

**Seosed Eesti lubjakivide Los Angeles' e purunemiskindluse ja
survetugevuse vahel Vao ja Sutlema maardla näitel**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Oliver Paul Jäär

Üliõpilaskood: 185361LARB

Juhendaja: Olle Hints, TalTech geoloogia instituut

Kaasjuhendaja: Henri Prank, AS Teede Tehnokeskus

Õppekava: LARB17/17

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: Oliver Paul Jäär

26.05.2026

[Allkirjastatud digitaalselt]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Olle Hints

26.05.2026

[Allkirjastatud digitaalselt]

Sisukord

Annotatsioon.....	3
Abstract	4
Kasutatud mõistete ja/või lühendite loetelu	5
1. Sissejuhatus.....	6
2. Ehitusmaavarad.....	8
2.1. Liiv ja kruus	8
2.2. Karbonaatkivimid	9
3. Uuringuala	12
3.1 Väo karjäär	12
3.2 Sutlema karjäär	15
4. Andmete kogumine ja meetodika.....	18
4.1. Eeltöö	18
4.2. Proovide kogumine	18
4.3. Loodusliku kivi survetugevus	19
4.4. Loodusliku kivi veeimavus.....	21
4.5. Purunemiskindluse Los Angeles meetodil	21
5. Tulemused	23
6. Arutelu ja järeldused	26
Kokkuvõte.....	32
Tänuavaldused	33
Kirjanduse loetelu	34
Lisa 1. Proovivõtu asukoha pildid	38
Lisa 2. Pildid katsekehadest.....	40

Annotatsioon

Eesti maapõues leiduvad maavarad on rahvuslik rikkus, mis on vajalik riigi majanduslikuks arenguks. Eestis on uuritud aluspõhja maavarasid 20. sajandi algusest saadik. Mida rohkem on aeg edasi liikunud, seda uuemad meetodid ja nõuded on välja töötatud. See põhjustab andmete, mis peaksid olema igavesti ajakohased, aegumist. Selle asemel, et teostada kordusuuringud, oleks efektiivsem leida korrelatsioonid vanade ja uute andmete vahel nende tõlgendamiseks. Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida seoseid Eesti lubja- ja dolokivide purunemiskindluse EVS-EN 1097-2:2020 Los Angeles meetodi ja GOST 8269.0-97 loodusliku kivi survetugevuse vahel. Teoriast on teada üldine seaduspärasus, mida suurem on loodusliku kivi survetugevus, seda parem on selle purunemiskindlus. Korrelatsioon võimaldaks hinnata kivimi purunemiskindlust kasutades survetugevuse katse tulemust. Uuringu käigus koguti Vao V lubjakivikarjäärist ja Sutlema karjäärist 8 paekivi proovi. Proovid valiti erinevatest kivimkompleksidest, mis kuulusid Uhaku, Lasnamäe, Aseri, Kunda, Vormsi ja Nabala lademesse. Igast proovist valmistati 50x50x50 mm kuubikulised katsekehad survetugevuse ja veeimavuse määramiseks. Ülejäänud materjal purustati ja teostati purunemiskindlus LA meetodil. Andmed esitati tabelis ning neid analüüsiti graafiliselt. Analüüsi tulemusena leiti hea seos purunemiskindluse ja survetugevuse vahel. Kivimi purunemiskindluse paranemisel suureneb ka kivimi survetugevus, kuid selles leidub erandeid. Tugevate kivimite puhul suureneb ka survetugevuse üksikkatsete omavaheline tulemuste hälve. Kuigi korrelatsioon on olemas, siis survetugevuse tulemuste varieeruvuse tõttu ei ole võimalik luua täpset matemaatilist seost konkreetse kivi purunemiskindluse ja survetugevuse üksikproovide tulemuse vahel. Selle eest on võimalik kategoriseerida survetugevused LA tulemuste järgi. Täpsema seose leidmiseks oleks soovituslik uurida veel lubjakivi kihtide veeimavust, poorsust ja keemilist koostist ning ka laiendada uuringuala.

Relationships between Los Angeles abrasion resistance and uniaxial compressive strength of Estonian limestones: the case of the Vão and Sutlema deposits

Abstract

The mineral resources found in Estonia's subsoil are a national asset of the Republic of Estonia and are essential for the country's economic development. Bedrock mineral resources within the territory of Estonia have been studied since the beginning of the 20th century. As time has progressed, newer methodologies and requirements have been developed. This has caused data that should ideally remain permanently up to date to become outdated. Instead of carrying out repeated investigations, it would be wiser to find correlations between old and new data in order to interpret them. The aim of this study was to investigate the relationships between the abrasion resistance of Estonian limestone and dolostone determined by the EVS 1097-2:2008 Los Angeles method and the uniaxial compressive strength of natural stone according to GOST 8269.0-97. In theory, the greater the compressive strength of natural stone, the better its resistance to abrasion. Such a correlation would make it possible to estimate the abrasion resistance of rock using compressive strength results. During the study, eight limestone samples were collected from the Vão V limestone quarry and the Sutlema quarry. The samples were selected from different rock complexes belonging to the Uhaku, Lasnamäe, Aseri, Kunda, Vormsi, and Nabala stages. Samples were chosen from various rock complexes. From each sample, 50×50×50 mm cubes were prepared for uniaxial compressive strength and water absorption testing. The remaining material was crushed and tested for fragmentation resistance using the LA method. The data were presented in tables and analyzed graphically. The analysis revealed a good relationship between abrasion resistance and uniaxial compressive strength. As the abrasion resistance of the rock improves, the compressive strength also increases, although exceptions do occur. In the case of more resistant rocks, the variation between individual compressive strength test results also increases. Although a correlation exists, the variability of compressive strength results makes it impossible to establish a precise mathematical relationship between the abrasion resistance of a specific bedrock layer and the results of individual compressive strength test samples. However, it is possible to categorize compressive strengths according to LA test results. To determine a more accurate relationship, it would be advisable to further investigate the water absorption, porosity, and chemical composition of the limestone beds, as well as to expand the study area.

Kasutatud mõistete ja/või lühendite loetelu

GOST – Vene või Nõukogude liidu standard

EVS – Eesti standard

EN – Euroopa Standardikomitee standard

EGT – Eesti Geoloogiateenistus

EGF – Eesti Geoloogiafond

LA – Los Angeles purunemiskindluse katse

LA35 – Los Angeles katse tulemus 35

F – külmakindlus

Fr – fraktsioon

MPa – megapaskal

1. Sissejuhatus

Eestis on aluspõhja geoloogiat uuritud juba üle kahe sajandi. Esimene Eesti aluspõhja geoloogiline kaart avaldati aastal 1858 (Schmidt, 1858) ning selleks ajaks on maapõue stratigraafiline liigestus juba küllaltki detailne (Rõõmusoks jt, 1997). Kui varasemalt uuriti aluspõhja kivimeid ainult paljandites, siis tänaseks on puuritud Eestisse kümneid tuhandeid puurauke, mis annavad detailse pildi Eesti geoloogilisest ehitusest. Eesti Geoloogiateenistuse Arbavere hoidlates on hoiul ligikaudu 2200 puuraugu 120 000 m puursüdamikku (EGT, i.a.-a) ning EGT puursüdamike andmebaasis on kokku andmeid üle 65 000 puuraugust (Puursüdamike andmebaas, 2026). Eesti sügavaim puurauk tähistusega K1(F373) asub Hiiumaal Kärkla kraatris, mis on 815,2 m sügav (Puursüdamike andmebaas, 2026). Jõhvi magnetanomaalia piirkonnas puuriti enam kui 500 m sügavusi süvapuurauke kristallilise aluskorras rauamaagi uuringuteks juba 1930ndatel aastatel (Nirgi jt, 2022). Geoloogilised uuringud on vajalikud maapõues leiduvate maavarade kaardistamiseks ja uurimiseks.

Eesti maavarad on Eesti Vabariigi põhiseaduse kohaselt rahvuslik rikkus, mis on vajalikud Eesti riigi majanduslikuks arenguks (Kliimaministerium, 2025). Nende alla kuuluvad hetkel kaevandatavad põlevkivi, turvas, savi, liiv, kruus, lubja- ja dolokivi ning järve- ja meremuda. Leidub ka vähem teatud maavarasid, mida praegu ei kaevandata nagu järvelubi, fosforiit, graniit, graptoliitargiliit ja rauamaak (Kliimaministerium, 2025). Eesti enim kasutatud maavarad on ehitusmaavarad, millele järgneb põlevkivi. Majanduskasvu prognoosi (Eesti Pank, 2025) ning teede hoolduse ja arenduse rahastuse suurenemise tõttu (Riigiteede teehoiukava, 2025) on põhjust eeldada järgnevatel aastatel ehitusmaavarade nõudluse kasvu, mida toetavad eriti rahvusvahelised suurprojektid Rail Baltica ja Balti kaitsevöönd. Maapõue ja maavara säästlikku ja majanduslikku kasutust reguleerib Eesti Vabariigi Maapõueseadus (RT I, 08.07.2025, 59).

Palju geoloogilisi uuringud teostati Eestis nõukogude okupatsiooni perioodil (1940-1991), mistõttu suur osa andmestikust on GOST-i standarditel põhinev. Pärast taasiseseisvumist liikus Eesti valitsus Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse (EVS) standardite peale, mis lähtusid Euroopa Standardikomitee (EN) standarditest. Kui liiva ja kruusade puhul muutus kvaliteedinõuetes (sõelanalüüs, peenosise sisaldus, filtratsioonimoodul jm) põhiliselt vaid katsekäik, siis karbonaatkivimitest ehitusmaterjalide puhul võeti kasutusel täiesti uusi meetodikaid.

Tänapäeval katsetatakse lubja- ja dolokivi killustiku kvaliteeti Los Angeles'e purunemiskindlusega (LA) ja külmakindlusega, mille tulemused väljendavad materjali protsentuaalset kadu. Kuigi purunemiskindluse katse riiultrumil eksisteeris ka varasemalt (tol ajal kulumiskindlus), siis enamasti kasutati kvaliteedi hinnanguks survetugevust eri tingimustes (kuivas, veega küllastunud ja peale külmumistsükleid) ning hiljem juba purunevust silindris, mis kujutas endast killustiku pressimist silindrisse. Kui purunevus silindris ja LA meetodi suhet on juba varasemalt Eestis käsitletud (Teede Tehnokeskus, 2011), siis survetugevuse ja LA meetodi seoste vahel on andmeid ebapiisavalt. Välismaal aga on erinevate purunemis- ja kulumistegurite võrdlused korduvalt käsitletud, kaasa arvatud Los Angeles'e meetodit ja survetugevust (Kahraman ja Fener, 2007; Ugur jt, 2009; Giannakopoulou, 2018; Kamani ja Ajalloeian, 2018).

Käesoleva töö põhieesmärgiks oli uurida, kas LA meetodiga määratud Eesti karbonaatkivimite purunemiskindlusel on selge seos üheteljelise survetugevuse tulemustega, mis aitaks vanemat andmestiku paremini kasutada. Korrelatsiooni olemasolul oleks võimalik varasemalt tehtud survetugevuste katsete põhjal hinnata või ennustada LA purunemiskindluse väärtust. Töö täiendavaks eesmärgiks oli meetodika õppimine, tutvumine Eesti erinevate paerimitega, ning nende mehaaniliste omaduste andmebaasi täiendamine.

2. Ehitusmaavarad

Eesti maavarad sealhulgas ehitusmaavarad liigitatakse kasutusalade järgi vastavalt Kliimaministeeriumi määrusele „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 arvele võtmiseks“ (RT I, 29.12.2024, 56). Ehitusmaavarad on tähtsad ressursid Eesti majanduse, elamuehituse ja transporditaristu arengule, mida tuleb vastutustundlikult kaevandada ja kasutada (Kliimaministeerium, 2026). Eestis peab Maapõuaseaduse alusel olema kaevandamiseks kaevandamisluba ja üldgeoloogilisteks uuringuteks uuringuluba, mille väljastab Keskkonnaamet (RT I, 08.07.2025, 59, ptk 3-4). Peamised ehitusmaavarad on liiv, kruus ja paekivi. Nende alla kuulub ka savi, kuid seda kaevandatakse võrdlemisi vähe, peamiselt keramsiidisavi ja keraamilist savi (EGT, i.a.-b; Vohta, 2025).

