanilistele omadustele. Selleks valmistati lubjakivist silindrilised katsekehad, mis jagati kuivade, keskmise niiskusega ja küllastunud proovide gruppidesse ning katsetati üheteljelise survetugevuse katsel vastavalt ISRM-i soovitatud meetodikale.

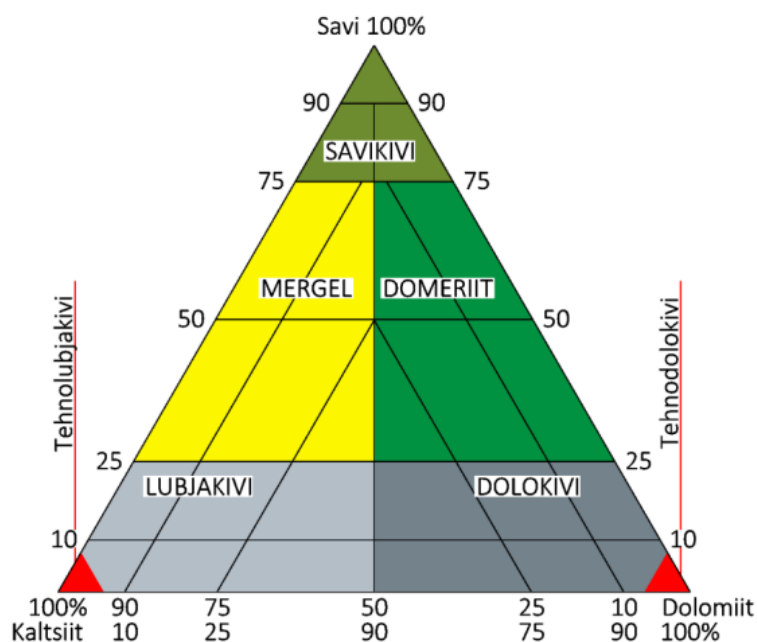
Töö hüpoteesiks on, et lubjakivi survetugevus väheneb niiskusesisalduse suurenemisel.

2. Lubjakivi üldiseloostus

Paekivi on karbonaatsete kivimite – lubjakivi, dolomiidi ja mergli üldnimetus. Eesti paekivi on tekkinud Ordoviitsiumi ja Siluri ajastul Baltika ürgmandrit katnud lauges Paleobalti meres, kus madalaveelistes tingimustes ladestusid lubjarikkad setted. Sügavamas meres moodustusid savirikkamad paekivimi erimid. Paekivi on biokeemilise tekkega setend, mis tekkis 472-417 miljonit aastat tagasi meres elanud organismide elutegevuse tulemusena. Baltika manner paiknes Kesk-Ordoviitsiumi ajastul lõunapoolkeral, mil moodustusid Lasnamäe ehituslubjakivi nimetuse all tuntud puhtad lubjakivid (Perens & Kala, 2007).

Kõige levinum pae erim on lubjakivi. Üle poole kivimi massist moodustab karbonaatne osa, kaltsiumkarbonaat ehk kaltsiit (CaCO_3), ning lahustumatu jääk, milles sisaldus on kuni 25% (Isakar, 2011). Puhas lubjakivi sisaldab ligikaudu 56% kaltsiumoksiidi (CaO) ja 44% süsinikdioksiidi (CO_2). Looduses esineb lubjakivis sageli lisandeid, mille sisaldusest sõltuvalt jaotatakse lubjakivi savikaks, liivakaks ja dolomiidikaks. Lubjakivi sisemine ehitus ulatub peitkristallilisest kuni jämedateraliseni. Kivimi põhimass on enamasti mikrokristalliline. Väiksema levikuga on afaniitne ehk peitkristalliline lubjakivi. Kõige levinumad on horisontaalkihilised (plaatjad), lainjad ja muguljad tekstuudid (Perens & Kala, 2007).

Lubjakivi ja dolokivi eristamine põhineb muuhulgas magneesiumoksiidi (MgO) sisaldusel. Kui MgO sisaldus on suurem kui 14%, on tegemist dolokiviga, väiksema kui 14% puhul on tegemist lubjakiviga (Reinsalu, 2008). Suur osa dolokividest on tekkinud lubjakivi dolomiidistumise käigus, mille tulemusena asendus kaltsium magneesiumiga. Dolokivi MgO sisaldus võib ulatuda kuni 21,7%-ni. Lubjakivi ja savi vahepealne kivim on mergel (joonis 1), mis sisaldab 25-50% savikat materjali (Perens & Kala, 2007). Mergel ei ole kasutusel maavarana, kuna savivaesemad karbonaatkivimid on üldjuhul tugevamad ja külmakindlamad (Pirrus, 1999).



Joonis 1. Lubjakivi, dolokivi ja savikivi liigitamine (Reinsalu, 2011).

2.1 Vão karjääri lubjakivi

Harjumaal Rae vallas asuv Vão lubjakivimaardla paikneb Põhja-Eesti platool. Kasuliku kihi moodustavad Kesk-Ordoviitsumi ladestiku Uhaku, Lasnamäe, Aseri ja Kunda lademe lubjakivid (Tammekänd, 2015). Vão karjääris kaevandatav Lasnamäe ja Uhaku lademe ehituslubjakivi on hea survetugevusega, külmakindel ning löökidele ja kulumisele hästi vastupidav (Pirrus, 1999). Seetõttu on Vão karjäär üks Eesti suurima majandusliku tähtsusega killustikku tootvaid karjääre (Raukas & Teedumäe, 1997).

Vão V lubjakivikarjäär asub Vão lubjakivimaardla kagu osas ning sealt võetud uuritav kivim kuulub kronostratigraafiliselt Lasnamäe lademesse ja litostratigraafiliselt Vão kihistusse. Kivipala on keskmisekihiline (14 cm) sisaldades kihilisusega paralleelseid savikelmeid ning dolomiidistumise jälgi. Nende tunnuste põhjal võib oletada, et uuritud kivim kuulub Kostivere kihistikku, mis moodustab suurima osa Vão kihistust. Lisaks Kostivere kihistikule hõlmab Vão kihistu Rebala ja Pae kihistikku (Raukas & Teedumäe, 1997). Pisikristalset, detriitjat lubjakivi sisaldav Vão kihistu jääb maardla alal keskmiselt 8 m paksuseks (Suuroja jt, 2002). Kogu maardla kasuliku kihi paksus on keskmiselt 12,7 m. Suurima kasuliku kihi moodustava Lasnamäe lademe paksus jääb vahemikku 8,4 – 9,6m, millest toodetakse peamiselt eri fraktsioonidega killustikku (OÜ Vão Paas, 2016).

3. Teoreetilised alused

Väo lubjakivimaardla, mis hõlmab Väo V lubjakivikarjääri mäeeraldist, on kantud keskkonnaregistrisse üleriigilise tähtsusega ehituslubjakivi maardlana. Kaevandatav ehitusmaavara on riigile oluline ressurss, sest kivimi kvaliteet vastab kõrgemargilisele ehituslubjakivi nõuetele, kus kriteeriumideks on keemiline koostis ja füüsikalised-mehaanilised omadused. Väo V lubjakivikarjääri kasuliku kihi kvaliteedi hindamisel lähtuti 2005. aasta nr 44 määrusest, milles üheks oluliseks näitajaks oli survetugevus. (Steiger, 2016; Tammekänd, 2015; Keskkonnaministri määrus nr 52, 2018).

Enne 2018. aasta määruse nr 52 jõustumist määrati Eestis lubjakivi ehitusotstarbeliseks (viimistlus- ja ehituslubjakivi) kivimi külmakindluse ja survetugevuse (kuivalt vähemalt 200 kg/cm² ehk ligikaudu 20 MPa) poolest, siis praeguseks on oluliste näitajate hulgast viimane asendatud purunemiskindlusega. 2005. aasta määruse nr 44 järgi, mida enne aastat 2018 kasutati, pidi kõrgemargilistel ehituslubjakividel survetugevus olema kuivalt suurem kui 600 kg/cm² (60 MPa), täitematerjalina kasutataval lubjakivil võis jääda alla 200 kg/cm² (20 MPa). Kuigi survetugevus pole enam oluline kvaliteedi näitaja karbonaatkivimite kasutusala liigitamisel, sest purunemiskindlust otseselt survetugevusega võrrelda ei saa, omab füüsikalised-mehaaniline näitaja mäenduses siiski olulist rolli (Rosentau jt, 2021).

Enamik maardlana arvele võetud lubjakivi karjääridest (sh Väo V lubjakivikarjäär) on geoloogilise uuringu läbinud vana määruse järgi, kus kvaliteeti hinnati ka survetugevuse alusel. Karjäärid, kus geoloogilistel uuringutel hinnati hetkel kehtiva määruse järgi teisi kivimi tugevusomadusi (purunemis- ja külmakindlust), moodustavad enamuse orienteeruvalt aastaks 2031 (Rosentau jt, 2021).

3.1 Kivimite tugevusomadused

Ehitusmaavara kvaliteet määrab maapõueressursi kasutusvõimalused ja sobivuse erinevateks ehitusotstarveteks. Maavara kaevandatavus sõltub aga mitmesugustest mäetehnilistest tingimustest, mis omakorda sõltuvad suuresti kivimi mehaanilistest omadustest. Kivimi peamisteks mehaanilisteks näitajateks on abrasiivsus ja tugevustunnused. Survetugevus, mida uuritakse ka käesolevas töös, on üks peamisi kivimi mehaaniliste omaduste kirjeldamisel kasutatavaid tugevustunnuseid (Burbaum, 2022; Reinsalu jt, 2014; Valgma, 2008).

3.1.1 Tugevusomaduste tähtsus

Kivimite tugevusomaduste määramise meetodeid on palju ning neid valitakse sõltuvalt kivimi käitlemise ja kasutamise eesmärgist. Peamiselt on kivimi tugevusomadused olulised maapõuerajatiste (näiteks tunnelid ja kambrid) püsivuse tagamisel. Maavara kaevandamisel ja rikastamisel võetakse arvesse kivimite surve-, painde-, tõmbe- ja nihketugevusi. Kaevandamisel on tugevustunnused olulised, et projekteerida kivimimassiivi vastupanu kaevandamisprotsessidele ning määrata sobiv kaevandamise tehnoloogia ja masinate tootlikkus. Kaevisel mehaanilisel rikastamisel mõjutab survetugevus purustatud materjali tükisuuruse, mille alusel saab kvaliteetse kaevisel välja sõeluda. Eelnevalt mainitult aitavad kivimite tugevusomadused hinnata ehitusmaavarade kvaliteeti ning on seega olulised uute maardlate hõlvamisel ja geoloogilistel uuringutel (Kolats jt, 2012; Reinsalu jt, 2014; Valgma, 2008)

3.1.2. Tugevusomaduste määramine

Üks viis kivimi tugevuse määramiseks on mikrotasandil uuritavate omaduste kaudu, mis saadakse välitöödel või laboratooriumis katsekehi teimides. Niisugusel juhul on katsekeha suhteliselt homogeenne ja lõhedeta, mistõttu tugevus sõltub mineraalide kõvadusest, kristallstruktuurist, poorsusest ning mineraale siduva aine (tsemendi) tugevusest ja koostisest. Kõige tavalisem tugevuse mõõdik on vastupanu ühesuunalisele survele ehk erisurve, mille juures katsekeha puruneb. Katsekehades algab uute pragude ja lõhede teke reeglina siis, kui kivimile mõjub ligikaudu pool maksimaalsest koormusest. Looduslikus keskkonnas on kivimimassiiv paraku heterogeenne, mistõttu kivimi teimitugevus ei peegeldu üksüheselt sama kivimi tugevust maapõues (Goodman, 1989; Reinsalu jt, 2014).

