

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geoloogia osakond

Kristjan Arold

Paekivi Los Angeles'e purunemiskindluse katse kadu geoloogilise südamikpuurimise andmestikust?

Magistritöö

Juhendajad: Martin Liira

Hardi Aosaar

Tartu 2020

Infoleht

Paekivi Los Angeles'e purunemiskindluse katse kadu geoloogilise südamikpuurimise andmestikust?

Käesolevas magistritöös peamiseks eesmärgiks on selgitada seoseid geoloogilise südamikpuurimisel kogutud puurandmestiku ning Los Angeles'e meetodil kivimi purunemiskindluse kao vahel, eesmärgiga leida kas ja kuidas on võimalik puurandmestiku põhjal määrata kivimi purunemiskindlust.

Seoseid uuriti ning anti hinnang meetodi teostatavusele. Töö tulemustele toetudes pakuti välja mõningad konkreetsed soovitusel sarnase töö teostamiseks tulevikuks.

Märksõnad: *Los Angeles'e meetodil purunemiskindlus, geoloogiline südamikpuurimine, mehaaniline eriennergia, puurandmete talletamine*

CERCS kood: **P430** – Maavarad, majandusgeoloogia; **T340** – Kaevandamine, mäendus

Dolostone's Los Angeles abrasion loss from drilling parameters?

Researchers and engineers in the recent years have been investigating to find a convenient method to estimate rock physical parameters continuously from recorded drilling data (MWD).

The determination of the Los Angeles abrasion loss is time consuming and expensive method, which requires a large amount of sample. For this reason, the prediction of Los Angeles abrasion loss from drilling data would be a convenient, fast and cost effective method to estimate rock's Los Angeles abrasion loss.

The main aim of this work is to estimate possibility of determining dolostone's Los Angeles abrasion loss from geological core drilling parameters. For this purpose, drilling data and Los Angeles Abrasion loss were analyzed.

Keywords: *measuring while drilling, mechanical sepcific energy, geological core drilling, Los Angeles Abrasion test*

CERCS code: **P430** – Mineral deposits, economic geology; **T340** – Mining

Sisukord

Infoleht	1
Sissejuhatus	3
1. Taust	5
1.1. Geoloogiline rootormetodil südamikpuurimine	5
1.2. Puuragregaat Massenza MI8	7
1.3. Puurparameetrite reaallajas jälgimine ning salvestamine	8
1.4. Paekivi kui täitematerjali purunemiskindluse määramine Los Angeles'e katse meetodil	9
1.5. Valistre uuringuruumi varasem uuritus ja geoloogiline ehitus	11
2. Materjalid ja metoodika	15
2.1. Mehaaniline erienergia	17
2.2. Kivimi lõhelisus	18
3. Tulemused ja arutelu	19
3.1. Kivimi lõhelisus (RQD)	20
3.2. Puurimiskiirus	23
3.3. Los Angeles'e (L.A.) tegur	24
3.4. Mehaaniline erienergia	25
3.5. Los Angeles'e katse kao sõltuvus puurimiskiirusest kivimi lõhelisusest ja mehaanilisest erienergiast	26
3.6. Problemaatika	31
3.7. Soovitused edaspidisteks uuringuteks	32
Kokkuvõte	34
Tänuavaldused	38
Kasutatud kirjandus	39
Lisa 1	42
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	50

Sissejuhatus

Paekivi on Eestis oluline ehitusmaterjal, ning tulenevalt intensiivsest ehitustegevusest on selle järele pidev nõudlus, näiteks seoses teedevõrkude korrastamisega ja uute rajamisega. Samuti suurendaks paekivi nõudlust ka planeeritav Rail Baltica. Paekivist valmistatakse ehitusmaterjalina põhiliselt killustikku, mis on strateegiliselt tähtis materjal tee-ehituses täitematerjalina ning kruusatee puhul ka teekattena. Eestis kasutatakse palju lubja- ja dolokivist valmistatud killustikku, kuna see on paljudes kohtades kergesti kättesaadav.

Ehituskivimi maavara geoloogilise uuringu käigus uuritakse maavara geoloogiliste puuraukude rajamisega eesmärgiga koguda puursüdamik – puuritud kivimkeha. Lisaks tuleb maavara uuringu raames kivimi keemilistele, füüsikalistele ja mehaanilistele omadustele vastavust katsetada, mille alusel selgitatakse maavara kvaliteet ning sobiv kasutusvaldkond.

Materjali purunemiskindlus Los Angeles'e katse meetodil on üks peamistest kriteeriumitest, mille alusel määratakse karbonaatkivimi kasutusala sobivus. Los Angeles'e meetodi peamisteks probleemiks on ajaline kulu ja maksumus, kuna materjal tuleb paljudel juhtudel esmalt purustada, kindlasti sõeluda, pesta, kuivatada, kaaluda, teha läbi trumlitsükkel ning siis uuesti sõeluda, pesta ja kuivatada ning kaaluda.

Aastal 2019. soetas OÜ Inseneribüroo Steiger peamiselt geoloogilisteks südamikpuurimisteks kohandatud puurmasina, mis varustati Eesti kontekstis uudse puurimisparameetrite jälgimise ja salvestamise informatsioonitalletussüsteemiga.

Salvestatud puurimisparameetritest on varasemates töödes leitud korrelatsioone kivimi füüsikaliste omadustega. Kuna on teada, et kivimi füüsikalised omadused mõjutavad nii purunemiskindlust ja geoloogilist puurimist, saab eeldada, et muutused puurimisparameetrites võivad kajastada kaudselt ka kivimi purunemiskindlust. Sellest teadmisest tulenevalt võib eeldada, et on võimalik kõrvutada puurimisandmestikku ning laboratoorseid paekivi ehitusmaterjali mõõtmisi võimalike seaduspärasuste saamiseks, mis aitaks hinnata kivimi purunemiskindlust puurimistöö ajal puurimisparameetrite andmestiku põhjal. Kirjeldatud ideest sündis käesoleva uurimustöö peamine eesmärk: Los Angeles'e meetodil purunemiskindluse katse kadu

tuletamine geoloogilise südamikpuurimise andmestikust. Milleni jõudmiseks seati järgnevad alaeesmärgid:

1. Leida seaduspärasusi puurimisandmestiku parameetrite ja Los Angeles'e meetodil purunemiskindluse katse kadu vahel.
2. Leida seaduspärasusi paekivi Los Angeles'e meetodil purunemiskindluse katse kadu ja otseselt puurimisele kulunud mehaanilise erienergia vahel (MSE – *Mechanical Specific Energy*).

1. Taust

1.1. Geoloogiline rootormeedodil südamikpuurimine

Rootorpuurimine (inglise k. *rotary drilling*) on üks keerdpuurimise tehnoloogiaid, mis võeti 19. sajandi lõpuaastatel kasutusele Ameerika Ühendriikides Texases ja Kaspia mere ääres Bakuu nafta leiukohas. Rootorpuurimisel kasutatakse nii statsionaarseid kui mobiilseid puuragregaate. Geoloogiline südamikpuurimine (inglise k. *geological rotary core drilling*) on üks rootorpuurimise meetodikaid, mis on valdavalt aluseks kõva kivimi aluspõhja geoloogilisteks uuringuteks. (Kildjer, 2017)

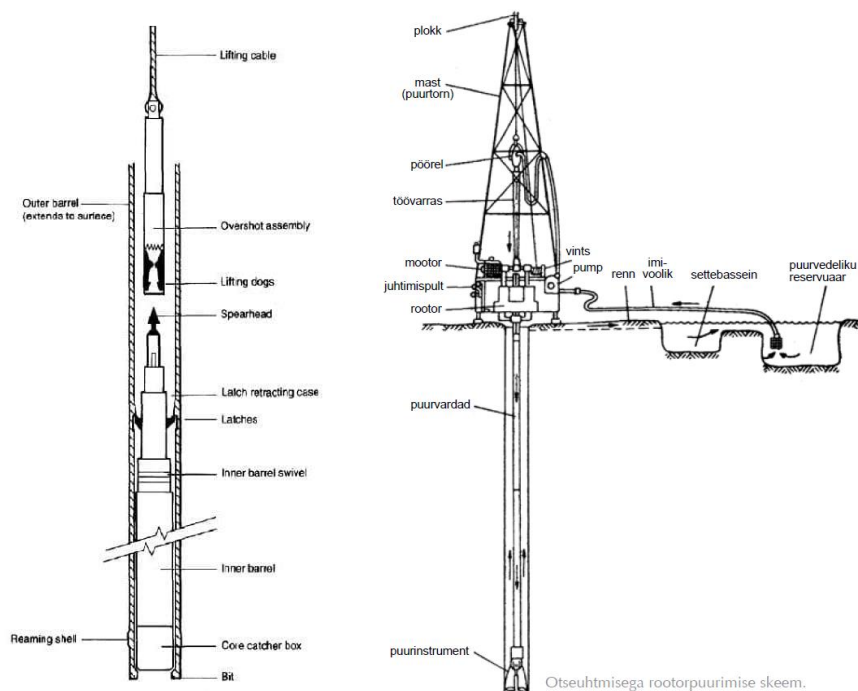
Geoloogiline südamik-rootorpuurimine võimaldab puurida viisil, mille puhul puuritakse maapõuest välja täies pikkuses silindrikujuline kivimkeha – puursüdamik. Rahvusvaheliselt enamkasutatavate puuraukude puursüdamiku diameetrid jäävad tavaliselt 27 mm kuni 85 mm vahemikku.

Trossisüsteemiga (inglise k. *wireline*) varustatud puuragregaadiga puurimisel puudub vajadus iga puuritud puurvarda järel kogu puurkolonni väljatõstmiseks, mis muudab puurimisprotsessi aja ja ressursi suhtes efektiivseks. Puursüdamiku tõstmine maapinnale toimub kas ühekordse või siis kahe-kolmekordse puurtoru sees trossisüsteemi abil. Enne *wireline*-trossisüsteemi kasutuselevõttu kaasnes puursüdamiku maapinnale toomisega peale iga reisi puurimist terve puurkolonni ülestõstmine.

Geoloogilist puurimist südamikpuurimise puhul võib omakorda jagada täiendavalt otsepuurimiseks ja suunatud puurimiseks. Otsepuurimise puhul planeeritakse puurauk ühe kindla sirge trajektooriga. Suunatud puurimise puhul on võimalik juhtida lõikepea suunda kivimkehas puurimistöde käigus – puurimise käigus on võimalik muuta puurimise suunda ning puurida keerukamate parameetritega auke. Lisaks võimaldab suunatud puurimine ühest puuraugust puurida harudena edasi täiendavaid puurauke.

Puuragregaadid võivad olla mobiilsed ja statsionaarsed. Mobiilsed puuragregaadid on tihti iseliikuvad ning üldjuhul paigaldatud veoautole või roomiku- või rattasüsteemile. Küll võivad mobiilsed puuragregaadid olla ka mittemobiilsed ning monteeritavad, selliseid puuragregaate kasutatakse näiteks puurimisel kohtades, kuhu ligipääs on raskendatud ja sageli tõstetakse puurimispaika helikopteriga. Statsionaarsed

puurmasinad tõstetakse ja monteeritakse puurimiskohta. Sellised puuragregaate kasutatakse tavaliselt aeganõudvate ja sügavamate puuraukude puurimiseks.



Joonis 1. Vasakul: nn. triple barrel tüüpi puursüdamikku väljandamise süsteem (Mazzensa, 2020). Paremal puuragregaadi lihtsustatud joonis (Kildjer jt, 2017).

Geoloogilisel südamikpuurimisel kasutatakse löikeinstrumendina tavaliselt volframkarbiid- ja teemantkroone. Volframkarbiidist kroonid on odavamad, löikepinna kõvaduselt pehmemad ning kuluvad kiiremini kui teemantkroonid. Volframkarbiid-kroone kasutatakse pigem pehme kivimmaterjali ja madalate puuraukude puhul. Teemantkroonid on kuni 15 korda kallimad kui volframkarbiid-kroonid, kuid kuluvad aeglasemalt ning nõuavad vähem uhtevedelikku efektiivseks löikeprotsessiks. Üldiselt eelistatakse praktikas kasutada isegi madalate puuraukude puhul pigem pehmemapoolses kivimis teemantkroone, kuna nende vastupidavus ning väiksem uhtevedeliku kulu ajaühikus kaaluvad üles nende maksumuse puurmasina opereerimiskulude arvelt.

Geoloogilise südamikpuurimise puhul kasutakse üldjuhul uhtevedelikku, milleks võib olla vesi või puurimistöö iseloomust tulenevalt puursegu – olenevalt puurimisprojekti iseloomust lisatakse veele vajadusel polümeere, kiudmaterjali ning bentoniite. Uhtevedeliku peamine eesmärk geoloogiliste puurimiste puhul on löikeinstrumendi – krooni hõõrde vähendamine, purustatud kivimmaterjali väljajanne ning spetsiaalsete

puursegude puhul ka puuraugu seinte kindlustamine. On olemas ka geoloogilise rootorpuurimise metoodika, mis uhtvedeliku asemel puurib puursüdamikku suruõhuga, küll on see praktikas pigem vähelevinud ning pigem sobilik väga pehme kivimmaterjali puurimiseks.

Uhtvedeliku liikumine geoloogilise rootorpuurimise puhul võib toimuda kahel erineval viisil. Otseuhtmisel surutakse uhtvedelik uhtepumba abil läbi puurvarraste puuritava augu põhja ja sealt koos purustatud kivimmaterjaliga puuraugust välja. Pöörduhtmisel on vedeliku liikumine vastupidine – vedelikul lastakse voolata puuraugu suudmest sisse ja väljapumpamine toimub läbi puurvarraste.

1.2. Puuragregaat Massenza MI8

Antud töös kogutud andmed koguti kõik Massenza MI8 multifunktsionaalse puurmasinaga (Lisa 1, Joonis 20), mis on võimeline puurima puurkaeve, viima läbi geoloogilisi südamikpuurimisi ning võimeline teostama veel teisi erinevaid geotehnoloogilisi puurimisi. MI8 puuragregaat on mobiilne, roomikutel, iseliikuv ning varustatud kahe veepumbaga. Käesoleval MI8-l oli 2019. a suvel võimekus kaldpuurimiseks 45° nurga all ja horisontaalis otsepuurimiseks NQ (puuraugu diameeter 75,7 mm ning puursüdamikud diameeter 47,6 mm) puurdiameetriga kuni 1000 m sügavuseni. Kõnealune MI8 võimaldab lisaks südamikpuurimisele veel tigupuurimist ning otse- ja pöörduhtmisega haamer- ja rataspuurimist.

MI8 puuragregaadiga puurimisel kasutati puurkolonnis kolme toru süsteemi (*wireline triple barrel*) süsteemi, mille puhul kõige alumine puurvarras koosneb välisest puurtorust ning sisemisest puurtorust, milles viimases omakorda asub veel õhukesest terasest kahest poolest koosnev toru. Sisemise toru otsas asub südamikumurdja, mis on koonusekujuline rõngas ja mille ülesanne on kindlustada puursüdamiku püsimine sisetorus. Sisemine puurtoru tõstetakse iga reisi puurimise järel vintsisüsteemiga puuraugust välja. Sisemise toru sees asuv kahest poolest koosnev toru aitab säilitada puursüdamikku ning nii mõnelgi juhul hõlbustab südamiku eemaldamist sisetorust.