2.1. Liiv ja kruus

Kruus ja liiv on purdsettelised maavarad, mida leidub üle terve Eesti. Maavaravarude koondbilanssi 31. detsember 2024 seisuga on Eestis 370 liivamaardlat ja 185 kruusamaardlat. Paljudes maardlates esineb kruus ja liiv korraga. Kokku kaevandati 2024 aastal mln 1,4 m³ kruusa ja 5,8 mln m³ liiva (Vohta, 2025). Vastavalt Kliimaministeeriumi määruse RT I, 29.12.2024, 56 nõudele jaotatakse liivad ja kruusad järgmiselt:

- täiteliiv ja -kruus,
- ehitusliiv ja -kruus,
- tehnoloogiline liiv.

Liigitus maavarana sõltub liivade ja kruusade mineraalsest koostisest, peenosise sisaldust (<0,063 mm läbimõõduga osakesed) ja üle 31,5 mm läbimõõduga osakeste sisaldust. Terade suuruse mõõtmiseks kasutatakse hetke seisuga standardiseeritud ruuduliste avadega sõelasid. Liivade ja kruusade kvaliteedi põhinäitajad on lõimis, peenosise sisaldus, mineraalne koostis ja üle 4 mm läbimõõduga osakeste koostis, kuju ning füüsikalise-mehaanilised omadused. Ehituskruusa puhul on oluliseks selle LA ja tehnoloogilise liiva puhul selle mineraalset koostist peegeldav oksiidide sisaldus (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃). Granulomeetriliselt on liiv tera suurusega 0,063-2 mm ja kruus suurusega 2-64 mm (Sinisalu ja Kleesment, 2002). Liigituse määramise nõuded maavarana ja kvaliteedi põhinäitajad on nimetatud Kliimaministeeriumi määruses RT I, 29.12.2024, 56, §28 - §29 (Tabel 1).

Tabel 1. Liiva ja kruusa kasutusalaade määramise nõuded. Tabel koostatud Kliimaministeeriumi määruse RT I, 29.12.2024, 56, §28 alusel (Oliver Jäär, 25.05.2026).

Liigitus	Peenosid (<0,063 mm osakesed)	>31,5 mm osakesed	SiO ₂ sisaldus	Al ₂ O ₃ sisaldus	Fe ₂ O ₃ sisaldus	LA kategooria
Tehnoloogiline liiv	-	-	95% või suurem	4% või väiksem	0,6% või väiksem	-
Ehitusliiv	5% või väiksem	35% või väiksem	-	-	-	-
Ehituskruus	12% või väiksem	35% või suurem	-	-	-	LA35 või väiksem
Täiteliiv ja -kruus	Kõik, mis ei vasta tehnoloogilise liiva ega ehitusliiva ja -kruusa nõuetele.					

Kruusa kasutatakse peamiselt vaid täitematerjalina aluspindade ja muldkeha ehituses, kuid ka betoonitäiteks. Liiv aga kasutatakse väga paljudes valdkondades. Taristuehitustel kasutatakse seda puiste- ja täitematerjalina või segatakse täitematerjali seguks ehk sidumata seguks. Segud sõltuvad terastikulisest koostisest, mis on määratud Kliimaministeeriumi määruse RT I, 26.11.2024, 3 lisas 10. Liiva muud kasutusalaad on asfaldi, betooni, silikaattoodete, klaasi, silikaattoodete ja mördi valmistamiseks. Veel kasutatakse liiva metallitööstuses vormide jaoks ning liivapritsis. (Pirrus, 1999)

2.2. Karbonaatkivimid

Karbonaatkivimid on lubjakivi, dolokivi ja mergel, mida nimetatakse rahvapäraselt tihti peakiviks või paeks. Kuna ehitusmaavaradest rääkides mõeldakse vaid lubja- ja dolokivi, siis käesolev töö käsitleb ainult nimetatuid. Eesti paekivid on iidse Balti mere valdavalt biogeensed setendid, mis pärast ladestumist tsementeerusid (Pirrus, 1999). Peamine lubjakivi moodustav mineraal on kaltsiit (CaCO₃) ja dolokivi puhul dolomiit (CaMg[CO₃]₂). Tööstuslikult olulisemad paekivid Eestis on Ordoviitsiumi ja Siluri ajastust, mis paiknevad peamiselt Pärnu-Põltsamaa-Mustvee joonest põhja pool, kuid Kagu-Eestis leidub piiratud alal ka Ülem-Devoni dolokive. Maavaravarude koondbilanssi 31. detsember 2024 seisuga on Eestis on 66 lubjakivimaardlat ja 38 dolokivimaardlat. Kokku kaevandati 2024 aastal 2,1 mln m³ lubja- ja dolokivi (Vohta, 2025). Vastavalt Kliimaministeeriumi määruse RT I, 29.12.2024, 56, §21 - §22 nõudele jaotakse karbonaatkivimid järgmiselt:

- tehnoloogiline lubja- ja dolokivi,
- kõrgemargiline ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi,
- madalamargiline ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi,
- viimistluslubjakivi ja dolokivi,
- täitelubjakivi ja täitedolokivi.

Liigitus maavarana sõltub karbonaatkivimi keemilisest koostisest ja füüsikalis-mehaanilistest omadustest. Lubjakiviks on karbonaatkivimit, mille MgO sisaldus on kuni 14% ja lahustumatu jäägi sisaldus kuni 25%. Dolokivi on karbonaatkivim, mille MgO sisaldus on 14% ja enam ning lahustumatu jäägi sisaldus kuni 25%. Ehituskivide ja viimistluskivide puhul on kvaliteedi põhinäitajad purunemiskindlus Los Angeles meetodil (LA) ja külmakindlus (F). Purunemis- ja külmakindluse puhul hinnatakse kvaliteeti kategooriliselt, kus number väljendab protsentuaalset materjali kadu katsetuse tulemusena. Viimistluskivi puhul on oluliseks ka kivimi dekoratiivsus ja poleeritavus. Tehnoloogilise kivi puhul on tähtis CaO, MgO, lisandite ja lahustumatu jäägi sisaldus kivimis. Hetkel kehtiva liigituse määramise nõuded maavarana ja kvaliteedi põhinäitajad on nimetatud Kliimaministeeriumi määruses RT I, 29.12.2024, 56, §21 - §22 (Tabel 2). Kuni 2017. aastani määrati ehitusotstarbelised lubja- ja dolokivid LA ja F kategooriate asemel sõltuvalt survetugevusest kuivas olekus ja külmakindluse tsüklite arvust („Üldgeoloogilise uurimustöö ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord“, 2005).

Tabel 2. Karbonaatkivimi kasutusala määramise nõuded. Tabel koostatud Kliimaministeeriumi määruse RT I, 29.12.2024, 56 alusel (Oliver Paul Jäär, 25.05.2026).

Liigitus	LA kategooria	F kategooria	CaO, MgO sisaldus	Lisandite ja lahustumatu jäägi sisaldus (SiO ₂ +R ₂ O ₃)	Survetugevus kuivalt*
Tehnoloogiline lubjakivi	-	-	CaO 50% või suurem	10% või madalam	-
Tehnoloogiline dolokivi	-	-	MgO 18% või suurem	5% või madalam	-
Kõrgemargiline lubja- ja dolokivi	LA30 või madalam	F2 või madalam	-	-	600 kg/cm ² või suurem
Madalamargiline lubja- ja dolokivi	LA31 – 35	F4 või madalam	-	-	200 – 600 kg/cm ²
Viimistluslubja- ja dolokivi	LA30 või madalam	F2 või madalam	-	-	200 kg/cm ² või suurem
Täitelubja- ja dolokivi	Kõik, mis ei vasta tehnoloogilise, ehitus- ega viimistluskivi nõuetele.				

*kehtetu („Üldgeoloogilise uurimustöö ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord“, 2005)

Paekivi on kasutatud ehituskivina ja põletatud lubja tootmiseks Eestis juba vähemalt 13. sajandist saadik (Muinsuskaitseamet, 2007). Tehnoloogiline lubja- ja dolokivi kasutatakse toorainena tsemenditööstuses. Ehituslubjakivist ja -dolokivist toodetakse killustikku, mida koos täitelubjakivi ja -dolokiviga kasutatakse taristutöodel nagu teed ja aluspinnad. Killustiku fraktsioonid valitakse vastavalt projekti kvaliteedinõuetele. Eesti teede puhul lähtutakse määrusest „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ (RT I, 26.11.2024) ja „Killustiku katendikihtide ehitamise juhendist“ (Transpordiamet, 2022). Nimetatud määruse ja juhendi kohaselt on tee aluse ehitamiseks vajaliku killustiku fraktsiooni valikul oluline kihi paksus, terastikuline koostis, peenosise sisaldus ja eeldatav

keskmine liiklussagedus. Viimistluskivi kasutatakse dekoratiivse kivina nii sise- kui välitingimustes, kuid ka sillutus- ning tänavakivina. Üks tuntumaid viimistluskive Eestis on Vasalemma kihistu teraline lubjakivi, tuntud ka kui "Vasalemma marmor", mis jääb silma tänu sarnanemisele marmoriga.

3. Uuringuala

Uuringuala hõlmab Eesti lubja- ja dolokivimaardlaid ja karjääre. Uuringu käigus analüüsiti karjääride andmeid ja varasemate uuringute tulemusi, mille põhjal kitsendati uuringuala Vão maardla Vão V lubjakivikarjääri ja Sutlema maardla Sutlema lubjakivikarjäärile.

3.1 Vão karjäär

Vão V karjääri opereerib OÜ Vão Paas. Karjäär asub Harju maakonnas Rae vallas. Vão maardla suhtes jääb karjäär kaguossa. Kaevandamine toimub Vão V lubjakivikarjäärist (mäeeraldise kood 1450) kaevandamisloa KMIN-137 alusel. Karjääri keskosa koordinaadid on 59°25'34"N ja 24°54'45"E. Karjäärist põhja suunas asub OÜ Vão Paasi Tondi-Vão karjäär (mäeeraldise kood 247) ning seda piirab C kategooria maagaasi jaotustorustik Tallinn-Kehra C12. Ida poole jääb Tallinna ringtee T11 2,2–2,4 km vahemik. Lõuna poolt piirab karjääri Maardu-Ülemiste raudteetrass. Karjäärist 100-120 m edela poole jääb Tallinna vangla (Joonis 2).

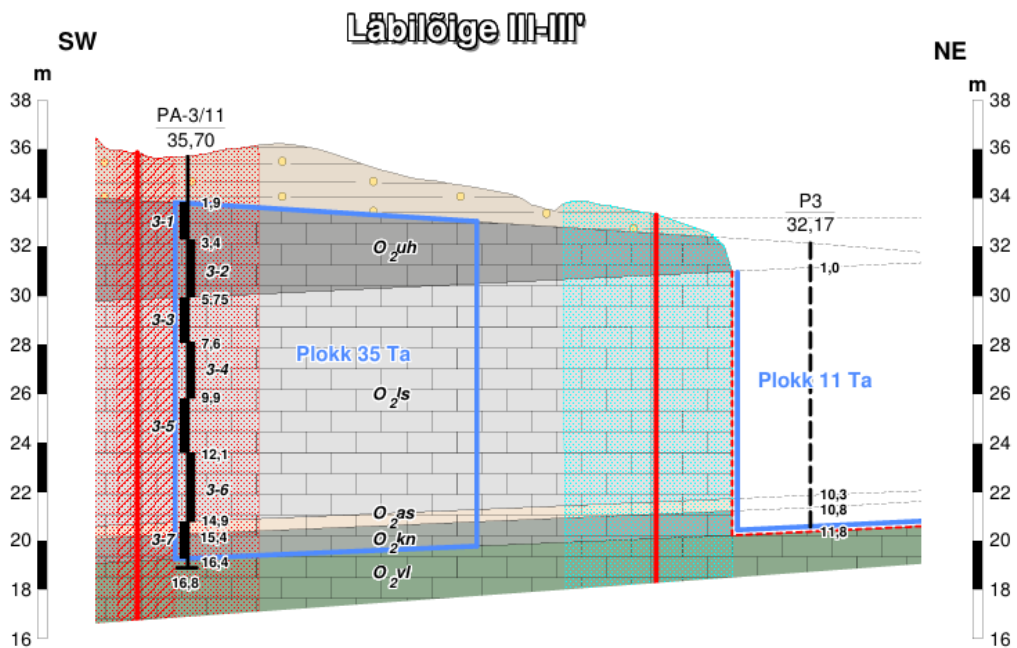


Joonis 1. Vaade Vão V karjääri lõunapoolsemale seinale lääne osas (Oliver Paul Jäär, 28.02.2025).