Reaalses kivimimassiivis esinevad lõhed, lisandid ja seotus kaaskivimitega loovad maapõues keeruka surveolukorra, mida laboratoorselt täielikult jäljendada ei ole võimalik. Tõmbetugevus risti lõhelisusega on peaaegu olematu. Lõhenevuse tõttu võib kivimimassiivides olla ka tugevust nõrgendav kõrgem niiskusesisaldus. Seetõttu mõjutavad rikked ja lahutuspinnad oluliselt kivimi tugevusomadusi ning muudavad kivimi anisotroopseks ehk tugevus sõltub koormamise suunast. Anisotroopsus ei teki siiski ainult rikkestruktuuride tõttu, vaid seda võivad põhjustada ka mineraaliosakeste eelistatud orientatsioon ning kivimi kujunemisel mõjunud pinged. Tugevuse anisotroopia väljendub näiteks selles, et kivimi survetugevus võib kihistumise suhtes kaldsuunas olla poole väiksem võrreldes koormamisega risti või paralleelselt kihistumise suhtes. Mikrotasandil uuritavad katsekehad on küll suhteliselt homogeenised, kuid siiski anisotroopsed (Goodman, 1989; Reinsalu jt, 2014).

Sellepärast võetakse arvesse ka makroomadused tugevuse määramisel, mis aitavad realistlikes tingimustes hinnata tegelikku kivimi massiivitugevust. Eriti allmaa konstruktsioonide, näiteks Eesti põlevkivi tervikute projekteerimisel kasutatakse makroomaduse iseloomustamiseks survetaluvust, mis peegeldab reaalselt survetugevust. Teistsuguse pingeolukorra tõttu talub tervik tegelikult 2-4 korda väiksemat teimitud survetugevust. Survetaluvuse hindamisel kasutatakse aga oluliselt väiksema väärtusega nihketugevust. Terviku väike nihketugevus põhjustab purunemise terviku keskosas, mille tagajärjel väheneb ristlõike pindala ja suureneb tervikule mõjuv survepinge ning toimub varisemine (Reinsalu jt, 2014).

Kivimite puhul on survetugevus mitmekordselt suurem kui nihke-, tõmbe- ja paindetugevus, mistõttu on loodud tugevustunnuste vahel kehtivad suhted. Seetõttu on mäetehnilistes tingimustes olulised ka teised tugevustunnused ja looduslikud eripärad massiivitugevuse määramisel. Kivimimassiivi tugevuse hindamise alusel projekteeritakse põhimõtteliselt kõik mäetehnilised protsessid. Täpsema hinnangu andmiseks kasutatakse mikrotasandil tehtud katsete väärtusi (Reinsalu jt, 2014, pells 1993).

3.2 Lubjakivi tugevusomadused

Lubjakivi on oma looduslikus massiivis heterogeenne. Lahutuspinnad, savikiled ja lõhelisus on looduslike lasundite puhul tavaline. Anisotroopsus, mis on omane ka katsekehadele, on kujunenud kihilisuse tõttu. Eestis on lubjakivi lasumid enamasti horisontaalkihilised ning ka käesolevas töös on survejõud rakendatud risti kihilisusega (Goodman, 1989; Reinsalu jt, 2014).

Lubjakivi geomehaanilised omadused sõltuvad suurel määral kivimi koostisest ja mikrostruktuurist. Maatriksi ja terade vahelised piirpinnad, fossiilide fragmendid ja pooriruumid on lubjakivil nõrgad kohad, kus koormuse rakendumisel algab pragude teke. Suurem poorsus vähendab kivimite tugevust ja suurendab deformatsiooni. Alahinnata ei tasu ka pooride geomeetriat, näiteks planaarsed (*planar*) mikrolõhed mõjutavad kivimi tugevust tunduvalt suuremal määral kui ümarad tühimikud (Goodman, 1989; Ündül jt, 2016).

Savi mõju lubjakivi tugevusele sõltub saviosakeste jaotumisest. Savikelmed kihipindadel põhjustavad kivimi lagunemist õhukesteks plaatideks. Hajutatud kujul sama kogus saviainet ei mõjuta kivimi tugevust samaväärselt (Pirrus, 1999).

3.3 Niiskuse mõju

Põhjavesi, sademed ja õhuniiskus teevad lubjakivi niiskeks ning mõjutavad kivimi mehaanilisi omadusi. Niiskus nõrgestab kivimite survetugevust mitmete füüsikalise-keemiliste efektide tõttu (Hou jt, 2025; Pells, 1993; Kliimaministerium, i.a.).

Niiskusega väheneb pindmine energia (*Rehbinder effect*). Vesi adsorbeerub kivimi poorides, kattes kristallid ja kivimiosakesed. Sellega väheneb nende pindmine energia nõrgestades sidemeid mineraalosakeste, kristallide ja tsementeeriva materjali vahel. Mikropragude tõttu on efekt lubjakivis eriti suur. Lisaks sellele võib vesi lahustada reageerivaid ühendeid ning vähendada sidusainete tugevust. Laboratoorsete survekatsete puhul aga ei võeta seda arvesse, sest efekt on kivimis väike (võrreldes Rehbinderi efektiga), sest mõju toimus arvatavasti juba varem looduses esineva niiskuse tõttu (Goodman, 1989; Riabokon jt, 2023)

Lubjakividel määrab niiskuse mõju kivimi tugevusele suuresti kivimi poorsus. Suurema poorsusega lubjakivid nõrgenevad vee mõjul rohkem. Sisemiste pooride seintele tekkiv vesi tekitab poorivee rõhu, mis koos maatriksi pehmenemisega raskendab vastupanu osutamist pinge rakendamisel tekkivatele deformatsioonidele, langetades survetugevust. Vesi vähendab ka hõõret ning soodustab nihkumist lõhepindade vahel, väiksem nihketugevus omakorda vähendab survetugevust. Suurema poorsusega kivimites on niiskusest tingitud teradevahelise hõõrde vähenemise mõju survetugevusele väiksem, kuna domineerivaks muutuvad poorivee rõhk, mikropragude olemasolu ja maatriksi pehmenemine. Niiskuse mõju poori geomeetrialet on samuti märkimisväärne (Hou jt, 2025). Zenah jt (2020) uuringus testiti niiskusest tingitud survetugevuse vähenemist suure poorsusega lubjakividel. Selgus, et sama poorsusega kivimitel oli peeneteralisel teimikul niiskuse tõttu survetugevus 50 % väiksem ja jämedateralisel ainult 16 %. Põhjendusena toodi välja erineva kujuga pooride esinemine.

Savimineraalid mõjutavad lubjakivi vastupidavust niiskusega seotud paisumise ja kahanemise kaudu, kus korduva märgumis-kuivamis tsüklite vaheldumisega hakkab kivim lagunema. Paljud kivimid, kus puuduvad paisuvad mineraalid (nt liivakivi) näitavad korduva märgumis-kuivamis tsükli järel samu niiskuse ja kuiva survetugevuse väärtused. Savimineraalid, eriti smektiidid mõjutavad kivimi niiskustundlikkust suure hügrokoopsuse tõttu ning võivad nihutada tugevuse vähenemise avaldumist kõrgema niiskusesisalduse juures (Cherblanc jt, 2016; Pells, 1993). Lisaks sellele tõestasid Cherblanc jt (2016), et kõrge õhuniiskuse käes imas savimineraale sisaldav lubjakivi piisavalt niiskust, et

survetugevus väheneks märkimisväärselt. 97 %-lise atmosfääri suhtelise õhuniiskuse käes oleval kivimil vähenes üheteljeline survetugevus 90 %.

3.4 Üheteljeline survetugevuse katse

Pinge, mille juures kivim puruneb, nimetatakse kivimi tugevuseks. Nii pinge kui ka tugevus pole üheselt defineeritud parameeter. Seetõttu on kivimi tugevus ainult kasulik, kui laboratoorse testi tüüp on mainitud (Fjær jt, 2021).

Üheteljeline survetugevuse katse, (inglise keeles *Uniaxial Compressive Strength test*) on üks tuntumaid kaljuste kivimite iseloomustamiseks tehtavaid katseid kivimimehaanikas ja insenerigeoloogias (Burbaum, 2022). See on üheks baastestiks paljude insenertehniliste meetodide projekteerimisel. Katsega hinnatakse allmaakaevandamise tugisammaste tugevust ja kaeveõõnte varisemiskindlust. Katseväärtusi kasutatakse raimamise tehnoloogia ning lõhkamise meetodi valikul ning paljudel teistel mäetehnilistel töödel (Pells, 1993). Üheteljelise survetugevuse katsel leitakse maksimaalne survepinge, mida peab standardse geomeetriaga kivimipalale rakendama, et see puruneks. Survetugevus saadakse suurima rakendatud survepinge jagamisel algse katsekeha ristlõike pindalaga, nagu näidatud valemis (1) (Goodman, 1989). Inseneeriliste struktuuride püsivusel on kriteeriumiks kivimi kõrge survetugevus, seevastu maavara väljamisel on eelistatud väiksem survetugevus (Coffey Testing, 2026).