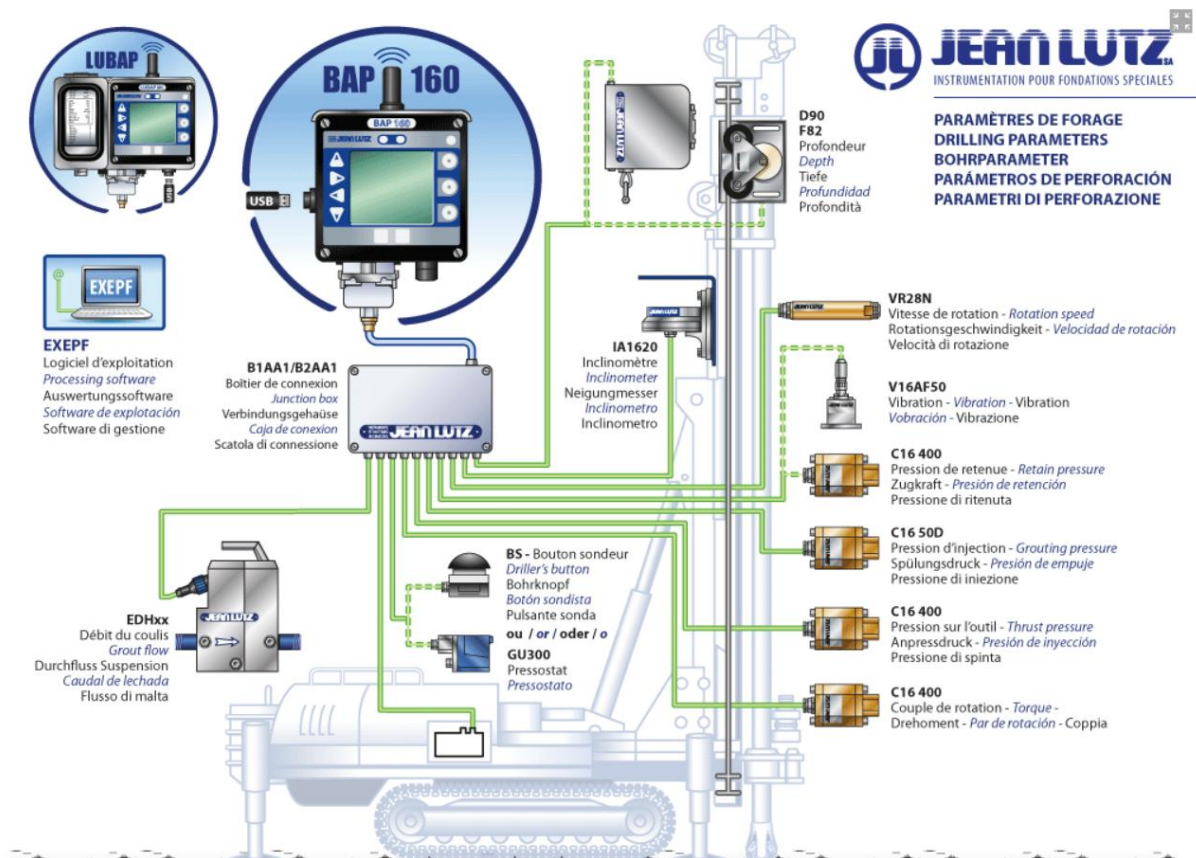
1.3. Puurparameetrite reaalaajas jälgimine ning salvestamine

Puurmasinaid e. puuragregaate on võimalik varustada puurparameetrite reaalaajas jälgimise ning salvestamise võimalustega, mis on kiirelt arenev valdkond. Reaalaajas puurimisparameetrite jälgimine annab operatiivse võimaluse puurimistööde käigus läbindamiskiiruse optimeerimiseks ja rikete võimalikult kiireks avastamiseks. Andmete salvestamine annab täiendavaid võimalusi hilisemaks puurimistöö analüüsiks.

Puurimisparameetrite salvestamine (inglise k. *real time monitoring and recording of drilling parameters*, **MWD** – *Measuring While Drilling* – **DPR** – *Drilling Parameter Recording*) on informatsioonitalletussüsteem, mis jälgib, mõõdab ning salvestab erinevaid puurimisalaseid parameetreid. Üldiselt mõõdetakse, jälgitakse ja salvestatakse geoloogilise südamikpuurimise puhul selliste süsteemidega kuni kaheksat parameetrit (Smith, 1994), mis on järgnevalt välja toodud.

1. Puurvedeliku rõhku puurkolonnis.
2. Suhtelist jõumomenti hüdrostsüsteemi rõhuna, mida rakendatakse puurpuurkolonni pööramiseks.
3. Puurkolonnile vertikaalselt alla rakendatav suhtelist survet (inglise k. *thrust pressure*) hüdraulikasüsteemi rõhuna – surumissurve.
4. Puurimise kiirust e. penetratsioonikiirust, e. läbistamiskiirust e. läbindamiskiirust.
5. Suhtelist õlirõhu survet hüdraulikasüsteemis puurkolonni tagasihoidmiseks “tagasihoidmisurvet” – (inglise k. *retaining pressure*).
6. Tagasipeegelduvaid vibratsioone.
7. Ühe kindla ühikväärtusega sügavuse puurimiseks vajaminevat aega.

Puurimisparameetrite salvestamisel saadud andmeid saab kasutada puurimistöö käigus esialgseks geoloogiliste formatsioonide eristamiseks, kavitatsioonide leidmiseks ja puurimistööde käigus tekkivate vigade kiireks avastamiseks ning ennetamiseks. Hiljem saab salvestatud andmeid kasutada näiteks edaspidiste puurimistööde optimeerimiseks.



Joonis 2. Valistre uuringuruumi puurimistööde ajal oli puuragregaat Massenza MI8 varustatud Jean-Lutz Bap-160 puurimisparameetrite talletussüsteemiga (data-logger) ning järgnevate anduritega: sügavuseandur F82, pöördekiiruse andur VR28N, uhtevedeliku surveandur C16 50D, Puurkolonni surumissurve (thrust pressure) andur C16 400, jõumomendi surveandur C16 400, (El Didi Group 2020).

1.4. Paekivi kui täitematerjali purunemiskindluse määramine Los Angeles'e katse meetodil

Materjali purunemiskindlus Los Angeles'e katse meetodil on üldjuhul peamine kriteerium killustiku külmakindluse peenosise, koostise ning tera kuju plaatsusteguri kõrval, mille alusel määratakse karbonaatkivimi sobivus kasutuselaks (Amirkhanian ja Kaczmarek, 1991; Keskkonnaminister, RT I, 19.12.2018, 28; Majandus- ja Taristuminister, RT I, 08.04.2016, 4).

Los Angeles'e (L.A.) katse meetodil purunemiskindluse määramine on standardne viis ning hetkel maailmas enimakasutatav meetod granulaarse kivimaterjali purunemiskindluse testimiseks (Mohajerani, Nguyen, Tanriverdi ja Chandrawanka, 2017). Meetod võeti kasutusele 1937. aastal Ameerika Ühendriikides ning see

asendas suuresti varasemalt kasutatud Deval katse. Ehitusmaterjali purunemiskindlusest oleneb paljuski teekatete eluiga. L.A. katse peamisteks miinusteks võib lugeda rahalist kulu ning suhteliselt suurt vajamineva materjali hulka (Mohajerani, jt, 2017).

L.A. kao (%) e. teguri määramiseks läheb tarvis L.A.-katseseadet (katsetrumlit), standardseid teraskuule (kuulide arv sõltub kasutatud standardist), kindlate avadega sõelu (oleneb kasutatud standardist, nn tavaliselt 1,6; 10; 11,2 (või 12,5); 14 mm) kaalu ning kuivatuskappi. Minimaalne L.A. katse jaoks vajalik proovimaterjali kogus on üldjuhul 5 kg.

L.A. meetodil täitematerjali purunemiskindluse katse põhimõtte seisneb selles, et purustatud, pestud, kuivatud, kaalutud kindla fraktsioonilise koostisega täitematerjali proovi pööratakse standardises trumlis koos standardsete teraskuulidega kindel arv pöördeid. Peale pööramise lõpetamist määratakse materjali jääk üldjuhul 1,6 mm avadega sõelal. Saadud tulemus – L.A. tegur e. L.A. kadu (%) on massi kao protsent esialgselt sõelutud proovikaalust ning esitatakse lähima täisarvuni ümardatult.

Eesti Vabariigis kehtib antud töö valmimise hetkel keskkonnaministri määrus „Üldgeoloogilise uurimistöö 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“. Määrus sätestab 7. peatükis karbonaatkivimi uurimise ja maavarana arvele võtmise nõuded: „kõrgemargilise ehituslubjakivi ja kõrgemargilise ehitusdolokivi puhul on purunemiskindluse kategooria Los Angelese katsel 30 või väiksem ja külmakindluse kategooria kuni F2 ning madalamargilise ehituslubjakivi ja madalamargilise ehitusdolokivi purunemiskindluse kategooria on Los Angelese katsel 31–35 ning külmakindluse kategooria kuni F4“. (Keskkonnaministri määrus, RT I, 19.12.2018, 28)

Samuti määrab majandus- ja taristuministri määrus „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ teetöödel kasutatava ehitusmaterjalile esitatud kvaliteedinõuded. Määrus sätestab, et „killustikmastiks asfaltbetoonsegu skelett koostatakse killustikust, mille purunemiskindluse kategooria on $\leq LA_{20}$. Kruusatee katte puhul kasutatava jämetäitematerjali purunemiskindluse kategooria peab olema vähemalt LA_{35} (*Los Angeles*’i tegur ≤ 35)“. Tee alustäite ehitamise puhul „peab jämetäitematerjali

purustatud pindadega terade sisaldus vastama vähemalt kategooriale C 50 ja purunemiskindluse maksimaalväärtuse kategooria peab olema vähemalt LA40". (Majandus- ja tartistuministri määrus, RT I, 08.04.2016, 4)

Eestis ja Euroopa liidus on hetkel kehtiv Euroopa standard EVS-EN 1097-2:2020 – „Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine“. Nimetatud standardi „Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid“ sätestab L.A. teguri määramise kehtiva standardse metoodika. Kõnealune standard kirjeldab Los Angelese katset kui põhimeetodit, mida kasutatakse jämetäitematerjali (standardi põhiosa) ja raudtee ballastina kasutatava täitematerjali purunemiskindluse määramiseks tüüpkatsete ja lahkarvamuste puhul. Standard kirjeldab, et muudel juhtudel, näiteks tehase tootmisohjes, võib kasutada muid meetodeid juhul, kui eelnevalt on kindlaks määratud kasutatava meetodi suhestumine etalonmeetodiga. Käesolev Euroopa standard rakendub ehituses kasutatavatele looduslikele, tööstuslikult toodetud ja taaskasutatavatele täitematerjalidele. (EVS-EN 1097-2:2010; Euroopa standard)

1.5. Valistre uuringuruumi varasem uuritus ja geoloogiline ehitus

2019. aasta suvel puuriti 16 puurauku Pärnumaal Valistre uuringuruumis geoloogilise uuringu läbiviimise tarbeks, millest antud magistritöö käsitleb seitset puurauku (Tabel 2), täpsemalt PA-6; PA-7; PA-12, PA-13; PA-14; PA-15 ja PA-16. Valistre uuringuruum asub Pärnu maakonnas Halinga vallas Valistre külas (Joonis 4).

Pärnumaal, Valistre uuringuruumi läheduses on varasemalt tegeldud dolomiitide otsinguga. 1982. – 1983. aastal toimusid otsingud Sepamaa ja Anemal ning Halinga piirkonnas (Barankina ja Predein, 1983). 1980-ndatel oli Anemala maardla piirkonnas ainus, kus toodeti paekivist kõrgemargilist ehituskillustikku. Täiendavate varude leidmiseks on varasemalt läbi viidud uuring Anelema maardlast lõuna pool Halingas. Piirkonda uuriti ca 15 km² alal ja puuriti 16 puurauku kuni 25 m sügavuseni. Kõnealuste uuringu tulemuste läbilõikes kirjeldati Jaagarahu lademesse kuuluvat mikro- kuni pisikristallilist dolokivi. Halinga uuringutööde puurauk 2 jääb Valistre uuringuruumi läänepiirist 175 m kaugusele, puurauk 1 ~900 m kaugusele edelasse, ülejäänud puuraugud jäävad põhja- ja idakaarde – Valistre uuringuruumist kaugemale kui 1,5 km (Joonis 3). (Tuuling, Mõttus ja Uppin, 2020)

Valistre uuringuruumi teenindusala 4,5 km põhja poole jääb Anelema dolokivi-maardla (Joonis 3). Anelema leiukoht avastati ehitusmaterjalide otsingutööde käigus 1959. a (Jalakas, 1960). Moderniseeritud uuringuaruannetes on Anelema maardla kivimit kirjeldatud Jaani lademe Anelema kihistu dolokivina, kuid varasemalt on karjääriseina ülaosas paljanduvaid kivimeid kirjeldatud kui Jaagarahu lademe Muhu kihistusse, ning alaosa kivimeid Jaani lademe Anelema kihistusse kuuluvaks. Ka geoloogilise kaardistamise andmeil jääb Anelema maardla Muhu kihistu avamusele. (Tuuling jt, 2020)



Joonis 3. Valistre uuringuruumi teenindusala geoloogilise uurituse plaan. (Tuuling jt, 2020)

Valistre uuringuruumist 2,3 km kagusse jääb Are kruusamaardla (Joonis 3), kus põhi-
maavaraks on ehituskruus ja kaasnevaks maavaraks täiteliiv. Sealsete uuringutööde
käigus aluspõhjakivimeid 2019. aasta seisuga avatud pole (Tuuling jt, 2020).

Valistre uuringuruum paikneb Siluri ladestu avamusel. Aluspõhjakivimite pealispinna
absoluutne kõrgus jääb uuringuruumis valdavalt ~15,5 – 16,5 m vahemikku.
Geoloogiline ehitus (Tabel 1) on Valistre uuringualal järgnev: pinnakatte moodustab
muld (Q_{IV}) ning kvaternaari glatsiofluviaalsed setted (Q_{IIIgl}), aluspõhja moodustab
Jaagarahu lademe Muhu kihistu (S_{2mh}), Jaani lademe Jaani kihistu (S_{2jn}) ning
Adavere lademe Velise kihistu (S_{1vl}). (Tuuling jt, 2020)

Valistre uuringuruumi puuraugud jäävad moreentasandikule, kus kvaternaarisetete
paksus on valdavalt üle 4 m, ulatudes PA-16 puhul maksimaalselt 6 meetrini. Väiksem
kattekihi paksus esineb PA-15 puhul (Tabel 1). (Tuuling jt, 2020)

Kogu Valistre uuringuruumis katab dolokivi keskmiselt 0,5 m paksune turbasegune
kasvukiht, mis varieerub 0,3 m paksuselt kuni 0,8 m paksuseni. Moreenkihi paksus on
keskmiselt 3,6 m varieerudes 1,2 m paksuselt kuni 3,6 m paksuseni. (Tuuling jt, 2020)

Litoloogiliselt on uuringuruumi kivim muutlik, on oletatud, et tõenäoliselt on piirkonna
setted kuhjunud üleminekufaatsiese tingimustes, ning sellest on tingitud ka eriilmeliste
dolokivide vaheldumine puurauguti. (Tuuling jt, 2020)

Valistre uuringuruumi läbilõike ülemise osa moodustab Siluri ladestu Wenlock'i
ladestiku Jaagarahu lademe Muhu kihistu (S_{2mh}) dolokivi, mis lasub vahetult
kvaternaari setete all. Muhu kihistut saab eraldada kaheks erinevaks litoloogiliseks
kompleksiks. Neist esimene kompleks on domeriidi kelmete ja õhukeste savika dolokivi
vahekihtidega dolokivi, ning teine kompleks mikro- kuni pisikristalliline tumedam hall
dolokivi. (Tuuling jt, 2020)