Karjääris esinevad Kesk-Ordoviitsiumi ajastiku Uhaku, Lasnamäe, Aseri, Kunda lademed (Joonis 3). Karjääri lamamiks on valdavalt Volhovi lademe Toila kihistu (O₂tl) rohekashall glaukoniitlubjakivi (Tammekänd ja Paat, 2020). Vão lubjakivimaardlas üldiselt Kukruse lademe Viivikonna kihistu (O₃vv) esindatud ei ole, kuid lääne pool Lõuna-Vão uuringuruumi lõuna osas avanevad vahetult katendi alt pruunikas hallid kukersiitsed lubjakivid, mis on ülaosast porsunud ja murenenud (Tammekänd ja Paat, 2020). Mäeeraldise katendi moodustab õhuke 0,3–5,0 m paksune moreeni ja mulla kiht (Tammekänd, 2015). Kasuliku kihina on 2015. a OÜ Inseneribüroo STEIGERi geoloogilise uuringu tulemusena arvele võetud Uhaku, Lasnamäe, Aseri ja Kunda lademe lubjakivid aktiivse tarbevaru plokina nr 35, mis vastab kõrgemargilisele ehituslubjakivile. Kokku hinnati varu suuruseks 1734 tuh m³ (Tammekänd, 2015).



Joonis 2. Väo V lubjakivikarjäär (punane ala). Joonisel on märgitud sinise ringiga PA-3/11. Joonis on koostatud kasutades Maa- ja Ruumiameti maardlate kaardirakendust (Oliver Paul Jäär, 11.05.2025).



Joonis 3. Väo V lubjakivikarjääri läbilõige edela-kirde suunas mäeeraldise keskosas ja puurauk PA-3/11 (Tammekänd, 2015).

Uhaku lademe **Kõrgekalda kihistu** (O_2kr) – Helehall peenkristalne ja detriidikas savikas lubjakivi. Kivimile annab lademe üleval osas pruunika varjundi kukersiit. Kihistu on õhukese-kihiline ja esinevad peenikesed mergli kihid. Kihistu alumiseks piiriks on kuue kuni seitsme kordsed püriidistunud katkestuspinnad. Lademe paksus karjääris ulatub 4,0 meetrini.

Lasnamäe ja Uhaku lademesse kuuluv **Väo kihistu** ($O_2vä$) – Tuntud enamasti kui Lasnamäe paekivi. Kihistut on võimalik jagada kolmeks erinevaks kompleksiks. Kihistu ülemine Kostivere kihistik kuulub osaliselt Uhaku lademesse, kuid alumised Pae ja Rebala kihistikud kuuluvad Lasnamäe lademe (O_2ls) koosseisu. Koos moodustavad nad 8,4–9,6 m paksuse kompleksi.

1. Kostivere kihistik ($O_2väK$) – Valkjashall detriitne ja pisikristalne paksukihiline (0,1–0,2 m) lubjakivi. Esinevad üksikud õhukesed merglikiled.
2. Pae kihistik ($O_2väP$) – hall peenkristalne dolokivi. Karjääris on kiht ligikaudu 0,5 m paksune. Alumine piir on üleminekuline.
3. Rebala kihistik ($O_2väR$) – hall dolomiidistunud õhukeste lainjate mergli vahekihtidega lubjakivi.

Aseri lademesse kuulub **Kandle kihistu** (O_2as) – Hall veidi roostepruun, pisikristalne ooidlubjakivi. Keskmise kuni paksukihiline. raudooidid esinevad kihis, lademe alumises osas esinevad ooidid tihedamalt. Lademe alumiseks piiriks on lainjas fosfaatne püriidistunud katkestuspind. Lademe fikseeritud paksus karjääris on 0,4 – 0,7 m, mis suureneb ida ja edela suunas.

Kunda ladet esindab Väo maardla piires **Loobu kihistu** (O_1kn) – Tumehall peenkristalne ja detriitne lubjakivi. Lademe paksus varieerub karjääris 0,6– 1,5 m, mis suureneb lõuna ja ida suunas

(Tammekänd, 2015; Tammekänd ja Paat, 2020).

3.2 Sutlema karjäär

Sutlema karjääri opereerib AS Kiirkandur. Karjäär asub Rapla maakonnas Kohila vallas Lümandu külas. Karjääri keskkoha koordinaadid on 59°10'26"N ja 24°36'57"E. Karjäär tegutseb Sutlema maardlas, mis on jagatud kolmeks mäeeraldiseks: Sutlema I, II ja III lubjakivikarjäär (mäeeraldise nr-d 584, 838 ja 1176). Maardla ulatus on 75,89 ha. Maardla jääb aluspõhja kõrgendikule, mis on tähtis lokaalne toiteala Vasalemma, Kasari ja Maidla jõe lähteallikatele, mis jäävad 1–6 km kaugusele (Sinisalu ja Tuuling, 2007). Maardla idaosas kulgeb Ääsmäe-Hageri kõrvalmaantee nr 11247 (Joonis 4).

Kaevandamine mäeeraldistest toimub kaevandamislubade Rapm-059, Rapm-062 ja Rapm-104 alusel. Aktiivne kaevandamine 2025. a kevadel toimus maardla kagunurgas, kus asetsevad Sutlema I ja II lubjakivikarjäärid ning Sutlema III lubjakarjääri idapoolne tipp. Aastal 2007 OÜ Inseneribüroo STEIGERi teostatud geoloogilise uuringu alusel võeti Sutlema maardlas aktiivseks tarbevaruks arvele 5992 tuh m³ ehituslubjakivi ja 1377 tuh m³ täitekrusa (Sinisalu ja Tuuling, 2007). Jõgede veerežiimi muutmise ohu tõttu on arvestatud ainult veepealse varuga. Põhjavee kaitseks on kohustuslik jätta 1 m paksune paekiht (Sinisalu ja Tuuling, 2007). Karjäär toodab madalamargilist ehituslubjakivi plokkidest nr 1, 2 ja 9 ning täitekrusa aluspõhjal lasuva katendi plokkidest nr 4 ja 5.



Joonis 4. Sutlema maardla (punane ala). Joonis koostatud kasutades Maa- ja Ruumiameti maardlate kaardirakendust (Oliver Paul Jäär, 11.07.2025).

Karjäär asub Ülem-Ordoviitsiumi avamusel. Katendi moodustab moreeni ja kasvukihi kiht, mille paksus on küllaltki muutlik, aga keskmiselt 2,1 m. Maardla keskosast põhja suunas avaneb Vormsi lademe Kõrgessaare kihistu. Vormsi lademe lamamiks on Nabala lademe Saunja kihistu, mille lamamiks omakorda on Nabala lademe Paekna kihistu (joonised 5–6). Kivim on kõikides kihistutes küllaltki lõheline.

Vormsi lademesse kuuluv **Kõrgessaare kihistu** (O_3vrK) – Hallikas detriidikas, veidi savikas lubjakivi. Kihistu paksus on maardla piires kuni 4,4 m.

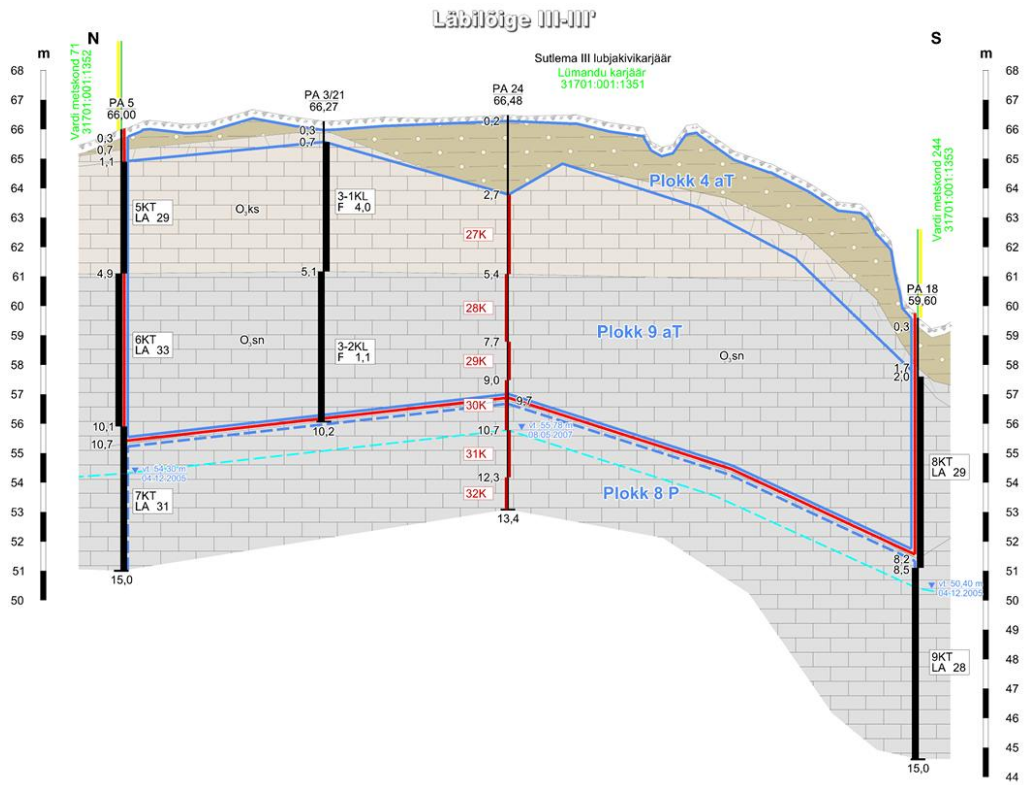
Nabala lademe **Saunja kihistu** (O_3sn) – Karpliku murdega peitkristalne lubjakivi, millele on iseloomulikud selgesti eristatavad beežikad ja hallikad kivimkompleksid. Eri värvi kihid ei ole pidevad ning läbilõigetes need kindlatel tasemetel välja ei joonistu. Hallikale kivimile on üldjuhul iseloomulikud horisontaal- kuni lainjaskihilised pruunikad kerogeensed lubimergli kelmed ja õhukesed vahekihid, mille paksus jääb 0,5–1,5 cm vahele, kuid võib ulatuda kuni 5 cm-ni. Beežikale kivimile on iseloomulik peenpoorne ja kavernoosne struktuur. Saunja kihistu kivim on kohati dolomiidistunud. Kihistu all osas sageneb lubimergli kihtide esinemine ja ilmneb püriidikirjalist erimit. Saunja kihistu kogupaksus on ligi 21 m.

Nabala lademe **Paekna kihistu** (O_3pk) – savikas lainjaskihiline mugulja tekstuuriga lubjakivi. Iseloomulikuks on lubimergli ja savimergli vahekihid. Tasemeti esinevad ka püriidikirjalised afaniitsed lubjakivid. Sutlema karjääris 01.04.2025 seisuga kihistu ei paljandu.

(Sinisalu ja Tuuling, 2007; Tuuling, 2021).



Joonis 5. Vaade põhja suunas Sutlema karjääri seinale (Oliver Paul Jäär, 01.04.2025).



Joonis 6. Sutlema karjääri läbilõige põhja-lõuna suunas ja puuraugud PA-5, PA-3/21, PA-24 ja PA-18 (Paat, 2021).

4. Andmete kogumine ja meetodika

Uuringu tulemuste analüüsiks kasutati Microsoft Excelit. Töö tegemisel on kasutatud tehisintellekti ChatGPT (OpenAI, 2026) õigekirja parandamiseks ja lause struktuuride kohandamiseks.

4.1. Eeltöö

Uuringu läbiviimiseks oli vajalik koguda karbonaatkivimite proove, millest oleks võimalik valmistada kuubikulised katsekehad survetugevuse määramiseks ja piisav kogus killustikku purunemiskindluse määramiseks LA meetodil. Proovide kogumiseks osutus kõige sobivamaks lahenduseks nende võtmine aktiivsetes karjäärides, sest seal on kaevandamise käigus paljandatud lubjakivi- ja dolokivi lasund. Eeltöona analüüsisin Eestis toimivaid karjääre. Eesmärgiks oli teha kindlaks, millised kivimkompleksid on karjäärides esindatud ja millised varasemad andmed nende kvaliteedi kohta on kättesaadavad. Oluliseks lähteandmestikuks olid varasemad kihtide kaupa teostatud survetugevuse ja purunemiskindluse määramised Los Angelese meetodil.

Tähelepanu pälvis esialgse analüüsi käigus Vão maardla. Vão kihistu lubja- ja dolokive on kasutatud juba sajandeid, mida peetakse Eesti parimateks ehituskivideks (Perens, 2004). Samuti on Vão maardla paekivi omadusi väga põhjalikult uuritud. Sajandite jooksul on kujunenud endiste murrutööliste selektiivse peamurdmise käigus nimetused kuni 56 Kostivere kihistiku ja ülemise Pae kihistiku murdumiskihile (Kink, 1999). 1959. aastal avas OÜ Peakivitoodete Tehas maardla põhjaosas Vão karjääri, mis on Eesti üks suurimaid ja vanim siiani tegutsev lubjakivikarjäär. Vão maardlast valisin täpsemaks uuringualaks OÜ Vão Paasi Vão V karjääri. Otsuse aitas langetada teadmine, et Vão V lubjakivikarjääris on varasemalt analüüsitud samadest kihtidest nii survetugevust kuubikuliste katsekehade surumise kaudu kui ka purunemiskindlust LA meetodil.