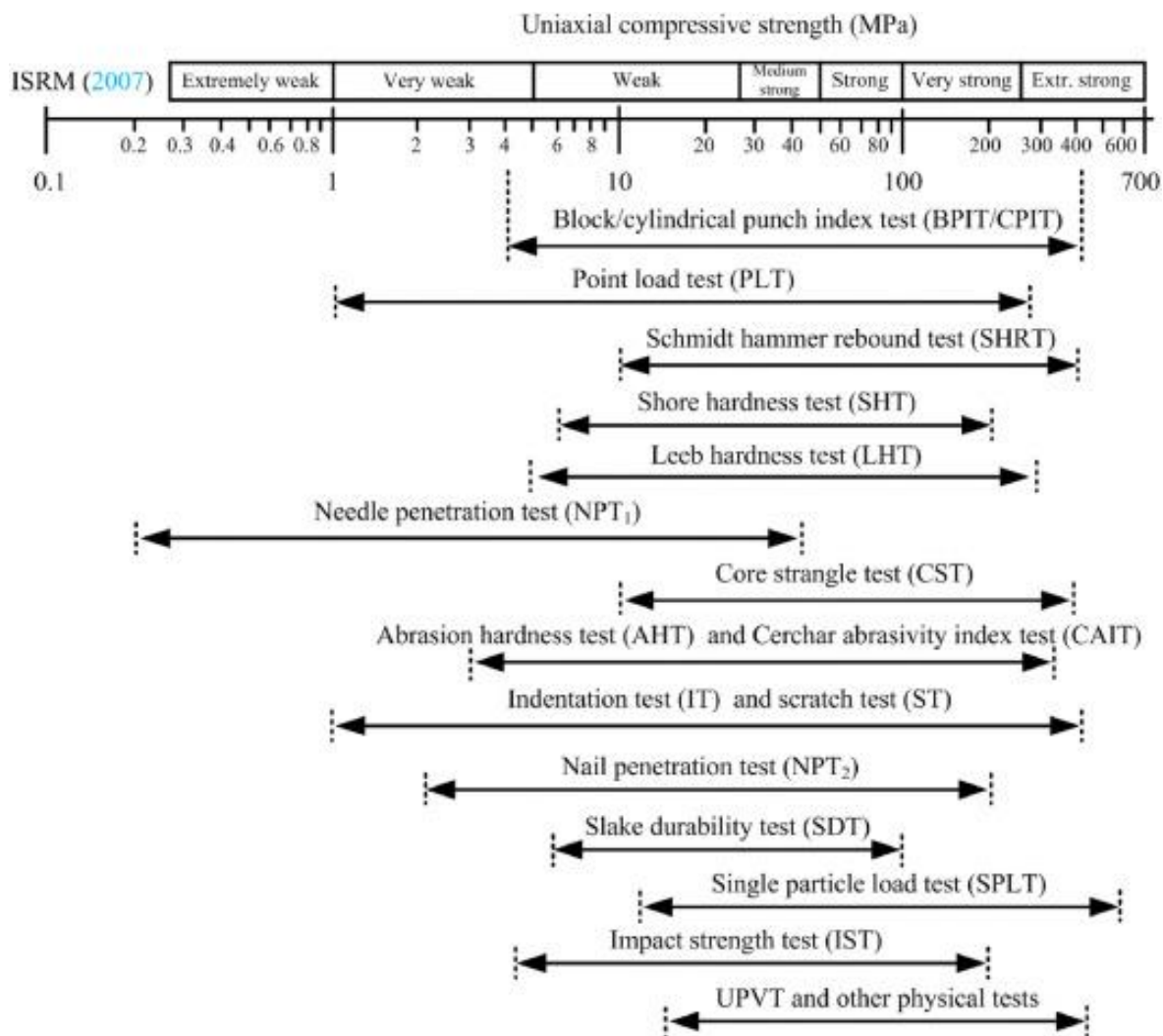
Vastavalt ISRM-i soovitatud meetodile on üheteljelise survetugevuse arvutamise valemi (1) järgi (Saliu jt., 2013):

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

Kus:

- σ_c – Üheteljeline survetugevus (MPa)
- P_{max} – Maksimaalne koormus (N)
- A – Algne katsekeha pindala (mm²)

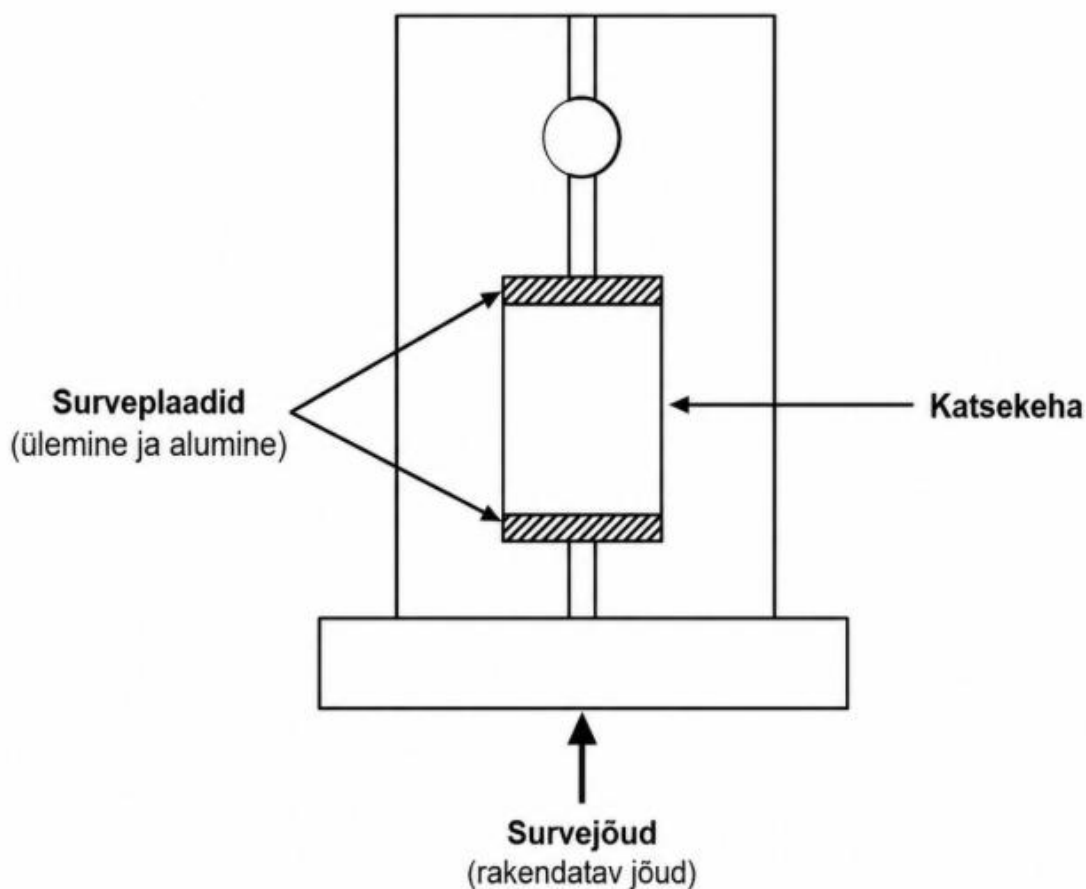
Survetugevuse alusel saab jaotada kivimid tugevusklassidesse. Poolkaljustel ja pudedatel kivimitel on survetugevus alla 10 MPa. Kaljused kivimid jagunevad nõrkadeks, keskmisteks, tugevateks ja ülitagevateks. Lubjakivi kuulub keskmise kaljuste kivimi tugevusklassi, kus kriteeriumiks on survetugevus 40 kuni 140 MPa (Reinsalu jt, 2014). Survetugevuse väärtusi saab empiiriliste seoste abil hinnata ka kaudsete meetoditega (vt joonis 2).



Joonis 2. Kaudsed meetodid üheteljelise survetugevuse hindamiseks (Xie jt., 2025).

3.4.1. Survepress

Laboratoorne üheteljeline survepress on katseseade (vt joonis 3), mida kasutatakse kivimi puursüdämike ja betooninäidiste survetestimiseks. Seadet saab kasutada silindriliste ja kuubikujuliste proovide katsetamiseks. Kuubikujuliste proovide testimisel on vaja vaheplaati. Surveteimi teostamiseks tuleb määrata katsekeha mõõtmed ja mass ning seejärel sisestada need seadme juhtsüsteemi. Pärast mõõtmistulemuste sisestamist tuleb katsekeha asetada pressi alumise plaadi keskele. Mootori sisselülitamisel hakkab käesolevas töös alumine surveplaat liikuma etteantud kiirusega kuni katsekeha purunemiseni (Valgma, 2008). Alltoodud joonis kirjeldab lihtsustatult katseseadme tööpõhimõtet. Käesolevas töös kasutati survepressi Controls AUTOMAX PRO-M COMPACT-Line 3000 kN.



Joonis 3. Üheteljelise survepressi lihtsustatud skeem. Koostatud Hamza (2019) põhjal.

3.5. Katse kriteeriumid

3.5.1. Üheteljelise survetugevuse standardid

Üheteljelise survetugevuse katse läbiviimiseks kasutatakse nii standardeid kui ka soovitatud meetodikaid. Kõige levinumad on ISRM-i (*International Society for Rock Mechanics*) soovitatud meetodika ja ASTM-i (*American Society for Testing and Materials*) standard D7012-14 (Burbaum, 2022). Standardid on koostatud, et katseprotseduur oleks usaldusväärne ning tulemused korratavad (Guerrero-Miguel jt., 2024).

Käesolevas töös lähtuti üheteljelise survetugevuse katsel ISRM-i poolt (1979) soovitatud meetodikast üheteljelise survetugevuse ja deformatsiooni määramiseks kivimites (*Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*).

Veesisalduse määramisel järgiti ISRM-i poolt (1977) soovitatud meetodikat veesisalduse, poorsuse, tiheduse, veeimavuse ja seotud omaduste ning paisumis- ja lagunemiskindluse indeksite määramiseks (*Suggested method for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*).

3.5.2 ISRM-i soovitatud meetodika üheteljelise survetugevuse katseks

Katse eesmärk on mõõta üheteljelist survetugevust regulaarse geomeetriaga teimikul, mis aitab liigitada kivimit vastavasse tugevusklassi ja iseloomustada rikkumata (ilma pragudeta ehk *intact*) kivimikeha (International Society for Rock Mechanics, 1979).

Survepressi sobilikkust määrab piisav mahutavus ja võime rakendada pidevat koormust, et katsekeha puruneks 5-10 minuti jooksul või et koormamist teostataks kiirusel 0.5-1.0 MPa/s. Nii plaadid kui ka katsekeha peavad olema üksteisega paralleelsed. Ringikujulised plaadid peavad olema piisava kõvadusega ning läbimõõt maksimaalselt 2 mm suurem katsekeha läbimõõdust. Plaatide paksus peab olema vähemalt 15 mm või kolmandik katsekeha läbimõõdust (International Society for Rock Mechanics, 1979).

Katsekehad peaksid olema silindri kujulised, mille kõrguse ja läbimõõdu suhe on 2,5-3,0. Suurema dimensioonide suhte korral väheneb kivimi tugevus. Minimaalne läbimõõt on 54 mm ning see peab olema vähemalt kümme korda suurem katsekeha suurimast terasuurusest. Proovikeha põhjad ja külged peaksid olema täisnurja all ning siledad, muidu võib katsekeha puruneda enneaegselt. Läbimõõdu mõõtmist tuleb teha 0,1 mm täpsusega, millega arvutatakse katsekeha ristlõike pindala. Kõrguse puhul võib mõõta täpsusega 1,0 mm. Katsekehad tuleb säilitada loodusliku niiskuse juures ning ladustama mitte rohkemaks kui 30 päevaks. Seevastu mõnedel juhtudel nagu ka käesolevas töös, on eesmärgiks teha survetugevuse katse spetsiifilistel niiskusesisaldustel, mis tuleb katsete tegemisel ka dokumenteerida. Minimaalne katsekehade arv on soovituslikult vähemalt viis (International Society for Rock Mechanics, 1979; Pells, 1993).

ISRM-i soovitatud meetodika kohaselt tuleb katsetulemuste esitamisel välja tuua järgmised andmed (International Society for Rock Mechanics, 1979):

- Kivimi litoloogiline kirjeldus;
- Koormuse suund vastavalt anisotroopsusele;
- Katsekeha päritolu;
- Katsekehade arv;
- Katsekeha kõrguse läbimõõdu suhe;
- Niiskusesisaldus katse tegemisel;
- Katseprotseduuri aeg;
- Purunemise tüüp;
- Survetugevus 0,1 MPa täpsusega;
- Informatsioon standardist kõrvale kaldumise kohta.