Muhu kihistu lamamiks on Siluri ladestu Wenlock'i ladestiku Jaani lademe Jaani kihistu
(S_{2jn}) savikas dolokivi. Kihistute piir on üleminekuline – Muhu kihistu allosas lasuv
savikas dolokivi asendub järk-järgult Jaani kihistu savise dolokivi ja domeriidiga. Jaani
kihistule tüüpilist domeriiti esineb Valistre uuringuruumi puuraukudes vaid intervalliti
ning küllaltki piiratud paksuses. (Tuuling jt, 2020)

Jaani kihistu alumisel piiril on peaaegu kõigis puursüdamikes fikseeritav püriitse impregnatsiooniga katkestuspind, mis jääb 16,6 m kuni 22.9 m sügavusele. Kirjeldatud katkestuspind on Jaani ja Velise kihistute ning samas ka Llandovery ja Wenlocki ladestike piiriks. (Tuuling jt, 2020)

Siluri ladestu Llandovery ladestiku Adavere lademe Velise kihistu (S₁vl) on esindatud savika, halli, peene- kuni pisikristallilise, keskmisekihilise, lainjaskihilise kuni poolmugulja dolokiviga. Savika dolomiidi ja domeriidi vahekihid on lainjad, hargnevad, valdavalt 1 – 2 cm paksused, harvemini esineb paksus kuni 5 cm. Kihtide kontaktid on valdavalt teravad. Hajusalt esineb peenpüriiti. Puuraukudes PA-7 ja PA-16 Velise kihistut ei avatud. (Tuuling jt, 2020)

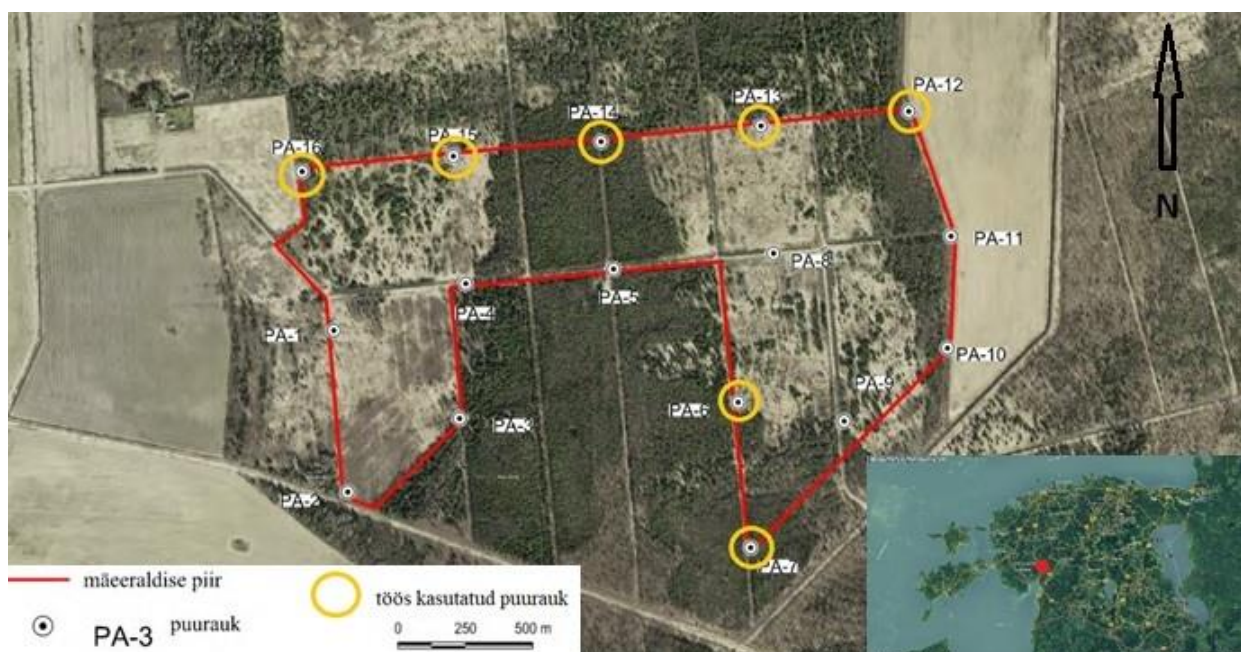
Tabel 1. Valistre uuringuruumi kõigi puuraukude põhjal üldine geoloogiline ehitus (Tuuling jt, 2020).

Nimetus	Geoloogiline indeks	Kihi paksus (puuraukudes fikseeritud), m		
		miinimum	maksimum	keskmine
Kasvukiht	Q _{IV}	0,3	0,8	0,5
Liivsavimoreen	Q _{gm}	1,2	5,2	3,6*
Kattekiht kokku		1,7	6,0	4,1
Dolokivi, pisi-, mikrokristalliline	S ₂ mh	3,1	8,6	6,2
Dolokivi savikas ja püriidikirjaline	S ₂ jn	8,1	10,6	9,9
Dolokivi savikas, lainjaskihiline	S ₁ vl	0,0	4,9	2,0

2. Materjalid ja metoodika

Käesoleva uurimustöös kasutatud andmed koguti 2020. a. valminud Valistre uuringuruumi geoloogilise uuringu teostamise raames. Uuringu läbiviijaks oli OÜ Inseneribüroo Steiger. 2020. a. valminud Valistre geoloogilise uuringu tellijaks oli OÜ Merko kaevandused, kellega on töö autoril olemas käesolevas uurimustöös kasutatud Valistre geoloogilise uuringu raames kogutud andmete kasutamiseks asjakohane kooskõlastus.

Puurimistööd viidi läbi 2019. a juunis ja juulis Pärnumaal Valistre dolokivi kui maavara geoloogilise uuringu raames. Puurimise käigus puuriti 16 puurauku (Joonis 4), millest seitsme puuraugu andmeid on kasutatud käesolevas töös (Tabel 2). Puuraugud valiti lähtudes maksimaalsest olemasoleva tervikliku informatsiooni hulgast. Valikusse osutusid puuraugud, kus lisaks puurimisparameetritele olid teostatud ka L.A. teguri määrangud ning kivimi lõhelisuse (RQD) mõõtmised.



Joonis 4. Valistre geoloogilise määraldise asukohaskeem puuraukude asukohtadega, kuhu on märgitud puuraugud, mille andmeid kasutatakse käesolevas uurimustöös. (Tuuling jt, 2020 järgi)

Tabel 2. Käesolevas magistritöös kasutatud puuraukude koordinaadid L-EST97 süsteemis ning nende vastavad stratigraafilised piirid. Q_{IV} – muld; Q_{IIIgl} – kvaternaari setted: kruus, liiv; S_{2mh} – Muhu kihistu; S_{2jn} – Jaani kihistu; S_{1vl} – Velise kihistu. (Tuuling jt, 2020)

Puurauk		PA-6	PA-7	PA-12	PA-13	PA-14	PA-15	PA-16
Koordinaadid	X	6493594,42	6493322,1	6494133,42	6494096,4	6494076,45	6494044,73	6494017,7
	Y	532519,79	532545,03	532839,3	532567,75	532267,65	531997,56	531716,12
Strat. indeks	Q_{IV}	0,0- 0,5	0,0- 0,8	0,0-0,5	0,0-0,5	0,0-0,5	0,0-0,5	0,0-0,8
	Q_{IIIgl}	0,5- 4,4	0,8- 4,3	0,5-4,3	0,5-4,8	0,5-3,0	0,5-2,5	0,8-6,0
	S_{2mh}	4,4-8,9	4,3-12,5	4,3-9,5	4,8-7,9	3,0-7,2	2,5-10,2	6,0-13,4
	S_{2jn}	8,9-18,9	12,5-21,5	9,5-19,6	7,9-18,5	7,2-16,6	10,2-20,5	13,4-21,5
	S_{1vl}	18,9-21,5		19,6-21,5	18,5-21,5	16,6-21,5	20,5-21,5	

Geoloogiliseks rootorpuurimiseks kasutati vastavalt kohandatud puurmasinat Massenza MI8, mis oli varustatud Jean Lutz BAP-160 puurimisparameetrite talletussüsteemiga (inglise k. *data logger*).

Puurimisprotsessi käigus mõõdeti ja salvestati järgmised parameetrid otseste mõõteväärtustena: sügavus (täpsusega 1 cm), aeg (1 cm läbistamiseks), puurkolonni pöörlemiskiirus (RPM – pööret minutis) ning uhtvedeliku puurkolonni pumpamissurve.

Puuragregaadi hüdraulikaõli süsteemi voolikutesse paigaldatud anduritega mõõdeti kaudsete parameetrina vastavale puurmasina hüdroajamile mõjunud õlirõhku, mida rakendati puurimisel puurkolonni pööramiseks (inglise k. *torque*) ja „tõukejõu tekitamiseks“ (inglise k. *thrust pressure*). Saadud kaudsed rõhuväärtustest arvutati käesoleva töö käigus hiljem ümber vastavalt jõumomendiks ja jõuks – puurkolonnile mõjunud jõumomendiks ning puurkroonile risti (inglise k. *WOB – weight on bit*) mõjunud jõuks. Arvutustel lähtuti puuragregaadi tehnilistest parameetritest ja peamootori võimsusest, milleks konkreetse Massenza MI8 puuragregaadi puhul oli 115 kW.

Valistre uuringuruumis toimunud puurtöödel kasutati uhtvedelikuna looduslikku põhja- ja pinnavett. Kõik Valistre puurimised puuriti rahvusvaheliselt standardse PQ3 diameetriga, mille puhul puuritava puursüdamiku ehk sisemise puurtoru sisemine diameeter on 83 mm ning välistoru väline diameeter ehk puuraugu diameeter on 122,6 mm. PQ3 diameetri puhul kasutakse puurimisel kolmekordse toru süsteemi.

Paekivi kui ehitusmaterjali laborikatsed viidi läbi OÜ Inseneribüroo Steiger laborites. Purunemiskindlus L.A. meetodil määrati EVS-EN 1097-2:2010, EAK standardile vastavalt. Puurimistööde käigus mõõdeti käesolevas uurimustöös kasutatavate puuraukude puursüdamiku lõhelisus RQD meetodikal.

Andmetöötluks ja seoste selgitamiseks kasutati puurimisandmestikust saaduid parameetreid, L.A. purunemiskindluse katsete tulemusi, puuritud kivimi lõhelisus (RQD) ning mehaanilise erienergia (MSE) vahel graafilist korrelatsioonimeetodit.

2.1. Mehaaniline erienergia

Mehaaniline erienergia (MSE – inglise k. Mechanical Specific Energy) defineeriti rootorpuurimise puhul esmaselt 1965. aastal Teale'i poolt kui kaevandatud kivimi ruumala kohta tehtud mehaaniline töö. MSE parameeter loodi eesmärgiga kvalitatiivselt hinnata puurimistööde efektiivsust st. väiksem erienergia kulu kajastab paremat puurimisefektiivsust (Teale, 1965).

Käesolevas töös kasutati MSE ja sellega seotud parameetrite arvutamiseks 2018, aastal Prasad'i jt. poolt geoloogilise südamikpuurimise jaoks kohandatud valemeid (Valem 1 ja 2). Kui valem 1 väljendab geoloogilise südamikpuurimise jaoks kohandatud mehaanilist erienergiat (MSE), siis valem 2 täpsustab puurkrooni lõikepinna pindala arvutamist (Prasad jt. 2018). Antud valemities tähistab OD puurkrooni välisdiameeterit (m) ja ID on puurkrooni sisediameeter (m). Mehaanilise erienergia (MSE) mõõtühikuks SI süsteemis on MPa, puurkroonile risti mõjuv jõud (W) on N, puurkolonnile rakendatav jõumoment (T) on Nm, puurkrooni lõikepinna pindala (Ab) on m² ja läbindamiskiirus (ROP) on m/h.

Siinkohal tasub märkida, et MSE mudeli põhjal arvutatuid väärtuseid tuleks vaadelda kindlasti kvalitatiivsete väärtustena, kuna kaudsetest puurmasina hüdraulikasüsteemi rõhuparameetritest absoluutsete parameetrite arvutamisel puudub piisava täpsusega meetod, et seda käsitleda kvantitatiivse väärtusena. (Samsuri, 2018)

Eelkõike kajastab MSE puurimise suhtelist puurimisefektiivsust (Teale, 1965).

$$\text{Mehaaniline erienergia, } MSE = \frac{WOB}{Ab} + \frac{2 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{Ab \cdot ROP}$$

(Valem 1)

$$\text{Puurkrooni lõikepinna pindala,} \quad Ab = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (OD^2 - ID^2)$$

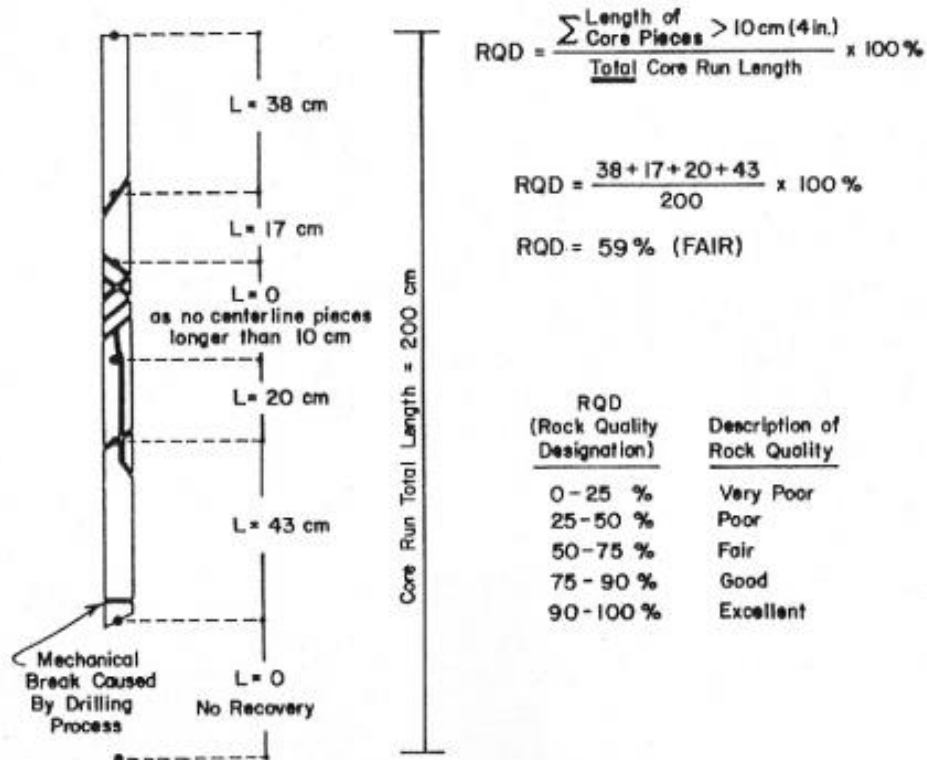
(Valem 2)

2.2. Kivimi lõhelisus

Kivimi lõhelisus (RQD – Rock Quality Designation) on mõõde kivimi lõhelisusest, mis saadakse puuritud puursüdamiku lõhede ja tükide mõõtmisega. RQD väljendub kui kui üle 10 cm pikkuste puursüdamiku tükide protsendiline osakaal puuritud reisi pikkuse kohta. RQD (%) mõõtmisel lähtutakse piki puursüdamiku juppide mõõtmisel puursüdamiku keskpaigast ning murdepindade/lõhede keskpaikadest. Juhul kui puursüdamiku üksiku tüki pikkus on pikem kui 10 cm, kuid kivimmaterjalil puudub kindel kõvadus, näiteks on tegemist plastse saviga, jäetakse selline tükk lugemata. Antud parameetri alusel saab puuritud kivimmassi liigitada kõrge kvaliteediga kivimiks, juhul kui RQD on suurem kui 75% või halva kvaliteediga kivimiks, juhul kui RQD väärtus on väiksem kui 50%. (Deere. 1964)

RQD on baasparameeter enimlevinud kivimmassi klassifikatsioonisüsteemides – RMR (*Rock Mass Rating system*) ja Q-süsteemis. RQD on vajalik parameeter näiteks tunnelite kandevõime arvutamisel (Deere ja Deere, 1988).

