



TÜKIKIVI TOOTMISE TEHNOLOOGILISTE VÕIMALUSTE ANALÜÜS EESTI LUBJA- NING DOLOKIVI KARJÄÄRIDES

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Diana Migur (179007LARB)

Juhendaja: Sander Kanter, lektor, MSc

Õppekava: Maapõueressursid (LARB)

Tallinn 2021

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: Diana Migur

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: lektor Sander Kanter

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Diana Migur

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Tükikivi tootmise tehnoloogiliste võimaluste analüüs Eesti lubja- ning dolokivi karjäärides,

mille juhendaja on lektor Sander Kanter,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna
Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja
lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas
Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja
lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete
kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (04.06.2021)

Sisukord

Autorideklaratsioon	2
Annotatsioon	5
Mina Diana Migur.....	3
Abstract.....	6
Jooniste loetelu.....	7
Tabelite loetelu.....	8
Sissejuhatus.....	9
1. Tükikivi tootmine ja vajalikkus	10
1.1. Tükikivi töötlemise protsessid	10
1.2. Tükikivi lõpp-produktid	10
2. Geoloogia	12
2.1. Paekivi	12
2.2. Geoloogiline taust.....	12
2.3. Ehitusmaavarade levik	13
2.4. Koondbilanss.....	15
3. Tükikivi tootmise tehnoloogiad	17
3.1. Tross-saega saagimine	17
3.2. Ketassaega saagimine	18
3.3. Vesilõikus	19
3.4. Soonuritega kivimi saagimine	19
3.5. Kiiludega murdmine.....	20
3.6. Puur-lõhketöödega tükikivi tootmine	22
3.7. Torulaengutega tükikivi tootmine.....	24
3.8. Paisuvseguga tükikivi tootmine	25
3.9. Kvaliteedinõuded tükikivile.....	26
4. Tootmine Eestis.....	28
5. PVT ehk parima võimaliku tehnoloogia valik.....	31
Kokkuvõte	34
Tänuavaldused	35
Kasutatud kirjandus	36

Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida, milliseid tükikivi tootmise tehnoloogiaid on Eesti lubja- ja dolokivikarjäärides võimalik kasutada, mida need tehnoloogiad endast kujutavad ning seejärel neid omavahel analüüsides leida Eesti tingimustesse kõige paremini sobiv tehnoloogia. Tükikivi tootmise tehnoloogiate kõrvale uuriti ka Eesti geoloogilist olukorda, võttes arvesse ehitusmaavarade levikut Eestis, viimaste aastate ehitusmaavarade koonbilanssi ja uuriti, millised kvaliteedinõuded on ehituskivile kehtestatud ning milliseid kivimikihte kaevandamiseks eelistatakse ja miks. Selleks, et uuringust leitud infot korrektselt analüüsida, kõrvutati see Eesti ettevõtetelt saadud informatsiooniga.

Käesolev töö koosneb uuringust ja analüüsist. Töö uuringu osas on autor analüüsinud infot tükikivi tootmise tehnoloogilisi võimalusi ning Eesti ehitusmaavarade geoloogilisi tingimusi. Selleks, et Eestis kasutatavate tehnoloogiate kohta rohkem infot saada, saatis autor Eestis tükikivi kaevandavatele ettevõtetele välja küsimustiku, millele vastas kolm kuuest: Saare dolomiit – Väokivi OÜ, Orgita dolomiiditooted OÜ ning Põhjakivi OÜ ja Sparks & Stone concept OÜ, kellest viimased kaks vastasid küsimustikule koos. Seetõttu mainitakse neid Eesti ettevõtteid selles bakalaureuse töös rohkem kui teisi.

Uuringu tulemusena selgus, et tükikivi tootmiseks on kasutatud tross- ja ketassaega saagimist, kiiludega murdmist, puur-lõhketöödega väljamist ning kiilude, torulaengute ja paisuvsegudega ja ekskavaatoriga kihiti murdmist. Nimetatud tehnoloogiaid omavahel analüüsides jõuti järelduseni, et parimaks võimalikuks tehnoloogiaks osutus torulaengutega kivimi murdmine. Eelnevaga oli samavõrdne ka paisuvsegudega kivimi murdmine, ent see tehnoloogia on liiga uudne, et seda järgnevatel aastatel kasutusse võtta saaks.

Ehitusmaavarade uurimisel selgus, et Harjumaal kaevandatakse ehituspaasi kõige rohkem Aseri, Lasnamäe, Uhaku, Keila ja Nabala lademe kivimitest, Rapla maakonnas Nabala ja Juuru lademe kivimitest ning Pärnumaakonnas vaid Jaagarahu kivimitest.

Abstract

The aim of the current Bachelor thesis was to study which limestone blocks technologies can be used in Estonian limestone and dolomite quarries, also to seek the information that these technologies represent and which is the most suitable technology for Estonian conditions by analysing them to each other. An ancillary study of potential technologies was also a survey of Estonian construction mineral resources done in counties to find out which layers of rock are preferred for rock mining and why. The geological situation in Estonia was also studied, taking into account the distribution of construction mineral resources in Estonia, the consolidated balance of construction mineral resources in recent years and the quality requirements established for construction stone

Current work includes research and analysis. Regarding the study of the work, the author has been looking for information on various technological possibilities of limestone blocks production, studying the geological conditions of Estonian construction mineral resources. In order to get more information about the technologies used in Estonia, the author sent a questionnaire to companies mining stone in Estonia, to which three out of six companies answered: Saare dolomiit – Väokivi OÜ, Orgita dolomiiditooted OÜ and Põhjakivi OÜ ja Sparks & Stone concept OÜ, of which the last two replied to the questionnaire together. Therefore, these Estonian companies are mentioned more in this bachelor thesis than others.

It was found in the study that circle and wire-sawing, wedge breaking, drilling and blasting the rock, pipe charges and extraction of the stone with expansion mixtures and the fracturing of the rock in layers with an excavator have been used for the production the limestone blocks. Analyzing these technologies, it was concluded that the best available technology for the production of limestone blocks is pipe-breaking rock fracturing, which is equivalent to extraction of the stone with expansion mixtures, but the latter technology is too new to be used in the coming years. The study of construction mineral resources revealed that in Harju County the construction limestone is mined mostly from the rocks of Aseri, Lasnamäe, Uhaku, Keila and Nabala Stages, in Rapla County from the rocks of Nabala and Juuru Stages and in Pärnu only from Jaagarahu rocks.

Jooniste loetelu

Joonis 1: Tallinna Kaarli kirik.	11
Joonis 2: Tallinna Rahvaraamatukogu.....	11
Joonis 3: Ajastute põhine kaart. (Bauert H. , 2018)	13
Joonis 4: Geoloogiliste uuringulubade väljastamine maakondade lõikes 2010 - 2018(2019) aastatel.....	14
Joonis 5: Kaevandamislubade väljastamine maakondades vahemikus 2010 – 2019 (2018).....	15
Joonis 6: Ehitusmaavarade aktiivsed ja passiivsed varud 2019. a seisuga.....	16
Joonis 7: Ehitusmaavarade kaevandamise mahud 2019. a seisuga.....	16
Joonis 8: Tross-saega saagimine (CEDIMA, 2020).....	17
Joonis 9: Tross-saega saagimine karjääris (Autor: E. Tomberg,, 1999).....	18
Joonis 10: Ketassaega kivimi saagimine karjääris (Autor: E. Tomberg, 1999).	19
Joonis 11: Näide käsitsi kiiludega murdmisest (Nõmmela & Rudanovski, 2012).	20
Joonis 12: Hüdrauliline kiil (Autor: Direct Industry, 2021).....	21
Joonis 13: Kaarma dolomiidikarjääri asukoht ja mäeeraldis.....	22
Joonis 14: Orgita dolomiidikarjääride asukoht ja mäeeraldis.....	22
Joonis 15: Lõhkeauguskeem musta püssirohtu kasutades.	23
Joonis 16: Lõhkeauguskeem torulaenguga kivimi lõhkamisel.	25
Joonis 17: Paisuvsegudega murtud kivim (Autor: Splitstar).....	26
Joonis 18: Eestis tükikivi kaevandavad lubja- ja dolokivikarjäärid.....	29
Joonis 19: Väo karjäär (Autor: Kristin Kahu, 2018).	30
Joonis 20: Kihiti murdmiseks hüdrovasar (Autor: T. Tomberg, 2020).....	30

Tabelite loetelu

Tabel 1: Kvaliteedinõuded kaevandatavale ehituslubjakivile ja ehitusdolokivile ((Perens, 2003) & töös kasutatud küsimustik).	26
Tabel 2: Ülevaade Eestis tükikivi tootvate ettevõtete kaevandamismahtudest ja prognoositavatest ammendumise perioodidest (Bauert H. , 2018) (Kaasik, 2020) (Tamm, 2020). ..	29
Tabel 3: Tehnoloogiate võrdlus.....	32

Sissejuhatus

Paekivi ehk paas on Eesti rahvuskivi, mis hõlmab lubjakivi ja dolokivi ning leiab laialdaselt kasutust killustikuna, täitematerjalina, ehitusmaterjalina, dekoratsioonidena, monumentidena ja ka viimistluskivina. Pae avamusi võib Eestis näha pea igal pool. Ehituspaeks loetakse kõrgemargilist paekivi, millest suur osa läheb teede ehituse materjalideks ja ülejäänud läheb tükikiviks. Tükikivi on hinnatud ehituspaas, mida kaevandatakse konkreetsete mõõtmetega plokkide ja tahvlitena ja mis on läbi ajaloo ehituses oma atraktiivsuse ja kvaliteedi tõttu tähtsal kohal olnud. Eestis on tükikivist valminud paljude haudade ristid, kiriku fassaadid, trepid jne (King, 2005-2021) (Administration, 2016).

Eestis pole tükikivi kaevandamise tehnoloogiate kohta siiani ülevaadet tehtud, millest tekkis ka idee selline lõputöö teema valida. Rohkem räägitakse teede-ehitusse mineva pae kaevandamise tehnoloogiatest. Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli teha ülevaade ja analüüs võimalikest tükikivi kaevandamise tehnoloogiatest. Selleks, et tehnoloogiaid analüüsida, otsiti erinevaid välismaa uuringuid antud tehnoloogiate kohta ning hiljem sealt saadud informatsioon küsimustiku kaudu Eesti ettevõtetelt saadud informatsiooniga ära siduda. Tehnoloogiate omavaheliseks võrdluseks toodi välja erinevad parameetrid, milleks olid keskkonnamõjud, mõju kivimile, tehnoloogia võimalik väljamissügavus ning kihtide eralduvus väljamisel. Üheks kõige olulisemaks faktoriks osutus tehnoloogia poolt tekitatud mõju keskkonnale, mis sai määravaks ka parima võimaliku tehnoloogia valikul.

Tehnoloogiate kõrvale tehti ülevaade ka ehituspaele kehtestatud kvaliteedinõuetest. Töö käigus uuriti ka Eesti geoloogilist olukorda ehitusmaavarade osas. Selle jaoks tehti ülevaade erinevate maakondade ehitusmaavarade aruannetest ning 2019. aasta koondbilanssist ehituspae kohta, et saada informatsiooni, palju tükikivi aastas väljatakse ja milline on üldine Eesti pae kaevandamise jätkusuutlikkus.

1. Tükikivi tootmine ja vajalikkus

Suurt osa paekivist kasutatakse tänapäeval teedehituses, raudtee ballastis, täitematerjalina ja killustiku tarbeks. Tihtipeale lõigatakse paekivi konkreetsete mõõtmetega plokkideks ja tahvliteks, mida siin töös edaspidi nimetatakse tükikiviks (King, 2005-2021).

Tükikivi on läbi ajaloo olnud ehituses tähtsal kohal nii oma atraktiivsuse kui ka kvaliteedi poolest. See on ehituskivina hinnatud, sest kivim ei nõua palju ümbertöötlust (Encyclopedia, 1998-2021). Tükikivi on laialdaselt kasutusel seinte, skulptuuride dekoratiivse viimistluse ja arhitektuuri rakendustes (Administration, 2016).

Enne kivimi väljamist viiakse läbi põhjalik ressursianalüüs ehk geoloogiline uuring, kus uuritakse vajamineva kivimi kogust asukohas ja selle majanduslikku kaevandatavust, millele järgneb kaevandamisloa taotlemine (SOLANCIS, 2021). Pärast karjääri plaani välja töötamist on esimeseks protsessiks katendi eemaldamine mehaaniliste ja hüdrauliliste meetoditega. Kui väljatav kivim on kõva, siis kasutatakse mõlema meetodi puhul ka puur-lõhketöid katendi lihtsamaks eemaldamiseks (Becker & Kennard, 1937). Kivimi väljamise tehnoloogia valitakse vastavalt kivimikihi orientatsioonile. Kui kivim on plokina välja lõigatud, lõigatakse see transpordiks ja paremaks käsitlemiseks sobivateks väiksemateks plaatideks (SOLANCIS, 2021).