3.5.3. ISRM-i soovitatud meetodika veesisalduse jaoks

Katse eesmärk on mõõta kivimis sisalduvat veemassi. Veesisaldus saadakse veemassi ja kuiva katsekeha massi suhtena (International Society for Rock Mechanics, 1977).

Kuivatamisel peab kuivatusahi olema võimeline hoidma 105 °C temperatuuri vähemalt 24 tundi. Lisaks sellele soovitatakse kasutada suletavat anumad, kuhu niiske katsekeha asetada niiskusekao vältimiseks

ning eksikaatorit katsekeha jahutamiseks pärast ahjust väljavõtmist. Kaal peaks olema täpsusega 0,01 grammi ning loodusliku kivimi niiskuse hindamisel ei tohi veesisaldus erineda rohkem kui 1% (International Society for Rock Mechanics, 1977).

Veesisalduse mõõtmisel peaks kivitükk olema pigem suur, et vähendada mõõtevigade mõju. Kivimi niiskuse määramiseks peaks kasutama vähemalt 10 proovi, mis on suuremad kui 50 grammi või mille minimaalne mõõde oleks vähemalt kümme korda suurem maksimaalsest terasuurusest. Samas ei tohi kivitükis esineda läbivaid mikropragusid ja -lõhesid, mistõttu proovide arvu võib vähendada. Kuiva proovi määramisel ei tohi katsekeha massi vähenemine ületada 4 tunni jooksul rohkem kui 0,1% ning kuiva proovi väljavõtmisel ahjust ei tohi niiskusesisaldus enne kaalumist suurenda (International Society for Rock Mechanics, 1977).

Veesisalduse arvutamiseks kasutatakse järgmist valemit (2) (International Society for Rock Mechanics, 1977):

$$w = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (2)$$

w – Veesisaldus (%);

M_w – Vee mass (g) (märja ja kuiva massi vahe);

M_s – Kuiva katsekeha mass (g).

3.6 Varasemad UCS katsed lubjakivil

Varasemad uuringud (Sidorova, 1956; Rimmel, 1970; Rannik, 2008) Väo maardla kivimite füüsikalismehaaniliste omaduste kohta näitavad, et kivimi kvaliteet on olnud stabiilne. Lasnamäe lademe lubjakivide mahumass jääb vahemikku 2,53–2,74 g/cm³ (keskmiselt 2,62 g/cm³). Kivimi survetugevus kuivas olekus jääb vahemikku 637–1707 kg/cm² (ligikaudu 63,7–170,7 MPa) ning keskmiselt 1099 kg/cm² (ligikaudu 109,9 MPa). Veega küllastunud olekus jääb kivimi survetugevus vahemikku 403–1361 kg/cm² (ligikaudu 40,3–136,1 MPa), keskmiselt 917 kg/cm² (ligikaudu 91,7 MPa). Veeimavus Lasnamäe lademe lubjakivil jääb vahemikku 0,5–2,7 % (keskmiselt 1,3 %) ja poorsus jääb vahemikku 1,5–6,3 % (keskmiselt 3,1 %). Lubjakivi survetugevus määrati vastavalt GOST standardile, mis kuulub endise Nõukogude Liidu riikliku standardisüsteemi, ülejäänud parameetrid määrati ka EVS–EN standardi järgi ehk Eesti standard, mis põhineb Euroopa standardite alusel (Tammekänd, 2015).

Lasnamäe lademe varasemate andmete põhjal on leitud korrelatsioon survetugevuse ja mahumassi vahel. Korrelatsiooni põhjal ei vastanud mahumassiga alla 2,52 g/cm³ kivimid kõrgemargilise karbonaatkivimi nõuetele. Analüüs viidi läbi enne 2018. aastat kehtinud määruse alusel, mille järgi pidi kõrgemargilise ehituslubjakivi survetugevus kuivalt ületama 600 kg/cm² ehk ligikaudu 60 MPa (Tammekänd, 2015; Keskkonnaministri määrus nr 52, 2018).

4. Proovide võtmine, ettevalmistus ja katsemetoodika

Töös kasutatud materjal on kogutud Vão V lubjakivi karjäärist. Uuritav kivim valiti Vão lubjakivi maardlast, kuna tegu on riiklikult tähtsa ehituslubjakivi maardlaga ning kivimi peal on tehtud palju erinevaid geoloogilisi uuringuid, mida saab võrdlusena käesolevas töös kasutada (Tammekänd, 2015).

4.1. Proovide kogumine

Enne proovide kogumist oli karjääris toimunud lõhketööd, mistõttu kivimi tükid olid laiali paisatud ning raske oli hinnata kivimi täpset kihti (joonis 4). Sellegipoolest sai kivimi iseloomulike omaduste põhjal võetud tükk liigitada Kostivere kihistikku. Kivimipala pikkus oli 740 mm (joonis 5), laius ligikaudu 530 mm ja paksus 150 mm. Oluline oli leida sobiv kivitükk üheteljelise survetugevuse katseks täites ISRM-i soovitatud meetodikat. Selleks vältisime kivi tükke, kus esinesid savised lahutuspinnad ning silmnähtavad lõhed ja praod. Need oleksid teinud teimiku märkimisväärselt anisotroopseks ning vähendanud survetugevuse väärtust (Goodman, 1989; International Society for Rock Mechanics, 1979). Kivitüki pindala pidi olema piisavalt suur, et puurida välja piisav arv katsekehi. ISRM-i soovitatud meetodika järgi tuleks ideaalis sooritada katse vähemalt viiel katsekehal, mistõttu pidi kivitükk kolme niiskusklassi tugevuse määramiseks võimaldama välja puurida 15 südamikuproovi (International Society for Rock Mechanics, 1979). Kivitükil pidi kihipaksus olema piisavalt suur, et täita ISRM-i soovitatud meetodika kõrguse ja läbimõõdu suhte 1:2,5 (International Society for Rock Mechanics, 1979). Ülikoolis kasutatava teemantpuuri läbimõõt oli 54 mm, mis vastab ISRM-i soovitatud meetodika minimaalsele läbimõõdule (International Society for Rock Mechanics, 1979). Sellest tulenevalt pidanuks korrektsete dimensioonide suhte saavutamiseks katsekeha kõrgus olema 135 mm. Käesolevas töös kaldusin soovitatud meetodikast kõrvale, kuna piisava paksusega kivimikihti ei olnud võimalik leida. Sellepärast võtsin eesmärgiks saada kõrguse ja läbimõõdu suhte 1:2, mida on kasutatud ka varasemates TalTechi mineraalsete ehitustoormete valdkonna uuringutes.



Joonis 4. Laiali paisatud kivitükid Väo V lubjakivi karjääris.



Joonis 5. Välja valitud kivitükk.

4.2. Proovide ettevalmistus

Pärast kõige paksema kihilise kivimipala, saagisin selle väiksemateks tükkideks (joonis 6), et lihtsustada transportimist. Seejärel TalTechi Mäepealse laboris puurisin teemantpuuriga (joonis 7) 23 puursüdamikku, millest üks osutus mittesobivaks, kuna puurimisel ristuti teise auguga. Ühe puursüdamiku puurimiseks kulus keskmiselt 4 minutit.



Joonis 6. Kivitüki saagimine väiksemateks tükkideks.



Joonis 7. Kivitükist puursüdamike välja puurimine.

Paralleelselt puurimisega indekseerisin proovid ja lähtekivitüki tähtede ja numbrite abil (1A, 2A, 1B jne). Tähed A, B ja C viitavad, millisest tükist on proovid võetud ning numbrid 1 – 9 tähistavad kivitüki puursüdamiku asukohta. Tükkidest A, B ja C saadi 8, 9 ja 5 proovi vastavalt (joonis 8).



Joonis 8. Lähtekivimi ja proovide indekseerimine.

Enneaegse purunemise vältimiseks nõuab ISRM-i soovitatud meetodika, et katsekeha otsad oleksid tasased (International Society for Rock Mechanics, 1979; Pells, 1993). Seetõttu saagisin kivisaega proovikeha otsad maha ning just nii palju, et lõplik silinder oleks vähemalt kõrguse ja läbimõõdu suhtega 1:2 (vt joonis 9). Mõõtsin nihikuga kolm korda 0,1 mm täpsusega iga proovi läbimõõdu ja kõrguse ning viisin proovid 105 °C temperatuuriga kuivatusahju 24 tunniks kuivama.



Joonis 9. Ebatasaste proovikehade otsade lihvimine.

4.3. Katseprotseduur

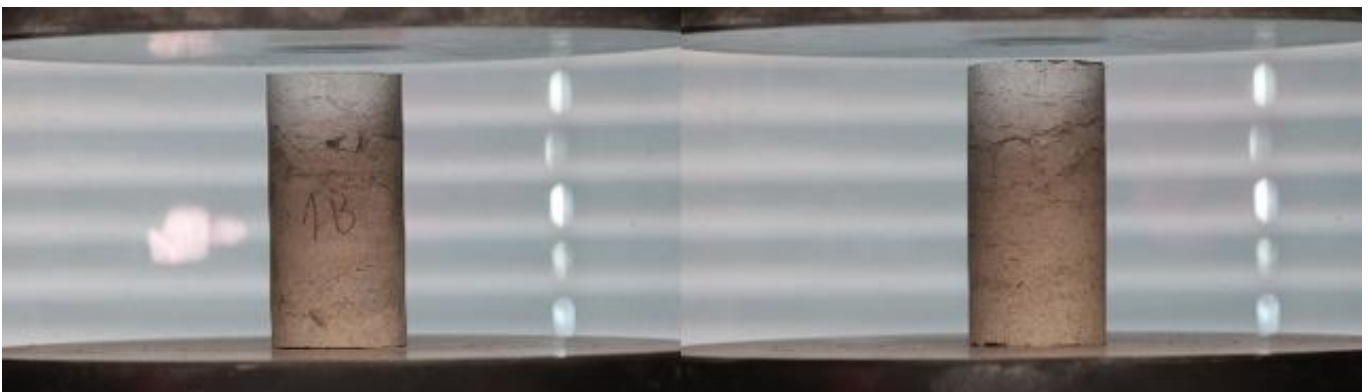
Korreksete katsetulemuste jaoks kontrollisin tööorganite võimekust ja seadistasin survepressi mehhanismi, vastavalt ISRM-i soovitatud meetodikale. Katsekeha purunemise kindlustamiseks valisin maksimaalse koormuse tundlikkuseks 50 MPa ning maksimaalseks rakendatavaks survepingeks 400 MPa. Koormamiskiiruseks valisin ISRM-i soovitatud meetodi pakutud minimaalse kiiruse ehk 0,5 MPa/s (International Society for Rock Mechanics, 1979).