DEERE AND DEERE ON ROCK QUALITY DESIGNATION INDEX



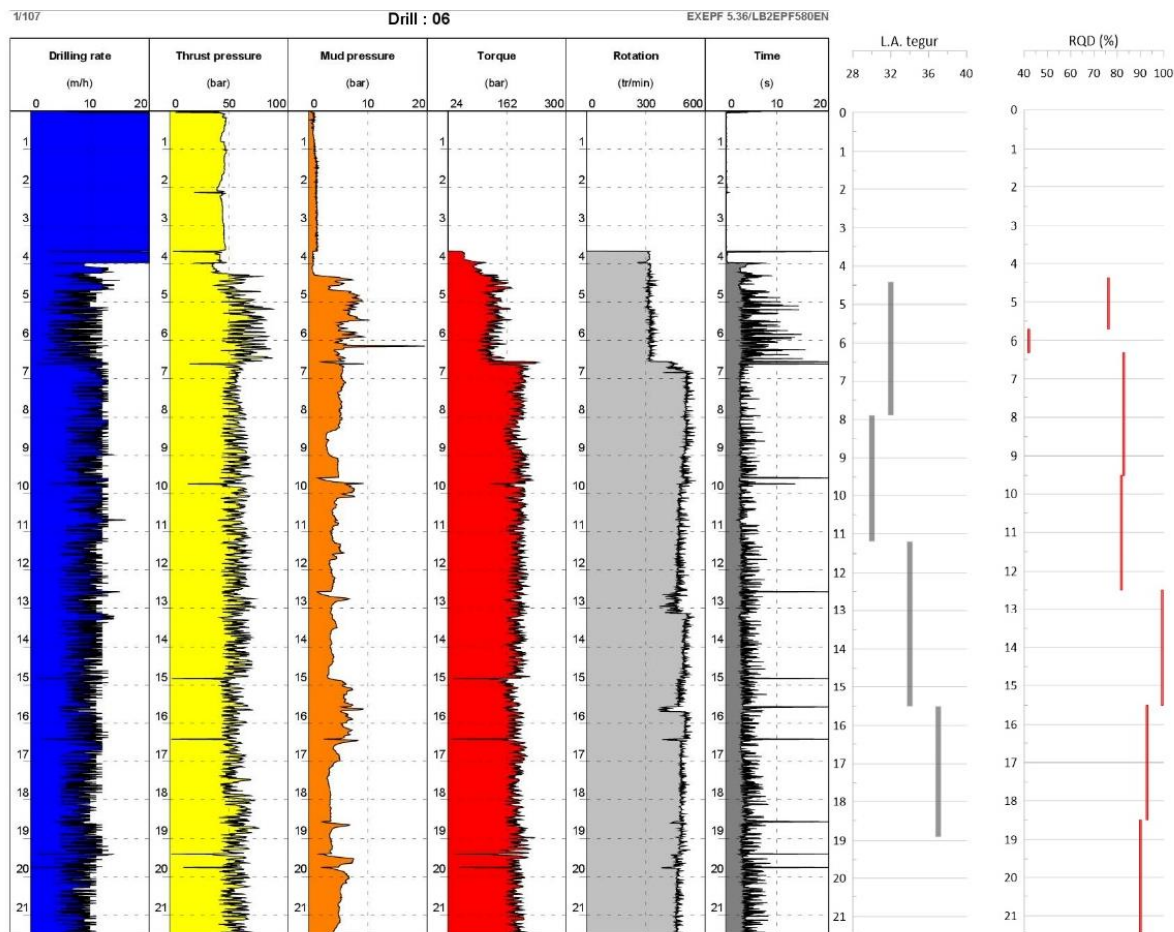
Joonis 5. Kivimi lõhelisuse (RQD) visualiseeritud mõõtmis- ja arvutsuprotseduur (Deere ja Deere, 1988)

3. Tulemused ja arutelu

Uurimustöö tulemused on välja toodud joonistel 6 kuni 9 ja tabelites 3 ja 4. Samuti on puuraukude puurimisel saadud algandmed esitatud graafilisel kujul Lisas 1 (Joonistel 11 – 17).

Valistre uuringualal puuritud puuraugud, mida on kasutatud käesolevas uurimistöös ulatuvad maapinnast sügavuseni kuni 21,50 m. Puurimistel kogutud detailne puuraugu puurimisparameetrite (nt. läbistamise kiirus, puurkolonni pöörlemiskiirus, uhetvedeliku surve jne) andmestik oli kogutud 1 cm täpsusega, ning koosnes enam kui 2000 andmerekast. Kogutud andmestik on visualiseeritud puuraugu 6 näitel joonisel 6 ning lisas 1 joonistel 11 – 17. Selgelt eristub antud andmestiku põhjal välja uuringuala pudedate setete kiht (nt. PA-6 puhul oli kvaternaari setete paksuseks 4,4 m). Karbonaatses aluspõhjas läbistamise kiirused langevad ja vastavalt suurenevad

puurkolonni pöörlemiskiirus, puurkolonnile mõjunud surumisurve ja jõumomenti tekitav surve. Vastavad näitajad aluspõhja läbistamisel oluliselt ei muutunud. Sarnased trendid on jälgitavad kõikides uuritud puuraukude puurimisparameetrite andmestikes (Joonis 6; Lisa 1, Joonised 11-17).

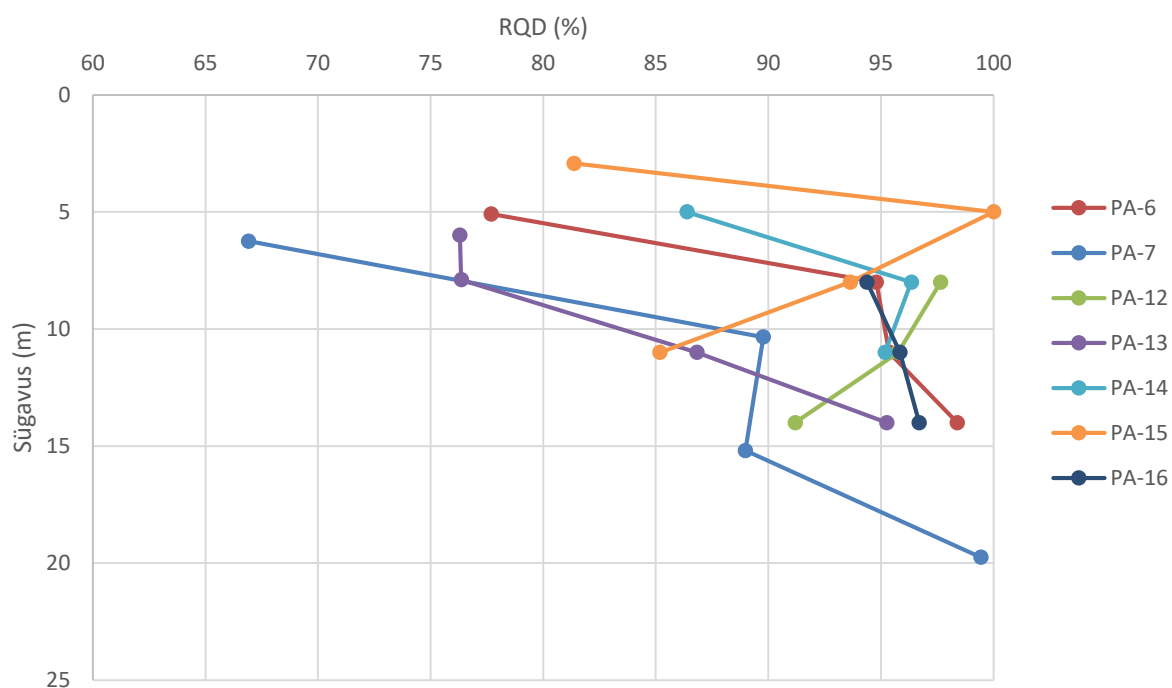


Joonis 6. Valistre PA-6 puurimisparameetrid kõrvutatult vastava L.A. katsete ja RQD mõõtmistulemustega.

3.1. Kivimi lõhelisus (RQD)

RQD meetodil kivimi lõhelisus (%) väljendab südamikpuurimisel puuritud kivimi suhtelist lõhelisust puuritud reisi kohta. RQD mõõtmiste tulemused on välja toodud joonisel 7 ning lisas 1 tabel 4. Antud töö jaoks valitud puuraukude intervallides on mõõdetud RQD keskmiselt 88% ja valdavalt üle 90%, millest viimane on RQD

definitsioonist tulenevalt suurepärase kvaliteediga kivimi alumine piirväärtus ning hea kvaliteediga kivimi ülemine piirväärtus.



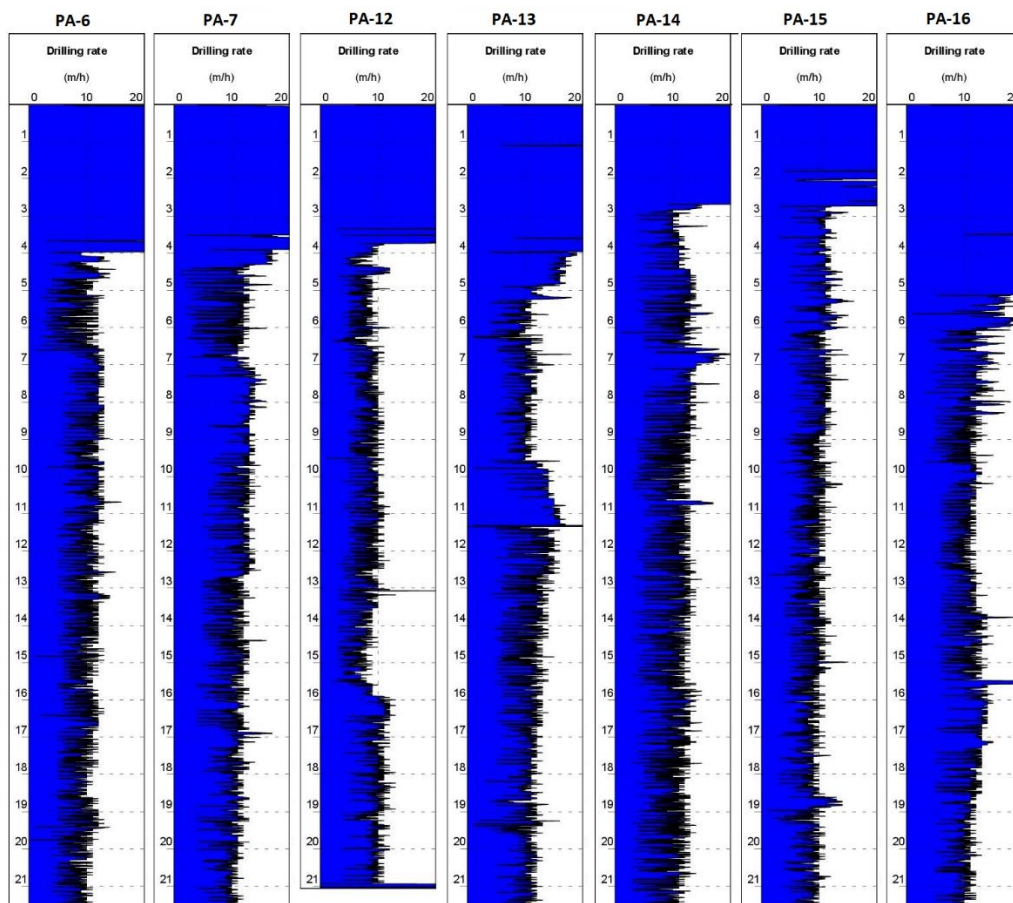
Joonis 7. Mõõdetud kivimi lõhelisus (RQD) uuritud puuraukudes prooviintervalli keskmisel sügavusel.

Tabel 3. Käesolevas töös kasutatud Valistre uuringuruumi L.A. katseproovide intervallide alusel keskmistatud andmed koos MSE ja selle tarbeks arvutatud puurimisparameetritega.

	Sügavus	ROP	Thrust pressure	Uhtevedeliku surge	RPM	Jõumomendi surge	Puurkolonnile rakendatav moment	Aeg	WOB	WOB	L.A. tegur	L.A. proovi intervall	L.A. proovi pikkus	MSE
	(m)	(m/h)	(bar)	(bar)	(tr/min)	(bar)	(Nm)	(s)	(bar)	(kN)	(%)	(m)	(m)	(MPa)
PA-6	6,15	9,9	59,5	6,1	388,1	156,7	1944	4,5	2252,6	15,75	32	4,4-7,9	3,5	113,5
	9,55	11,0	56,4	4,5	488,9	189,3	1543	3,6	2249,6	15,88	30	7,9-11,2	3,3	102,5
	13,35	9,9	55,9	4,3	477,0	184,8	1582	4,2	2249,0	16,62	34	11,2-15,5	4,3	114,4
	17,20	9,4	55,0	4,7	480,9	183,2	1569	4,7	2248,1	17,29	37	15,5-18,9	3,4	120,2
PA-7	6,25	11,3	64,5	6,8	385,8	158,2	1955	4,4	2257,9	16,77	27	4,3-8,2	3,9	100,3
	10,35	12,1	59,9	8,4	463,2	185,3	1629	3,2	2253,0	16,75	34	8,2-12,5	4,3	93,8
	15,20	10,6	62,6	7,8	443,9	190,6	1699	3,9	2255,6	18,36	38	12,5-17,9	5,4	107,2
	19,76	10,1	69,7	9,0	429,7	194,9	1756	4,0	2262,7	20,79	40	17,9-21,5	3,6	112,2
PA-12	7,80	8,5	51,5	4,6	337,2	135,0	2237	4,7	2244,8	14,51	32	4,3-11,3	7	132,3
	13,40	7,8	57,8	5,8	338,5	144,1	2229	5,4	2250,7	17,00	35	11,3-15,5	4,2	143,9
	17,50	9,8	71,8	7,3	392,4	197,1	1922	4,3	2265,0	20,70	32	15,5-19,5	4	115,4
PA-13	4,95	12,3	55,4	4,2	425,7	151,2	1772	3,1	2248,6	14,67	32	4,8-5,1	0,3	92,0
	7,30	10,1	63,3	7,0	398,2	168,3	1895	4,4	2256,4	16,76	33	5,1-9,5	4,4	112,2
	11,59	14,2	73,2	6,5	420,3	236,0	1795	3,6	2266,1	19,68	37	9,5-13,7	4,2	80,7
	16,10	10,8	73,9	7,5	424,2	216,7	1778	3,8	2266,3	20,81	35	13,7-18,5	4,8	105,8
PA-14	5,10	11,8	63,6	6,4	450,6	181,1	1674	3,8	2257,0	16,35	35	3,0-7,2	4,2	96,3
	9,35	11,0	65,1	8,0	439,1	181,4	1718	3,9	2257,9	17,58	34	7,2-11,5	4,3	103,5
	14,54	10,6	68,3	6,7	443,0	187,6	1703	4,1	2261,0	19,35	34	11,5-16,6	5,1	107,0
PA-15	5,00	15,3	56,1	6,0	429,0	172,2	1759	3,6	2249,6	14,82	32	2,5-7,5	5	74,6
	9,25	9,7	59,5	6,5	431,6	174,6	1748	4,1	2252,8	16,44	38	7,5-11,0	3,5	115,9
	13,85	8,9	60,9	7,8	441,2	173,4	1710	4,7	2254,1	17,73	46	11,0-16,7	5,7	127,0
	19,18	8,8	65,0	8,7	447,7	171,5	1685	4,7	2258,0	19,71	47	16,7-21,5	4,8	128,8
PA-16	8,26	11,4	60,0	4,9	368,1	152,1	2049	3,7	2252,9	16,32	34	6,0-10,5	4,5	99,2
	12,90	10,7	58,9	4,2	447,3	190,0	1686	3,7	2252,0	17,11	36	10,5-15,3	4,8	106,2
	18,44	13,8	70,5	6,4	448,2	213,2	1683	3,5	2263,5	20,65	38	15,3-21,5	6,2	83,3

3.2. Puurimiskiirus

Puurimiskiirus (inglise k. *rate of penetration* – ROP või *drilling rate*) ehk läbindamiskiirus ehk läbistamiskiirus näitab kui kiiresti läbistatakse kindel vahemaa kivimit ehk kui kiiresti suudetakse puurida mingisugune pikkus kivimit ajaühiku jooksul. Käesoleva töö raames L.A. purunemiskindluse katseintervallide järgi keskmistatud andmetes on puurimiskiirused erinevates puuraukudes sarnased, jäädes 7,8 m/h kuni 15,3 m/h olles keskmiselt 10,8 m/h (Tabel 3; Joonis 8). Puurimiskiirus oleneb eelkõige kasutatavast puurimistehnikast (puurpea tüüp ja diameeter, puuraugu parameetrid, puuragregaadi tehnilisest spetsiifikast, jne) ja puuritava kivimi füüsikalistest ja mehaanilistest omadustest (nt. kõvadus, plastsus, tihedus, poorsus, lõhelisus) ning puurimisalastest tövõtetest. Suurim osa puurimiskiiruse kujunemisel on siiski puurijal tulenevalt puuragregaadi käsitlemisest. Üldjuhul kehtib puurimistöödel siiski reegel, et puuritakse maksimaalse võimaliku kiirusega, mida puuritav kivimkeha spetsiifika, puuraugu parameetrid ning puurimistehnika võimaldab.