Uuringu hilisemas etapis kaasasin täiendavalt Sutlema karjääri eesmärgiga suurendada proovide arvu ja esindatud kivimite mitmekesisust ning laiendada uuringuala. Sutlema karjääris esineb ka mitmeid kihte, millest kõige huvipakkuvaimad on eri värvi Saunja kihistu kivimkompleksid. Sutlema karjäär on hetkel oluline, sest seal tarnitakse Rail Baltica ehituse tarbeks muldkehade rajamiseks täitelubjakivi. Katsete läbiviimiseks kasutasin AS Teede Tehnokeskuse laboriseadmeid.

4.2. Proovide kogumine

Ideaalne proov on 20-25 kg kivi, mille minimaalne paksus kõigist kolmest mõõtmest oleks 10 cm. Pildid proovivõtu kohtadest asuvad lisas 1. Esimene välitöö toimus Vão V karjääris 28.02.2025. Selles osales peale autori ka lõputöö juhendaja TalTechi geoloogia instituudist Olle Hints. Proovide kogumist lihtsustas asjaolu, et kivimit väljatati kahe astmena, mis lubas kergemini leida ja koguda proove karjääri kõrgematest kihtidest. Esimesed kaks proovi võeti karjääri läänepoolsest otsast. Esimese proovi võtsime Uhaku lademest Kõrgekalda kihistust, mis jäi 2,3 m kõrguselt alumisest ahangust ja 2,0 m sügavusele pealmisest ahangust (Joonis 21). Teise proovi võtsime Vão kihistu Kostivere kihistikust, mis jäi 1,2 m kõrgusele alumisest ahangust ja 2,0 m sügavusele ülemisest ahangust (Joonis 22). Pae kihistikust proovi võtmine otsustus liiga raskeks katsumuseks kihistiku liiga kõrge paiknemise tõttu karjääri seinas. Viimased kolm Vão karjääri proovi võtsime karjääri

keskosa põhjapoolsest seinast. Kolmanda proovi võtsime 0,5 m kõrguselt karjääri põhjast ja 0,5 m sügavuselt Kunda lademest (Joonis 23).

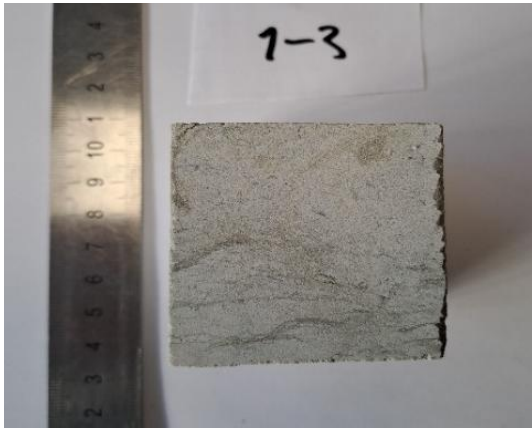
Neljanda võtsime samast kohast 0,2 m kõrguselt Aseri lademe lamamist (Joonis 24). Viies proov sai võetud Väo kihistu Rebala kihistikust 0,75 m kõrguselt karjääri põhjast ja u 2,0 m sügavuselt Pae kihistiku lamamist (Joonis 25). Teine välitöö toimus iseseisvalt Sutlema karjääris 01.04.2025. Kuna hetkel tegutsevas karjääri osas Paekna kihistu ei paljandu, siis pidin leidma ainult piiri Vormsi ja Nabala lademe vahel (Saunja ja Kõrgessaare kihistu vahel), mis osutus üpris lihtsaks. Esimesena võtsin proovi Vormsi lademe lamamist 0,5 m kõrguselt ja pealmisest astangust 1,0 m sügavuselt, mis üldvaates on 6. proov (Joonis 26). Kuna Saunja kihistu kivim esineb kahe erimina: halli ja beeži lubjakivina, siis otsustasin võtta ühe proovi mõlemast erimist. Seitsmes proov on Saunja kihistu beežikast kivist karjääri põhjast 0,8 m kõrguselt ja 2,6 m sügavuselt astangu ülemisest servast (Joonis 27). Kaheksanda proovi võtsin Saunja kihistu hallikast kivimist 1,6 m kõrguselt karjääri põhjast ja 3,2 m allpool Vormsi lademe piiri (Joonis 28). Kõik Sutlema proovid sai võetud karjääri läänepoolse osa põhja seinast, mis jäi Sutlema II lubjakivikarjääri mäeeraldisele.

4.3. Loodusliku kivi survetugevus

Kivimi survetugevust oli vaja katsetada Standardi GOST 8269.0-97 järgi. GOST-i standardi täpse kirjelduse kättesaamine osutus keerukaks, sest veebis neid avalikult ja täismahus neid ei leidu. Seetõttu kasutasin katse läbiviimiseks infot, mida sain varasematest AS Teede Tehnokeskuse katseprotokollidest ja -juhenditest. Lähtusin ka Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse standardist EVS-EN 1926:2007.

Survetugevus näitab maksimaalset koormust, mida materjal kannatab. Tulemus väljendatakse megapaskalites (MPa). Mida suurem väärtus, seda tugevam on materjal. Kivimi survetugevuse katsetus näeb ette 50x50x50 mm või 70x70x70 mm kuubikulise katsekeha pressimist kuivas, veega küllastunud olekus ja pärast 25 külmutamistsükli hüdraulilise pressiga. Valisin väiksema mõõduga katsekehad, sest varasemalt läbiviidud survetugevuse katsed tehti just 50x50x50 mm katsekehadele. Kuna antud töös oli huvipakkuvaks näitajaks maksimaalne survetugevus, siis teostasin survetugevuse katse ainult kuivas olekus.

Iga proovi kohta saagisin välja vähemalt 3 katsekeha (Joonis 7). Katsekeha küljed lihvisin tasaseks ning kuivatasin kuivatuskapis $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ kraadi juures kuni konstantse massini. Peale toatemperatuurini jahtumist kaalusin kuivalt iga katsekeha, mõõtsin nende dimensioonid ja arvutasin katsekehade ruumala ning surutava külje pindala. Igat katsekeha pressisin risti kihtide rõhtsuunaga kiirusel 0,8 MPa/s (2 kN/s). Press surus katsekeha kuni see ei pidanud enam koormatud jõule vastu ning purunes (Joonis 8). Seade kuvas tulemuse automaatselt arvestades katsekeha pindala ja maksimaalset rakendatud jõudu.



Joonis 7. Uhaku proovi kuubiline katsekeha 1-3.



Joonis 8. Katsekeha pärast survetugevuse katset.

4.4. Loodusliku kivi veeimavus

Survetugevuse tulemuste paremaks analüüsiks katsetasin katsekehade veeimavust. Veeimavus näitab proovi võimet imenduda vett oma pooridesse, lõhedesse ja kapillaaridesse tavalise õhurõhu juures, mille tulemus kajastub protsentuaalselt. Katsed viisin läbi vastavalt Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse standardile EVS-EN 13755:2008. Katseks kasutatud katsekehad olid kuivatatud 70°C juures konstantse massini ning kuivkaalud dokumenteeritud. Asetasin katsekehad kuni poole kõrguseni vette. Tunni möödumisel uputasin katsekehad täielikult vette ning kontrollisin nende kaalu iga 24 tundi järel. 48 tunni möödudes olid katsekehad saavutanud konstantse massi, misjärel kaalusin need pindkuivalt ühe minuti jooksul peale veest välja võtmist. Arvutasin iga katsekeha veeimavuse kasutades valemit 1.

$$A (\%) = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100, \text{ kus } m_s \text{ on veega küllastunud mass (g) ja } m_d \text{ on kuivmass (g).}$$

(1)

4.5. Purunemiskindluse Los Angeles meetodil

Kivimi purunemiskindlust katsetasin vastavalt Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse standardi EVS-EN 1097-2:2020 p.5 kohaselt fraktsioonile 10/14 mm ühe korra proovi kohta. Purunemiskindlus näitab materjali vastupanu mehaanilisele koormusele, purunemisele ja kulumisele selle töötlemise käigus, mida väljendatakse protsentuaalse materjali kao järgi tähisega LA. Näiteks tulemuse LA35 puhul oli materjalikadu proovis 35%. Mida väiksem on LA katse numbriline väärtus, seda suurem on materjali purunemiskindlus.

Proovi saagisin väiksemateks tükkideks ja purustasin lõugpurustiga (Joonis 9). Purustatud materjalist sõelusin sõelumisraputi (Joonis 10) abil välja 3250 g fraktsiooni 10/12,5 mm ja 1750 g fraktsiooni 12,5/14 mm. Mõlemad fraktsioonid pesti läbi vastava fraktsiooni väiksema suuruse sõelaga kasutades pesuraputit (Joonis 11). Pestud materjal kuivatati kuivatuskapis 105±5°C juures kuni konstantse massi saavutamiseni. Kuivatatud fraktsioonid segasin kokku 5000±5 g prooviks suhtega 35:65 (Joonis 13). Tähtis on, et fr 10/14 mm proov sisaldab 60% – 70% materjali, mis läbi 12,5 mm sõela.



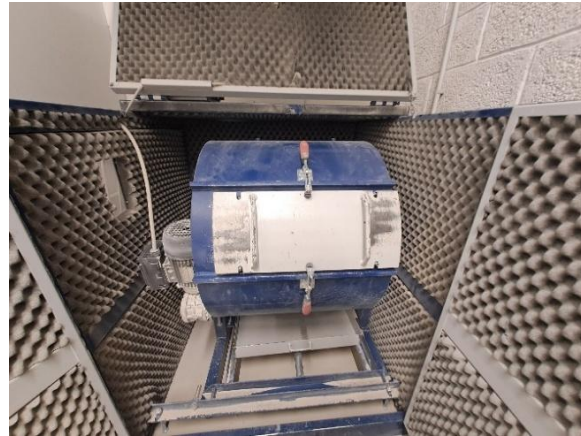
Joonis 9. Lõugpurusti Teede Tehnokeskuse laboris.



Joonis 10. Sõelad raputis.



Joonis 11. Pesuraputi.



Joonis 12. LA trummel.

Katse läbiviimiseks kasutasin standardi kohast terastrumlit (Joonis 12). Asetasin trumlisse 11 teraskuuli ($d \approx 47$ mm) ning seejärel välja kaalutud proovi. Trummel tegi 500 pööret kiirusel 31-33 pööret/min. Seejärel kallasin proov ettevaatlikult trumlist välja ning eemaldasid sealt kuulid (Joonis 14). Veendusin, et trumlisse ei jäänud materjali. Edasi pesin materjali läbi 1,6 mm sõela ning kuivatasin kuivatuskapis $105 \pm 5^\circ\text{C}$ juures kuni konstantse massini. Jahtunud proovi (Joonis 15) sõelusin kontrolliks veel läbi 1,6 mm sõela ning kaalusin jäänud massi 1 g täpsusega. Arvutasin LA teguri kasutades valemit 2.

$$LA = \frac{5000-m}{50}, \text{ kus } m \text{ on } 1,6 \text{ mm sõelale jäänud proovi mass (g).} \quad (2)$$



Joonis 13. LA fr 10/14 mm proov enne katset.



Joonis 14. Sama LA proov pärast 500 pööret trumlis.



Joonis 15. Sama LA proov pärast trumlit ja sõelumist läbi 1,6 mm sõela.

5. Tulemused

Katsete tulemused sisestati Microsoft Exceli tabelisse järelduste tegemiseks. Proovid on tähistatud numbritega 1 kuni 8 ja survetugevuse seeria katsekehad on nummerdatud 1-1, 1-2, 1-3 jne. Pildid katsetatud katsekehadest asuvad lisas 2. Kõik katse tulemused asuvad tabelis 3.

Tabel 3. Väo V lubjakivikarjääri ja Sutlema karjääri kihtide katsetulemuste koondtabel.