Testi sooritamiseks kaalusin katsekehad 0,01 grammi täpsusega kaalul (vt joonis 10) ning asetasin proovi survepressi masina alumise plaadi keskele. Seejärel tegin masina sees olevast katsekehast eest- ja tagantvaate pildid (joonised 11 - 13) ning sisestasin katseandmed arvutisse. Koormuse rakendamisel hakkas alumine plaat tõusma ning lõi kontakti katsekehaga. Katse lõpetati, kui katsekeha purunemise järel langes koormus alla seadistatud tundlikkuse piiri. Seejärel hindasin katseprotseduuri edukust ja

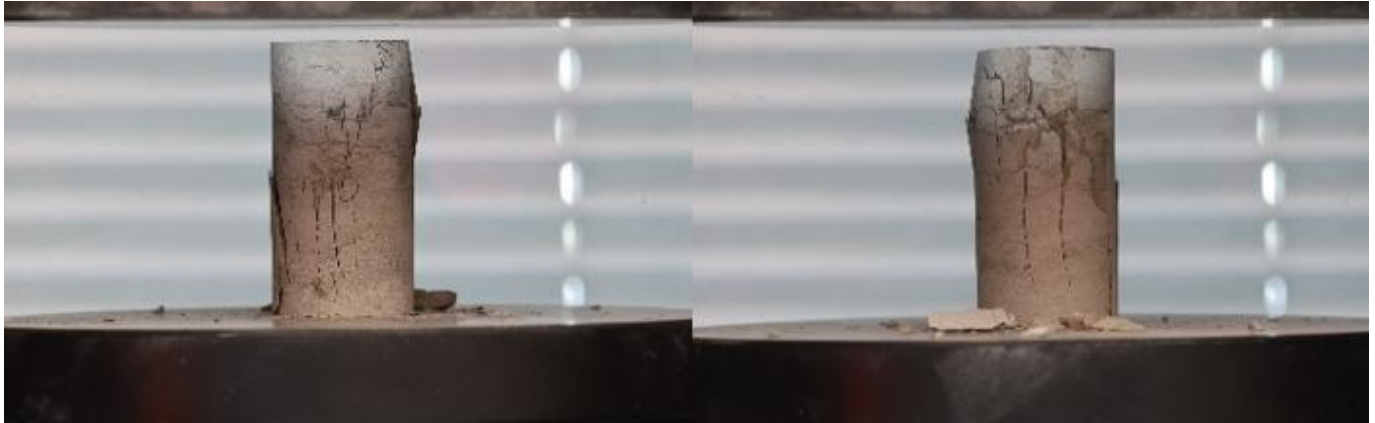
tegin purunenud katsekehast pildid (vt joonised 11 - 16). Tõstsin purunenud materjali märgistatud proovikottidesse. Salvestasin andmed ja dokumenteerisin katsele kulunud aja.



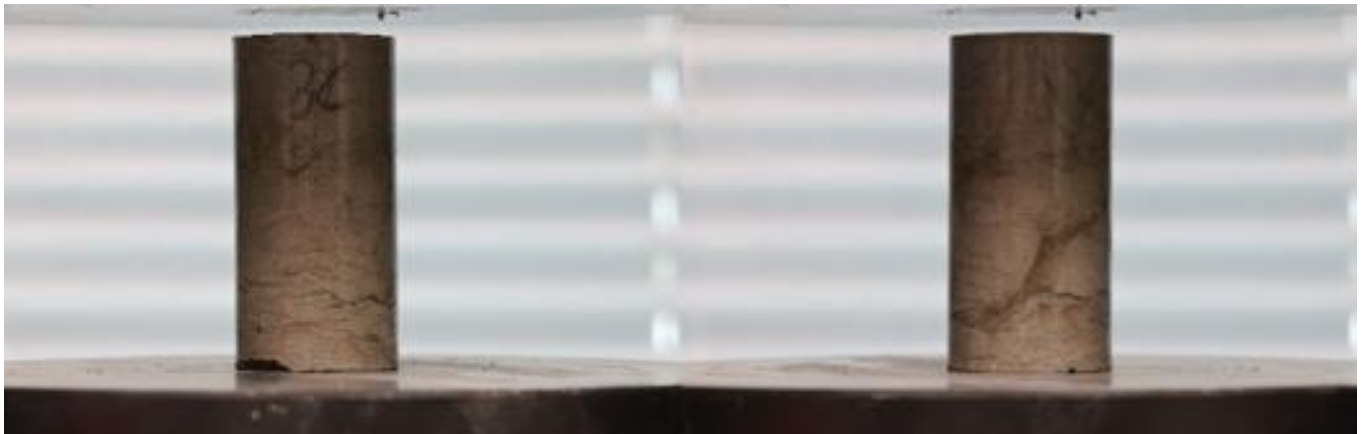
Joonis 10. Kuivatusahjust välja võetud proovide kaalumine



Joonis 11. K-grupi proovi 1B pildid eest ja tagant enne katset.



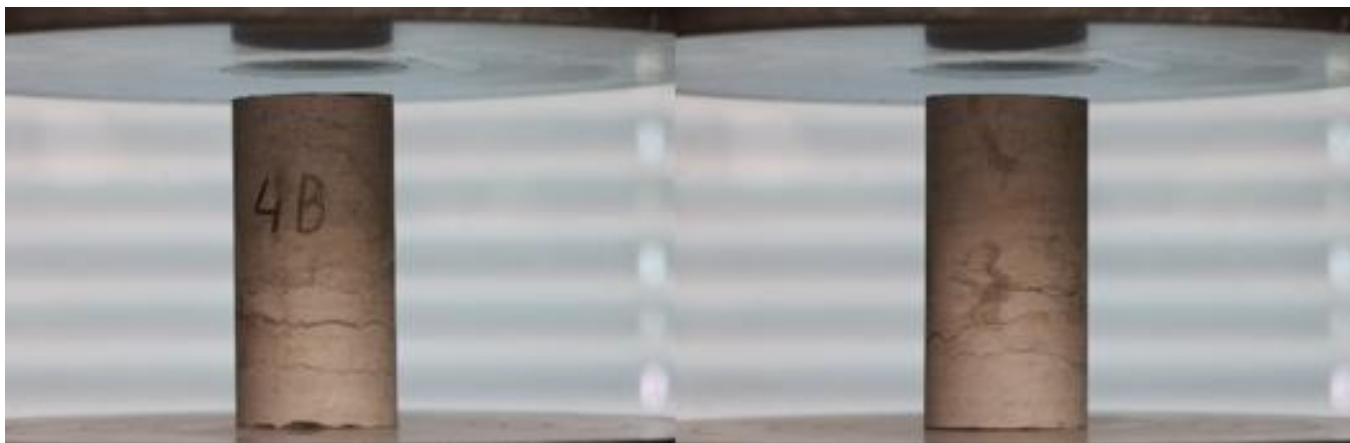
Joonis 12. K-grupi proovi 1B pildid eest ja tagant pärast katset.



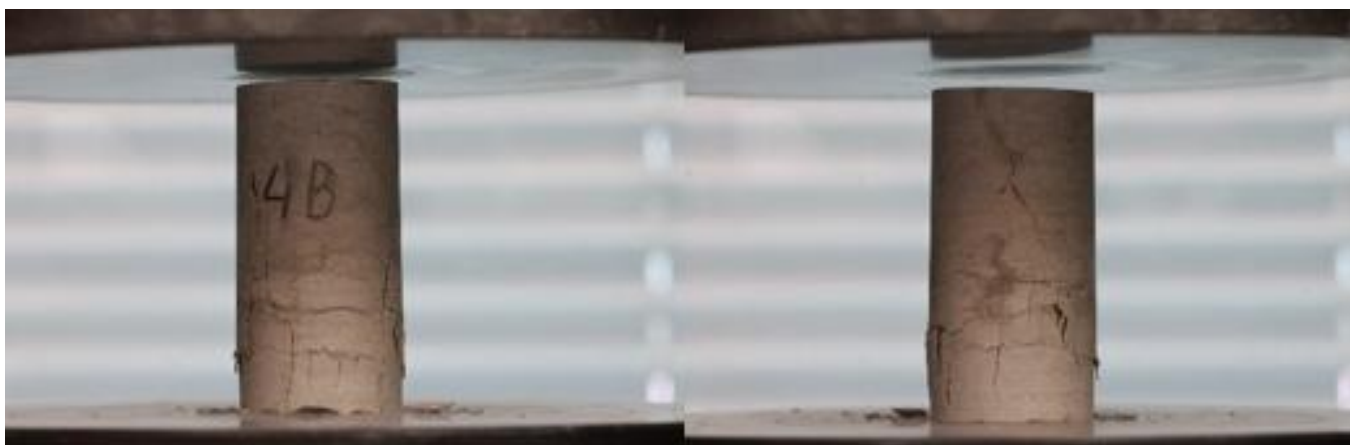
Joonis 13. M-grupi proovi 3C pildid eest ja tagant enne katset.



Joonis 14. M-grupi proovi 3C pildid eest ja tagant pärast katset.



Joonis 15. N-grupi proovi 4B pildid eest ja tagant enne katset.



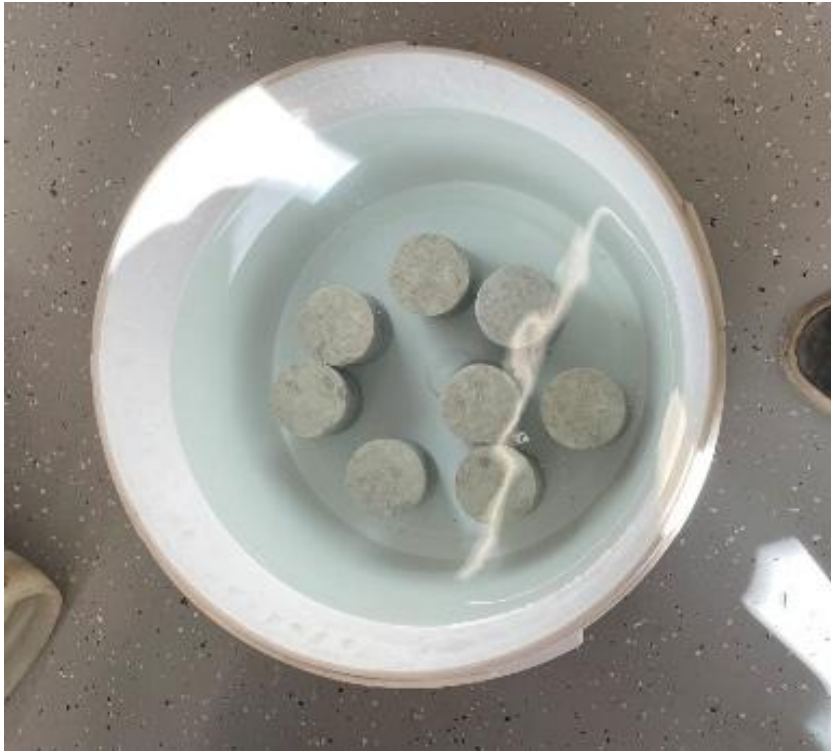
Joonis 16. N-grupi proovi 4B pildid eest ja tagant pärast katset.