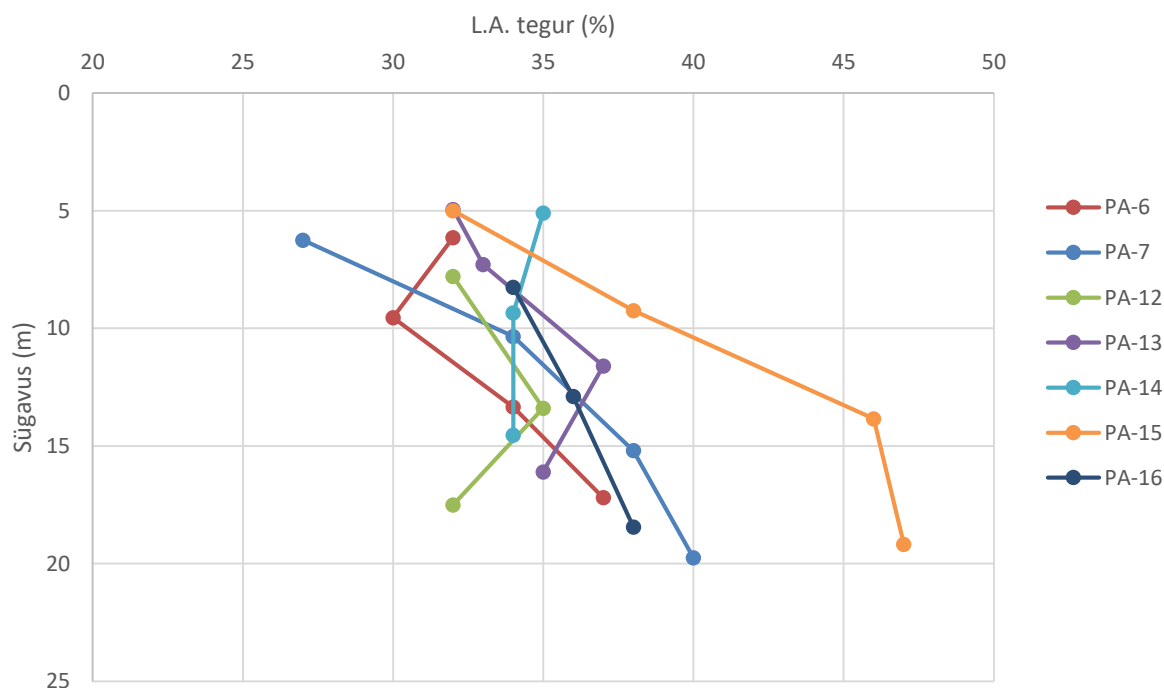


Joonis 8. Valistre geoloogise uuringu puuraukude läbindamise kiirused (m/h).

3.3. Los Angeles'e (L.A.) tegur

Töös kasutatud purunemiskindluse L.A teguri katseproovi intervallid olid määratud OÜ Inseneribüroo Steiger poolt läbi viidud ja 2020. aastal valminud Valistre geoloogilise uuringu raames.

L.A. katse meetodil materjali kaod (ehk L.A. tegurid) jäävad käesolevas töös kasutatud puuraukude puhul nende prooviintervallides 27% ja 47% vahele, olles puuraugu keskmiselt valdavalt 35% (Tabel 3; Joonis 9). Kesktlääbi kesiseimad – st. suurima L.A. kaoga puuraugud olid PA-16 ja PA-15 vastavalt 36% ja 41%. L.A. meetodil purunemiskindluse katsete tulemustest selgub, et Valistre dolokivi L.A. teguri väärtustest lähtuvalt oleks seda võimalik kasutada tee-ehitusel kasutatava täitedolokivi ning madalamargilise ehitusdolokivina, millede L.A. tegur on vastavalt üle 35% ja 31% kuni 35% (k.a.).

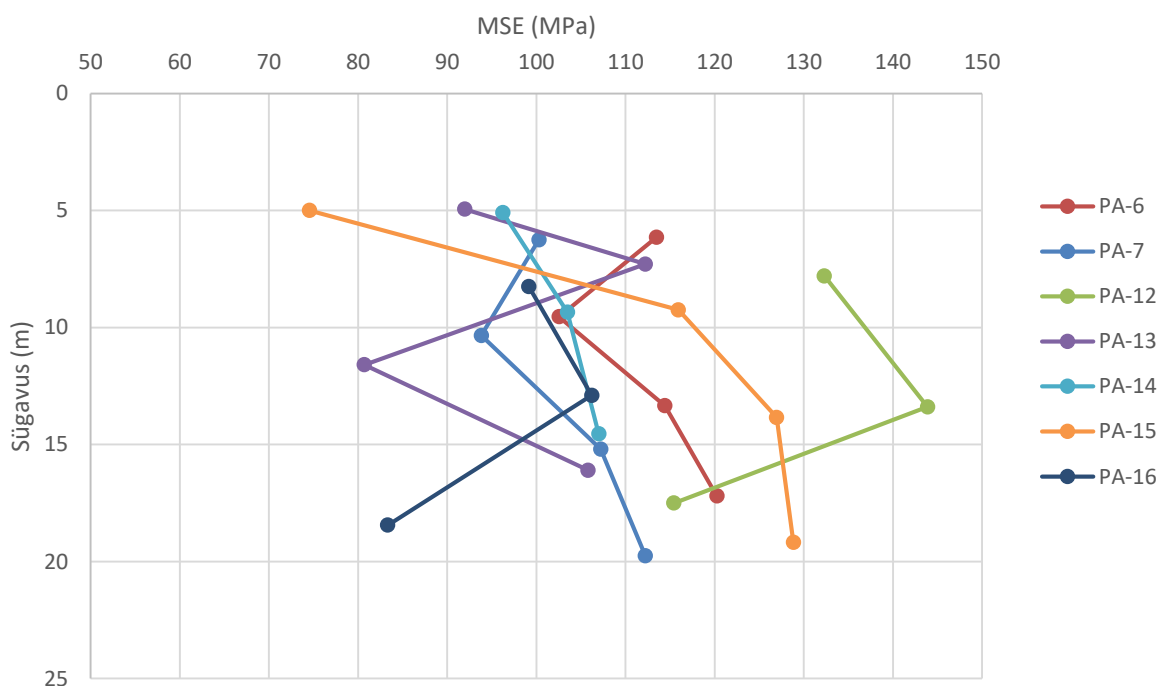


Joonis 9. Valistre dolokivi L.A. kadu uuritud puuraukudes prooviintervalli keskmisel sügavusel.

3.4. Mehaaniline erienergia

Selleks, et tagada andmete võrreldavus L.A. meetodil kivimi purunemiskindlusega oli vajalik puurmisandmestik keskmistada, mis antud töö kontekstis tähendas puurimisandmestiku keskmisdamist L.A. teguri katseproovide intervallide järgi. Keskmistatud andmestikule tuginedes arvutati mehaaniline erienergia (MSE kui mitmele puurimisparameetrile toetuv kombiparameeter). MSE on Teale'i poolt 1965. aastal rootorpuurimise tarbeks loodud mehaanilise erienergia (MSE – inglise k. *Mechanical Specific Energy*) parameeter, mida täiustas konkreetselt südamikpuurimise jaoks 2018. aastal Prasad jt. MSE on parameeter, mis näitab kvalitatiivset energia kulu, mis kulub rootorpuurimisel ruumala ühiku kivimi purustamiseks.

Mehaaniline erienergia (MSE) parameeter varieerub purunemiskindluse katseproovi järgi keskmistatud keskmise väärtusena 74,6 MPa kuni 143,9 MPa, olles keskmiselt 107,5 (Joonis 10; Tabel 3).



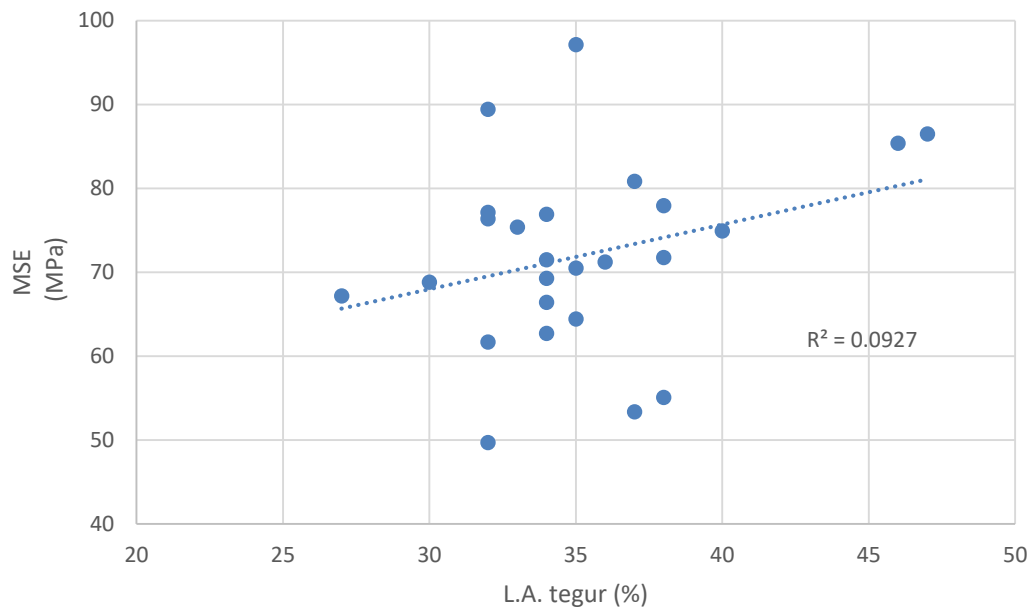
Joonis 10. L.A. katseproovi intervallide järgi keskmistatud mehaaniline erienergia (MSE) uuritud puuraukudes prooviintervalli keskmisel sügavusel.

3.5. Los Angeles'e katse kao sõltuvus puurimiskiirusest kivimi lõhelisusest ja mehaanilisest erienergiast

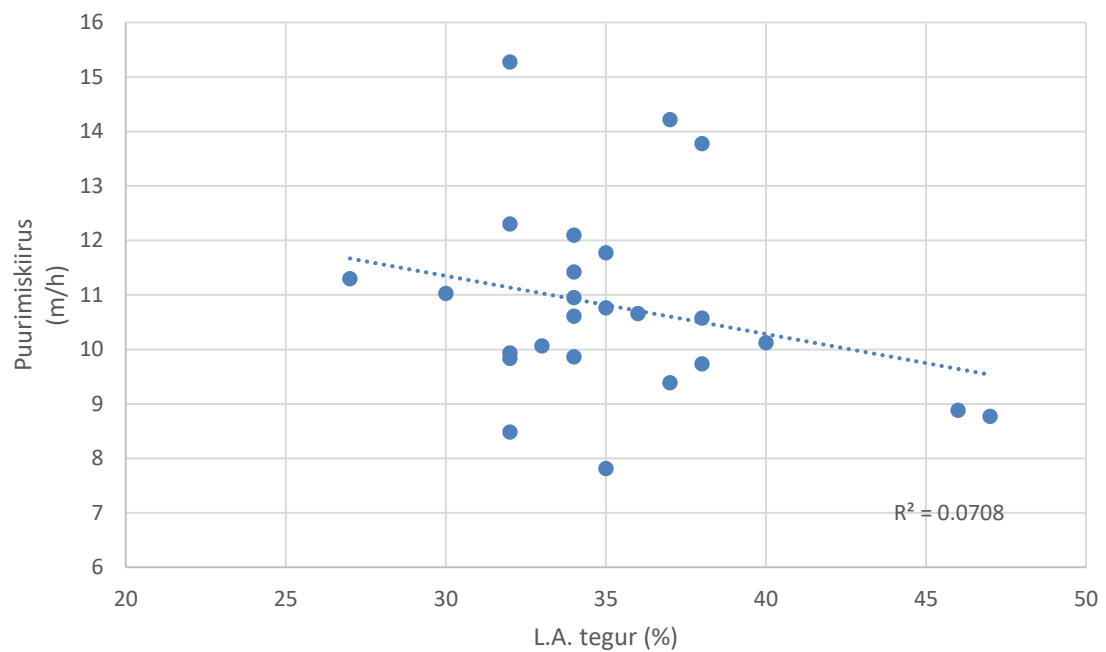
Kivimi lõhelisus RQD meetodil on ühe puurimise reisi kohta üle 10 cm pikkuste tükide protsendiline osakaal. Selline parameeter on aga suhteline ning esitatud normaliseeritud kujul, mis oleneb palju puurimisprotsessist. Pole teada varasemad mõrad kivimkehas ning kuhu puurimise käigus mõrad on tekkinud (RQD mõõtmine näeb ette arvestata ainult >10 cm pikkuseid tükke). Lisaks purustatakse L.A. meetodil purunemiskindluse määramiseks massiivne kivimkeha väiksemateks fraktsioonideks. Küll aga oleks RQD meetodil lõhelisust vale suhestada L.A. teguriga, mis otseselt ei pruugi olla üldsegi eelnevalt kirjeldatud kivimi mõrasuse tekke või olemasoluga seotud. Töö käigus uuriti ja leiti, et RQD meetodil mõõdetud kivimi lõhelisust ja L.A. tegurit ei saa otseselt suhestada.

Kõigi puuraukude L.A. teguri kadude ja mehaanilise erienergia (Joonis 11) vahel on korrelatsiooni kordaja (r^2) 0,0927. Sarnast tulemust näeb kõrvutades L.A. teguriga puurimiskiiruseid (Joonis 12), kus korrelatsiooni kordaja (r^2) on 0,0708.