1.1. Tükikivi töötlemise protsessid

Sellel, kuidas tükikivi tootmisesse jõuab, on kaks võimalust: kas loodusliku paekivi plokina, mis on paekivi otse maast väljalõikamise tulemus plokkidena, või „taastatud“ (ingl. k. „reconstituted“) lubjakivi, mis saadakse väljatud purustatud lubjakivi segamisel väikese protsendi vee ja tsemendiga ning selle plokkideks vormimisega. Erinevalt looduslikust tükikivist, ei kaasne taastatud lubjakivi plokkidega kõrvalprodukti ja nende värvus ei kulu ajaga (PTC, 2021).

Tükikivi lõigatakse ja modelleeritakse tehases vastavalt projekti jaoks vajalikele nõuetele. Tehases pannakse lubjakivi plokkid lõikemasinasse, mis lõikab tükikivi vajaliku paksuseni. Selle tulemuseks saadakse mitmesugused kiviplaadid. Seejärel lähevad tükikivid poleerimismasinasse, mis kasutab hõõrdumist soovitud viimistluse saamiseks ning võrreldakse, kaalutakse ja digitaliseeritakse plaadid, et veenduda soovitud tonnažis. Vajadusel modelleeritakse pae plokkid vastavalt tellimusele keerukamatesse vormingutesse (Solancis, 2021).

1.2. Tükikivi lõpp-produktid

Tükikivi lõpp-produkte on Eestis näha pea igal pool. Ajaloos on pae plokkide kasutatud näiteks kirikute portaalide, hauaristide, linnamüüri, hauaplaatide või trepiastmete valmistamisel (Perens, 2003). Tänapäeval on tükikivi kasutusel struktuuri materjalina ning dekoratsioonide ja monumentidena. Samuti on see kasutusel aknalaudade, viimistlus- ja kaunistustöödel ning seinte sisekujunduses ja põrandakattena. Plokkide kasutatakse ka mälestusmärkide või nikerdatud dekoratiivsete objektide valmistamisel. Ehituskivi hulka kuuluvat viimistluskiivi toodetakse kõikidest paelikidest, seda iseloomustab dekoratiivne pealispind ja hea töödeldavus. Siseviimistlusplaatide jaoks kasutatakse väga tihti Lasnamäe lademe Vao kihistu ehituslubjakivi. Eestis loetakse parimateks viimistluskiivideks Siluri ajastu dolomiidistunud paekivid ning Vasalemma „marmorit“ (Perens, 2003) (Kerner, 1961).

Väokivi OÜ toodetud tükikivi lõpp-produktideks on plaadid, aknalauad, trepiastmed, müürikivid ja eridetailid. Orgita dolomiiditooted OÜ keskenduvad oma tootmises rohkem ehitusmaterjalidele, mille alla lähevad samuti trepid, aga ka näiteks laminaat ja fassaadid.

Tükikivi on Eesti ehitistes kasutatud näiteks Kaarli kiriku välismüüritis (Joonis 1) ja ka Rahvaraamatukogu fassaadis (Joonis 2).



Joonis 1: Tallinna Kaarli kirik.



Joonis 2: Tallinna Rahvaraamatukogu.

2. Geoloogia

2.1. Paekivi

Paekivi on lubjakivi, mergli ja dolomiidi üldnimetus. Nende teke algas Eestis ligikaudu 472 miljoni aasta eest Ordoviitsiumi ajastu Paleobalti meres ning jätkus 419 miljoni aasta taguseni Siluri ajastul.

Lubjakivi, keemilise valemiga CaCO_3 , on settekivim, tihe, peitkristalliline või teraline enamasti hele karbonaatne settekivim, mille peamiseks koostisosaks on kaltsiit ning on kõige paremini säilinud algse struktuuriga paekivi Eestis (Kaasik, 2020). Lubjakivi peamiseks lisanditeks on mitmesugused savimineraalid ja kvarts, mille sisaldus kvaliteetses ehituskivimis ei tohi ületada 25 %.

Dolomiit, keemilise valemiga $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, on enamasti tekkinud dolomiidistumisel ehk protsessi käigus, kus lubjakivi muutub kas osaliselt või täielikult dolomiidiks. Dolokivi on lubjakivist tugevam, suurema tihedusega ja terviklikum, sest temas puuduvad lubjakivile omased savikad vahekihid. Dolomiidistumise puhul põhjustab Ca asendumine Mg-ga karbonaatses komponendis kivimi mahu vähenemise. Samuti maskeerivad või koguni kaotavad asendusreaktsioonid lubjakivi algse kihilisuse. Teralised plaatjad lubjakivid muutuvad dolomiidistumise käigus poorseteks dolomiitideks (Perens, 2004) (Reinsalu, 2011).

Vastavalt kasutusale liigitatakse lubja- ja dolokivid tsemendilubjakiviks, tehnoloogiliseks lubjakiviks, ehituslubjakiviks, tehnoloogiliseks dolokiviks, viimistlusdolokiviks, ehitusdolokiviks ja täitedolokiviks (Bauert & Perens, 2012). Paekivi üldlevinud tekstuuriline tunnus on kihilisus, mis avaldub litoloogiliste omaduste vertikaalses muutumises. Kivimi tekstuuri määrab selle komponentide orientatsioon ja paiknevus ruumis. Ehituseks sobiva paekivi tekstuur on kas plaatjas või kergelt laineline ning peamiselt paksukihiline või massiivne. Ehituspae seisukohalt on primaarne ehk esmase tekkega dolomiit, mida esineb harva, äärmiselt oluline kivim (Perens, 2004).

2.2. Geoloogiline taust

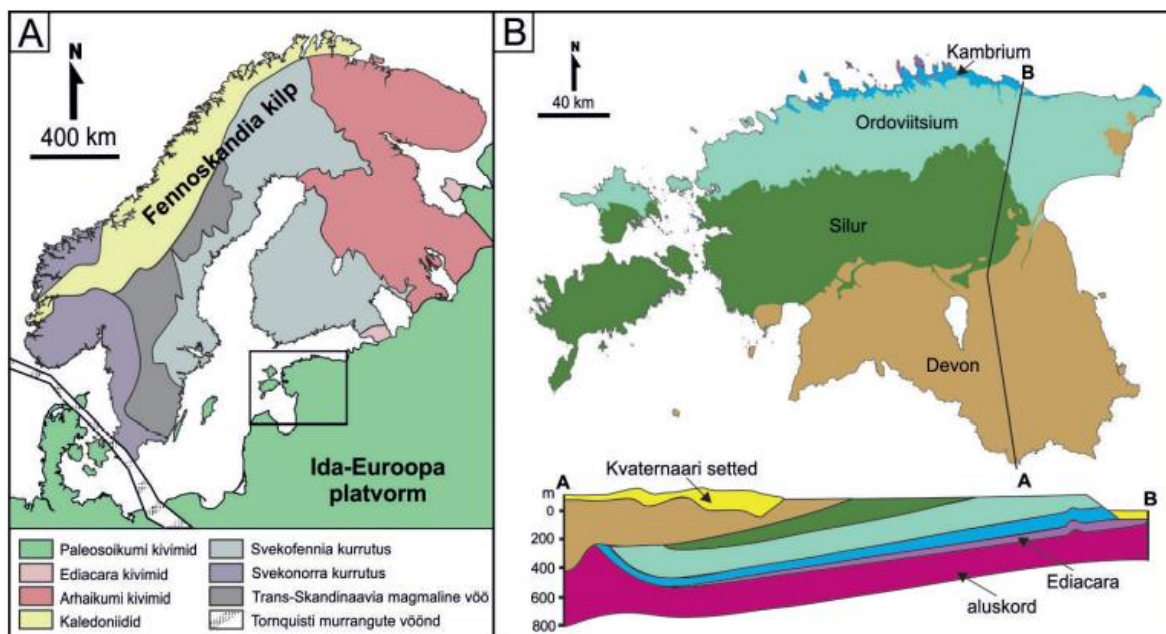
Eesti asub Ida-Euroopa platvormi Balti kilbi lõunanõlval ning külgneb vahetult Skandinaavia ja Soome ala hõlmava kristalsetest kivimitest moodustunud Eelkambriumi vanusega Fennoskandia kilbiga (Joonis 3). Seetõttu avanevad erineva vanusega settekivimid enamasti lääne-idasuunaliste vöönditena, mis tähendab, et vanemad kivimid on põhja pool ning nooremad lõuna pool. Eesti paeläbilõige on mitmekesine, mis on tingitud miljonite aastate tagustest settimistingimustest (Tamm, 2020) (Raukas & Teedumäe, 1977).

Paekivi mitmekesisus on seotud kunagise settebasseini sügavusega ja selle pideva muutumisega. Maailmamere kliimamuutused, tsüklilised kõikumised ja regionaalsed tektoonilised liikumise põhjustasid minevikus sagedasi mere transgressioone, mistõttu meri nihkus maismaa suunas, ja regressioone, mille tagajärjel meri taganes maismaalt mere suunas. See tingis settevööndite pideva rände, mida on näha ka kivimis ehk kõvastunud settes. Jääaja-eelsete setete all levivad Eesti alal mäetekkeprotsessidest mõjutamata alam-Paleosoikumi settekivimid. Eesti geoloogilise läbilõike saab jagada kahte kivimikompleksi: tugevasti kurrutatud Proterosoikumi tard- ja moondekivimitest koosnev aluskord ning sellel lasuvad rõhtsa lasumusega Ediacara ja Paleosoikumi settekivimid. Settekivimitel lasub ka pinnakate, mis koosneb kobedatest ja veel kõvastumata Kvaternaari ajastu setetest. Geoloogilise lõike pealiskorraks loetaksegi Paleosoikumi settekivimeid ja nendel lasuvaid Kvaternaari setteid. Eestis aluskord ei paljandu (Bauert H. , 2018).

Ediacara (635 – 541 Ma), Kambriumi (541 – 485 Ma), Ordoviitsiumi (488 – 443 Ma), Siluri (443 – 419 Ma) ja Devoni (419 – 358 Ma) ajastul moodustunud settekivimite minimaalne paksus Põhja-Eestis on 100 – 200 m ning Edela-Eestis üle 700 meetri. Eesti pealiskorra kivimitega seotud maavarad on enamjaolt tekkinud Vara-Paleosoikumi eal ning paekivi on moodustunud karbonaatsetest Ordoviitsiumi-Siluri setetest. Geoloogiliste uuringute tulemusena on ehitusmaavarad keskkonnaregistri maardlate nimistus arvele võetud (Bauert H. , 2018) (Perens, 2003).

Ordoviitsiumi ladestu ja Siluri ladestu koosnevad põhiliselt lubjakividest, dolomiitidest, merglitest ja domeriitidest. Väikseid paelaie avaneb ka Devoni ladestu noorematel kihtidel (Perens, 2003). Ordoviitsiumi ja Siluri ladestutes leiduvat ehituseks sobivat paekivi avaneb pea kõikjal Põhja-, Lääne- ja Kesk-Eestis. Ordoviitsiumi kivimite kogupaksus Eestis võib ulatuda kuni 180 meetrini, Siluri kivimite paksus võib üle kahe korra suurem olla. Murda saab aluspõhja kivimeid avamusel ehk seal, kus neile ligi pääseb. Avamused on üldjoontes vaid mõne kuni mõnekümne kilomeetri laiused, mistõttu on moodustub kaevandamisväärne kivi vaid väikese osa maapõues eksisteerivast paekivist (Bauert & Perens, 2012) (Reinsalu, 2011) (Bauert H. , 2018).

Harjumaal kaevandatakse põhiliselt Aseri, Lasnamäe, Uhaku, Keila ning Nabala lademe kivimeid ning kihistutest Vao, Kandle, Loobu, Kõrgekalda ja Vasalemma lubjakivi. Raplamaa põhjaosas on olulisemateks ehitusmaavaradeks Nabala lademe Paekna ja Saunja kihistu lubjakivid, mis avalduvad Sutlema ja Nabala maardlas, ning kesk- ja lõunaosas Juuru lademe Tamsalu ja Varbola kihistu kivimid ning Raikküla lademe Raikküla kihistu kivimid. Pärnumaal on ehitusmaavaradena kasutusele võetud vaid dolokivimaardlad, mis paiknevad Siluri ladestu Jaagarahu lademe Muhu kihistu avamusaladel (Bauert H. , 2018) (Kaasik, 2020) (Tamm, 2020).