Kiht	Katse-keha Tähis	Kuivmass (g)	Tihedus (Mg/m ³)	Vee-Imavus (%)	Survetugevus (Mpa)	Keskmine survetugevus (MPa)	LA (%)
Uhaku lade, Kõrgekalda kihistu	1-1	380,0	2,52	2,3	49	64	35
	1-2	361,6	2,55	2,5	74		
	1-3	369,2	2,56	2,0	69		
Lasnamäe lade, Kostivere kihistik	2-1	351,7	2,58	1,1	113	121	29
	2-2	345,3	2,63	1,1	126		
	2-3	345,3	2,62	1,0	123		
Kunda lade, Loobu kihistu	3-1	395,0	2,64	0,6	153	169	24
	3-2	400,5	2,68	0,6	148		
	3-3	342,6	2,80	0,6	204		
Aseri lade, Kandle kihistu	4-1	370,7	2,56	2,2	95	84	33
	4-2	346,4	2,56	1,7	93		
	4-3	351,9	2,46	3,6	63		
Lasnamäe lade, Rebala kihistik	5-1	357,5	2,76	0,9	93	131	26
	5-2	359,3	2,77	0,5	150		
	5-3	347,9	2,73	1,3	106		
	5-4	349,8	2,65	0,7	175		
Vormsi lade, Kõrgessaare kihistu	6-1	299,4	2,54	1,2	101	102	30
	6-2	300,6	2,54	1,0	58*		
	6-3	300,9	2,55	1,4	82		
	6-4	306,5	2,54	1,1	122		
	6-5	328,0	2,60	0,9	104		
Nabala lade, Saunja kihistu (beež)	7-1	294,1	2,43	3,5	77	90	36
	7-2	287,4	2,41	3,1	94		
	7-3	287,1	2,42	3,1	91		
	7-4	291,8	2,40	3,1	113		
	7-5	295,8	2,43	2,9	78		
Nabala lade, Saunja kihistu (hall)	8-1	310,6	2,42	3,0	92	90	33
	8-2	302,4	2,44	2,6	79		
	8-3	295,2	2,44	3,4	100		
	8-4	292,8	2,48	2,4	90		
	8-5	289,2	2,39	3,2	87		

* – Põrunud katse, ei arvestata keskmises.

Tabelis 4 on näidatud LA ja survetugevuse tulemused võrreldes referents-tulemustega. Referentsproovide tulemused on koondatud varasemates geoloogilistes uuringutes käsitletud puuraugu proovide tulemuste järgi. Vanemad survetugevuse tulemused teisendati MPa-ks. Väo V lubjakivikarjääri puhul on kasutatud 2015 ja 2020 aasta geoloogiliste uuringute andmeid (Tammekänd, 2015; Tammekänd ja Paat, 2020). Sutlema karjääri puhul on kasutatud 2007 ja 2021 aasta geoloogilisi uuringuid (Sinisalu ja Tuuling, 2007; Tuuling, 2021). Katsekeha nr 6-2 ei jäänud survetugevuse katse ajal paralleelselt hüdraulilise pressi plaatide vahele, mis põhjustas ebaühtlase koormuse jaotuse katsetuse ajal. Tulemuste korrektse järelmisi tegemiseks nimetatud katsekeha arutus ei arvestatud. Kõik teised katsetused õnnestusid korrektselt.

Tabel 4. Survetugevuse ja LA tulemuste võrdlemisi varasemate uuringu tulemustega.

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8
Kiht	Uhaku, Kõrgekalda	Lasnamäe, Kostivere	Kunda, Loobu	Aseri, Kandle	Lasnamäe, Rebala	Vormsi, Kõrgessaare	Nabala, Saunja (beež)	Nabala, Saunja (hall)
LA (%)	35	29	24	33	26	30	36	33
Keskmine survetugevus (MPa)	64	121	169	84	131	102	90	90
Referents LA (%)	31-36 33*	25-29 27*	25-28 26*		25-29 27*	29-33 31*	33-35 34*	
Referents survetugevus (MPa)	63-129 92*	65-174 112*	79-146 110*		65-174 112*	92	113-160 135*	

* - Keskmine

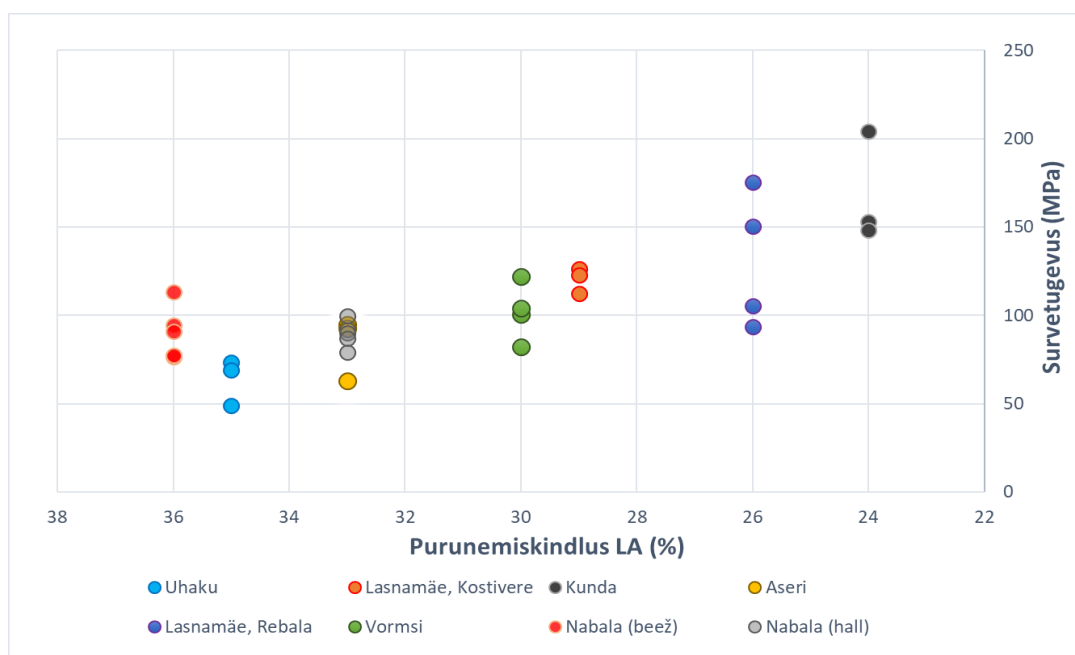
LA katse tulemused on loogilised ja kattuvad varasemate uuringute käigus saadud tulemustega. Märkimisväärseks erinevuseks oli proovi nr 7 LA väärtus, mis oli suurem proovi 8 LA-st, kuigi et need samast kihistust. Suurim LA purunemiskindluse tulemus oli LA24 Kunda lademe tumehallil peenkristalsel lubjakivil ja madalaim LA36 Nabala lademe beežil kivimil. Ainult kihiti oleks kõige halvem LA35 Uhaku lademe helehallil savikal lubjakivil. Survetugevuse tulemused olid varasemate uuringute tulemustest enamjaolt erinevad. Üllatavaks oli nende seas, kui palju erinevad sama proovi katsekehade tulemused (Joonis 16 ja 17). Arvestades, et survetugevuse tulemused sõltuvad rangelt proovi homogeensusest ning need varieerusid laialdaselt ka varasemate uuringute proovides, siis on selline variatsioon aktsepteeritav.

Väo maardla puhul ilmnis suurim proovide tulemuste erinevus proovi 5 puhul. Visuaalse hinnangu alusel on raske hinnata konkreetset erinevuste põhjust, kuid märgates katsekehal 5-3 dolomiidistumise ilminguid (Joonised 43-45), siis tõenäoliselt võib see olla erinevuste põhjuseks. Teiste Väo maardla proovide survetugevused olid võrdlemisi sarnased, kus erines vaid ühe kuubi tulemus teistest kahest. Suurim variatsioon nende hulgas on Kunda lademe katsekehal 3-3, mis erines 51-56 MPa võrra. Visuaalse hinnangu järgi on raske määrata erinevuse põhjust, kuid

arvestades proovi madalat LA tulemust ja katsekeha suuremat tihedust, siis võib olla kõrgem ja rohkem hajuv survetugevus loogiline. Aseri lademe katsekeha 4-3 survetugevus erineb 30-32 MPa. Arvestades, et nimetatud katsekehas esines palju rohkem ooiide (Joonised 40-42), sellel oli suurem veeimavus ja väiksem tihedus, siis on tulemus loogiline. Proovi 1 puhul erineb katsekeha 1-1 teistest katsekehade survetugevust 20-25 MPa võrra. Visuaalse analüüsi põhjal on näha, et katsekehas esineb rohkem õhukesti savikaid kelmeid (Joonised 31-33), mis kinnitab tulemuse loogilisust. Kõige sarnasemad tulemused olid proovil 2, kus erinevus oli ainult 3-13 MPa.

Sutlema karjääri proovide juures üllatasid kõige rohkem Saunja kihistu tulemused, kus hallika ja beežika kivimi survetugevuste keskmised andsid sama tulemi (90 MPa), kuid LA purunemiskindluse tulemused erinesid 3 punkti võrra. Proovide 6-8 kuupide tulemused on suhteliselt sarnased, kuid esinevad üksikud erinevused. Proovi 7 tulemused kõikusid ± 40 MPa ja proovi 8 tulemused ± 35 MPa ulatuses. Proovide 7 ja 8 kuupide erinevused tunduvad olevat tingitud sellest kui palju oli kivim allunud porsumisele (Joonis 49-58). Proovi 6 katsekehade puhul tunduvad survetugevuse erinevused olevat katsekehade erinevast merglikelmete tihedusest (Joonised 45-49) ja nende tulemused kõikusid ± 21 MPa ulatuses.

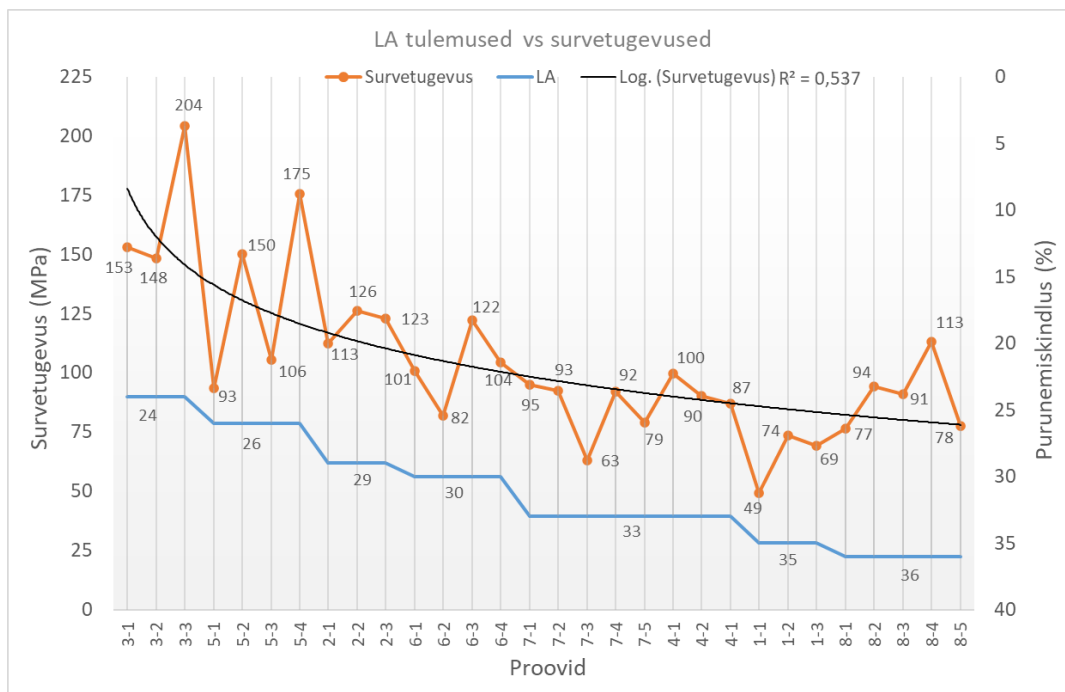
Joonis 16. Survetugevuse ja LA tulemused kihtide kaupa.



6. Arutelu ja järeldused

Katsetatud lubja- ja dolokivi proovide survetugevuse ja LA purunemiskindluse tulemuste võrdlemisel on kindlalt märgatav pöördvõrdeline seos, mis tõestab teooriat, et suurema purunemiskindlusega kivimil on suurem survetugevus. Samale järeldusele on jõutud ka mitmetes teadusartiklites (Kahraman ja Fener, 2007; Ugur jt, 2009; Giannakopoulou, 2018; Kamani ja Ajalloeian, 2018). Survetugevuse ja LA teguri võrdluse graafikul (Joonis 16) on näha, et LA tulemuse paranemisel suureneb enamjaolt ka survetugevus. See paistab välja ka jooniselt 17, kus on trendijoone abil näha, et survetugevused suurenevad LA tulemuste langedes, aga tulemused varieeruvad proovide raames palju. Tulemuste terviklikus vaates on märgatavad erinevused proovide katsekehade survetugevuses, kus ühe proovi piires võivad tulemused erineda mõnest MPa kuni paarikümne MPa. Kaljupinnaste puhul, mille hulka kuuluvad ka uuritud lubjakivid, on tulemuste varieeruvus kuni 30 MPa ulatuses proovis normaalne (Vilo, 1986). Joonis 16 näitab veel, et survetugevuste tulemuste varieeruvus proovi raames suureneb LA tulemuse paranedes. Kivimkompleksid ei ole alati homogeenised. Kihid võivad olla kohati savikamad või porsunud, paksemate või õhemate merglist vahekihtidega, rohkem või vähem dolomiidistunud. See kõik mõjutab selle kivimi tugevusomadusi. Maardlate uuringul tehakse mitmeid puurauke ja võetakse nii palju erinevaid proove kui võimalik, et saada terviklikum pilt kihi kvaliteedist. Kui võrrelda Väo või Sutlema maardla baasil erinevatest puuraukudest samade kihtide kirjeldusi, siis on need ka märgatavalt erinevad.