Kuigi töö sissejuhatuses kirjeldatud hüpoteesidest võis uurimustöö eelselt eeldada, et MSE korreleerub paekivi puhul Los Angeles'e meetodil purunemiskindluse väärtustega, siis töö käigus selgus, et üldiseid korrelatsiooni Valistre uuringuruumi geoloogilise uuringu käigus kogutud puurimisandmete põhjal arvutatud MSE ja laboris testitud L.A. kao vahel ei eksisteeri (Joonised 11 ja 12).



Joonis 11. Graafikul toodud kõigi uuritu puuraukude MSE suhe L.A tegurisse.



Joonis 12. Graafikul toodud kõigi uuritud puuraukude puurimiskiiruse suhe L.A tegurisse.

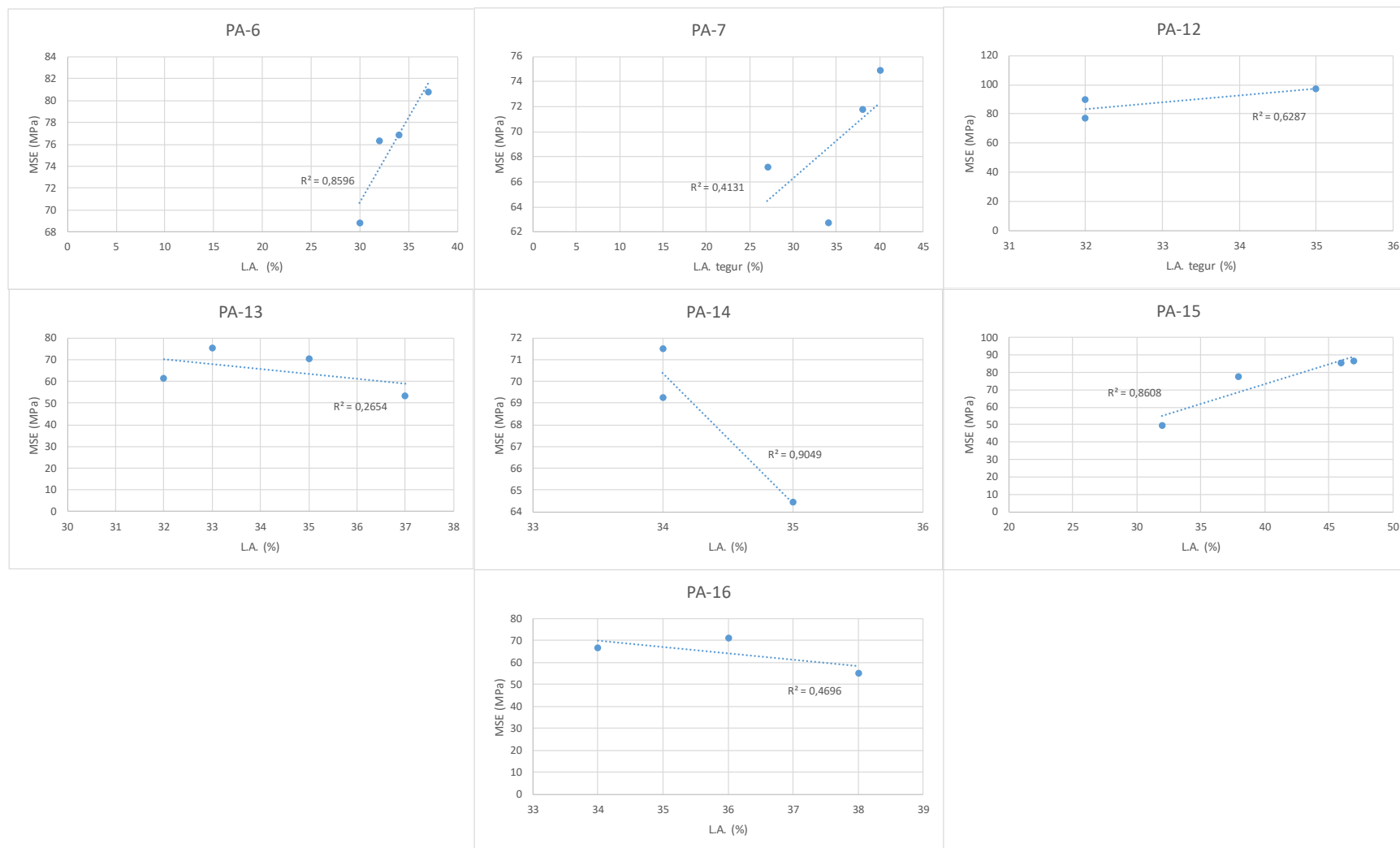
Kuigi kõiki uuritud puuraukude andmeid kasutades ei paista seost kivimi purunemiskindluse ja mõõdetud või arvutatud puurimisparameetrite vahel, on siiski võimalik leida seosed üksikute puuraukude põhiselt (Joonis 13). Näiteks PA-6 ja PA-15 arvutatud mehaanilise erienergia väärtused näitavad väga head positiivset sõltuvust laboratoorsete L.A. tegurite vahel (korrelatsiooni kordaja $r^2 > 0,85$). Sarnaseid tugevaid seoseid on võimalik leida ka teiste puuraukude puhul (nt. PA-14), siiski tuleb silmas pidada, et antud sõltuvused põhinevad väga väiksele (kolmel või neljal punktil) ja väga keskmistatul (L.A. proovi keskmine intervalli pikkus 4,3 m) andmehulgal ning sõltuvused erinevad oluliselt puuraukude vahel.

Seega, omavad puuraugud eraldiseisvalt (Joonis 11) erineva tõusuga, positiivseid ja negatiivseid üldiselt suhteliselt häid korrelatsioone MSE-ga. Näib, et teatavat sorti sõltuvused kivimi puurimisele kulunud mehaanilise erienergia ning purunemiskindluse vahel on olemas, siiski suuremaid järeldusi antud andmete põhjal ei ole võimalik teha.

Üldiselt võivad sellised puuraugupõhiselt eraldiseisvad korrelatsiooni olla põhjustatud kivimi füüsikaliste omaduste erinevusest ja osakaalude varieerumisest, mis mõjutavad otseselt MSE-d. Seda eeldades, et puurmasina juhtimisalast seadistust, millel on mõju puurimisparameetritele hoiti puuraugu puurimisel läbivalt algusest lõpuni üldiselt sarnasena. Juhul kui ühe puuraugu puurimise jooksul puurmeister oma töö käigus puurmasina juhtpuldil puurmasina töös midagi korrigeeris või muutis, kajastab MSE pigem puurmasina konkreetse seadistuse hetkeefektiivsust puuritava kivimi suhtes. Käesolevas töös seda veel L.A. katseproovi intervallile keskmistatult vastavalt. Kuid kahjuks ei saa siinkohal kindlaid järeldusi teha, sest pole teada millised muutused puurimisandmestikus on põhjustatud puuritava kivimi muutlikkusest ja millised muutused on tulenenud puurmeistri töömetoodikast puurmasina töö juhtimisel.

Muutused puurmasina töös puurimise ajal seletaks korrelatsioonide puudumise kui otsida korrelatsioone kõigi uuritud puuraukude kivimi purunemiskindluse ja mõõdetud või arvutatud puurimisparameetrite vahel. Sellest järeldub, et Valistre geoloogiliste puurimiste puhul ei pruugitud hoida puurmasina puurimisalast (puurmasina juhtpuldi seadistus) seadistust konstantselt ühesena, vaid puuriti nn. tavapraktikast lähtuvalt. Teisisõnu, tavapraktikas puurmeistrid puurivad viies sisse oma valdkonna spetsiifikale tulenevate teadmiste põhjal pidevalt muutusi puurmasina töösse, et tagada optimaalseima kiirusega puurimistöö, mil on omakorda mõju puurimisparameetritele.

Kahjuks ei võimalda sellise puurimisalase töömetoodikaga kogutud puurimisandmestik hiljem täiesti objektiivselt hinnata puuritud kivimaterjali muutlikkusest tulenevaid muutusi puurmasina juhtpuldist puurmeistri poolt sisse viidud muudatustest.



Joonis 13. Valistre individuaalsete puuraukude mehaanilise erienergia (MSE) väärtused suhtes L.A. väärtustega.

3.6. Problemaatika

Töös kasutatud andmestiku puhul puurimiskiirust ja mehaanilist erienergiat kõrvutades purunemiskindlusega mingisugust üldist korrelatsiooni ei leitud (Joonis 11 ja 12). See on arvatavasti põhjustatud hulga erinevatest faktoritest, millest mõned võimalikud on loetletud allpool.

1. Puurimise käigus on puurijal tavaliselt eesmärk püüda hoida võimalikult kiiret läbindamise kiirust. Selle tõttu puurmeister teeb puurimise käigus puurmasina töös pidevalt muutusi, mitte ei hoia ilma mõjuva põhjuseta puurimisel ühtset puuragregaadi tööseadistust. See teeb aga keeruliseks puurimisandmestikust hiljem välja eraldada kivimi omaduste muutustest tulenevaid muutusi puurparameetrites.
2. Adekvaatsete korrelatsioonide leidmist ei soodusta ka L.A. teguri liialt laiad vähevarieeruvad väärtused ning üldistavad katseproovi intervallid. Geoloogilise maavara uuringu spetsiifikast tulenevalt valitud purunemiskindluse katseproovide intervallid on antud uurimustöö eesmärgist lähtuvalt pigem liialt laiad ning valdavalt läbivad mitut kihistut. Käesoleva töös kasutatud L.A. proovintervallid varieerusid 0,3 meetrilt kuni 6,2 meetrini olles keskmiselt 4,3 m pikad. Kindlasti ei saa eeldada, et terve proovi intervalli puhul on tegemist homogeense kivimiga, millele vastaks ühine L.A. teguri proovitulemus terve proovi intervalli lõikes.
3. Välipuurimiste käigus võib vahest esineda ka mõningaid probleeme puurimistöös, mis mõjutavad puurimisparameetreid ning salvestuvad andmestikus, kuid ei ole tingitud muutusest puuritavas kivimmaterjalis. Näiteks maaparanduskraavist pinnavee uhtedelikuna kasutamisel metsakõdu poolt tekitatud vee sissevõtufiltri ummistus, mis väljendub otseselt puurimisparameetrites uhtevee rõhu langemisena, mis omakorda mõjutab ka puurmasina tööd ja teisi puurimisparameetreid.

3.7. Soovitused edaspidisteks uuringuteks

Edaspidiselt sarnase töö teostamise jaoks andmete kogumisel sama tehnikat kasutades tasuks puurides hoida kõiki inimfaktorist sõltuvaid puurmasina seadistusi võimalikult fikseeritult konstantsena – peamootori pöörded, puurpea käik ning kindlasti puurkolonni pöörlemiskiirust, surumis-survet (*thrust pressure*) ja uhteveepumba tööd mõjutavad puurmasina juhtseadistused, kuna selline toimetamine lahutab puurandmetest töövõtetest tulenevad muutused ning selleläbi kajastab maksimaalselt puuritava kivimi muutlikust. Kindlasti tasuks ettenägelikult niipalju kui võimalik välistada ka igasugused puurimistöode käigus potentsiaalsed veatekke kohad, mis võiksid mõjutada puurimisandmestikku (nt. metsakõdu põhjustatud uhtevee sissevõtufiltri ummistused jne).

Antud magistritöö seisukohast problemaatiliseks osutunud laiad ja vähevarieeruvad L.A. katse prooviintervallidest järeldub, et neid tuleks tulevikus kindlasti võtta rohkem ja puursüdamiku kohta tihedamalt, või vähemalt piiritlema katseintervalli piirid stratigraafiliste kihistute piiridega (eeldades, et kivimi füüsikalised ja mehaanilised omadused pole kihistu piires väga muutlikud). Tulevikus tuleks kindlasti kasuks ka sarnase töö läbiviimisel L.A. meetodil purunemiskindluse üksikproovide katsetulemuste suurem varieeruvus kasutatavates andmetes.

Puurimisparameetrite kujunemist mõjutab veel omajagu kasutatud puurkrooni tüüp, hambusus, tugevus, dimensioonid ja kindlasti ka puurkrooni kulumisaste. Millele peaks tähelepanu pöörama, kui tahetakse omavahel võrrelda erinevaid puurimistöid, kus on kasutatud erinevaid puurkroone. (Samsuri, 2018)

Tasub märkida, et tõenäoliselt ei mõjuta kõik kivimmaterjali füüsikalised (nt. tihedus, kõvadus, poorsus) ja mehhaanilised omadused (nt. elastsus, plastsus, soojuskindlus) samaselt ja samade osakaaludega geoloogilist südamikpuurimist ning L.A. katse tulemust kivimi kulutusprotsessi erinevusest tulenevalt. Nende kivimi omaduste täpne mõju ja mõjude osakaalud mõlema kulutusprotsessi puhul nõuavad põhjalikumat uurimist.

Siiski on varasemalt rahvusvaheliselt palju tööd tehtud puurimisandmestiku korreleerimisel kivimi survetugevusega (inglise k. *Uniaxial Compressive Strenght* – UCS) ja saadud positiivseid tulemusi (Hareland, Nygaard, 2007; Tomar, Kumbhakar,

2015; Khorzoughi, Hall, Apel, 2014; El-Biblawi, 2007; Lakshminarayana, Tripathi, Pal, 2020). Lisaks on kivimi survetugevust ka omakorda püütud korreleerida L.A. teguriga ning saadud positiivseid tulemusi (Khan, 2017; Karham, Fener, 2014). Sellest teadmistest tulenevalt tasuks tulevikus kindlasti määrata ka puuritud kivimi survetugevust.

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärkideks oli leida seoseid geoloogilise rootormetodil südmikpuurimisel kogutud puurimisparameetrite ja Los Angeles'e meetodil kivimi purunemiskindluse vahel.

Valistre dolokivi on Eestis kehtivatest teeehitusele seatud nõuetest lähtuvalt sobilik täitedolokivina, ning maavaradele esitatud nõuetest tulenevalt madalamargilise ehitusdolokivina kasutamiseks.

Töö käigus selgus, et RQD on suhteline normaliseeritud parameeter, mida ei ole mõistlik korreleerida L.A. teguriga, mis on oma olemuselt pigem absoluutväärtus.

Kõigi kasutatuid puuraukude andmeid koos vaadeldes puudus antud andmetele tuginedes korrelatsioon puurimiseks kulunud mehaanilise erienergia ja L.A. purunemiskindluse kao vahel. Kõige tõenäolisemalt on selline korrelatsiooni puudumine tulenev puurmasina puurimisseadistuse erinevustest erineval ajahetkel, eeldades, et kivimi füüsikalised ja mehaanilised omadused Valistre uuringuruumis puurauguti väga palju ei erine.

Siiski viitavad üksikute puuraukude põhiselt väljajoonistuvad korrelatsioonid L.A. teguri ja MSE väärtuste vahel, et korrelatsioon nende kahe teguri vahel tõenäoliselt esineb. Kindlaid järeldusi antud töö algandmetele tuginedes kahjuks teha ei saa kuna, ei leitud üldistavaid korrelatsioone. Leitud üksikute puuraukude andmete vahel korrelatsioonide esinemine ja nende omavahelised suured erisused viitavad potentsiaalselt erinevale puurmasina juhtseadistusele puurimistööde vältel, mil on otsene mõju puurparameetrite kujunemisel. Sellest tulenevalt on keeruline eristada puurandmetes muutusi, mis on otseselt tulenevad puurmasina juhtpuldi käsitlemisest ja mis on tulenev puuritava kivimmaterjali omaduste muutusest.

Siiski, kuna üksikute puuraukude lõikes korrelatsioone Los Angelese meetodil purunemiskindluse ja mehaanilise erienergia vahel esines, võib olla võimalik leida kindlamaid korrelatsioone ning isegi ühildumisvalemeid puurparameetrite ja L.A. katse kao vahel.