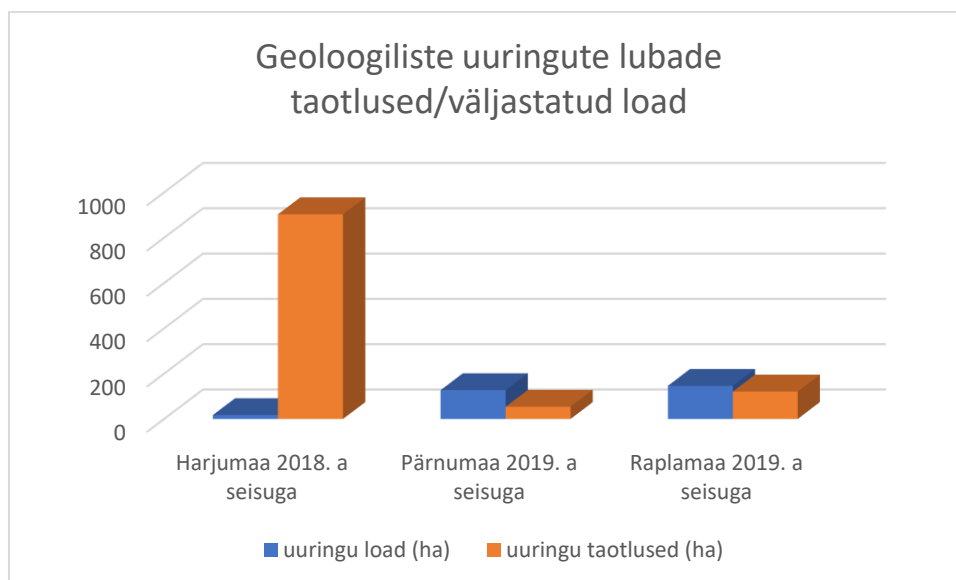
Joonis 3: Ajastute põhine kaart (Bauert H. , 2018).

2.3. Ehitusmaavarade levik

Eestis on kohalikud ehitusmaavarad põhiliselt kasutusel toormena ehitusmaterjalide tootmisel või täitematerjalina ehitustöödel ja teedehituses. Ajavahemikuks 2011-2020 tehtud prognoosi näitas, et ehitusmaavarade aastane vajadus on tõenäoliselt 6-8 mln m³, millest 50-60 % läheb

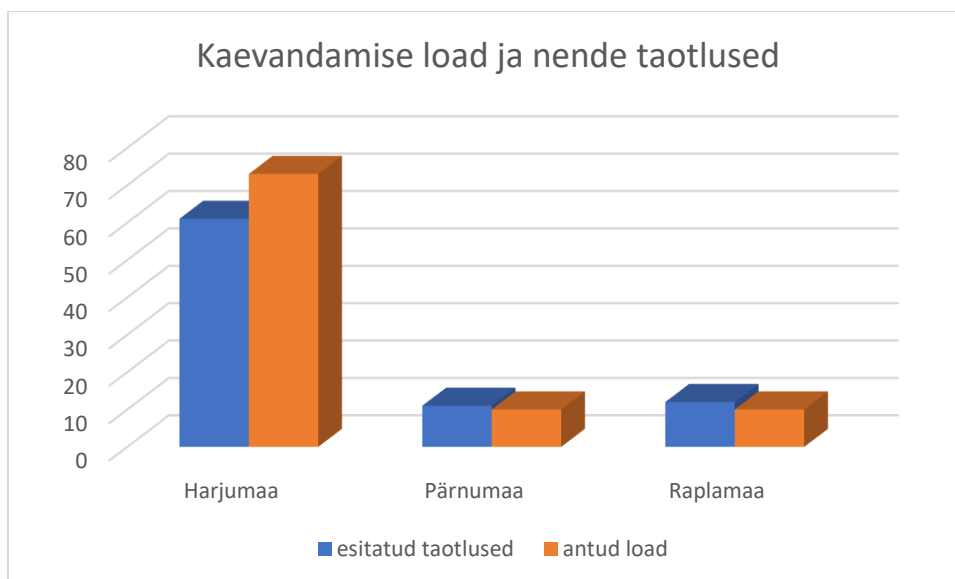
riigimaanteede ehituseks, remondiks või hoolduseks, 20 % kohalike teede hoolduseks ning ülejäänud 25-30 % on kasutusel ehitusmaterjalide tööstuses. Harjumaal on ehitusmaavarad kasutuselade järgi jaotatud vastavalt: lubjakivi – ehitus- ja viimistluskiivi, Pärnumaal: dolokivi – ehitus- ja viimistlusdolokivi ning Raplamaal jaotatakse ehitusmaavarad samamoodi nagu Harjumaal ja Pärnumaal kokku (Bauert H. , 2018) (Kaasik, 2020) (Tamm, 2020).

Harjumaal ulatuslikult leviv paekivi ei ole alati kasutatav ehitusmaavarana, sest ehitusmaavaradele on ette nähtud kindlad nõuded selleks, et need maardlate nimistusse arvele võetaks. Selleks, et maardla ehitusmaavarana arvele võetaks, on vaja läbi viia geoloogiline uuring, mille jaoks on vaja luba taotleda. Viimastel aastatel on Harjumaal kaevandamiseks antud lubade arv, mille annab välja Keskkonnaamet, vähenenud. Harjumaal on ehituslubjakivi uuringuks väljastatud ainult seitse luba, kuigi ainuüksi 2017. aastal võeti menetluse 13 taotlust ja 2018. aastal 12 taotlust. Kokku on 2018. aasta seisuga menetlusel 19 lubjakivi taotlust. 2018. aasta seisuga on Keskkonnaametile esitatud 903,67 hektari ulatuses geoloogilise uuringu taotlusi, geoloogilise uuringu lubasid on väljastatud vaid 17,22 hektari ulatuses. 2019. aasta seisuga on Pärnumaal väljastatud uuringu lube 127,2 hektari ning Raplamaal 146,43 hektari ulatuses ning lubade taotlusi on Pärnumaal 53,9 hektari ning Raplamaal 121,05 hektari ulatuses (Joonis 4) (Bauert H. , 2018) (Kaasik, 2020) (Tamm, 2020).



Joonis 4: Geoloogiliste uuringulubade väljastamine maakondade lõikes 2010 - 2018(2019) aastatel.

Vahemikus 2010 – 2018 a. esitati Harjumaal paekivi kaevandamiseks 61 taotlust ning lube väljastati 73. Lubade väljastamisel jälgitakse erinevaid faktoreid, mistõttu Harjumaal ulatuslikult leviv paekivi ei ole alati kasutatav maavarana, sest igal pool ei vasta kivimi omadused õigusaktides esitatud nõuetele. Ühtlasi jälgitakse ka seda, kas kivimi kaevandamine antud kohas on majanduslikult tasuv. Vahemikus 2010 – 2019. esitati Pärnumaal paekivi kaevandamiseks 11 ja Raplamaal 12 taotlust, ent lube väljastati mõlemas maakonnas vaid 10. Kokku esitati kolme maakonna peale taotlus kaevandada ligikaudu 24 081,8 tuh m³ lubja- ja dolokivi (Bauert H. , 2018) (Kaasik, 2020) (Tamm, 2020) (Joonis 5).

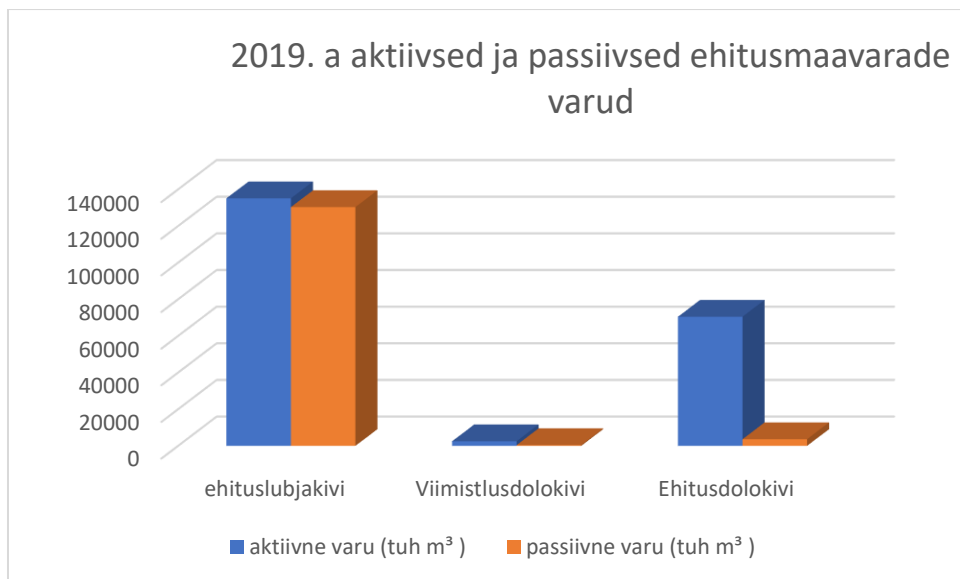


Joonis 5: Kaevandamislubade väljastamine maakondades vahemikus 2010 – 2019 (2018).

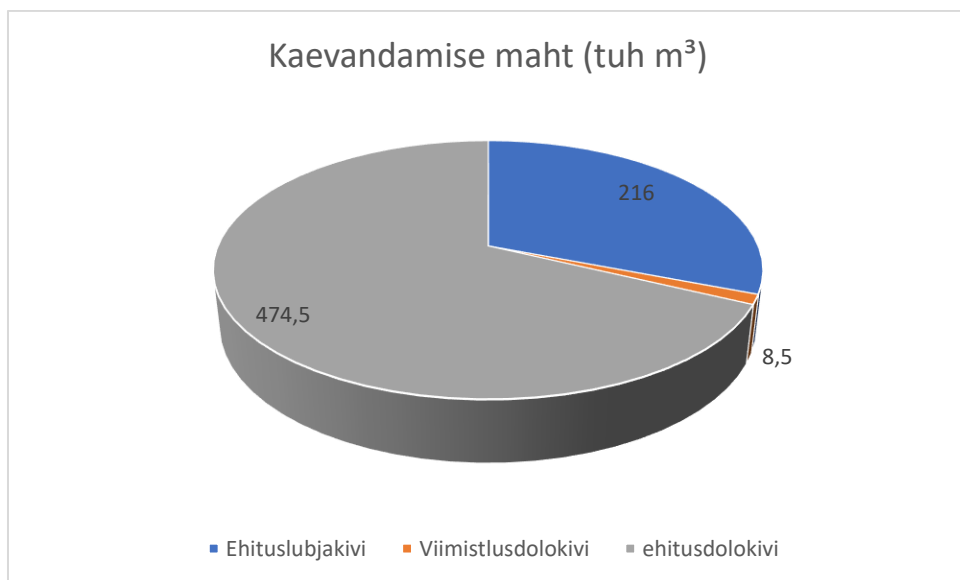
2.4. Koondbilanss

2019. aasta lõpu seisuga on keskkonnaregistri maardlate nimistus kokku arvele võetud 936 maardlat, millest 59-l maardlal on põhimaavaraks lubjakivi ning 36-l maardlal dolokivi. Eestis kaevandati 2019. aastal ühest maardlast 418,2 tuh m³ tsemendilubjakivi, neljast maardlast 137,5 tuh m³ tehnoloogilist lubjakivi, 18 maardlast 1786,3 tuh m³ ehituslubjakivi ning neljast maardlast 8,5 tuh m³ viimistlusdolokivi, kümnest maardlast 690,5 tuh m³ ehitusdolokivi, ühest maardlast 93,6 tuh m³ tehnoloogilist dolokivi ja ühest maardlast 9,1 tuh m³. Et suured mahud maavaradest läheb teedehituse, siis on Eesti pealiskorra kivimite varud varsti ammendumas. 2019. aasta seisuga on Eestis ehituslubjakivi aktiivset varu vastavalt 2005. a uuringuviisile 135 136,9 tuh m³, viimistlusdolokivi aktiivset varu 2524,2 tuh m³ ning ehitusdolokivi aktiivset varu 70 486,8 tuh m³. Selles lõputöös on keskendumine 2005. a uuringuviisiga, mitte 2018. a uuringuviisiga koondbilansil, sest 2019. aasta koondbilanssi aruandes välja tulles ei olnud uuema uuringuviisiga lubja- ja dolokivi varudele kaevandamisluba (Joonis 6).