Joonis 17. Survetugevus tulemused võrreldes LA tulemustega.

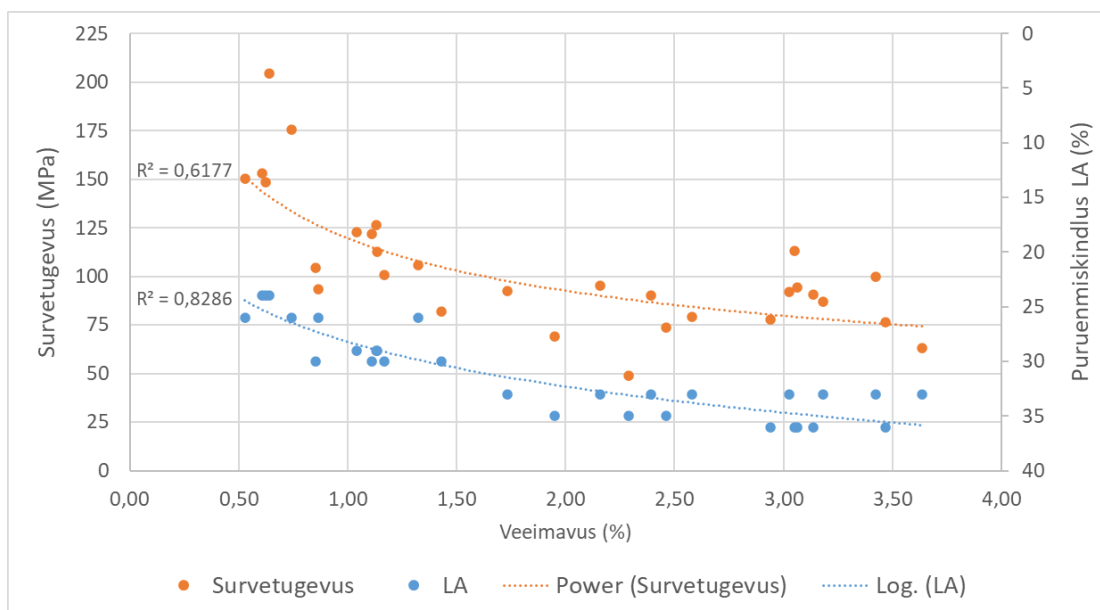


Märkimisväärne erand proovide hulgas on Nabala lademe Saunja kihistu beež lubjakivi. Proovil on kõige halvem LA tulemus, aga survetugevused (konkreetselt keskmine survetugevus) on suuremad kui kahel väiksema LA tulemusega proovil. Samuti on Saunja kihistu beežil kivimil 3% võrra halvem LA kui Saunja kihistu hallil kivimil, millel aga survetugevus beeži kivimiga on sama. Kivimi beež

värvus tuleneb selle porsumisest, kus kivimis esinev hajus püriit on vee ja hapnikuga kokkupuutel hakanud oksüdeeruma. Porsudes kivimi mehaaniline tugevus väheneb (Bilen jt, 2025). Sellest võib järeldada, et Saunja kihistu hallika ja beežika kivimite LA tulemuste erinevus sõltub porsumisest, kuid see ei avalda piisavalt mõju survetugevuse tulemuse halvenemiseks. C. Bileni pakkus välja meetodi kivimi porsumise hindamiseks kasutades karbonaatanalüüsi, mida oleks võimalik rakendada ka kivimi mehaanilise tugevuse kaudsel hindamisel (Bilen jt, 2025).

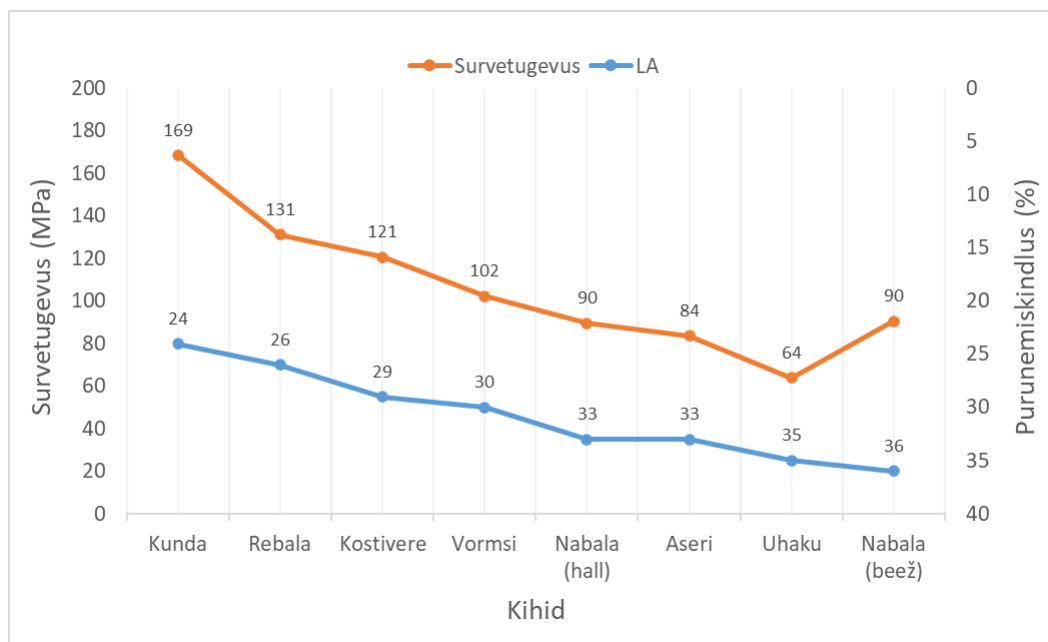
Kivimite purunemiskindlus ja survetugevus on tingitud nende struktuurist ja tekstuurist. Heterogeensed kihilised, poorsed ja jämedateralised kivid on vähem vastupidavamad koormamisele kui homogeensed tihedad ja massiivsed kivimid (Bewick jt, 2015). Üldjuhul survetugevuse katsel lõhenevad katsekehad mööda olemasolevaid lõhesid, poore, terade kontaktpindasid. Tihedamad kivimid on vastupidavamad survele, sest nendes terad asetsevad tihedalt üksteisega koos, mistõttu sidemed nende vahel on tugevamad. Sama on ka peenemateraliste kivimite puhul, milles kompaktsem struktuur ja suurem terade kontaktpind muudavad kivimi tugevamaks. Pooride, lõhede ja tühimike kogust analüüsiks kasutatakse poorsust, veeimavust ja tihedust. Veesisalduse tulemusi analüüsides, ilmneb survetugevuse nõrk seos ($R^2 = 0,62$) veeimavuse tulemustega (Joonis 18): kui proovi veeimavus on suurem, siis selle survetugevus on väiksem. Seoses esineb siiski palju kõrvalekaldeid. Sama efekt tekitab ka kui võrrelda kuivade katsekehade survetugevust veega küllastunud katsekehade omaga, kus kivimi pehmenedes vees langeb selle survetugevus (Vilo, 1986). Samasugune seos kajastub küll väga hästi ($R^2 = 0,83$) purunemiskindluse tulemuste juures, kus rohkesti vett imava killustiku materjali kadu purunemiskindluse katse käigus on suurem vähem vett imenduvatest proovidest. Võimalik, et survetugevuse jaoks on otstarbekam võrrelda seda hoopis poorsusega mitte veeimavusega. Kuigi praktiliselt kasutades veeimavust otse LA või survetugevuse kasutamiseks ei saa, siis oleks see potentsiaalselt abiks kui tulemused grupeerida veeimavuse järgi. Sama korraldati Türgi uuringus poorsusega, kus leiti hea korrelatsioon purunemiskindluse, survetugevuse ja poorsuse vahel (Kahraman ja Fener, 2007).

Joonis 17. Survetugevuse ja LA seos veeimavusega uuritud proovide näitel.



Peale kivimi struktuuri ja tekstuuri, sõltub purunemiskindlus sellest, milline on killustiku terade kuju ja plaatus. Plaatjad terad purunevad katse käigus rohkem, kui paksemad kandilised terad. See, millised terad killustiku sattuvad, sõltub sellest, millist tüüpi purustit kivimite purustamiseks kasutatakse (Kamani ja Ajalloeian, 2020). Siin uuringus kasutati lõugpurustit, mis tekitab märkimisväärselt rohkem plaatjat killustiku kui näiteks rootor- või koonuspurusti. Siiski ei tohiks see uuringu võrdlust mõjutada, sest kõik proovid purustati sama purustiga. Küll aga võib proovide 7 ja 8 LA tulemuste erinevus olla tingitud hoopis võimalusest, et proov 7 on kihilisem, mistõttu moodustus selle purustamisel rohkem plaatjaid terasid kui proov 8 purustamisel.

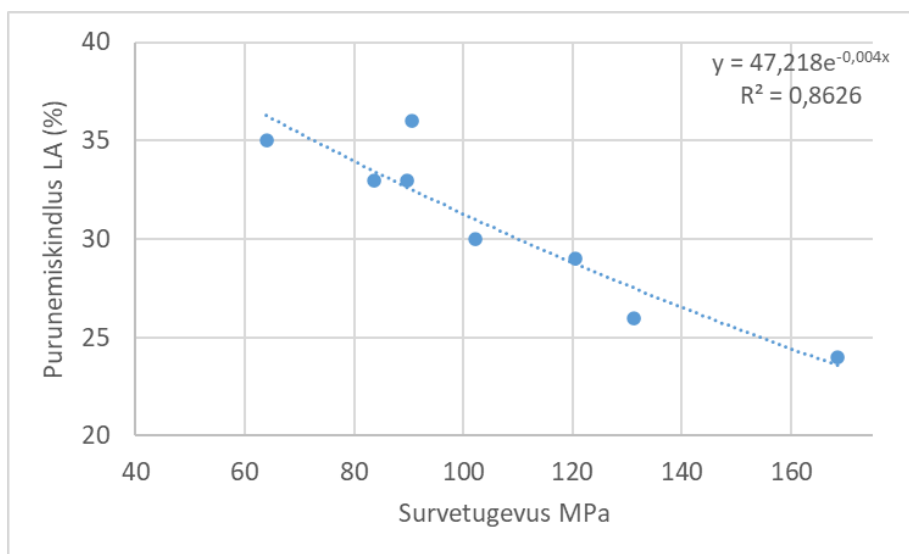
Joonis 18. Keskmise survetugevuse ja LA purunemiskindluse võrdlus uuritud kihtide näitel.



Selleks, et survetugevuse tulemusi paremini võrrelda LA väärtustega, saab kasutada ka proovide keskmisi survetugevusi. Joonisel 19 on näha, et kui võrrelda LA tulemusi keskmiste survetugevuse tulemustega, siis on korrelatsioon nende kahe vahel palju tugevam, kuid siiski leidub erandeid. Kõige tugevama korrelatsiooni moodustas käesolevas uuringus eksponentsiaalne trendijoon ($R^2 = 0,86$) (Joonis 20). Teiste teadlaste trendijooned olid kõik erinevad, kuid lubjakivide baasil analüüsitud korrelatsioon oli väiksem (Kahraman ja Fener, 2007; Kamani ja Ajalloeian, 2018) kui käesoleva töös saadud trend. Nimetatud uuringutes oli proovide arv suurem, mis põhjustas tulemuste suurema variatsiooni. Kasutades vaid tard- ja moondekivimeid leiti aga oluliselt selgem seoses survetugevuse ja purunemiskindluse vahel (Kahraman ja Fener, 2007; Giannakopoulou jt, 2018).