Edaspidiseks saab soovitada käesoleva uurimustööga sarnase eesmärgiga töö teostamiseks esmalt koguda puurimise käigus standardiseeritud puurandmestik, mis

on kogutud puurimistöode käigus läbivalt konstantselt puurmasina juhtseadistuse hoidmisega. Sellise lähenemise puhul kajastavad puurimisparameetrite muutused puurimisandmestikus arvatavasti maksimaalselt puuritava kivimi füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste muutusi.

Summary

Researchers and engineers in the recent years have been investigating to find a convenient method to estimate rock physical parameters continuously from recorded drilling data (MWD).

The determination of the Los Angeles abrasion loss for aggregates is time consuming and expensive method, which requires a large amount of sample. For this reason, the prediction of Los Angeles abrasion loss continuously from drilling data would be a convenient, fast and cost effective method to estimate rock's Los Angeles abrasion loss (L.A. abrasion loss).

The main aim of this work was to estimate possibility of determining dolostone's Los Angeles abrasion loss from geological core drilling parameters. For this purpose, drilling data and Los Angeles Abrasion loss were analyzed mechanical specific energy (MSE) calculated and analyzed. MSE was developed by Teale in 1965 to measure efficiency of rotary drilling method to find optimal technical setting for rotary drilling process.

It became apparent that looking at the data of multiple boreholes together there were no correlation found between L.A. abrasion loss corresponding to any of the drilling parameters, drilling rate and Mechanical Specific Energy (MSE). In theory MSE should reflect physical changes in rock material if the drilling rig's technical drilling settings which drilling parameters depend on are constant throughout of the drilling process.

Although there were found to be some good correlations between individual borehole L.A. abrasion loss and MSE. The found correlations and their equations found were different. At that point it came apparent that during the drillings technical settings of the drilling equipment may not have been constant throughout the drilling process.

It is a standard work methodic for drillers to maximally optimize drilling rate. To do that they control and change work settings of a drilling rig when needed throughout the drilling work. Unfortunately, data collected drilling this way cannot let us reliably eliminate changes in drilling logs made by driller from changes in rock mass physical properties. Based on few individual correlations found between MSE and L.A. abrasion loss it is assumed that the better were individual correlations the more constant were drilling rig controls that control the drilling. Assuming that the Los

Angeles abrasion loss is similarly dependable on rock physical and mechanical properties. Making reliable decisive conclusions on drilling data collected using conventional drilling work methodics and very limited laboratory tests results could be difficult. Recommendations for future projects a like were made.

To draw a certain conclusion on future projects alike trying to correlate L.A. abrasion to same MWD log parameters using same principle methods as this work it is recommended that drillings should firstly be conducted with keeping constant drilling settings of drilling rig.

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada oma juhendajaid Martin Liirat ja Hardi Aosaart, puurmeisterid Ardi Haugast ja Vitalii Lysenkot, ettevõtteid OÜ Merko Kaevandused ning OÜ Inseneribüroo Steiger ning nende meeskonda.

Kasutatud kirjandus

Amirkhanian, S.N., Kaczmarek, D.R., & Burati, J.L., 1991. EFFECTS OF LOS ANGELES ABRASION TEST VALUES ON THE STRENGTHS OF LABORATORY-PREPARED MARSHALL SPECIMENS.

Ariffin Samsuri. 2018. Drilling. BoD – Books on Demand. lk 134 – 135; 108; 113
SBN 1789843030, 9781789843033

Barankina, I., Predein, N, 1983. Aruanne dolomiitide otsingutest Pärnu rajoonis 1982.-1983. a. EGF 4003.

Chen, X., Yang, J., Gao D., 2018. Drilling Performance Optimization Based on Mechanical Specific Energy Technologies, Drilling, IntechOpen.

Deere, D.U., Deere, D.W., 1988. "The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice," in Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publications 984, Philadelphia, 91-101.

Deere, D.U., 1964. "Technical description of rock cores", Rock Mechanics Engineering Geology, 1. 16-22.

EL-Biblawi, M.M., Sayed, M.A, Mohamed, EL-Rawy, M.T., 2007. Some Drilling Parameters as a Tool to Predict Different Categories of Rocks. J. of Engineering Sciences, Assiut University, Vol 35, No 4, pp 995-1008.

EVS-EN 1097-2:2010; standard. Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid.

Hareland, G., Nygaard, R., 2007. Calculating unconfined rock strength from drilling data. Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium - Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands.

Jalakas, A., 1960. Anelema dolomiidimaardla detailse geoloogilise luure töö aruanne. Pärnu TSNTK allutatud territooriumi Anelema dolomiitide füüsikalise mehaaniliste omaduste uurimus. Keila. EGF 1271.

Keskonnaministri määrus, Üldgeoloogilise uurimistöö 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. RT I, 06.03.2020, 6.

Riigiteataja

Khan, M. S., 2014. Establishment of Correlation between Los Angeles Abrasion Loss and Strength Determined through Point Load Index and Schmidt Rebound. Science International (Lahore), 26(2), 2014.

Kildjer, P., 2017. Puurija käsiraamat, Eesti Geoloogia Selts, 86-96.

Lakshminarayana, C.R., Anup, T., Samir, P., 2020. MWD technique to estimate the uniaxial compressive strength of rocks. AIP Conference Proceedings.

Majandus- ja taristuministri määrus. Tee ehitamise kvaliteedi nõuded. RT I, 08.04.2016, 4. Riigiteataja.

Mohajerani A, Nguyen, B.T., Tanriverdi, Y., Chandrawanka, K., 2017. Kavindha Chandrawanka, A new practical method for determining the LA abrasion value for aggregates, Soils and Foundations, Volume 57, Issue 5, 2017, Pages 840-848, ISSN 0038-0806,

Mohammad, M. B., Hall, R., Apel, D., Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques, International Journal of Mining Science and Technology, Volume 28, Issue 6, 2018.

Prasad, U., Moronkeji, D., Shouse, R., Villegas R., 2018. Mechanical Specific Energy (MSE) in Coring: A Tool to Understand the Drilling Mechanism and Coring Parameters Optimization for Improved Core Recovery.

Sair, K., Mustafa, F., 2007. Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength.

Smith, H. J., 1994. Improving Site Characterization for Rock Dredging using a Drilling Parameter Recorder and the Point Load Test.

Teale, R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2(1):57-73

Tomar, R., Dilip, K., 2017. Review of Rock Properties Based on Drilling Parameters.

Tuuling, T., Mõttus, M.-A., Uppin, M., 2020, Pärnu maakonna Valistre uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.04.2020), EGF: 9358.

Veebiviited:

El Didi Group. (kasutatud 02.03.2020).

<https://eldidigroup.com/product/bap160-lubap/>

Maa-amet, 2020. Maa-ameti geoportaal, <http://geoportaal.maaamet.ee/est/>

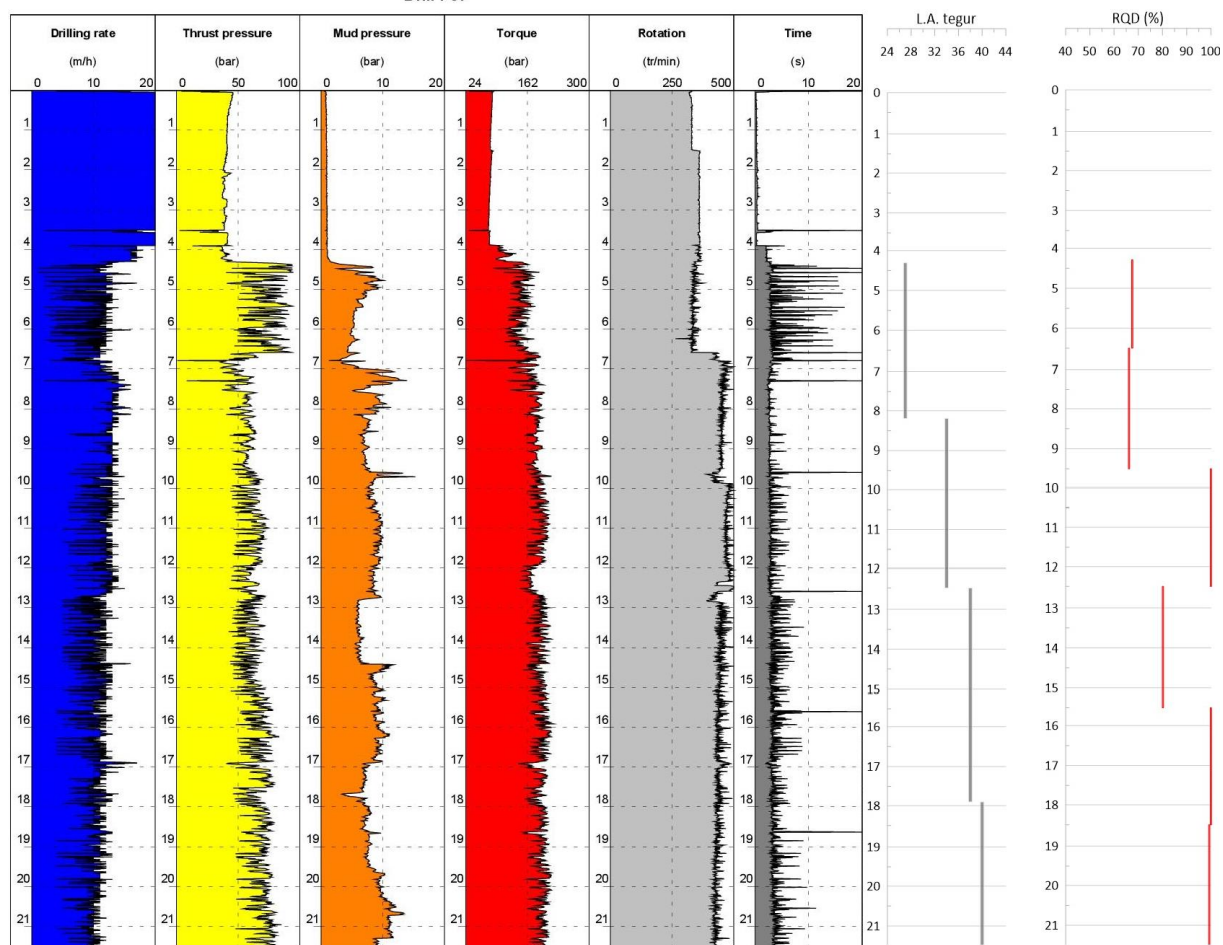
Massenza Fu Giuseppe, Wireline Coring. (kasutatud 03.26.2020).

<https://www.massenzarigs.com/wireline-coring/>

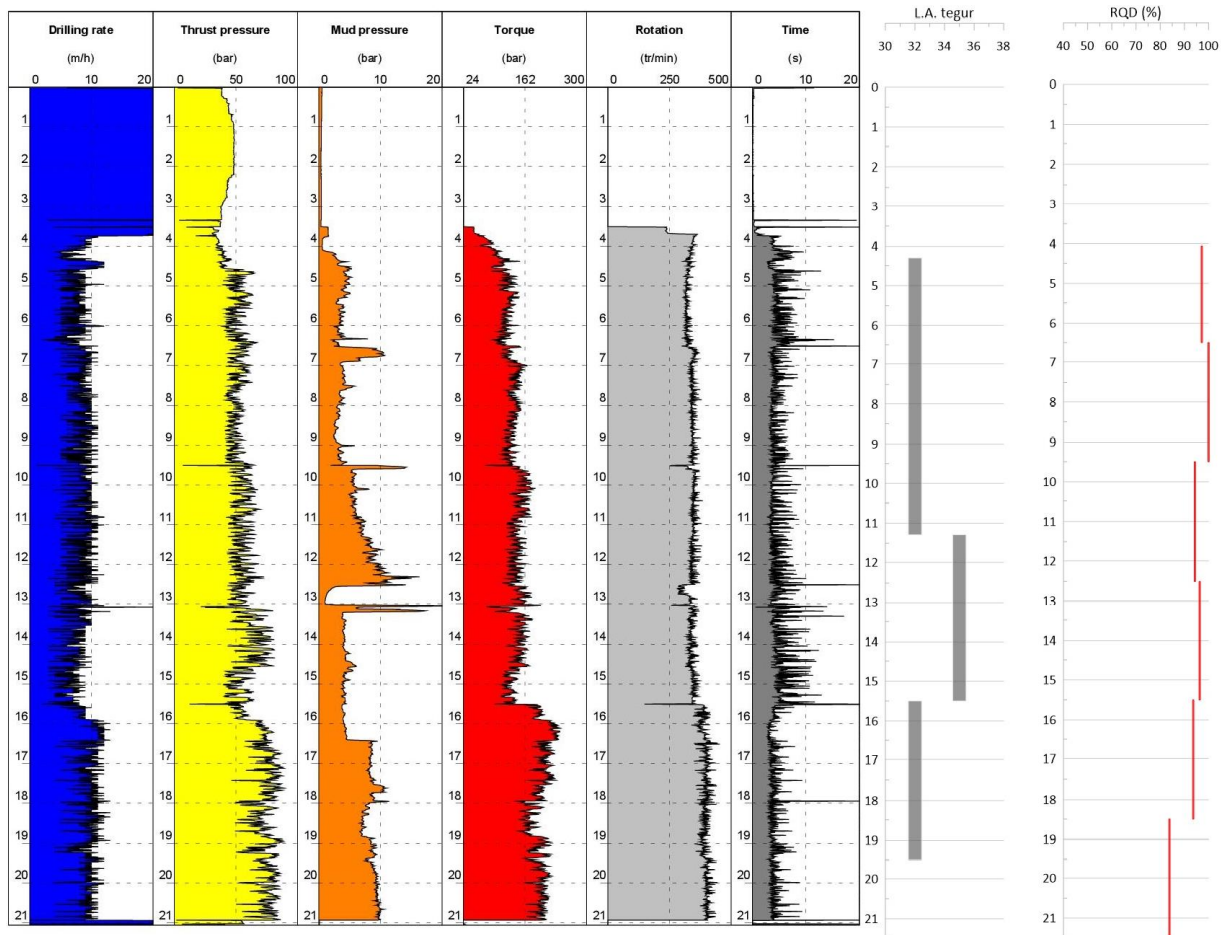
Lisa 1

Tabel 4. Valistre puursüdamiku mõõdetud lõhelisus (RQD)