Harjumaa karjääridest on kõige suurema varuga Vasalemma karjäär, mille ammendumise perioodiks on prognoositud 147 aastat, tükikivi tootva Väo karjääri ammendumise perioodiks on prognoositud 28 aastat. Pärnumaa karjääridest on kõige pikema ammendumise prognoositava perioodiga Tarva dolokivikarjäär, mis peaks ammendumas 62 aasta pärast. Raplamaa karjääridest on suurima varuga Sutlema II lubjakivikarjäär, mille ammendumise perioodiks on prognoositud 161 aastat, tükikivi kaevandava Orgita V dolokivikarjääri ammendumise perioodiks on prognoositud 127 aastat. 2019. aastal kaevandati ehituslubjakivi 216 tuh m³, viimistlusdolokivi 8,5 tuh m³ ning ehitusdolokivi 474,5 tuh m³ (Joonis 7) (Bauert H. , 2018) (Maa-amet, 2019) (Tamm, 2020) (Kaasik, 2020).



Joonis 6: Ehitusmaavarade aktiivsed ja passiivsed varud 2019. a seisuga.



Joonis 7: Ehitusmaavarade kaevandamise mahud 2019. a seisuga.

3. Tükikivi tootmise tehnoloogiad

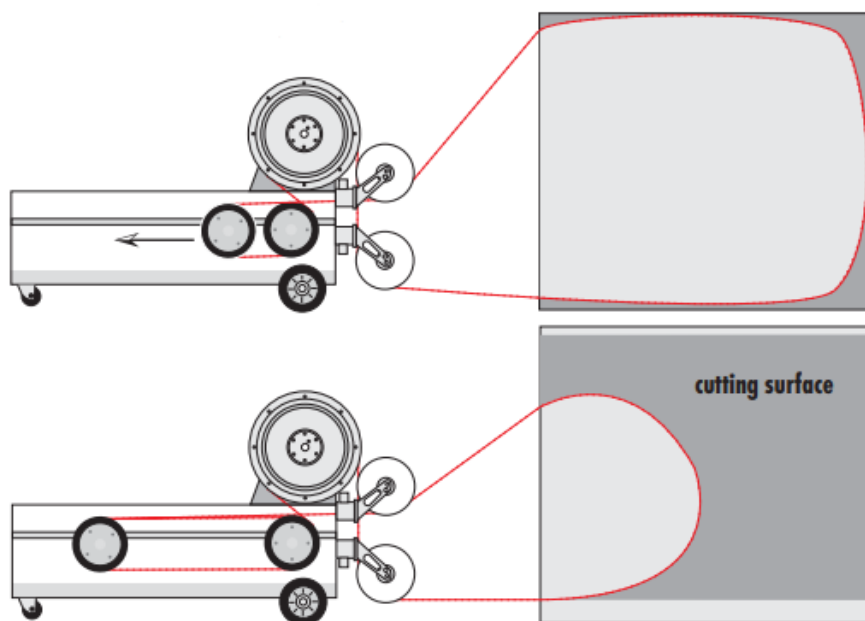
Kiviraiumine on kivi töötlemine viisil, mille tulemusena muutub kas kivi kuju või pinnastruktuur. Kiviraiumise erinevaid protsesse on läbi ajaloo teostatud käsitsi. Tänapäeval toimub paekivi tootmine täielikult diisli ja elektriga töötavate masinatega. Need on asendanud tööd, mis kunagi tehti manuaalselt (Becker & Kennard, 1937) (Nõmmela & Rudanovski, 2012).

3.1. Tross-saega saagimine

Tross-saega saagimise tehnoloogia on laialdaselt kasutusele võetud rabedate ja kõvade materjalide väljamisel, milleks on näiteks graniit ja paekivi. Selle tehnoloogia eeliseks on kaks kuni kolm korda suurem tootlikkus ning sellega saab väljata korraga suuri paekivi plokkke (Wu, 2016). Tänapäeval on tross-saega saagimisel peaaegu piiramatud võimalused, sest tänu kaasaegsele tross-sae tehnoloogiale pole varem kõrge keerukusega kivimi lõikamine enam probleemiks. Pöörlevaid ja traatjuht rulle kasutades saab tross-saega lõigata ka raskesti ligipääsetavates kohtades ja kitsastes kohtades (CEDIMA, 2020).

Tross-sae lõikeorganiks on liikuv tross, millele on kas kinnitatud teemantsegust silindrid või siis puistatakse kivimi väljamisel trossi ja kivi vahele abrasiivmaterjali. Tross-saega kivimi väljamise jaoks puuritakse esmalt vertikaalne ja horisontaalne puurauk, millest tõmmatakse tross läbi (Joonis 8) (Joonis 9). Tross on keritud juhikute ümber, moodustades paralleelsete trosside võrgu. Seejärel kulutab trossil olev abrasiivne materjal kivimi ära, saagides selle seejärel kihtideks (Bidiville, Wasmer, Meer, & Ballif, 2014).

Meetodi positiivseks küljeks on võimalus selekteerida sobilikke plokkke ja lõigata massiivseid plokkke, ühtlasi saab lõikamisprotsessis suure osa automatiseerida. Miinusteks on aga rohke vee- ja energiakulu, mis on vajalik trossi jahutamiseks ja ülekuumenemise vältimiseks. Puuduseks on trossi kiire kulumine ning see, et saagimise tulemusena saadud kihid ei eraldu.



Joonis 8: Tross-saega saagimine (CEDIMA, 2020)



Joonis 9: Tross-saega saagimine karjääris (Autor: E. Tomberg,, 1999).

3.2. Ketassaega saagimine

Ketassaage on tööstuses laialdaselt rakendatud saagimisel, lõikamisel ning betooni ja plaatide lihvimisel (Joonis 10). Seda tehnoloogiat eelistatakse, sest saag lõikab kiiresti, on paindlik ja ökonoomne ning sellega saab parema täpsusega lõigata kui teiste tehnoloogiatega. Ekskavaatori noole külge kinnitatud ümmarguse teemantsae lõiketera koosneb kahest põhikomponendist: teemantsegmentist ja terasest südamikust. Komposiitmaterjalist teemantsegment koosneb teemantosakestest läbimõõduga 150-1000 µm, mis on hajutatud metallist sideaine sisse. Metallist sideaine koosneb üldjuhul koobaltist, pronksist, niklist ja tinast. Et teemandiosakesed metalliga ühtlaselt segada, kasutavad tootjad raputeid, mis tagavad pikema aja vältel osakeste ühtlase jaotumise (Ersoy & Atici, 2004). Ketassaega saagimisel kihid ei eraldu ning töötlussügavus on ühe kuni kahe kihilise sügavusest erinevalt näiteks tross-saega saagimisest. Lisaks paekivile kasutatakse ketassaage ka graniidi lõikamiseks.

Suure diameetriga ketassaagidega on saavutatud suurepärane tootlikkus minimaalsete kuludega, võrreldes teiste tükikivi tootmise valdkonnas kasutatavate masinatega. Lisaks on suure diameetriga saagide poolt toodetud kivitahvlid siledapinnalised ega vaja edasist vormimist. Masina valimise protseduuri ja masina jõudlust mõjutavateks teguriteks on kivi füüsikalised ja mehaanilised omadused, masina omadused, läbitungimiskiirus ja tööriista kulu (Tumac, 2015). Saagitavust mõjutavad ka üheteljeline survetugevus, tõmbetugevus, Schmidti haamri väärtus, punktkoormuse tugevus, löögitugevus, LA tegur, saagimise kiirus, masina omadused, ketta tüüp ja läbimõõt, sae pöörlemiskiirus, teemandi ja maatriksi omadused, lõikamise sügavus, masina spetsifikatsioonid, loodusliku kivi füüsikalised ja mehaanilised omadused, kivimi mineraloogilised ja petrograafilised omadused, masina operatori oskused ning sae jahutamise kiirus (Tutmez, Kahraman, & Gunaydin, 2006) (Engin, Bayram, & Yasitli, 2012) (Tumac, 2015). Sae pidev jahutamine on vajalik ketassae ülekuumenemise vältimiseks, mistõttu selle tehnoloogiaga kaasneb lisaks suurele energiakulule ka suur veekulu.

Eesti karjääridest kasutavad ketassaaga kivimi saagimist näiteks Põhjakivi OÜ, Spark & Stone Concept OÜ, Saare Dolomiit - Väokivi OÜ ning Orgita dolomiiditooted OÜ. Väo karjääris saetakse suure ketassaaga kihid eraldi lahti ning eraldatakse need hiljem käsitsi kiiludes ja kraanaga tõstes massiivist. Põhjakivi OÜ ja Orgita Dolomiiditooted OÜ kasutavad ketassaagi kivimi väljamisele järgnevas protsessis ehk sellega saetakse massiivsed kivimi plokid transpordiks sobivateks väiksemateks tükideks. Ketassaage kasutatakse välismaal näiteks New Hampshire'i graniidikarjääris.



Joonis 10: Ketassaaga kivimi saagimine karjääris (Autor: E. Tomberg, 1999).

3.3. Vesilõikus

Ketassaaga saagimise alternatiiviks on katsetatud ka vesilõikumist, mille kohta on välismaal tehtud mitmeid uuringuid. Veejoaga kivimi saagimine võib küll üldist tööefektiivsust ja prognoositavust lihtsustada ning parandada, ent see kahjustab kivimit rohkem, mistõttu kvaliteetse tükikivi tootmiseks pole see kõige parem valik. Ketassaaga saagimisel on madalamate spetsiifiliste energiaväärtuste tõttu rohkem eeliseid kui veejoaga saagimisel ehk veejoaga saagimist tasuks kasutada pigem dekoratiivseks lõikamiseks mitte plokkide lõikamiseks (Engin, Bayram, & Yasitli, 2012). Vesijoaga kivimi lõikamist kasutatakse näiteks Põhja-Carolina graniidi ettevõtte karjääris (GraniteCorp, 2013). Eestis seda tehnoloogiat ei kasutata.

3.4. Soonuritega kivimi saagimine

Soonimine tähendab kivimisse vertikaalsete soonte lõikamist soonuriga. Soonur võib töötada elektrimootori, suruõhu, bensiinimootori, diisli või hüdraulilise süütevõimendi jõul.

Soonur on kaasaskantav mootorsaag, mille lõikeorganiks on ketas-saag, mille ümber olev peene sakilise lüluga kett on omavahel ühendatud. Enim kasutatakse soonuri lõiketeradena kiilutüüpi lõikeorganeid. Keti lõiketerad on paekivi lõikamise jaoks üldiselt teemandisegmentidega, varasemalt kasutati karbiidist lõiketerasid (Dagrain & Marchandise, 2013) (Merriam-Webster, 1828).

Soonuri lõiketerad asetsevad trossil tavaliselt sümmeetriliselt, et vältida lõikeorgani ebaühtlast kulumist, mis võib tekitada masina kõrvalekaldumisi kavandatud lõikejoonest. Kui lõikeorgan on saavutanud teatava kulumisastme, siis pööratakse kogu tööriista samaaegselt, et saagida teravama poolega (Copur, 2010).

Soonurmasinatega kivimi saagimine on kiire, sellega kaasneb minimaalne materjalikadu, saetud plokid on kohe valmis müügiks ning see tehnoloogia tekitab vähem jäätmeid. Soonimisega kaasnevateks keskkonnamõjudeks on müra ja vibratsioon. Kiviosakesi ja tolmu selle tehnoloogiaga atmosfääri ei paisku, sest soonimisprotsessi ajal juhitakse lõikurile pidevalt vett.

3.5. Kiiludega murdmine

Kivimite löökmurdmine kiilukujulise tööriista abil on tööstuses laialdaselt kasutusel. Kivi murdmiseks kiiludega tuleb kivimisse puurida kiiluaugud, mis varasemalt raiuti kivimisse käsitsi, ent tänapäeval kasutatakse selleks spetsiaalseid kivipuure. Pehmematesse kivimitesse saab kiiluauke puurida tavalise pöörleva puuri abil, suurema tihedusega kivimite jaoks peab kasutama kas elektrilist puurvasarat või löökperforaatorit (Joonis 11) (Nõmmela & Rudanovski, 2012).

Puuritavate aukude tihedus sõltub kivi lõhenevusest ning vajalikust lõhenemise täpsusest, tuleb ka arvestada, et kivi lõhenevus ei ole igas suunas ühesugune. Pikuti kivi lõhestamisel puuritakse kiiluaugud tihedalt ja pikemalt, et nõrgendada kivi sidusust ja veenduda, et kivi lõheneb piki vajalikku soont. Kiilude ja kiilupõskede kuju valitakse vastavalt kiiluaukudele. Kui augud on karpja kujuga, siis valitakse lapikud kiilud ning kiilupõsed on kas plekist või pehmema kivi korral neid mõnikord ei kasutatagi. Lapikkiilusid kasutatakse juhul, kui murdepinna täpsus ei ole oluline ning kui lühikestest kiiluaukudest piisab (Nõmmela & Rudanovski, 2012). Kiiludega murdmise tehnoloogia on hea mehhaniseerituse tasemega, millega on mikropragude tekkimise võimalus minimaalne. Tehnoloogia puuduseks on suhteliselt väikene väljamissügavus, mis piirdub ühe kuni kahe kivimikihiga. Tööprotsess nõuab ka mitme masina kasutust samas ees.