Käesoleva töö autori leitud parima trendijoon võrrandi järgi on võimalik arvutada LA tulemus sõltuvalt survetugevuse σ tulemusest kasutades valemit 1 (joonis 19). Antud valem sobib kasutamiseks proovi keskmise survetugevuse puhul, kui üksikproovide arv on võimalikult suur. Soovituslikult peaks olema ühe proovi kohta vähemalt 5-10 survetugevuse katsetust (Bewick jt, 2015).

$$LA = 47,218e^{-0,004\sigma}, \text{ kus } \sigma - \text{survetugevus, LA} - \text{purunemiskindlus.} \quad (3)$$

Joonis 19. LA tulemuste võrdlus keskmiste survetugevuste tulemuste järgi 8 uuritud proovi kohta.


Kui rakendada antud valemit siin uuringus proovi 5-3 LA tulemuse leidmiseks arvutuslikult kasutades selle survetugevust, siis oleks tulemus LA21, mis on madalam kui katsetatud LA ja väiksem kui näiteks Paldiski gneisi tulemus LA23 (Kontson jt, 2025). Eesti lubja- ja dolokivide purunemiskindluse tulemused on tavaliselt vahemikus 25-40, kuid näiteks põlevkivi aheraine killustiku puhul võib see olla ka suurem. Kuigi LA21 tulemus lubja- ja dolokivide puhul on ebareaalne, siis 200 MPa survetugevus seda ei ole, mis ületati ka selles uuringus proovil 5-3 (Tabel 3). Tulemusi ligi 200 MPa on saadud ka varasematest ehituskivi uuringutest Eestis (Rommel, 1968; Rommel, 1970). Arvutuslikult peaksid olema LA10-20 survetugevused 200-300 MPa, mis reaalses ei vasta tõele. Teiste uuringute kohaselt jäävad tard- ja moondekivimi survetugevused enamasti vahemikku 50-200 MPa, mille LA on 10-30 (Giannakopoulou jt, 2018). Sama probleem on ka väga madalate survetugevuste puhul, kus arvutuslikult LA50 jaoks peaks olema survetugevuse väärtus negatiivne, mida see olla ei saa. Seda arvestades on soovituslik kasutada valemit 3 ainult lubja- ja dolokivide puhul, mille survetugevus jääb vahemikku 40-160 MPa. Eesti tard- ja moondekivimite rakendusliku seose leidmiseks tuleks uurida neid eraldi.

Tabel 5. Arvutuslikud LA tulemused survetugevuse (σ) järgi kasutades valemit 3.

σ MPa	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
LA %	43,6	40,2	37,1	34,3	31,7	29,2	27,0	24,9	23,0	21,2	19,6	18,1	16,7	15,4

Tabelis 5 on esitatud LA tulemused kasutades valemit 3 erinevate survetugevuste kohta. Tabeli alusel on võimalik liigitada survetugevuste kategooriad LA tulemuste vahemike järgi kasutades madala- ja kõrgemargilise lubja- ja dolokivi liigitamise nõudeid alusena, mis asuvad tabelis 6. Liigituse järgi on kõrgemargilise lubja- ja dolokivi survetugevus vähemalt 110 MPa, madalamargilise lubja- ja dolokivi survetugevus vahemikus 70-109 MPa ja täitekivi survetugevus alla 70 MPa (Tabel 6). Kliimaministeeriumi määruse RT I, 29.12.2024, 56 alusel sobib sama liigitus ka aluskorra ehituskividele. Tabelit 6 sobib kasutades antud uuringu raames, kuid ametlikuks kasutuseks tuleks laiendada andmete mahtu. Määruses sätestatud teised kvaliteedinõuded, nagu näiteks külmakindlus, kehtivad siinkohal jäädavalt määruse kohaselt. Tabeli 6 kohaselt oleksid proovid 2, 3 ja 5 kõrgemargilised ehituslubjakivid, proovid 4, 6, 7 ja 8 madalamargilised ehituslubjakivid ja proov 1 täitelubjakivi.

Tabel 6. Survetugevuse kategooriad LA tulemuste vahemike järgi töö autori soovitusel. Liigitus baseerub tabeli 2 andmetel (RT I, 29.12.2024, 56, §21 - §22). LA ja survetugevuse vahemikud lähtuvad valemist 3 ja tabelist 5.

Liigitus	Kõrgemargiline ehituskivi		Madalamargiline ehituskivi	Täitekivi	
	LA25 ja väiksem	LA26-30	LA31-35	LA36-40	LA41 ja suurem
Survetugevus (MPa)	> 160	110 – 159	70 – 109	40 – 69	< 39

Kokkuvõte

Käesoleva uuringu käigus analüüsiti Eesti lubja- ja dolokivide purunemiskindluse seoseid survetugevusega Vão V ja Sutlema karjääri näitel. Töö eesmärgiks oli hinnata, kas varasemate GOST standardite alusel määratud survetugevuse tulemusi saab kasutada tänapäevaste EVS standardite kohaste Los Angelese (LA) purunemiskindluse tulemuste prognoosimiseks. Uurimuse praktiline väärtus seisnes võimaluses siduda ajaloolised geoloogilised andmestikud tänapäevaste kvaliteedinõuetega ning seeläbi parandada olemasolevate maavaraandmete kasutatavust. Uurimus annab olulise panuse Eesti karbonaatkivimite kvaliteedi hindamise meetodikate võrdlemiseks ning aitab kaasa olemasolevate geoloogiliste andmete tõhusamale kasutamisele ehitusmaavarade valdkonnas.

Uuringu käigus koguti kokku kaheksast erinevast Ordoviitsiumi asjastu Eesti lubjakivikihist proovid, mis hõlmasid Vão V lubjakivikarjääri ja Sutlema karjääri. Proovid esindasid Uhaku, Lasnamäe, Aseri, Kunda, Vormsi ja Nabala lademete kihte. Igast proovist valmistati survetugevuse ja veeimavuse määramiseks 50 × 50 × 50 mm kuubikulised katsekehad ning ülejäänud materjalist tekitati fr 10/14 mm killustik LA katse läbiviimiseks. Survetugevus määrati kuivas olekus lähtudes GOST 8269.0-97 meetodikast ning purunemiskindlus vastavalt standardile EVS-EN 1097-2:2020. Parimad tulemused saavutas Kunda lademe tumehall peenkristalne lubjakivi, mille LA on 24, parim survetugevus 204 MPa ja keskmise survetugevus 169 MPa. Samas kõige halvem LA tulemus oli Nabala lademe beežil lubjakivil (LA36) ja kõige halvem survetugevus Uhaku lademe helehallil savikal lubjakivil (49 MPa, keskmine survetugevus 64 MPa). Töö käigus selgus siiski, et üksikute katsekehade survetugevused varieerusid märkimisväärselt isegi sama kivimkompleksi piires. Variatsioonide põhjuseks võib lugeda kivimite heterogeensust, poorsust, porsumise ilminguid ning mergli ja savi vahekihtide esinemise sagedust.

Tulemused näitasid selget seost kivimi survetugevuse ja purunemiskindluse vahel. Mida suurem oli kivimi survetugevus, seda parem oli selle vastupidavus purunemisele ehk madalam LA väärtus. Analüüsi põhjal leiti hea korrelatsioon Eesti lubjakivide LA väärtuse ja survetugevuse vahel, kuid täpse praktilise matemaatilise seose leidmist piiras tulemuste varieeruv hajuvus ja erandid. Täpsema praktilise valemi jaoks tuleks laiendada uuringuala ning hõlmata kõik peamised kaevandatavad lademed/kihistud ning teha vähemalt 5-10 survetugevuse katset proovi kohta, sõltuvalt kivimi homogeensusest. Küll aga võimaldas uuring välja pakkuda ligikaudsed survetugevuse vahemikud erinevate LA kategooriate jaoks. Samuti ilmnis oluline seos veeimavuse ning kivimite mehaaniliste omaduste vahel — suurema veeimavusega kivimid olid üldjuhul väiksema survetugevuse ja halvema purunemiskindlusega. Sellest kajastub, et loodusliku kivimi survetugevus ja purunemiskindlus sõltuvad selle struktuurist ja tekstuurst. Tulevikus täpsema praktilise seose leidmiseks survetugevuse ja LA teguri vahel, oleks vajalik täiendavalt uurida kivimite poorsust, veeimavust ja keemilist koostist. Kasulik oleks ka leida korrelatsioon tard- ja moondekivimite purunemiskindluse ja survetugevuse vahel.

Tänuavaldused

Tänan enda lõputöö juhendajat Olle Hintsit heade nõuannete ja abivalmiduse eest välitöödel ning töö vormistamisel. Kaasjuhendaja Henri Prank AS Teede Tehnokeskust pakkus välja uuringuprobleemi ja head laboritingimused proovide töötlemiseks. Tänan AS Kiirkandurit ja OÜ Väo Paasi, kes võimaldasid oma karjääridest proove koguda. Ühtlasi tänan oma perekonda ja sõpru, kes toetasid mind terve töö protsessi käigus.

Kirjanduse loetelu

- Bewick, R., Amann, F., Kaiser, P.K. & Martin, D. (2015). *INTERPRETATION OF UCS TEST RESULTS FOR ENGINEERING DESIGN*. Canada.
- Bilen, C., Tugrul, A. & Ündül, Ö. (2025). *Engineering geological evaluation of weathered limestones and dolomites quarries in Gebze (Türkiye)*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 84, 227. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04245-8>
- Eesti Geoloogiateenistus. (i.a.-a). Puursüdamikud ja geoloogiline materjal. Arbavere uurimiskeskus. Kasutatud 25.05.2026. <https://www.egt.ee/maapouealane-teave/arbavere-uurimiskeskus/puursudamikud-ja-geoloogiline-materjal>
- Eesti Geoloogiateenistus. (i.a.-b). *Ehitusmaavarad. Maapõueressursid*. Kasutatud 18.05.2026. <https://www.egt.ee/tegevusvaldkonnad-ja-eesmargid/maapoueressursid/ehitusmaavarad>
- Eesti Pank. (2025). *Rahapoliitika ja Majandus. 2025/2. Eesti Panga prognoos aastateks 2025-2027*. lk 22-36.
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2007). *EVS-EN 1926:2007. Natural stone test methods—Determination of compressive strength*. <https://www.evs.ee/et/evs-en-1926-2007>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2008). *EVS-EN 13755:2008. Natural stone test methods—Determination of water absorption at atmospheric pressure*. <https://www.evs.ee/et/evs-en-13755-2008>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2020). *EVS-EN 1097-2:2020. Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid*. <https://www.evs.ee/et/evs-en-1097-2-2020>
- Geoportaal. (2024). *Maardlate kaardirakendus*. Kasutatud 17.05.2026. <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maardlad>
- Giannakopoulou, P. P., Petrounias, P., Tsikouras, B., Kalaitzidis, S., Rogkala, A., Hatzipanagiotou, K. & Tombros, S. F. (2018). *Using Factor Analysis to Determine the Interrelationships between the Engineering Properties of Aggregates from Igneous Rocks in Greece*. *Minerals*, 8(12), 580. <https://doi.org/10.3390/min8120580>
- Kahraman, S. & Fener, M. (2007). *Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength*, *Materials Letters*, 61, 26, lk 4861-4865. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.06.003>

- Kamani, M. & Ajalloeian, R. (2019) *Evaluation of the mechanical degradation of carbonate aggregate by rock strength tests*, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(1), lk 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.05.007>
- Kamani, M. & Ajalloeian, R. (2020) *The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape*, *Construction and Building Materials*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117016>
- Kink, H. (1999). *Laagna kiirteesüvend, Loodusmälestised*, 4, lk 10-14. Taltech.
- Kliimaministeerium. (2025). *Maavarad*. Kasutatud 19.05.2026. <https://kliimaministeerium.ee/energeetika-maavarad/maavarad>
- Kliimaministeerium. (2026). *Ehitusmaavarad. Maavarad*. Kasutatud 19.05.2026. <https://kliimaministeerium.ee/energeetika-maavarad/maavarad/ehitusmaavarad>
- Maapõueseadus. (08.07.2025). *Riigi Teataja. RT I, 08.07.2025, 59*. Kasutatud 19.05.2026. <https://www.riigiteataja.ee/akt/MaaPS>
- Muinsuskaitseamet. (2007). *Lubi. Ajalugu, valmistamine ja kasutamine*. Eesti Muinsuskaitseamet.
- Nirgi, S., Maala, L., Kaasik, T., Smyth, D. & Wrobel, F. (2022). *Jõhvi magnetanomaalia uuringupotentsiaali hindamine*. Eesti Geoloogiateenistus. EGF9552. <https://fond.egt.ee/fond/egf/9552>
- OpenAI. (2026). *ChatGPT*. Kasutatud 25.05.2026. <https://chatgpt.com>
- Perens, H. (2004). *Paekivi Eesti ehitistes II. Harju, Rapla ja Järva maakond*. Eesti Geoloogiakeskus. 144 lk.
- Pirrus, E. (1999). *Maavarade geoloogia. Looduslikud ehitusmaterjalid*, lk 68-73. Taltech.
- Puursüdamike andmebaas. (2026). Eesti Geoloogiateenistus. Kasutatud 17.05.2026.
- Rommel, S. (1968). *Suure survetugevusega lubjakivide ja dolomiitide otsimistööde aruanne*. Geoloogia Valitsus. EGF2972. <https://fond.egt.ee/fond/egf/2972>
- Rommel, S. (1970). *Aruanne 1976.-70. a. geoloogilistest uurimustöödest Väo-II lubjakivimaardlal*. Geoloogia Valitsus. EGF3116. <https://fond.egt.ee/fond/egf/3116>
- Rõõmusoks, A., Puura, V., Raukas, A., & Mark-Kurik, E. (1997). History of geological research. *Rmt Geology and mineral resources of Estonia* (lk. 15–26). Estonian Academy Publishers, Tallinn. <https://geoloogia.info/geology>
- Schmidt, Fr. (1858). *Untersuchungen über die Silurische Formation von Ehtland, Nord-Livland und Oesel. Archiv für die Naturkunde Liv-, Ehst- und Kurlands*, 2, 1–249.