4.4. Niiskustingimused

Käesolevas töös ei olnud eesmärgiks määrata katsekehade survetugevust looduslikul niiskusel, vaid võrrelda erinevate niiskustingimuste mõju survetugevusele. Seetõttu võis ISRM-i soovitatud meetodika kohaselt kasutada proovide lõikamisel vett ning määrata veesisaldus katseprotseduuri läbivate katsekehadel (ehk mitte alamproovide peal). (Pells, 1993).

Kuna töö eesmärk oli hinnata lubjakivi ühtelise survetugevuse muutust sõltuvalt niiskusesisaldusest, liigitasin 22 proovi kolme niiskusegruppi: kuiv, keskmine niiskus ja märg. Edaspidi viitan gruppidele lühendatud kujul, kus K-gruppi kuuluvad kuivad proovid, N-gruppi keskmise niiskusega proovid ja M-gruppi märgjad proovid. Käesoleva töö eesmärkidest lähtuvalt püüdsin K-grupi proovidel saavutada 0-protsendiline veesisaldus, N-grupi proovidel 50-protsendiline küllastusaste ning M-grupi proovidel täielik küllastus. Proovide gruppidesse liigitamisel lähtusin asukoha indeksitest, et vältida katseväärtuste sõltuvust lokatsioonist (International Society for Rock Mechanics, 1977). Nii M kui ka K-gruppi kuulus seitse proovikeha ning N-gruppi ülejäänud kaheksa.

Esmalt võtsin ahjust välja N ja M-grupi 15 proovi. Kaalusin nad kuivalt ära ning jätsin eraldi veevannidesse niiskust imama (joonised 17 ja 18). Seejärel sooritasin katsed K-grupi proovidel vastavalt eelmainitud katseprotseduurile.



Joonis 17. N-grupi proovid jäetud vett imama



Joonis 18. M-grupi proovid jäetud vett imama

4.4.1 Niisked proovid

M ja N-grupi proovid ligunesid veevannides 72 tundi. Kõigepealt võtsin veevannist välja N-grupi proovid, et vähendada õhu käes veeküllastust eesmärgipärase 50 protsendini. Niiskuse hindamiseks valisin kontrollproovideks kaks N-grupi indeksiga 6A ja 7A katsekehad ning määrasin maksimaalse veeimavuse atmosfääri rõhul pärast 72 tundi ehk täieliku küllastuse.

Seejärel sooritasin üheteljelise survetugevuse katsed M-grupi proovide peal, kus maksimaalse niiskuse säilitamiseks võtsin proovid ükshaaval veevannist välja. Katseprotseduur M-grupi proovide peal kestis ligikaudu tund aega. Pärast seda määrasin 6A ja 7A proovidel niiskusesisalduse ning selgus, et õhu käes ei kuivanud proovid piisavalt kiiresti. Eesmärgipärase niiskusesisalduse saavutamiseks panin kõik N-grupi proovid 25 minutiks kuivatusahju. Seejärel määrasin niiskusesisalduse uuesti ning sooritasin üheteljelised survetugevuse katsed N-grupi proovidel.

5. Tulemused

Tulemuste analüüsimisel võtan arvesse 21 proovikehadel (vt tabel1) läbi viidud katseprotseduuri andmed. N-gruppi kuuluva katsekeha indeksiga 9B loen ebaõnnestunuks ning ei võta tulemuste esitamisel arvesse, sest katse sooritamisel kustusid proovi katseandmed.

5.1 Proovide parameetrid

Iga niiskusgrupp sisaldab seitse proovikeha:

- K-grupp: 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3B;
- N-grupp: 4C, 6B, 5A, 4A, 5B, 3C, 3A;
- M-grupp: 6A, 7A, 7B, 4B, 8A, 8B, 5C (9B on välja jäetud).

Keskmsed dimensioonid kõikidel proovidel:

- Keskmine läbimõõt ≈ 54 mm (vahemikus 53,9 kuni 54,2 mm);
- keskmine kõrgus $\approx 109,9$ mm (vahemikus 109,4 kuni 110,6 mm);
- keskmine kõrguse ja läbimõõdu suhe (L/D) $\approx 2,03$.

Katsekehade keskmine kuivmass oli 652,1 g (vahemikus 647,4 kuni 655,8 g) ning kivimi keskmine mahumass oli 2,6 g/cm³.

5.2 Niiskusesisaldus

Seitsme kuiva proovi tegemisel seisis kõik proovid ahjust välja võttes toatemperatuuril õhu käes. Viimase katsekeha kaalumisel enne survepressi alla asetamist selgus, et tunni aja jooksul ei olnud mass muutunud. Sellest saab järeldada, et õhu käes ei imanud kivim olulisel määral õhuniiskust.

Keskmine veesisaldus M-grupi proovidel oli 1,87%, koos kontrollproovidega 6A ja 7A oli keskmine veeimavus ehk keskmine maksimaalne veesisaldus 1,89%

Kontrollproovideks valitud katsekehade 6A ja 7A maksimaalne veesisaldus oli keskmiselt 1,92%. Pärast 80 minutit toaõhu käes seismist langes veesisaldus 1,62 protsendile ehk suhteline küllastusaste oli 84%. Pärast 25 minutit kuivatamist kuivatusahjus sain 6A ja 7A keskmiseks veesisalduseks 1,28%, mis on ligikaudu kaks kolmandikku maksimaalsest veesisaldusest. See sobis, sest teadsin, et survetugevuse katseprotseduuri vältel kuivavad proovid õhu käes edasi. Kontrollproovideks valitud kaks N-grupi katsekeha (6A ja 7A) läbisid esmajärjekorras katseprotseduuri. Keskmine veesisaldus N-grupi katsekehadel oli 1,17% ja keskmine küllastusaste 62% (vt tabel 1). Oluline on märkida, et keskmise küllastusastme arvutamisel kasutasin 6A ja 7A proovide jaoks nende enda maksimaalset veesisaldust ja teiste N-grupi katsekehade puhul maksimaalset veesisaldust.

5.3 Survetugevus

Iga katsekeha purunes nõuetekohaselt (läbinisti) üheteljelise survetugevuse katsel (joonised 10—12). K-grupi proovidel kulus katseprotseduuri tegemiseks 1 tund ja 1 minut, M-grupi proovidel 1 tund ja 3 minutit ning N-grupi proovidel 57 minutit. Ühe katse keskmine ajaline kestus oli 8 minutit. Katsekehad purunesid survepinge rakendamisel ligikaudu 2 kuni 3 minuti jooksul (vt tabel 1).

Keskmsed survetugevused erinevate niiskusgruppide lõikes olid järgmised:

- K-grupi keskmine survetugevus oli 92,2 MPa (vahemikus 65,8—119,9 MPa);
- N-grupi keskmine survetugevus oli 54,3 MPa (vahemikus 39—64,6 MPa);
- M-grupi keskmine survetugevus oli 49,1 MPa (vahemikus 32,5—62,4 MPa).

Tabel 1. Katsetulemused

NIISKUSEGRUPP	PROOVI INDEKS	LÄBIMÕÖT (mm)	KÕRGUS (mm)	L/D	VEESISALDUS (%)	KÜLLASTUSASTE (%)	SURVETUGEVUS (MPa)
K	1A	54	109,5	2,03	0	0	89,8
K	1B	54	109,4	2,03	0	0	82,8
K	1C	54,1	109,7	2,03	0	0	91,4
K	2A	54	109,6	2,03	0	0	81,8
K	2B	53,9	109,7	2,04	0	0	114,3
K	2C	54,2	110,1	2,03	0	0	119,9
K	3B	54	110,2	2,04	0	0	65,8
M	4C	54,1	109,9	2,03	1,80	100	62,4
M	6B	54	109,9	2,04	1,94	100	32,5
M	5A	53,9	110,2	2,04	1,92	100	50,2
M	4A	54	110,2	2,04	1,86	100	52,9
M	5B	54,1	109,8	2,03	1,90	100	43,3
M	3C	54	110	2,04	1,84	100	47,6
M	3A	53,9	109,9	2,04	1,84	100	55,0
N	6A	54	109,7	2,03	1,31	68	52,7
N	7A	54	109,9	2,04	1,25	65	39,0
N	7B	54	110,6	2,05	1,15	61	63,0
N	4B	54	109,5	2,03	1,19	63	55,1
N	8A	54	109,8	2,03	1,13	60	64,6
N	8B	54	109,8	2,03	1,20	63	41,8
N	5C	54	109,8	2,03	1,06	56	64,1

6. Arutelu ja järeldused

Käesolevas töös tehtud üheteljeliste survekatsete tulemused kirjeldavad survetugevust erinevate niiskussisalduste juures. Selleks, et katseväärtused oleksid usaldusväärsed, järgisin ISRM-i soovitatud meetodikat survetugevuse ja veesisalduse mõõtmisel. Igasugune informatsioon standardist kõrvalekaldumise kohta tuleb välja tuua, et lugeja saaks hinnata tulemuste täpsust ja võimalikke mõjusid katsetulemustele.

6.1 ISRM-i soovitatud meetoditest kõrvalekalded

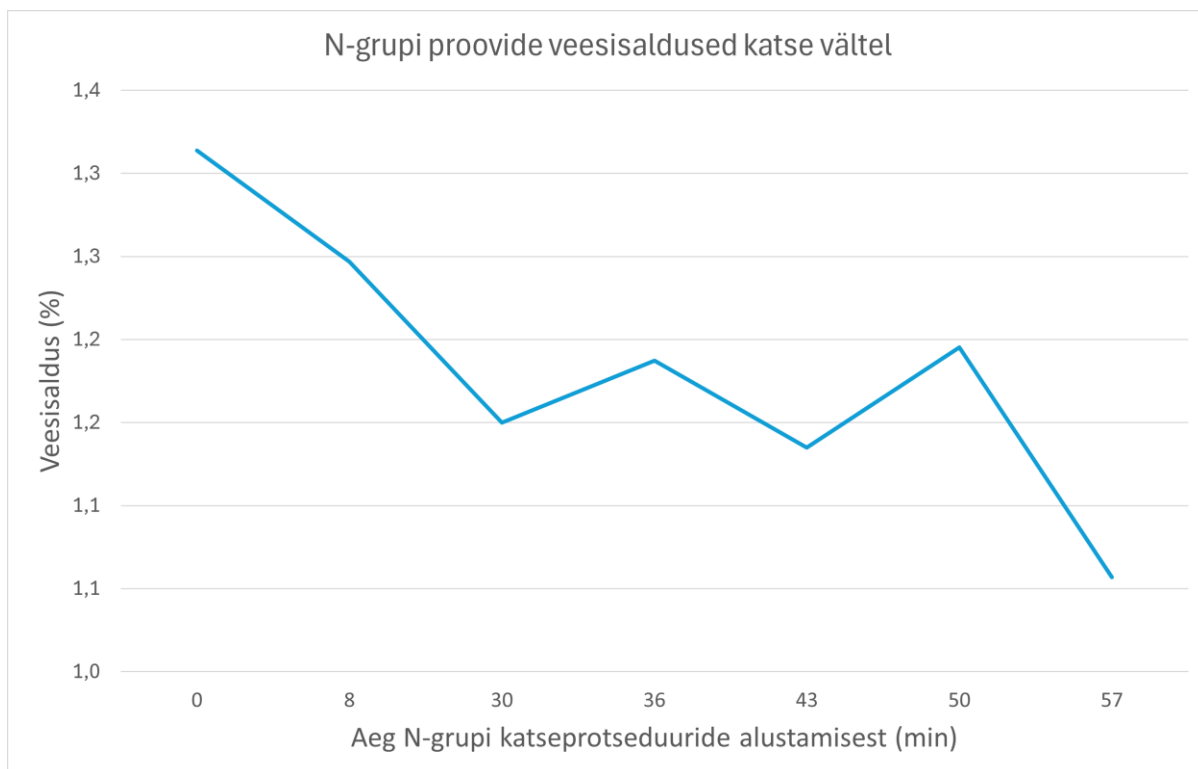
Vastavalt ISRM-i soovitatud meetodikale peab katseaparaadi plaatide läbimõõt olema maksimaalselt 2 mm suurem kui katsekeha läbimõõt. Käesolevas töös kasutasin ülikooli poolt pakutud masinat, mille plaadi suurus ei vastanud soovitatud meetodikale. Kuna survepressi tehnilisi parameetreid ei olnud mul võimalik muuta, siis nendest tulenevaid kõrvalekaldeid edasises töös ei arvesta.