Joonis 11: Näide käsitsi kiiludega murdmisest (Nõmmela & Rudanovski, 2012).

Kiiludega murdmisel tuleb arvesse võtta kivimi tugevust, mis jaotatakse üldjuhul kolme gruppi: kõva materjal, keskmine materjal ja pehme materjal. Pehmem kivi põhjustab murdmise korral

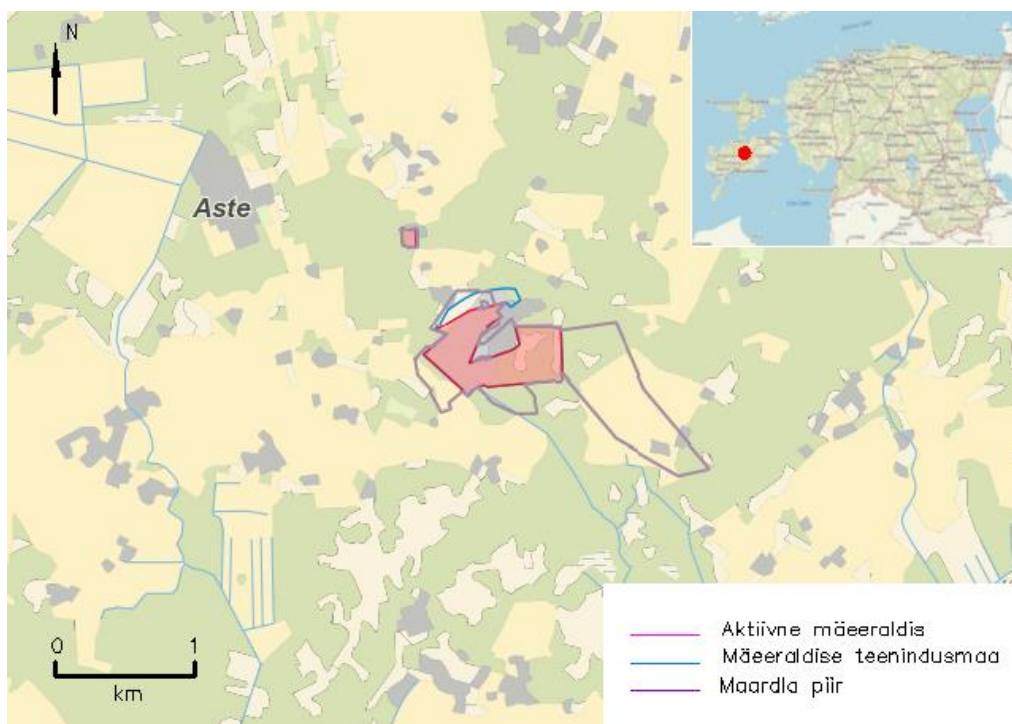
suurema horisontaalse hajumispinge, mis põhjustab omakorda laiema akustilise emissiooni kogunenud ala kiilu all ja vertikaalse nihkejaotuse teravam muutuse. Kiiludega murdmiseks minev maksimaalne jõud sõltub peamiselt kivimi omadustest ja kiilude asetamise nurga nihkest. Ehk mida suurem on nurga nihe, seda suurem on jõukulu. Samuti põhjustab nurga suurenemine kivimile asümmeetrilisema purunemismustri (Zhang, Ji, Liu, Zhang, & Peng, 2017).

Tänapäeval kasutatakse ka hüdrauliliste kiiludega murdmist, mis Eestis on kasutusel Kaarma karjääris Saaremaal (Joonis 12) (Joonis 13). Hüdrauliliste kiiludega murdmise süsteem koosneb pumbaga juhtimissüsteemist ja hüdraulilisest murdmisest. Töö põhimõte seisneb selles, et hüdrauliline süsteem tekitab kivimile pinget, millele järgneb kivimi lõhestamiseks mehaaniliste kiiludega lisasurve avaldamine (Shijun, Desheng, Zhili, Qiwen, & Bin, 2010).

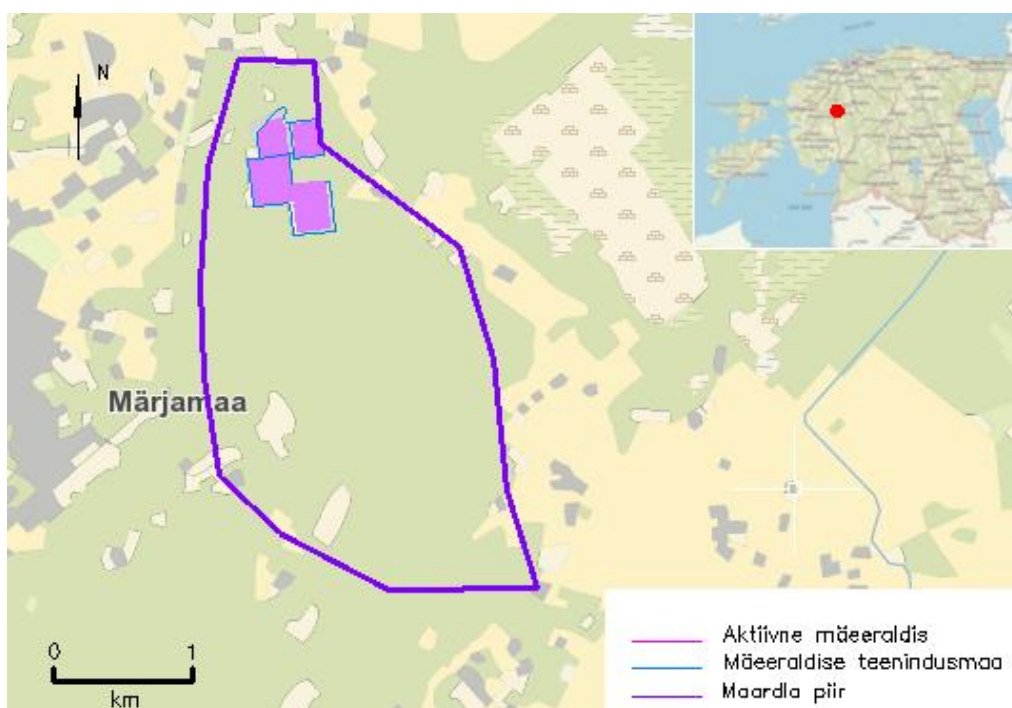
Orgita karjääris kasutatakse koos kiiludega murdmisega ka ekskavaatoriga kihiti murdmist (Joonis 14).



Joonis 12: Hüdrauliline kiil (Autor: Direct Industry, 2021)



Joonis 13: Kaarma dolomiidikarjääri asukoht ja mäeeraldis.



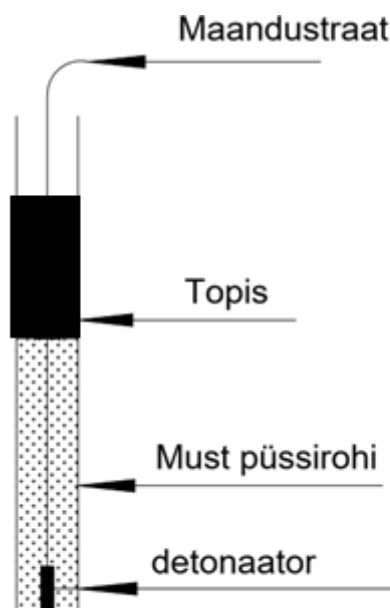
Joonis 14: Orgita dolomiidikarjääride asukoht ja mäeeraldis.

3.6. Puur-lõhketöödega tükikivi tootmine

Puur-lõhketööd on lõhkeainete kontrollitud kasutamine kivimi murdmiseks kaevetöodel. Puur-lõhketööl kasutatakse erinevaid lõhkeaineid, millel on erinevad koostised ja omadused. Lõhkeaine on plahvatusohtlik ning reaktiivne aine, mis sisaldab suures koguses potentsiaalset energiat, mis ootamatu eraldumise korral võib põhjustada plahvatuse, millega üldjuhul kaasneb ka soojust, heli, rõhu ning valguse tekkimine. Selline potentsiaalne energia võib olla näiteks keemiline

energia või survestatud gaas. Lõhkeaineid võib liigitada ka segu paisumiskiiruse järgi – plahvatavad materjalid, mis on väidetavalt tugevad lõhkeained, ning põlevad materjalid, mis on vastavalt nõrgad lõhkeained. Lõhkeaineid saab liigitada ka nende tundlikkuse põhjal – tundlikud materjalid, mis reageerivad suhteliselt väikese koguse kuumuse või rõhuga, on primaarsed lõhkeained ning raskemalt reageerivad lõhkeained on tertsiaarsed. Suurema brisantsusega lõhkeained on sobilikud suhteliselt kõva kivimi purustamiseks ning väiksema kiirusega lõhkeained on kasutusel pehmemates kivimites suurema gaasirõhu ja heite efekti tekitamiseks (Krehl, 2008) (Sigurdsson, 2017).

Varasemalt on üheks puur-lõhketöödega tükikivi tootmise tehnoloogiaks olnud musta püssirohu laengutega lõhkamine, mis oli kivimi murdmiseks kasutusel kuni 70-ndateni. Lõhkamiseks puuriti piki lõhatava ploki kontuuri rida lõhkeauke, mis laeti musta püssirohuga, mis oli kooslus kaaliumnitraadist, väävlis ja puusöest. Puurauku asetati seejärel initsieerimise vahend ja seejärel topis, kasutati kas elektrilist või mitte-elektrilist detonaatorit (Joonis 15). Must püssirohi on ülimalt tundlik leegi ja sädeme suhtes, mistõttu oli sellega lõhkamisel vajalik kasutada täiendavaid ohutusmeetmeid, milleks olid näiteks maandustraata staatilise elektrilaengu maandamiseks ja sädet tekitavate materjalide kasutamise keeld. Laengud lõhati üheaegselt (Tomberg & Veersalu, 2017) (Sigurdsson, 2017). Meetodi eeliseks on selle lihtsus ja vähene ajakulu, ent sellega kaasneb võimalus mikropragude tekkeks lõhatud plokis ja plokitaguses massiivis. Must püssirohi omab vahetus kontaktis lõhatava kivimiga teatavat brisantsust, mistõttu kasutati Tallinna paemurdudes suurendatud söesisaldusega püssirohtu, kus söesisaldus võis küündida kuni 50 protsendini. Musta püssirohuga lõhkamine on võimalik vaid kuivades lõhkeaukudes (Tomberg & Tomberg, 2003).



Joonis 15: Lõhkeauguskeem musta püssirohtu kasutades.

Musta püssirohuga tükikivi lõhkamise kõrval on pae väljamiseks kasutatud ka detoneeriva nõoriga väljamist ja hüdrolohkamist. Hüdraulilise löögi toimel kivimi väljamise tehniline põhimõte on järgmine. Esiteks puuritakse kivimisse auk, kuhu süstitakse veekindlat lõhkeainet. Seejärel lisatakse augu sulgemiseks piisavalt madalal rõhul vesi, et vältida pragude tekkimist. Selleks, et detoneeriv nõor ei puutuks kokku puuraugu seinaga, võib laengu ümber keerata näiteks mõned

alumiiniumtraadist keerud. Seejärel ühendatakse laengud omavahel lõhkenõoriga ning pannakse detonaatoriga lõhkema. Plahvatuse tagajärjel tekkinud vee lööklained ja mullide pulseerimised põhjustavad auku ümbritsevas kivimi seinas suurt rõhku. Kui lõhkeauku ümbritsevale kivimi seinalle avalduv pinge ületab selle dünaamilise kriitilise purunemistugevuse, puruneb ümbritsev kivim ning kivi mõraneb. Seda tehnoloogiat katsetati Eestis Ülemistel ja kasutati elektridetonaatorit (Tomberg & Tomberg, 2003) (Huang, Liu, Fu, & Guan, 2011).

Puur-lõhketöödega kaasnevad mitmed soovimatud keskkonnamõjud nagu maapinna vibratsioon, õhu ülerõhk ja kivimikildude laialipaiskumine karjääri läheduses olevas keskkonnas. Need keskkonnamõjud võivad kahjustada inimesi, läheduses asuvaid struktuure, põhjavett ja ökoloogiat. Liigne juhuslik kivimikildude viskumine plahvatuse ohualast kaugemale võib tekkida ebatäpsete puurimiste, ülekoormatud laenguaukude ja ebasoodsate geoloogiliste tingimuste tõttu. (Huang, Liu, Fu, & Guan, 2011) (Armaghani, Hajihassani, Mohamad, Marto, & Moghaddam, 2015).