- Sinivalu, R. & Kleesment, A. (2002). *Purdsetendite granulomeetrilisest klassifikatsioonist*. Eesti Geoloogiakeskuse Toimetised. 10/1, lk 20-26.
- Sinivalu, R. & Tuuling, T. (2007). *Rapla maakonna Sutlema uuringuala lubjakivi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.01.2007)*. Eesti Geoloogiakeskus. EGF7878. <https://fond.egt.ee/fond/egf/7878>
- Kontson, K., Lill, K., Sillamäe, S., Kendra, A., Evert, M., Soop, S., Pädam, S.I., Ehrlich, Ü., Levo, A. & Kanter, S. (2025). *Pakri poolsaarele rajatava vesialvest alumiste reservuaaride ehitamise käigus välja kaevandatavate gneisside teedeehituses kasutamise tehnilise teostatavuse ning majandusliku ja sotsiaalmajandusliku mõju hindamine. Lõpparuanne*. Taltech.
- Tammekänd, M. (2015). *Väo lubjakivimaardla Väo V uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.10.2015. a). Töö nr 11/0733-2*. OÜ Inseneribüroo STEIGER. EGF8682. <https://fond.egt.ee/fond/egf/8682>
- Tammekänd, M. & Paat, K. (2020). *Väo lubjakivimaardla Lõuna-Väo II ja Tondi-Väo II uuringuruumide geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.11.2020)*. OÜ Inseneribüroo STEIGER. EGF9451. <https://fond.egt.ee/fond/egf/9451>
- Tee ehitamise kvaliteedi nõuded. (2024). *Riigi Teataja. RT I, 26.11.2024, 3*. Kasutatud 25.05.2026. <https://www.riigiteataja.ee/akt/126112024003>
- Teede Tehnokeskus. (2011). *Kivimaterjali purunevuse silindris (GOST 8269) ja purunemiskindluse (EVS-EN 1097-2) tulemuste võrdlus*. Maanteeamet.
- Transpordiamet. (26.01.2022). *Killustiku katendikihtide ehitamise juhend. Riigiteede juhendid*. Kasutuse kuupäev 17.05.2026. <https://transpordiamet.ee/riigiteede-juhendid#katend>
- Transpordiamet. (2026). *Riigiteede teehoiukava 2026-2029*.
- Tuuling, T. (2021). *Sutlema lubjakivimaardla maavara kvaliteedi ümberhindamise seletuskiri (varu seisuga 30.09.2021)*. OÜ Inseneribüroo STEIGER. EGF9542. <https://fond.egt.ee/fond/egf/9542>
- Ugur, I., Demirdag, S. & Yavuz, H. (2010). *Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates. Materials Characterization*. 61, 1, lk 90-96. [10.1016/j.matchar.2009.10.014](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.10.014)
- Vilo, A. (1986). *Ehitusgeoloogia*. Taltech.
- Vohta, A. (2025). *Eesti Vabariigi 2024. aasta maavaravarude koondbilansid (seisuga 31.12.2024)*. Eesti Geoloogiateenistus, EGF47389. <https://fond.egt.ee/fond/egf/47389>

Üldgeoloogilise uurimistöo ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord. (2005). *Riigi Teataja*. RTL 2005, 60, 866. Kasutatud 19.05.2026. <https://www.riigiteataja.ee/akt/905848>

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. (2024). *Riigi Teataja*. RT I, 29.12.2024, 56. Kasutatud 19.05.2026. <https://www.riigiteataja.ee/akt/129122024056>

Lisa 1. Proovivõtu asukoha pildid



Joonis 20. Väo V karjäär. Proov 1. Uhaku lade, Kõrgekalda kihistik (Oliver Paul Jäär, 28.02.2025).



Joonis 21. Väo V karjäär. Proov 2. Lasnamäe lade, Väo kihistu, Kostivere kihistik (Oliver Paul Jäär, 28.02.2025).



Joonis 22. Väo V karjäär. Proov 3. Kunda lade Kandle kihistu (Oliver Paul Jäär, 28.02.2025).



Joonis 23. Väo V karjäär. Proov 4. Aseri lade.



Joonis 24. Vão V karjäär. Proov 5. Lasnamäe lade, Vão kihistu, Rebala kihistu (Oliver Paul Jäär, 28.02.2025).



Joonis 25. Sutlema karjäär. Proov 6. Vormsi lade, Kõrgessaare kihistu (Oliver Paul Jäär, 01.04.2025).



Joonis 26. Sutlema karjäär. Proov 7. Nabala lade, Saunja kihistu (hall) (Oliver Paul Jäär, 01.04.2025).



Joonis 27. Sutlema karjäär. Proov 8. Nabala lade, Saunja kihistu (beež) (Oliver Paul Jäär, 01.04.2025).

Lisa 2. Pildid katsekehadest



Joonis 28. Survetugevus katsekeha 1-1.



Joonis 29. Survetugevus katsekeha 1-2.



Joonis 30. Survetugevus katsekeha 1-3.



Joonis 31. Survetugevus katsekeha 2-1.



Joonis 32. Survetugevus katsekeha 2-2.



Joonis 33. Survetugevus katsekeha 2-3.



Joonis 34. Survetugevus katsekeha 3-1.



Joonis 35. Survetugevus katsekeha 3-2.



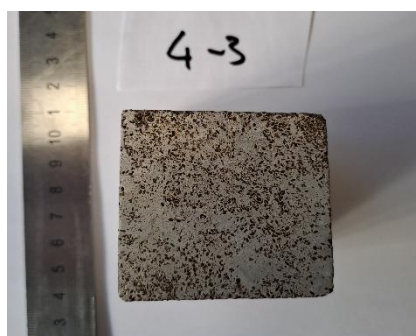
Joonis 36. Survetugevus katsekeha 3-3.



Joonis 37. Survetugevus katsekeha 4-1.



Joonis 38. Survetugevus katsekeha 4-2.



Joonis 39. Survetugevus katsekeha 4-3.



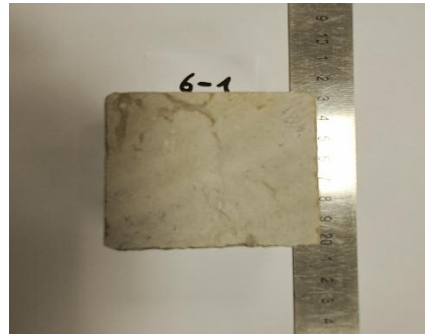
Joonis 40. Survetugevus katsekeha 5-1.



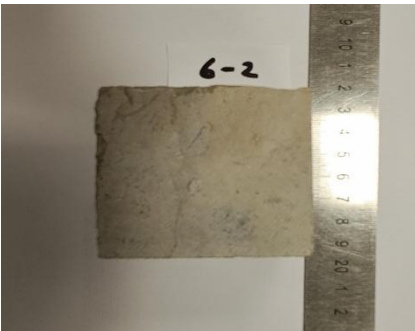
Joonis 41. Survetugevus katsekeha 5-2.



Joonis 42. Survetugevus katsekeha 5-3.



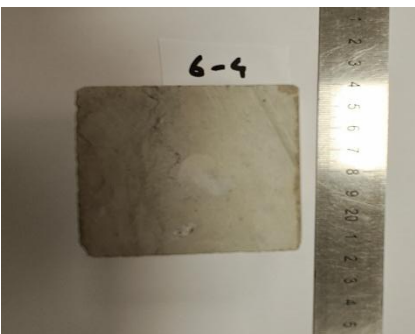
Joonis 43. Survetugevus katsekeha 6-1.



Joonis 44. Survetugevus katsekeha 6-2.



Joonis 45. Survetugevus katsekeha 6-3.



Joonis 46. Survetugevus katsekeha 6-4.



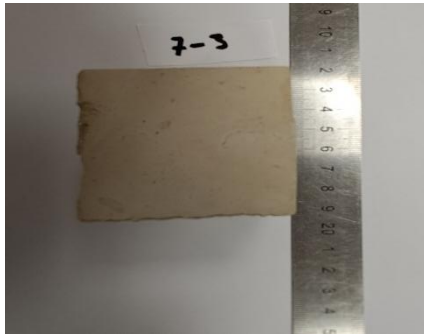
Joonis 47. Survetugevus katsekeha 6-5.



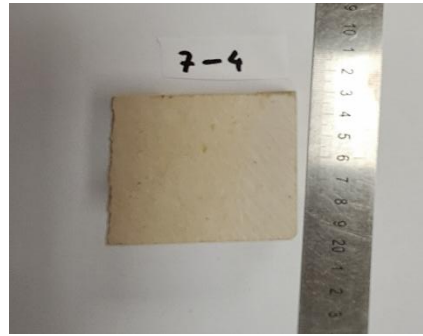
Joonis 48. Survetugevus katsekeha 7-1.



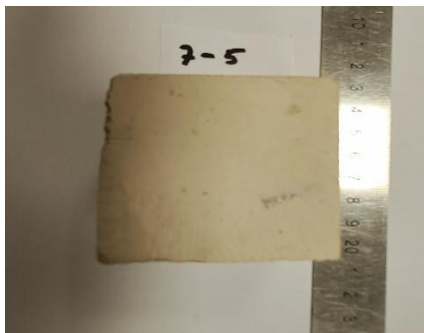
Joonis 49. Survetugevuse katsekeha 7-2.



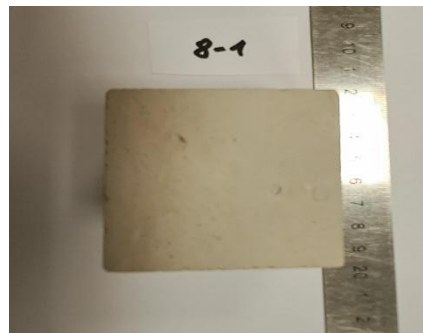
Joonis 50. Survetugevus katsekeha 7-3.



Joonis 51. Survetugevus katsekeha 7-4.



Joonis 52. Survetugevus katsekeha 7-5.



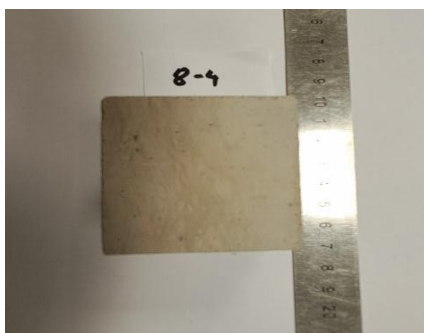
Joonis 53. Survetugevus katsekeha 8-1.



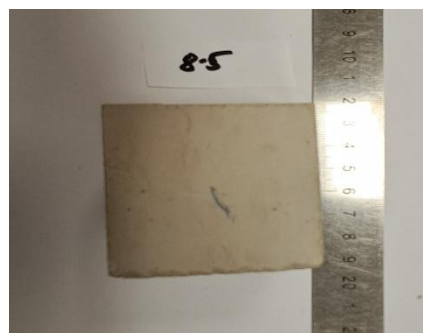
Joonis 54. Survetugevus katsekeha 8-2.



Joonis 55. Survetugevus katsekeha 8-3.



Joonis 56. Survetugevus katsekeha 8-4.



Joonis 57. Survetugevus katsekeha 8-5.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Oliver Paul Jäär,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Seosed Eesti lubjakivide Los Angeles'e purunemiskindluse ja survetugevuse vahel Väo ja Sutlema maardla näitel,

mille juhendaja on Olle Hints,

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.

26.05.2026

[Allkirjastatud digitaalselt]

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 kaitsevale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.