ISRM-i soovitatud meetodika järgi peaks kõrguse ja läbimõõdu suhe olema vähemalt 2,5. Käesolevas töös oli kõrguse ja läbimõõdu suhe katsekehadel ligikaudu 2,03. Kõrvalekalde peamiseks põhjuseks oli piisava paksusega lähtekivimi puudumine. Kuigi kasutatud 54 mm läbimõõduga teemantpuur vastas ISRM-i nõuetele, ei võimaldanud Väo karjäärist pärinevast lähtekivist valmistada nõutud kõrgusega katsekehi. Seejuures püüdsin proovide valikul vältida savikaid lahuspindu, nähtavaid lõhesid ja muid defekte. Arvestan, et töös kasutatud dimensioonide suhte tõttu on survetugevuse katseväärtused suuremad.

Lisaks sellele kaldusin kõrvale N-grupi niiskuse määramise osas, kus katsekehade eesmärgipärase veesisalduse saavutamiseks pidi teostama põhimõtteliselt teise märgumis-kuivamis tsükli. See on ISRM-i soovitatud meetodikaga vastuolus, mistõttu võivad N-grupi katsekehade survetugevuse väärtused olla tegelikkusest väiksemad.

6.2 N-grupi niiskusesisalduse vähenemine toaõhu käes

N-grupi proovide katseprotseduur kestis kokku 57 minutit ning katsekehade veesisalduse mõõtmisel märkasin, et hiljem katsetatud proovide veesisaldus oli väiksem. Veesisalduse vähenemine on tõenäoliselt seotud proovide kuivamisega toaõhu käes katseprotseduuri ajal. Seetõttu tuleb N-grupi tulemuste tõlgendamisel arvestada, et proovide niiskustingimused ei püsinud kogu katseperioodi jooksul konstantsena. Samas esines ka hilisemates proovides üksikuid suurema veesisaldusega katsekehi, mis viitab tõenäoliselt katsekehade vahelisele heterogeensusele või mõõtemääramatusele (vt joonis 20). Vaatamata üksikutele kõrvalekalletele näitab üldine trend N-grupi proovide veesisalduse vähenemist katseprotseduuri vältel.



Joonis 19. N-grupi katsekehade veesisaldused alates katseprotseduuride algusest

6.3 Nõrkuskohad

Koormuse maksimaalne tundlikkus oli õigesti seadistatud, kuna survepress peatas katse pärast proovikehade purunemist ning pragude levik oli selgesti jälgitav (vt joonised 11–16).

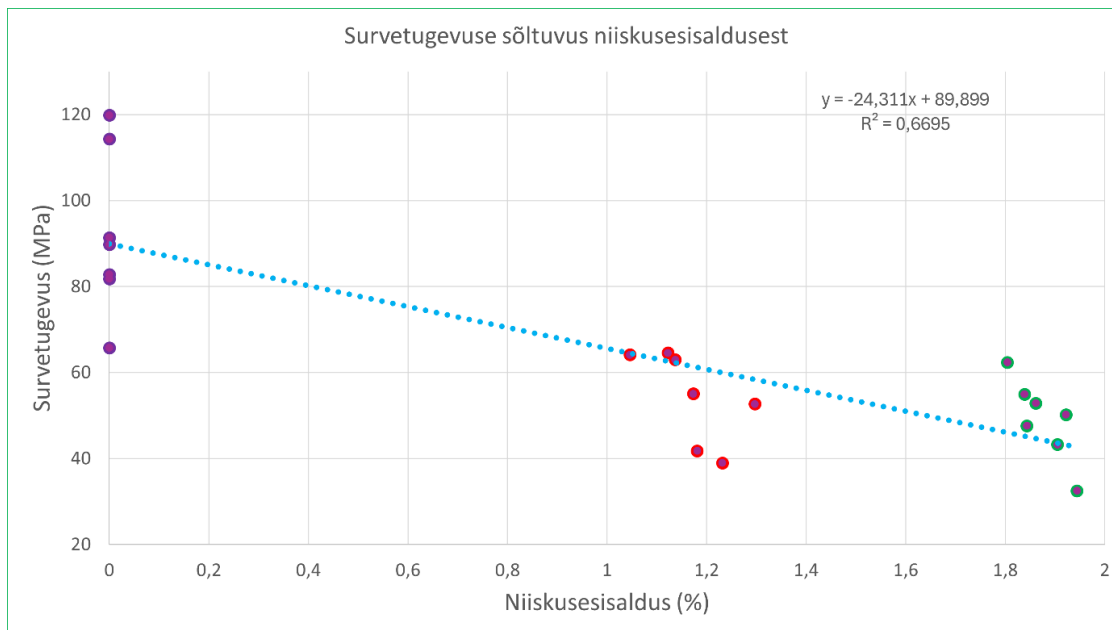
Katseprotseduuri läbinud katsekehade piltidelt on näha, et pragunemine toimus nii vertikaalses kui ka horisontaalses suunas. Seejuures K-grupi proovidel domineeris vertikaalne pragunemine, M ja N-grupi proovidel esineb horisontaalseid pragusid rohkem. See viitab savikelmete nõrgemale sidususele võrreldes ülejäänud kivimimaterjaliga ning suurema niiskuse korral muutuvad need peamisteks nõrkuskohtadeks.

6.4 Survetugevus sõltuvalt niiskusest

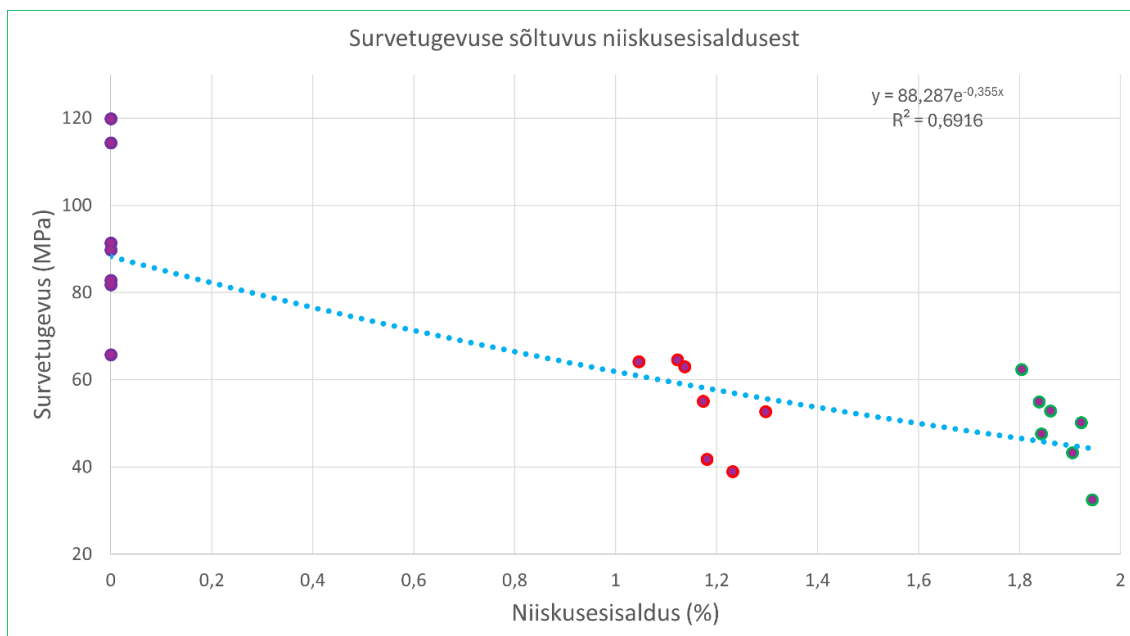
Survetugevuse väärtuste ja määratud veesisalduste põhjal koostasini sõltuvusgraafiku, kus näen selgeid seoseid niiskusesisalduse ja survetugevuse vahel. Niiskusesisalduse suurenemisel vähenes üldiselt katsekehade survetugevus. Suurim tugevuse langus toimus K-grupi ja N-grupi proovide vahel, samas kui N- ja M-grupi vahel oli survetugevuse vähenemine väiksem. See võib viidata sellele, et suurem osa niiskuse mõjust avaldus juba suhteliselt väikese veesisalduse juures. Samas tuleb N-grupi tulemuste tõlgendamisel arvestada täiendava märgumis-kuivamistsükli ning katsekehade heterogeensuse võimaliku mõjuga.

Seda kirjeldab paremini matemaatilise seosevõrrandid (vt joonised 20 ja 21), mis iseloomustavad sõltuvust. Parima variandi (suurima determinatsioonikordajaga) andis eksponentsiaalne seos, kus

trendijoonet võrrandiks oli $y = 88,287 * e^{-0,3555x}$ ja determinatsioonikordajaks $R^2 = 0.6916$, samas kui lineaarse seose korral oli $R^2 = 0.6695$ (vt joonised 21 ja 22). Kuna märgumis-kuivamistsükli mõju niiskusproovidele ei saa täielikult välistada, ei ole võimalik kindlalt väita, milline seos kirjeldab tegelikku survetugevuse sõltuvust niiskusesisaldusest kõige täpsemini.



Joonis 20. Survetugevuse sõltuvuse graafik, kasutades lineaarset seost. Lillad punktid tähistavad K-grupi proove, punased N-grupi proove ja rohelised M-grupi proove.



Joonis 21. Survetugevuse sõltuvuse graafik, kasutades eksponentsiaalset seost. Lillad punktid tähistavad K-grupi proove, punased N-grupi proove ja rohelised M-grupi proove.