Eestis on puur-lõhketöödega kivimi murdmisel üheks tegutsevaks ettevõtteks AS YIT Eesti lõhketööde üksus. Nad kasutavad lõhkamisel mitte-elektrilist lõhkamise süsteemi, millega on võimalik laenguauke lõhata viivitusega, mis tagab väiksema seismiliste lainete ebasoodsa ümbritsevale keskkonnale. Nende tööobjektideks on olnud näiteks Väo karjäär ja Maardu paekarjäär (YIT, 2021).

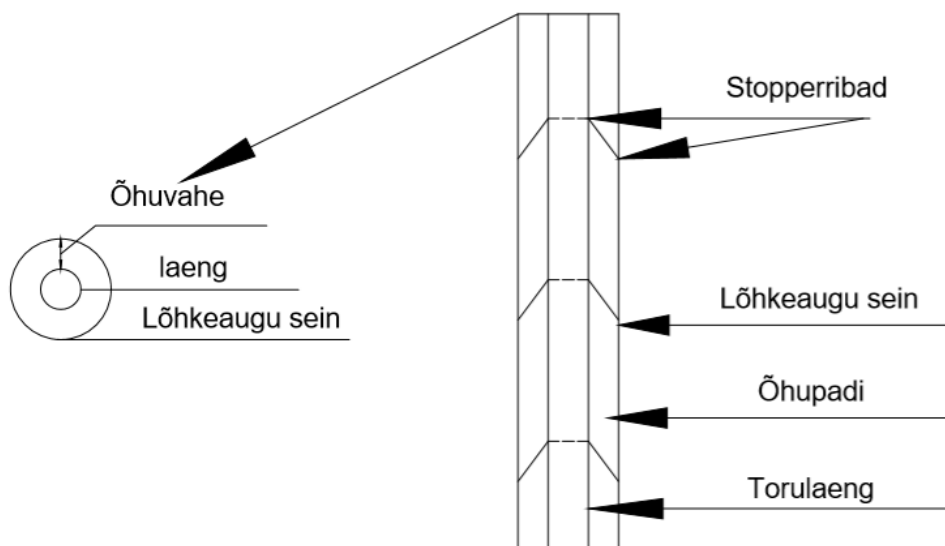
3.7. Torulaengutega tükikivi tootmine

Torulaeng on plahvatusohtlik pulbriline aine, mis sisaldab nikroglükooli ja diiselomeeri ehk diatomiiti. Lõhkeaine on pakitud polüpropüleenist torudesse. Torulaenguid kasutatakse kivimi lõhkamiseks piki kihistuspindu (Forcit, 2017). Tehnoloogia seisneb selles, et piki väljatava ploki kontuuri puuritakse lõhkeaugud, mis laetakse torulaengutega. Torulaengutes on 0,5 – 1 m kohta kas 100 või 200 grammi lõhkeainet, mis initsieeritakse 5 mg või 10 mg detoneeriva nõoriga. Torulaengud pannakse 32 mm diameetriga kontuurpuurimise meetodil tehtud puurauku ning torulaengu küljes olev stopper asetab toru täpselt augu keskmesse, et torulaengu ja kivi vahele tekiks õhkpadi. Initsieerumise hetkel tekkivad gaasid löövad kivimi mööda selle looduslikke pragusid katki. Õhkpadi laengu ja kivimi vahel on vajalik, et vältida kivimisse mikropragude teket (Joonis 16). Ühtlasi ei kasutata torulaengute korral topist, et üleliigsed gaasid liikuma pääseksid ja kivimi pealmiseid kihte ei kahjustaks. Torulaengud asetatakse sirgjooneliselt ja lõhatakse samaaegselt. Korraga võib lõhata 40 ruutmeetrit. Tehnoloogia positiivseks küljeks on, et kivimisse ei teki mikropragusid, sest õhuvahet summutab brisantse löögi kivimile, ja laskemoona kasutatakse minimaalselt. Tänapäeval kasutatakse torulaengutega toodetud tükikivi näiteks müürides, vundamentides, linna sisedisainis – näiteks treppides, skulptuurides ja põrandates jne. Torulaengute tehnoloogiat kasutatakse peamiselt Lasnamäe ja Aseri lademe paekivide peal. Torulaengutega kivimi murdmine on Eestis hetkel katsetusjärgus.

Väljatava ploki kontuurid on täpsed ning kihid eralduvad piki kihistuspindu. Torulaenguid saab kasutada ka märgades lõhkeaukudes. Torulaengutega kaasneb vähene keskkonnamõjusid ja puur-lõhketööd on suhteliselt ohutud. Suuremat kulu masinatele torulaengutega väljamise juures ei kaasne, sest masinate näol on tarvilikud vaid puurpink ja kahveltõstuk. Juhul, kui torulaeng on laetud hoolikalt ja puhtalt, on plahvatusest tekkivate kahjulike tulegaaside kogus väiksem.

Plahvatuses tekkivate gaaside hulk sõltub hapniku tasakaalust ja sellest, kui täielik on plahvatus. Ideaalseteks tingimusteks loetakse seda, kui hapniku tasakaal on null ja plahvatus on täielik, ent praktikas ei saavutata seda ideaali kunagi ja hapniku tasakaal on tavaliselt kas pisut negatiivne või

positiivne. Torud on valmistatud polüpropüleenist, mis põleb peamiselt detonatsioonis ning ei moodusta eriti mürgiseid gaase, ent mõned plastosad võivad siiski ala ümbruses levida (Forcit, 2017). Torulaengute miinuseks on, et see on kulukam, kui teised tehnoloogiad. Nende säilivusaeg on kuivades tingimustes 2 aastat. Eestis viib torulaengutega tükikivi väljamist läbi Voglers Eesti OÜ.



Joonis 16: Lõhkeauguskeem torulaenguga kivimi lõhkamisel.

3.8. Paisuvseguga tükikivi tootmine

Paisuvsegu on kivimi murdmise tehnoloogia, mis ei ole plahvatusohtlik ning mida kasutatakse kivimi ja betooni purustamiseks. Paisuvsegude eesmärgiks on pakkuda keskkonnatundlikes piirkondades kivimi lammutamist ilma plahvatuse ja sellega kaasnevate keskkonnamõjudeta. Mitte-plahvatusohtliku segu kasutamisel kivimi purustamiseks puuduvad müra, vibratsioon, ebamugavused inimestele ja õhurõhuga seotud struktuurilised kahjustused (Geobreak, 2019) (Joonis 17).

Tehnoloogia seisneb selles, et puuritakse puuraugud piki kontuuri, kuhu valatakse kuiva segu ja seejärel vett, millega segu reageerib. Keemilise reaktsiooni tagajärjel toimub paisumine kõigis suundades ja kivimi kihid eralduvad piki looduslikke kihistuspindu lahti. Selle tehnoloogia positiivseteks külgedeks on, et kivimi eraldumine toimub mööda kihte ja keskkonnamõjud on minimaalsed. Paisuvsegu negatiivseks küljeks on kuni mõne-tunnine tehnoloogiline paus, mistõttu ajakulu suureneb. Sellist tootmise tehnoloogiat pole Eestis tükikivi tootmiseks küll kasutatud, ent aastal 2003 katsetati Tondi-Väo karjääris paisuvate segude kasutamise võimalusi ehitus- ja viimistluskivi toorplakkide lahti murdmiseks, mille tulemusest järeldati, et paisuvsegu saab kasutada plakkide lahti murdmiseks massiivist (Tomberg & Tomberg, 2003). Paisuvsegud on ka vaiksed ning nende kasutamisel ei kaasne vibratsiooni nagu lõhkeainetega ning paisuvseguga tükikivi tootmiseks pole vaja erilitsentsiga luba (Geobreak, 2019).



Joonis 17: Paisuvsegudega murtud kivim (Autor: Splitstar)

3.9. Kvaliteedinõuded tükikivile

Ehitussektor vajab konkreetsete rakenduste jaoks pidevat kvaliteetse lubjakivi tarnimist. Hea kvaliteediga lubjakivi saab defineerida kui kivimit, millel on füüsikalised ja keemilised omadused, mis vastavad ja ületavad insener-tehnilisi nõudeid, mis on vajalikud ehitise ohutuks ja pikaajaliseks kasutuseks. Euroopas on kehtestatud ehituses kasutatavatele kivimitele kvaliteedinõuded. Ehituseks sobiva tükikivi tekstuur peaks olema kas plaatjas või kergelt laineline ning peamiselt paksukihiline või massiivne. Savikaid vahekihid ja merglikihid mõjuvad aja jooksul kivimile halvasti, tehes lubjakivi kasutamise ehituskivina keerulisemaks seetõttu, et sellised kivimid on kõrge veeimavusega ning lõhuvad ehitiste müüre ja konstruktsioone ning annavad kivimile selgelt väljendunud anisotroopsuse. Sellel põhjusel ei ole Pärnu maakonnas paljanduvaid savikaid lubja- ja dolokivikihte, mis kuuluvad Adavere ja Jaani lademesse, maavaradena kasutusele võetud, sest need ei vasta nõuetele (Perens, 2004). Viimistluslubjakivi ja viimistlusdolokvi peavad olema dekoratiivsed ja poleeritavad ning vastama kõrgemargilise lubja- ja dolokivi nõuetele. See tähendab, et kivimi purunemiskindluse kategooria LA katsetel peab olema 30 või väiksem, külmakindlus peab olema vähemalt 25 tsükli ning survetugevus peab kuivalt olema üle 600 kg/cm². Eesti ettevõtted jälgivad tükikivi valikul kivimi pragude eksistentsi, paindetugevust, veeimavust atmosfääril, veeimavust kapillaarsuse järgi, kivimi tihedust, kivimi avatud poorsust, termilist šoki vastupidavust massimuutuse järgi, kriimustustele vastupidavust ning libeduskindlust nii kuivana kui ka märjana (Tabel 1). Viimistluskivide puhul omab tähtsust ka kivimi toon ja muster.

Tabel 1: Kvaliteedinõuded kaevandatavale ehituslubjakivile ja ehitusdolokivile ((Perens, 2003) & töös kasutatud küsimustik).

	Nõue
Paindetugevus	17,4 Mpa
Veeimavus atmosfääril	0,90%
Veeimavus kapillaarsuse järgi	0,5-1,654 g/m ² s

Tihedus	2650 kg/m ³
Avatud poorsus	2,60%
Termilise shoki vastupidavus	0,04%
Kriimustustele vastupidavus	19,5 mm
Libeduskindlus kuivana	55,7
Libeduskindlus märjana	35,6
Purunemiskategooria (LA)	30 või väiksem
Külmakindlus	vähemalt 25 tsüklit
Survetugevus kuivalt	Üle 58,8 MPa

4. Tootmine Eestis

Eestis tegelevad pae plokkide tootmisega Orgita dolomiiditooted OÜ, Saare dolomiit – Väokivi OÜ üldnimetusega Reval Stone, Pärtli paas/paemurd OÜ, Ungru kivi, Põhjakivi OÜ ja Spark & Stone Concept OÜ. Pärtli paemurd kaevandab tükikivi Maardu maardlas, Oü Väokivi Väo maardlas ning OÜ Orgita dolomiiditooted ja OÜ Saare dolomiit – Väokivi Orgita-Haimre maardlas (Tabel 2). Tükikivi kaevandatakse Kaarma, Orgita ja Selgase dolomiidikarjäärides, Väo karjääris, Pärtli paemurrus, Pusku karjääris ning Valkla lubjakivikarjääris (Joonis 18). Väokivi karjäärist väljatakse tükikivina raudsüdan, ristikorda, alumist ja ülemist muldvalget ning seitsmetollist, sest need kihid sobivad plaatide tootmiseks kõige paremini olles paksemad ja hästi lihvitavad. Orgita dolomiiditooted OÜ kaevandavad nagu ka nimes mainitud dolomiiti, sest sellel on kõige rohkem turgu. Põhjakivi OÜ ja Spark & Stone Concept eelistavad tükikivi tootes Lasnamäe ladet, Aseri ladet, Rõa kihistu dolomiiti, sest need on kvaliteetsemad, massiivsemad ning peavad Eesti kliimas paremini vastu. Spark & Stone Concept ei oma ise karjääri, vaid käib vastavalt tellimustele teiste ettevõtete karjäärides tükikivi väljamas.