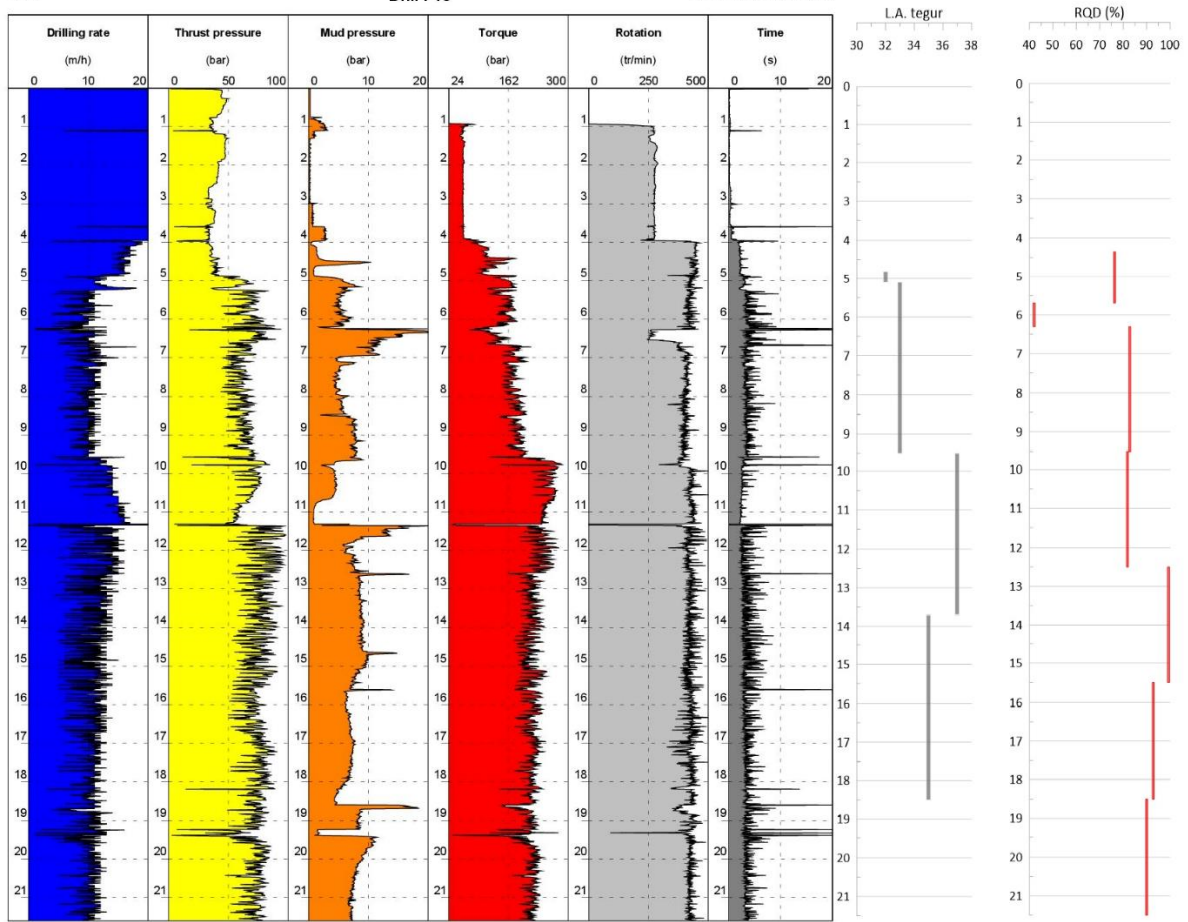
	RQD intervall		RQD (%)
	Algus	Lõpp	
PA-6	3,68	6,5	63
	6,5	9,5	99
	9,5	12,5	91
	12,5	15,5	97
	15,5	18,5	98
	18,5	21,5	100
PA-7	4,3	6,5	68
	6,5	9,5	66
	9,5	12,5	100
	12,5	15,5	80
	15,5	18,5	100
	18,5	21,5	99
PA-12	4,05	6,5	97
	6,5	9,5	100
	9,5	12,5	94
	12,5	15,5	96
	15,5	18,5	94
	18,5	21,5	84
PA-13	4,35	5,7	76
	5,7	6,3	42
	6,3	9,5	83
	9,5	12,5	82
	12,5	15,5	99
	15,5	18,5	93
	18,5	21,5	90
PA-14	2,8	3,5	79
	3,5	6,5	86
	6,5	9,5	94
	9,5	12,5	99
	12,5	15,5	94
	15,5	18,5	95
	18,5	21,5	99
PA-15	2	2,35	66
	2,35	3,5	36
	3,5	6,5	90
	6,5	9,5	98
	9,5	12,5	100
	12,5	15,5	94
	15,5	18,5	84
	18,5	21,5	86
PA-16	3,5	6,5	72
	6,5	9,5	98
	9,5	12,5	90
	12,5	15,5	94
	15,5	18,5	100
	18,5	21,5	95



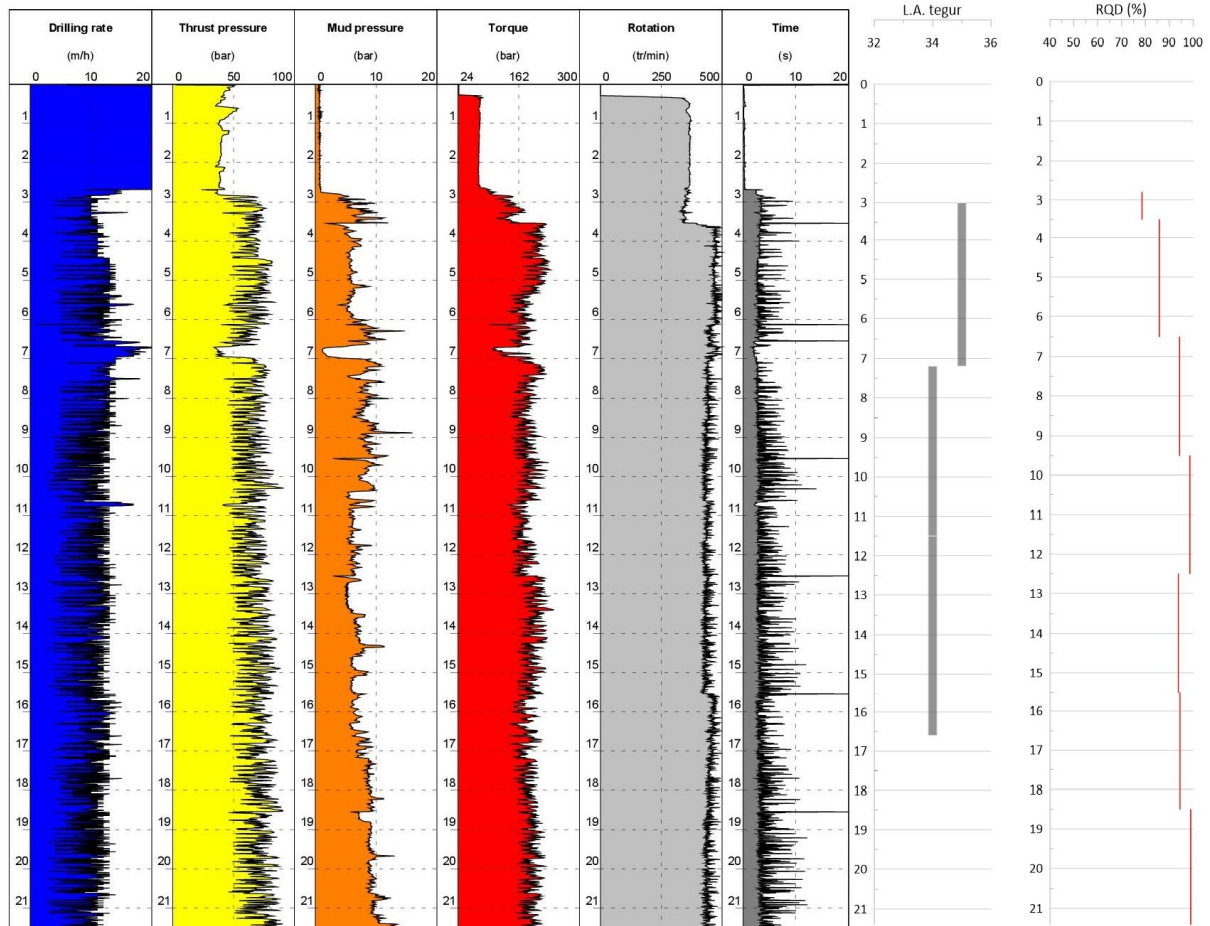
Joonis 14. Valistre PA-7 puurimisandmestik kõrvutatud L.A. teguri ja kivimi lõhelisusega (RQD).



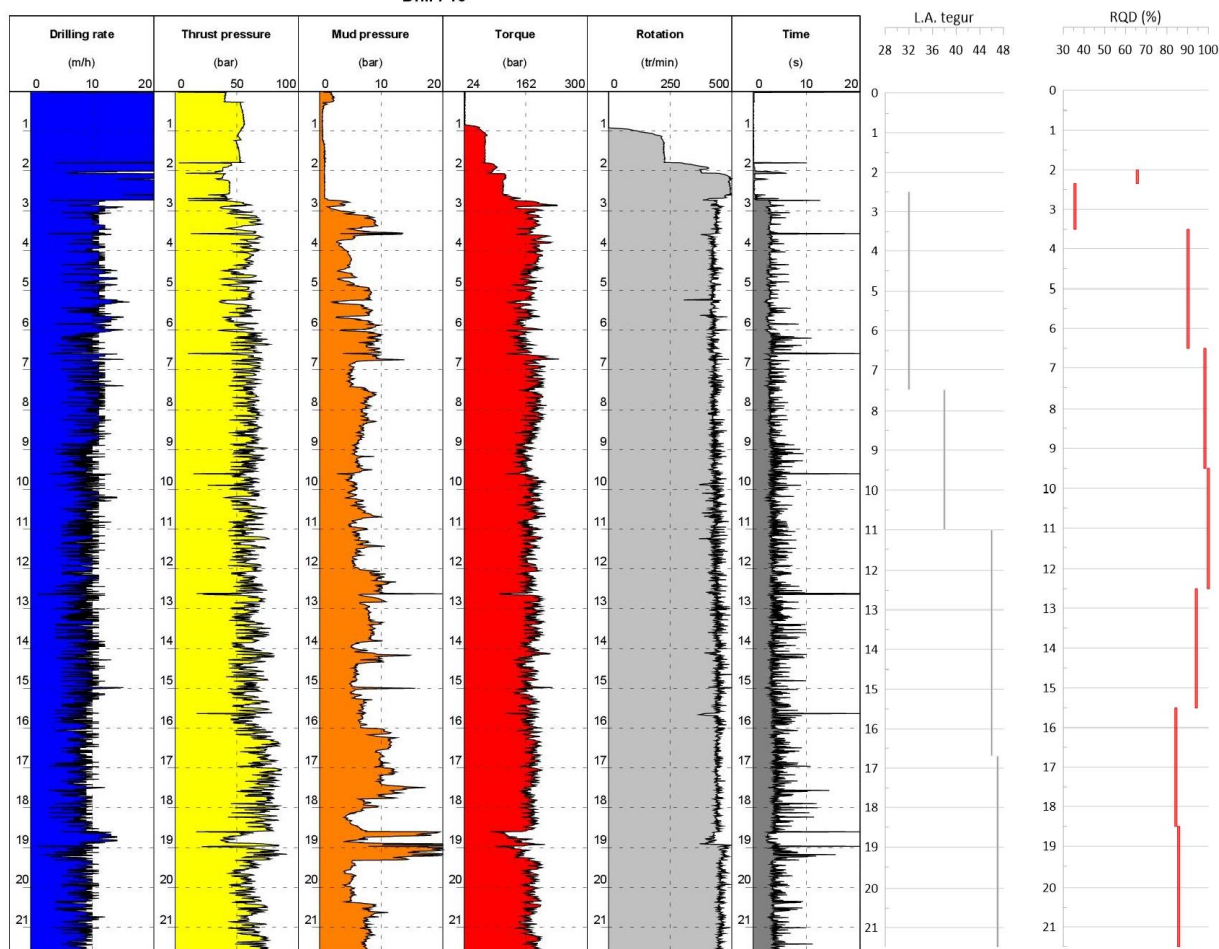
Joonis 15. Valistre PA-12 puurimisandmestik kõrvutatud L.A. teguri ja kivimi lõhelisusega (RQD).



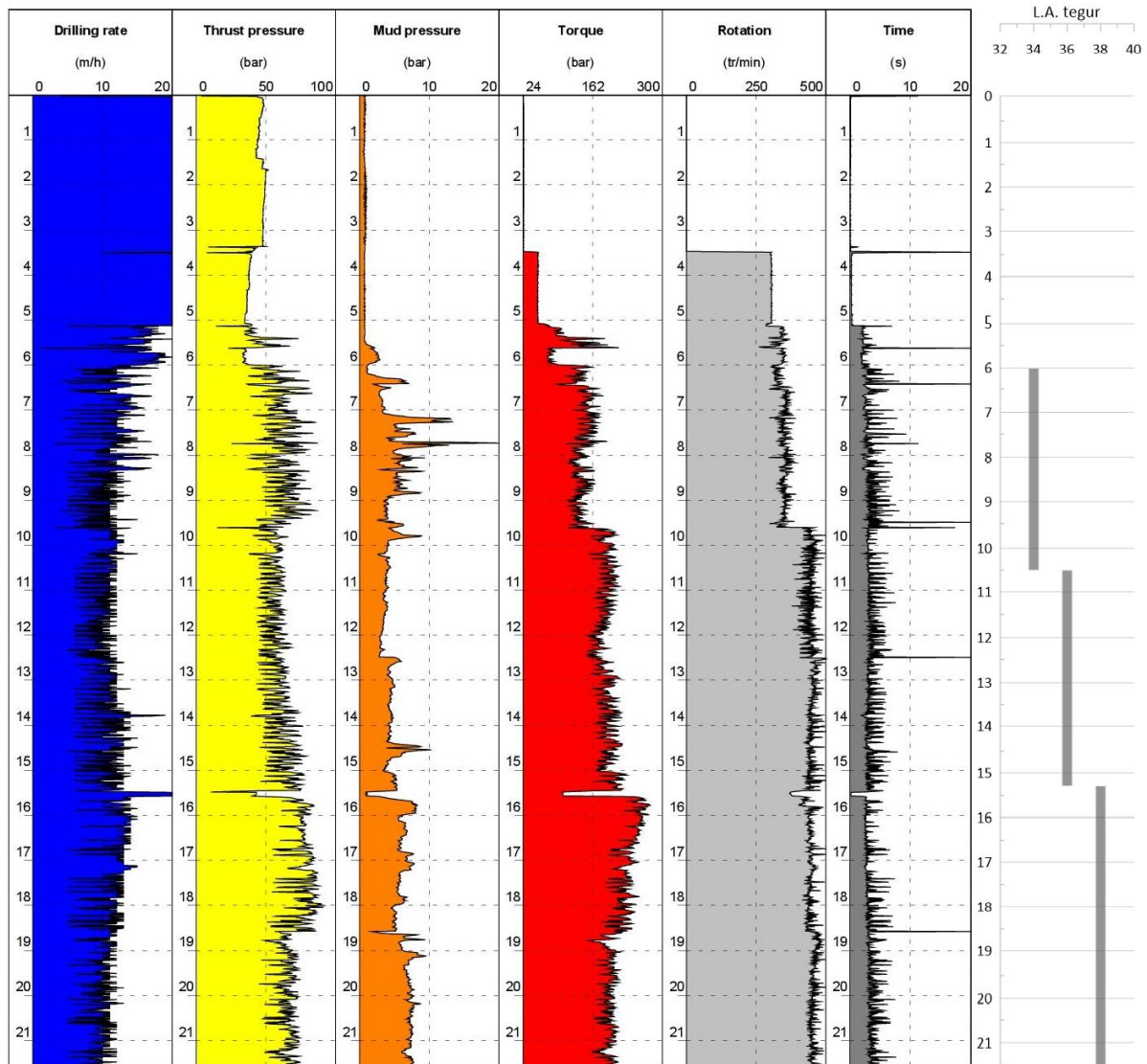
Joonis 16. Valistre PA-13 puurimisandmestik kõrvutatud L.A. teguri ja kivimi lõhelisusega (RQD).



Joonis 17. Valistre PA-14 puurimisandmestik kõrvutatud L.A. teguri ja kivimi lõhelisusega (RQD).



Joonis 18. Valistre PA-15 puurimisandmestik kõrvutatud L.A. teguri ja kivimi lõhelisusega (RQD).



Joonis 19. Valistre PA-13 puurimisandmestik kõrvutatud L.A. teguriga.



Joonis 20. Massenza MI8 puurmasin geoloogilistel puurmistöodel.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristjan Arold,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Paekivi Los Angeles’e purunemiskindluse katse kadu geoloogilise südamikpuurimise andmestikust?“, mille juhendaja on Martin Liira ja Hardi Aosaar,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kristjan Arold

01.06.2020