6.5 Võrdlus varasemate uuringutega

Käesolevas töös saadud tulemused on üldiselt kooskõlas varasemate Vão maardla Lasnamäe lademe lubjakivi uuringutega. Katsekehade keskmine mahumass oli ligikaudu $2,6 \text{ g/cm}^3$, mis on veidi väiksem kui varasemate uuringute keskmine väärtus. Sellele vastas ka suurem veeimavus, mis käesolevas töös oli 1,89%, samas kui varasemates uuringutes oli keskmine veeimavus ligikaudu 1,3%. Suurem veeimavus võib viidata suuremale poorsusele ja arvatavasti ka suuremale savimineraalide osakaalule mikrostruktuuris.

Kuivade proovide keskmine survetugevus oli 92,2 MPa, mis jäi varasemates uuringutes toodud Lasnamäe lademe lubjakivide vahemikku 63,7-170,7 MPa, kuid oli väiksem varasemast keskmisest väärtusest. Küllastunud proovide keskmine survetugevus oli 49,1 MPa, mis jäi samuti varasemate uuringute vahemikku 40,3-136,1 MPa, kuid oli keskmisest märgatavalt väiksem. Käesolevas töös vähenes küllastunud proovide survetugevus võrreldes kuivade proovidega keskmiselt 46,8%, samas kui varasemates uuringutes oli keskmine tugevuse vähenemine 16,6%. Seda võib põhjendada savikelmete esinemisega, sest hajutatud kujul ei peaks mõju nii suur olema. Lisatõestust annab ka nõrkuskohtade analüüs katsekehade purunemispiltidel.

Samuti oli kuivade proovide keskmine survetugevus piisav, et liigitada uuritud lähtekivi varasema määruse kohaselt kõrgemargiliseks ehituslubjakiviks. See on loogiline, sest uuritud proov pärines Vão V karjäärast, kus maavara kvaliteedi hindamisel kasutati samuti vana määruse nõudeid. Lisaks on Lasnamäe lademe varasemate uuringute põhjal leitud korrelatsioon survetugevuse ja mahumassi vahel, mille järgi väiksema kui $2,52 \text{ g/cm}^3$ mahumassiga kivimid ei vastanud üldiselt kõrgemargilise karbonaatkivimi nõuetele. Käesolevas töös oli katsekehade keskmine mahumass ligikaudu $2,6 \text{ g/cm}^3$, mis on kooskõlas varasemates uuringutes kirjeldatud suurema mahumassi ja kõrgema survetugevuse vahelise seosega.

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli uurida Väo V lubjakivikarjäärist pärineva Lasnamäe lademe lubjakivi üheteljelise survetugevuse sõltuvust niiskusesisaldusest. Katsekehade veesisaldus ja survetugevus määrati ISRM-i soovitatud meetoodika alusel.

Töö käigus koguti Väo karjäärist lubjakivi lähtekivim, millest puuriti 23 puursüdamikku. Üks katsekeha osutus puurimisel mittesobivaks ning katsetes kasutati kokku 22 proovikeha. Proovid valmistati silindriliste katsekehadena ning jagati kolme niiskusgruppi: kuivad, keskmise niiskusega ja küllastunud proovid. Katsekehade mõõtmed, massid ja veesisaldused määrati enne survetugevuse katseid.

Katsetulemustel analüüsiti 21 katsekeha, sest üks proovikeha ebaõnnestus. Katseväärtused kinnitasid töö hüpoteesi, et niiskusesisalduse suurenemisel lubjakivi survetugevus väheneb. Kuivade proovide keskmine survetugevus oli 92,2 MPa, keskmise niiskusega proovidel 54,3 MPa ning küllastunud proovidel 49,1 MPa. Võrreldes kuivade proovidega vähenes küllastunud proovide survetugevus keskmiselt ligikaudu 46,8%.

Katsekehade purunemispiltide analüüs näitas, et suurema niiskusesisalduse korral toimus pragunemine sagedamini mööda savikelmeid ja kihipindu. See viitab savikelmete olulisele mõjule kivimi nõrkuskohtadena ning võib selgitada suuremat survetugevuse vähenemist võrreldes varasemate uuringutega.

Käesolevas töös saadud tulemused olid üldiselt kooskõlas varasemate Väo maardla uuringutega. Kuivade proovide survetugevused jäid varasemates uuringutes toodud vahemikku ning uuritud kivim vastas varasema määruse järgi kõrgemargilise ehituslubjakivi nõuetele.

Tulemuste tõlgendamisel tuleb siiski arvestada mõningate kõrvalekalletega ISRM-i soovitatud meetoodikast, sealhulgas katsekehade väiksema kõrguse ja läbimõõdu suhte ning N-grupi proovidel lisandunud märgumis-kuivamistsükli võimaliku mõjuga. Sellest hoolimata näitab töö selgelt, et niiskusesisalduse suurenemine vähendab märgatavalt lubjakivi survetugevust.

Tänuavaldused

Tänan oma lõputöö juhendajat Sander Kanterit, kes mind töö valmimisel pidevalt tagant utsitas, innustas ja toetas ning aitas bakalaureusetöö lõpuni viia. Kaasjuhendaja Siim Roov aitas katsete läbiviimisel ja andmete analüüsimisel.

Samuti tänan kõiki instituudi inimesi, kes aitasid kaasa töö valmimisele. Eraldi tänan ettevõtet Vao Paas, kes võimaldas kasutada Vao karjääririst pärinevat kivimimaterjali.

Lisaks tänan kursusekaaslasi abi eest Wordi ja Exceliga seotud probleemide lahendamisel ning õigekirja kontrollimisel.

Kirjanduse loetelu

- Burbaum, U. (2022). Stress-rate dependency of uniaxial compressive strength of hard rock with regard to test procedure standards. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03024-z>
- Cherblanc, F., Berthouneau, J., Bromblet, P., & Huon, V. (2016). Influence of water content on the mechanical behaviour of limestone: role of the clay minerals content. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0911-y>
- Coffey Testing. (s.a.). Uniaxial Compressive Strength (UCS) Testing. Salvestatud 14. mai 2026 <https://www.coffeytesting.com/uniaxial-compressive-strength-coffey-testing-sydney/>
- Fjær, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., & Rasmus Risnes. (2021). Failure mechanics. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822195-2.00011-5>
- Goodman, R., E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Hou, T., Zhou, Z., Zhang, J., & Zhang, Y. (2025). Study on the mechanical properties of limestone materials with different moisture contents under cyclic loading and unloading. *Frontiers in Materials*. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1641442>
- International Society for Rock Mechanics,. (1977). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index propertie. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 143–156.
- International Society for Rock Mechanics,. (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16, 135–140.
- Isakar, M. (2011). Lubjakivi ja dolomiit. Eesti maavarad. <https://sisu.ut.ee/maavarad/lubjakivi/>
- Kolats, M., Leiaru, M., & Adamson, A. (2012). Kivimite valikpurustamine. I. Valgma (Toim), Kaevandamine ja keskkond (lk 10–20). TTÜ Mäeinstituut. <https://files.geocollections.info/a143bd3e-69d4-481a-a4c5-7c7dca7f5702.pdf>
- Pells, P. J. N. (1993). Uniaxial Strength Testing. *Basic Rock Properties* (lk 67–85). Pergamon Press.
- Perens, H., & Kala, E. (2007). PAEKIVI - EESTI RAHVUSKIVI. MTÜ GeoGuide Baltoscandia.
- Pirrus, E. (1999). *Maavarade geoloogia*. Tallinna Tehnikaülikool.
- Kliimaministeriumi. (i.a.). Põhjavesi Salvestatud 22. mai 2026 <https://kliimaministerium.ee/merendus-veekeskond/veekasutamine-ja-kaitse/pohjavesi>
- Raukas, A., & Teedumäe, A. (1997). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers. <https://geoloogia.info/geology/index.html>

- Reinsalu, E. (2008). *Mäemajandus*. Tallinna Tehnikaülikool.
- Reinsalu, E. (2011). *Eesti mäendus: Maapõueinseneri õpik*. Tallinna Tehnikaülikool, Mäeinstituut.
- Reinsalu, E., Anepaio, A., Karu, V., Lüütse, E., Roots, R., Saarnak, M., Sein, O., & Väizene, V. (2014). *NÕRKADE KIHILISTE KIVIMITE TUGEVSOMADUSED*.
- Riabokon, E., Turbakov, M., Kozhevnikov, E., Vladimir Poplygin, & Jing, H. (2023). *The Rehbinder Effect in Testing Saturated Carbonate Geomaterials*. *Materials*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/ma16083024>
- Rosentau, A., Nirgi, T., Mõtsep, R., Raagmaa, G., Orru, K., Kont, R., Karro, E., & Ainsaar, L. (2021). *Ehitusmaavarade otstarbekama kasutuse mudelite ja riigi huvi määratlemise meetodika väljatöötamine*. Tartu Ülikool.
- Saliu, M. A., Akindoyeni, A. F., & Okewale, I. A. (2013). *Correlation between Blast Efficiency and Uniaxial Compressive Strength*. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(8), 805–811.
- Seletuskiri. (2016). OÜ Vao Paas. <https://kliimaministerium.ee/sites/default/files/documents/2021-12/M%C3%A4%C3%A4ruse%20seletuskiri.pdf>
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., & Vahtra, T. (2002). *Eesti geoloogiline baaskaart*. 6343 Maardu. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus.
- Tammekänd, M. (2015). *Vao lubjakivimaardla Vao V uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (11/0733-2)*. OÜ Inseneribüroo STEIGER. [https://fond egt ee/fond/get-file/8682/92853/Uuringuaruanne-\(Vao-V\)-2015.pdf](https://fond egt ee/fond/get-file/8682/92853/Uuringuaruanne-(Vao-V)-2015.pdf)
- Valgma, I. (Toim). (2008). *Killustiku kaevandamine ja kasutamine*. Eesti Mäeselts; TTÜ Mäeinstituut. <https://files.geocollections.info/a143bd3e-69d4-481a-a4c5-7c7dca7f5702.pdf>
- Üldgeoloogilise uurimistöo ning maavara geoloogilise uuringu kord ja nõuded ning nõuded fosforiidi, metallitoorme, põlevkivi, aluskorra ehituskivi, järvelubja, järvemuda, meremuda, kruusa, liiva, lubjakivi, dolokivi, savi ja turba omaduste kohta maavarana arvelevõtmiseks. Keskkonnaministri määrus nr 52. RT I, 19.12.2018, 28. <https://www.riigiteataja.ee/akt/119122018028>
- Ündül, Ö., Aysal, N., Çobanoglu, B. C., Amann, F., & Perras, M. (2016). *Strength, deformation and cracking characteristics of limestones*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/308801359_Strength_deformation_and_cracking_characteristics_of_limestones
- Xie, W.-Q., Liu, X.-L., Zhang, X.-P., Liu, Q.-S., & Wang, E.-Z. (2025). *A review of test methods for uniaxial compressive strength of rocks: Theory, apparatus and data processing*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(3), 1889–1905. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.003>

*Hamza, O. S. M. (2019). Characterization and treatment of expansive subgrade soils in Sudan (Doctoral dissertation, University of Khartoum). ResearchGate.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27302.27201>*

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Ekke Kõu Leitham

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Lubjakivi survetugevuse sõltuvus niiskusesisaldusest“,

mille juhendajateks olid Sander Kanter ja Siim Roov

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.