Kihtide valikul on, lisaks teistele ehituskivimile esitatud nõuete vastavusele, oluline, et kivimis poleks mõrsaid ega pragusid. OÜ Saare dolomiit – Väokivi väljab aastas umbes 4000 m³ paekivi plokki, millest valmistoodangusse jõuab umbes 25%, tootmise jäägid müüvad nad täitematerjaliks või teevad sellest killustikku. Orgita dolomiiditooted OÜ kaevandavad aastas ligikaudu 1000 – 1500 m³ tükikivi, millest lõpp-produktiks läheb vaid 30-40%, ülejäänud 60% läheb teedeehitusse killustikuks. Nad on üritanud lõpptoodanguks mineva kivimi protsenti aastaid tõsta, ent palju materjali läheb pragude eksistentsi tõttu kaotsi. Põhjakivi OÜ ja Spark & Stone Concept OÜ-l on lõpp-produktiks mineva tükikivi protsent teiste Eesti ettevõtetega võrreldes kõige suurem – vähemalt 70-80% 1000 – 1500 m³ kohta aastas. Ülejäänud 20-30% tükikiviks mittesobivat materjali läheb kas rekultiveerimisel täitematerjaliks või karjääri teenindusmaa ehitamiseks (Tabel 2).

Väo karjääris kasutatakse kivimi kaevandamiseks suurt ketassaagi, millega saetakse kihid eraldi lahti ning eraldatakse need seejärel käsitsi kiiludes ja kraanaga tõstes massiivist (Joonis 19). Kaarma karjääris soonitakse kivimid soonuriga ning eraldatakse need seejärel ekskavaatoriga massiivist. Seejärel saetakse suured plokid tross-saega transpordiks vajalikku mõõtu ning väiksema ketassaaga saetakse vajalikus mõõdus toorikud. Väokivi OÜ toodetud tükikivi lõpp-produktideks võivad olla plaadid, aknalauad, trepiastmed, müürikivid ja eridetailid.

Orgita dolomiiditooted OÜ kasutab kivimi väljamiseks ekskavaatoriga kihiti murdmist (Joonis 20) ning vahest ka kiiludega murdmist, sõltuvalt sellest kui kinni kivim massiivis on. Pärast kivimi väljamist saevad nad plokid transpordiks vajalikus mõõdus väiksemateks kandilisteks plokkideks ning edasi töödeldakse kivimit vastavalt tellimusele. Orgita dolomiiditooted OÜ põhiliseks toodanguks on ehitusmaterjal, milleks võivad olla näiteks laminaadid, trepid või fassaadid.

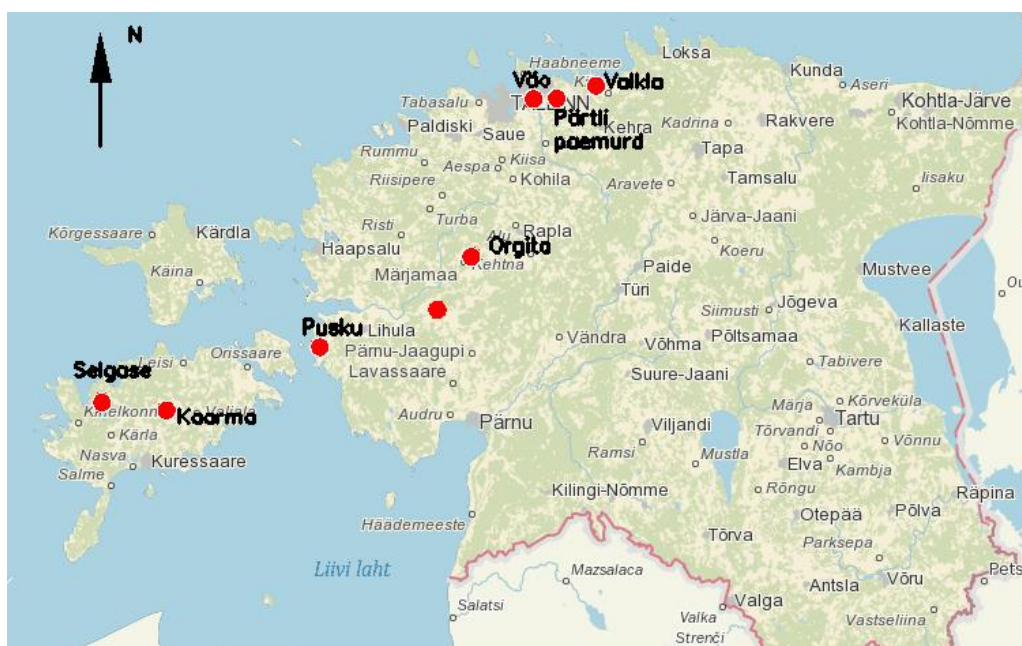
Põhjakivi OÜ kasutab samuti kivimi kaevandamiseks suure ketassaaga kivimi saagimist ning masina jõul murdmist, Spark & Stone Concept OÜ kasutab aga torulaengutega kivimi murdmist. Väljatud kivi saetakse, poleeritakse ja klombitakse vastavalt erinevate tööstuse ja tootegruppide saavutamiseks. Nende tükikivi mõnedeks lõpp-produktideks on poleeritud plaadid, põrandaplaadid, köögitasapinnad, sillutusivid, müürikivid seinadekoor jne.

Eestis on tükikivi turg väike, mistõttu läheb 80% Väokivi OÜ toodangust ekspordiks: Rootsi saavad nad põrandaplaate ning eridetaile Venemaale, Soome, Lätti ja Taani. Põhjakivi OÜ

toodangust läheb Eestis müügiks nii poleeritud kivi kui ka müüri- ja ehituskivi, nende koostööpartneriteks on erinevad looduskivi edasimüüjad või erakliendid. Ekspordivad nad peamiselt antiikse viimistlusega põrandaplaati, mis läheb Rootsi, Norra, Läti ja Leetu ning Saksamaale. Põhjakivi OÜ peab ka läbirääkimisi Araabia Ühendemiraatidega, et neile poleeritud paekivi tooteid müüja.

Tabel 2: Ülevaade Eestis tükikivi tootvate ettevõtete kaevandamismahtudest ja prognoositavatest ammendumise perioodidest (Bauert H. , 2018) (Kaasik, 2020) (Tamm, 2020).

Ettevõte	Maardla nimetus	ligikaudne kaevandamise maht aastas tuh m ³	Jääkvaru tuh m ³	Prognoositav ammendumise periood aastates
OÜ Pärtli paas	Maardu	0,8	105,7	144 a
OÜ Väokivi	Väo	103	1659,7	28 a
OÜ Orgita dolomiiditooted	Orgita-Haimre maardla	3,9	119,9	44 a
OÜ Saare dolomiit-Väokivi	Orgita-Haimre maardla	3,1	393,4	124-127 a



Joonis 18: Eestis tükikivi kaevandavad lubja- ja dolokivikarjäärid.



Joonis 19: Väo karjäär (Autor: Kristin Kahu, 2018).



Joonis 20: Kihiti murdmiseks hüdrovasar (Autor: T. Tomberg, 2020)

5. PVT ehk parima võimaliku tehnoloogia valik

Käesoleva töö alapeatükis 3.3. on välja toodud, et Harjumaal kaevandatakse Aseri, Lasnamäe, Uhaku, Keila ning Nabala lademe ning Vao, Kandle, Loobu, Kõrgekalda ja Vasalemma kihistu kivimeid, Raplamaa põhjaosas Nabala lademe Paekna ja Saunja kihistu lubjakive ning kesk- ja lõunaosas Juuru lademe Tamsalu ja Varbola kihistu kivimeid ning Raikküla lademe Raikküla kihistu kivimeid. Pärnumaal kaevandatakse ehitusdolokivi vaid Jaagarahu lademe Muhu kihistu avamusalal asuvaid kivimeid. Lisaks sellele, et nende lademete kivimid vastavad alapeatükis 3.4. välja toodud ehituskivile esitatud nõuetele, usun ma, et neid kivimeid eelistatakse ka nende kättesaadavuse lihtsuse tõttu, mis tähendab, et katendi paksus on umbes 0-5 meetri paksune ja et selle eemaldamisele ei kulu palju ressursse.

Peatükis 2. väljatoodud tehnoloogiatest kasutavad ketas-saega tükikivi saagimist Väokivi OÜ, Põhjakivi OÜ ja Orgita dolomiiditooted OÜ, kiiludega kivimi murdmist Väokivi OÜ ja Orgita dolomiiditooted OÜ, ekskavaatoriga kivimi kihiti murdmist Saare Dolomiit OÜ ja Orgita dolomiiditooted OÜ, tross-saega saagimist Väokivi OÜ, torulaenguga kivimi murdmist Spark & Stone Concept OÜ ning soonuriga saagimist Saare Dolomiit OÜ nagu on välja toodud käesoleva töö peatükis 4. Sellest järeldan, et Eestis antud hetkel puur-lõhketöid ja paisuvsegusid tükikivi kaevandamiseks ei kasutata.

Saare dolomiiditooted – Väokivi OÜ-s läheb ehituskivina lõpptoodangusse vaid umbes 25% väljatud kivimist ja kuna Vao karjääris kasutatakse tükikivi kaevandamiseks suures osas ketassaega või soonuriga saagimist, siis tundub, et need tehnoloogiad pole ehituspae plokkide tootmiseks kõige paremad valikud, kui kaevandatud kivimist vaid nii väike osa lõpp-produktina turule jõuab. Orgita dolomiiditooted OÜ poolt kaevandatud dolokivist jõuab lõpp-produktina turule umbes 30 – 40%, ent kuna kivimi kvaliteet selgub alles väljatud kivi uurimisel, siis on raske hinnata, kas selles, et vähem kui pool kaevandatud kivimist tükikivina lõpp-toodangusse jõuab, on põhjuseks kivimi kvaliteet või väljamisel kasutatud tehnoloogia. Spark & Stone Concept OÜ torulaenguga väljatud ehituskivist jõuab viimistluskivina lõpp-produktiks 70 – 80% murtud kivimist, mis näitab, et torulaengutega kivimi murdmine on perspektiivne tehnoloogia, millega tükikiviks mittesobivat materjali kaasneb vaid 20 – 30%.

Käesoleva töö peatükist 2. saadud info põhjal tehtud tabelist (Tabel 3) on näha, et kõige halvema mõjuga keskkonnale on puur-lõhketöödega kivimi lõhkamine, sellega peaaegu sama kehva mõjuga on kivimi kihiti murdmine ekskavaatoriga. Tross- ja ketas-saega ning soonuriga kivimi saagimine põhjustavad keskkonnale samavõrdset keskmist kahju. Kiilude ja torulaengutega kivimi murdmine on samuti keskkonnale minimaalselt kahjulikud. Paisuvsegudega tükikivi murdmine on loetletud tehnoloogiatest keskkonnale kõige ohutum. Puur-lõhketöödega kivimi väljamisega kaasneb kõige suurem pragude tekke tõenäosus, ekskavaatoriga kivimit murdes on see tõenäosus keskmine, tross- ja ketas-saega ning kiiludega murdmisega kaasneb minimaalne oht mikropragude tekkeks, ent see võimalus siiski eksisteerib.

Kui võrrelda tehnoloogiate tulusust pragude tekke suhtes on kõige tulusamateks tehnoloogiateks ketassaega, torulaengutega ja paisuvsegudega kivimi murdmine, mille puhul võib peaaegu 100% kindel olla, et väljatavasse kivimisse ei teki mikropragusid. Väljamissügavuse osas saab minu arust tehnoloogiad jagada kaheks: tehnoloogiad, mille väljamissügavus ei ületa kahte kihti ning tehnoloogiad mille väljamissügavus ületab kahte kihti. Esimesse gruppi kuuluvad ketas-saega kivimi saagimine, kiiludega murdmine ja kihiti murdmine ning teise tross-saega saagimine, puur-

lõhketööd, torulaengud ja paisuvsegud. Samamoodi saab tehnoloogiad jagada kaheks ka kihtide eraldumise järgi, kus ühes grupis on tehnoloogiad, millega kivimi kihid ei eraldu väljamisel ja teises need, kus kihid eralduvad. Sellisel juhul kuuluvad esimesse gruppi soonuri, tross- ja ketassaega saagimine ning teise ülejäänud varasemalt mainitud tükikivi tootmise tehnoloogiad.

Kui võrrelda tabelis välja toodud erinevaid tükikivi tootmise tehnoloogiatega kaasnevaid tegureid, milleks olid mõjud keskkonnale, pragude tekkimise tõenäosus ning väljamissügavus ja kihtide eralduvus, on antud hetkel parimad tükikivi tootmise tehnoloogiad torulaengute ja paisuvsegudega kivimi murdmine. Et Eestis on paisuvsegudega kivimi murdmist alles paar korda katsetatud ning ei saa kindlalt öelda, et selle mõjud keskkonnale tõesti nii olematud on, samas kui torulaengutega väljatakse Eestis ehituskivi juba mitu aastat, siis on minu arust 2021. aasta seisuga parimaks võimalikuks tehnoloogiaks tükikivi tootmisel torulaengutega kivimi murdmine. See tulemus võib aastate jooksul muutuda, kui paisuvsegudega kivimi murdmine tulevikus Eestis kasutusele võetakse, sest tegelikult lahendaks see tehnoloogia nii mõnegi karjääri müra ja vibratsiooni probleemi.

Tabel 3: Tehnoloogiate võrdlus.

Tehnoloogia	Keskkonnamõjud	Pragude teke	Plokid	Kihid	Lisanduvad ressursikulud
Tross-saega saagimine	Vähene tolmu ja kivimiosakesed atmosfääris; vali müra, vibratsioon	Väike mikropragude tekkimise võimalus	Saab selekteerida ja väljata massiivseid plokkide	Ei eraldu	Tross kulub kiiresti; suur vee- ja energiakulu
Ketassaega saagimine	Vähene tolmu ja kivimiosakesed atmosfääris; vali müra, vibratsioon	Minimaalne mikropragude tekkimise võimalus	Maksimaalselt kahe kihi sügavuselt	Ei eraldu	Saag kulub kiiresti; suur vee- ja energiakulu
Kiiludega murdmine	Väiksem müra, vähene vibratsioon	Sõltub kivimi looduslikest pragudest, minimaalne	Ühe kuni kahe kihi sügavuselt	Eralduvad	Mitu masinat samas ees: tööjõule + masinate kulud
Puur-lõhketööd	Vali müra; vibratsioon; gaasid, tolmu- ja kivimiosakesed atmosfääris	Suur mikropragude tekkimise võimalus	Maksimaalne väljamissügavus	Eralduvad	Ohutusmeetmetele
Torulaengud	Minimaalne müra ja vibratsioon; väike tulegaaside kogus atmosfääris	Mikropragused ei teki	Enam kui kahe kihi sügavuselt	Eralduvad	Teistega võrreldes kulukam tehnoloogia
Paisuvsegud	Keskkonda kahjustavaid mõjusid ei ole	Mikropragused ei teki	Enam kui kahe kihi sügavuselt	Eralduvad	Teistega võrreldes kulukam tehnoloogia

Kihiti murdmine	Vali müra; vibratsioon; tolmu- ja kivimiosakesed atmosfääris	Keskmine mikropragude tekkmise võimalus	Maksimaalselt kahe kihi sügavuselt	Eralduvad	Järeltöötlus
Soonuritega saagimine	Müra, vibratsioon	Minimaalne mikropragude tekkmise võimalus	Enama kui kahe kihi sügavuselt	Ei eraldu	Veekulu trossi jahutamiseks

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö tulemusel ütleksin, et Harjumaal eelistatakse ehituspaekivi kaevandada Aseri, Lasnamäe, Uhaku, Keila ning Nabala lademe kivimitest, Raplamaal Nabala, Juuru ja Raikküla lademe kivimitest ning Pärnumaal vaid Jaagarahu lademe kivimitest. Need lademed on põhilisteks huviorbiitideks just nende maavarade lihtsa kättesaadavuse tõttu, mis tähendab, et katend on piisavalt õhuke ja ei tekita maavarade kaevandamisel lisakulusid. Uuringu käigus selgus, et tükikivi tootmiseks on kasutatud tross- ja ketassaega kivimi saagimist, kiiludega murdmist, soonuriga kivimi saagimist, puur-lõhketöödega kivimi väljamist, torulaengute ja paisuvsegudega kivimi murdmist ning kihiti murdmist ekskavaatoriga. Ettevõtetele saadetud küsimustest selgus, et kõige enam kasutatakse Eesti lubja- ja dolokivikarjäärides ketassaega paekivi tootmise tehnoloogiat. Analüüsid omavahel tükikivi tootmise tehnoloogiaid, jõudsin järeldusele, et Eesti lubja- ja dolokivikarjäärides on parimaks võimalikuks tehnoloogiaks torulaengutega kivimi murdmine. Torulaengutega kivimi murdmisel olid üsna sarnased mõjud paisuvsegudega, ent paisuvsegudega kivimi murdmist on Eestis vaid paar korda katsetatud. Seetõttu ei saa 100% kindel olla, kuidas see keskkonda mõjutab ja et see tehnoloogia pole lähiajal veel kasutusse tulemas, siis oli õigem valida juba Eestis kasutusel olev tehnoloogia.

Üheks töö edasiarendamise ettepanekuks oleks minu poolt uurida paisuvsegude toimet Eesti pae- ja lubjakarjäärides, et näha, millised on selle tehnoloogiaga kaasnevad mõjud keskkonnale ja milline oleks selle tehnoloogiaga väljatava kivimi kvaliteet.

Tänuavaldused

Minu siiras tänu kuulub juhendajale lektor Sander Kanterile, et ta mind antud bakalaureusetöö raames igatepidi aitas ja mulle nõu andis. Tänada tahaks ka Imbi ja Eino Tombergi, et nad mul oma materjale uurimuse raames kasutada lubasid. Ja viimaks tahaks tänada ettevõtteid Orgita dolomiiditooted OÜ, Saare dolomiit – Väokivi OÜ, Põhjakivi OÜ ja Spark & Stone Concept OÜ, et nad mu küsimustikule vastasid.

Kasutatud kirjandus

- Administration, U. G. (2016). Limestone: Characteristics, Uses and Problem. *Outdoor Sculpture Manual - Center For Public Buildings*. Retrieved from https://www.gsa.gov/node/88106?Form_Load=88341
- Armaghani, D. J., Hajihassani, M., Mohamad, E. T., Marto, A., & Moghaddam, M. R. (2015). Application of two intelligent systems in predicting environmental impacts of quarry blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 9647–9665. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1908-2>
- Bauert, H. (2018). *Ehitusmaavarade levik, kavandamine ja kasutamine Harju maakonnas*. Rakvere: Eesti Geoloogiateenistus. Allikas: <https://fond.egt.ee/fond/egf/8994>
- Bauert, H., & Perens, R. (2012). *Paekivi kaevandamise mõjud Nabala lubjakivimaardlas*. MTÜ Geoeducation center. Tallinn: Keskkonna investeeringute keskus. Allikas: https://www.envir.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/paekivi_kaevandamise_moj_ud_nabala.pdf
- Becker, & Kennard. (1937). The Limestone Industry. *Ohio State Engineer*(20), 19-21. Allikas: <http://hdl.handle.net/1811/35364>
- Bidiville, A., Wasmer, K., Meer, M. V., & Ballif, C. (2014). Wire-sawing processes: parametrical study and modelling. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 132, 392-402. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.09.019>
- CEDIMA. (2020). *DIAMANT-CEDIMA*. Allikas: <http://www.berntsendiamant.com/filarkiv/File/wiresaging.pdf>
- Copur, H. (2010). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Istanbul Technical Univesity, Mining Engineering Department, 34469 Maslak , Istanbul. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.09.006>
- Dagrain, F., & Marchandise, P. (2013). *Optimization of the cutting design of chain saw machines*. 1University of Mons, Civil Engineering Department, Civil Engineering Department. Belgium: Univesity of Mons. Allikas: <https://www.researchgate.net/publication/269696710>
- Encyclopedia, T. E. (1998-2021). Limestone. Allikas: <https://www.britannica.com/science/limestone>
- Engin, I. C., Bayram, F., & Yasitli, N. E. (2012). Experimental and Statistical Evaluation of Cutting Methods in Relation to Specific Energy and Rock Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 755-766. doi:<https://doi.org/10.1007/s00603-012-0284-4>
- Ersoy, A., & Atici, U. (2004). Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks. *Diamond and Related Materials*, 13, 22-37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2003.08.016>
- Forcit. (2017). K-pipecharge, product information. Soome. Allikas: <https://forcit.fi/assets/product-brochures/K-PIPECHARGE-EN.pdf>
- Geobreak. (2019). Expansive Rock Breaking Non-explosive Demolition Agent. *Rock breaking solutions*. Allikas: <https://www.geobreak.ca/products/expansive-rock-breaking-non-explosive-demolition-agent/>

- GraniteCorp, N. (2013). North Carolina Granite Corp. Allikas: <https://www.youtube.com/watch?v=QNgkrcMeJpk&t=651s>
- Huang, B., Liu, C., Fu, J., & Guan, H. (2011). Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 976-983 . doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.004>
- Kaasik, T. (2020). *Ehitusmaavarade levik, kaevandamine ja kasutamine Rapla maakonnas*. Rakvere: Eesti Geoloogiateenistus. Allikas: <https://fond.egt.ee/fond/egf/9334>
- Kerner, O. (1961). *Uses of limestone and dolomite*. Illinois: Illinois Geological Survey library. Allikas: <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/42725/usesoflimestoned321lama.pdf?sequence=2>
- Keskkonnaõiguse_keskus. (2020). Väike kaevandussõnastik. Tallinn. Allikas: <https://k6k.ee/fookuses/maapou/kaasaraakimise-juhised/kaevandussonastik>
- King, H. M. (2005-2021). What is limestone and how is it used? *Geoscience News and information*. Allikas: <https://geology.com/rocks/limestone.shtml>
- Krehl, P. O. (2008). *History of Shock Waves, Explosions and Impact*. Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-540-30421-0>
- Maa-amet. (2019). Maavarude koonbilanss. Allikas: https://geoportaal.maaamet.ee/docs/geoloogia/koondbilanss_2019.pdf?t=20200526081544
- Maa-amet. (2021). Allikas: Maa-ameti kaardirakendus: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>
- Merriam-Webster. (1828). *Definition of chain saw*. Allikas: Sõnastik: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/chain%20saw>
- Nõmmela, K., & Rudanovski, A. (2012). *Kiviraiumine ajaloost praktikani*. Allikas: Paberimuuseum: <http://www.paberimuuseum.ee/kivitest/kiviraiumise-abc/kiviraiumine-5.html>
- Perens, H. (2003). *Paekivi Eesti ehitistes I*. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- Perens, H. (2004). *Paekivi Eesti ehitistes II*. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- PTC, P. T. (2021). Kasutamise kuupäev: 2021, allikas <https://www.perthtradecentre.com.au/blog/2015/03/08/limestone-blocks-natural-vs-reconstituted-blocks/>
- Raukas, A., & Teedumäe, A. (1977). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Allikas: <https://geoloogia.info/geology>
- Reinsalu, E. (2011). *Eesti mäendus, Maapõueinseneri õpik*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool Energeetikateaduskond .
- Shijun, L., Desheng, W., Zhili, W., Qiwen, X., & Bin, W. (2010). *Wedge Components of the Hydraulic Stone Splitter*. Yashan Univesity, Qinhuangdao, Mechanical Engineering Academic . Chengdu, China: IEEE. doi:<https://doi.org/10.1109/iccsit.2010.5564497>
- Sigurdsson, A. (2017). China's explosive history of gunpowder and fireworks. Allikas: <https://science.jrank.org/pages/2634/Explosives-History.html>

- SOLANCIS. (2021). Extraction. Allikas: <http://www.solancis.com/cn/quarries/extraction>
- Solancis. (2021). Production. Allikas: <http://www.solancis.com/company/transformation>
- Zhang, X. P., Ji, Q. P., Liu, Q. S., Zhang, Q., & Peng, Z. H. (2017). Physical and numerical studies of rock fragmentation subject to wedge cutter indentation in the mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 354-365. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.003>
- Tamm, J. (2020). *Ehitusmaavarade levik, kaevandamine ja kasutamine Pärnu maakonnas*. Rakvere: Eesti Geoloogiateenistus. Allikas: <https://fond.egt.ee/fond/egf/9333>
- Tomberg, I., & Tomberg, E. (2003). *Uuringu ja katsetööd paest ehitus- ja viimistluskiivi tootmiseks puur- ja lõhketööde abil*. Tallinn: Eesti paeliit. Allikas: <https://paeliit.files.wordpress.com/2017/03/uuringu-aruanne-terviktekst.pdf>
- Tomberg, T., & Veersalu, K. (2017). *Lõhketööd I: Mäenduslikud ja enamlevinud lõhketööd*. Tallinn.
- Tumac, D. (2015). Artificial neural network application to predict the sawability performance of large diameter circular saws. *Measurement*, 80, 12-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.025>
- Tutmez, B., Kahraman, S., & Gunaydin, O. (2006). Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones. *Construction and Building Materials*, 21, 1672-1679. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.023>
- Wu, H. (2016). Wire sawing technology: A state-of-the-art review. *Precision Engineering*, 43, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.08.008>
- YIT. (2021). *AS YIT Eesti koduleht*. Allikas: <https://www.yit.ee/infrateenused/materjalide-tootmine/lohketood>