



# **Orava lubjakivikarjääri mäetööde planeerimine ehitusprojekti teenindamiseks Rail Baltica Rapla IV objekti näitel**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Hanna Brigita Kört

Üliõpilaskood: 233733LARB

Juhendaja: Jüri Vassiljev, TalTech, vanemteadur

Kaasjuhendaja: Aleks Strazdin, OÜ Merko kaevandused, mäetööde juht

Õppekava: Maa süsteemid, kliima ja tehnoloogia

## **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: Hanna Brigita Kört

25.05.2026

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Jüri Vassiljev

25.05.2026

## Sisukord

Annotatsioon.....	4
Abstract .....	5
Jooniste loetelu .....	6
Tabelite loetelu.....	7
1. Sissejuhatus.....	8
2. Uuringuala tutvustus ja teoreetilised alused .....	10
2.1. Orava karjääri asukoht ja üldisloomustus.....	10
2.1.1. Geoloogilised tingimused .....	11
2.1.2. Hüdrogeoloogilised tingimused .....	12
2.2. Mäetööde planeerimise teoreetilised alused .....	12
2.2.1. Kaevandamisjärjestuse ja tööfrondi liikumise alused .....	13
2.2.2. Tootmisvõimsuse hindamine .....	13
2.2.3. Kasutatav tehnika ja tööprotsessi .....	13
2.2.4. Lõhketööde hindamise teooria .....	14
3. Andmed ja meetodid.....	16
3.1. Kasutatud lähteandmed.....	16
3.1.1. Geoloogilised ja tehnilised lähteandmed .....	16
3.1.2. Rail Baltica Rapla IV ja lisaklientide indikatiivsed lähteandmed .....	16
3.2. Metoodika.....	17
3.2.1. Mahuarvutuse metoodika .....	17
3.2.2. Tootmisstsenaariumite arvutusmetoodika .....	18
3.2.3. Tehnika koormuse hindamise metoodika .....	18
3.2.4. Lõhketööde sageduse ja kobestatud materjali varu kestuse hindamine.....	21
3.2.5 Arvutuste piirangud.....	21
4. Mäetööde planeering.....	22
4.1. Olemasoleva olukorra analüüs.....	22
4.2. Kaevandamisetappide planeering.....	23
4.3. Mahuarvutuse tulemused.....	24
4.4. Hooajaliselt muutuvad koormusstsenaariumid.....	24
4.4.1. Keskmise vajalik päevane maht .....	24
4.4.2. Stsenaarium A — Rail Baltica .....	25
4.4.3. Stsenaarium B —Rail Baltica ja lisakliendid.....	25

4.5. Masinapargi tootlikkus ja koormus eri stsenaariumites .....	26
4.5.1. Pöördkoppekskavaatorite Caterpillar 330B LN arvutuslik võimekus .....	26
4.5.2. Pöördkoppekskavaatori Volvo EC380DL võimekus .....	27
4.5.3. Rataslaadur VOLVO L-180E võimekus .....	28
4.5.4. Puudujäägi katmine kombineeritud töökordusega .....	29
4.5.5. Puhvervaru vajadus maksimaalse tippkoormuse korral .....	31
4.6. Lõhketööde sagedus ja kobestatud materjali varu .....	31
4.7. Peamised tootmisriskid ja piirangud.....	32
5. Arutelu ja järeldused .....	33
Kokkuvõte.....	35
Tänuavaldused .....	36
Kirjanduse loetelu.....	37
Lisa 1. Rataslaaduri vaatlusandmed .....	40

## Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on koostada Orava lubjakivikarjääri mäetööde planeering Rail Baltica IV objekti ja samaaegsete klientide teenindamiseks ning hinnata, kas karjääris olemasolev masinapark ja töökorraldus võimaldavad katta vajalikke tootmiskahte. Töös käsitletakse karjääri geoloogilisi ja tehnilisi tingimusi, kaevandamisetaappide planeerimist, tootmisstsenaariume, masinapargi tootlikkust, lõhketööde vajalikku sagedust ja puhvervaru vajadust.

Töö lähteandmetena kasutati Orava lubjakivikarjääri keskkonnanaloa ja kaevandamisprojekti andmeid, DJI Terra 3D mudeli põhjal määratud pindala- ja sügavusandmeid, OÜ Merko Kaevandused esitatud tootmisandmeid ning karjääris kogutud vaatlusandmeid.

Mahuarvutuse põhjal on nelja kaevandamisetaapi planeeritud kogumass 696 072 t, mis ületab Rail Baltica IV objekti ja lisaklientide summaarse 600 000 t vajaduse 96 072 t võrra. Seega on vaadeldava perioodi planeeritud vajadus etappide kogumahu poolest piisav.

Tootmisstsenaariumite analüüsi põhjal on kogu perioodi keskmine päevane tootmiskaht ligikaudu 2098 t/p ja Rail Baltica IV objekti põhikoormuse kontrollväärtus 2900 t/p. Lisaklientide samaaegse teenindamisega võib maksimaalne päevakoormus ulatuda 5400 t/p. Masinapargi tootlikkuse järgi on kahe pöörkoppekskavaatori 12 tunnise tööpäeva kombineeritud võimekus 6312 t/p, kuid rataslaaduri väljastusvõimekus jääb 4296 t/p. Kombineeritud töökorralduse korral jääb maksimaalse tippkoormuse juures puudujäägiks 192 t/p. Selle katmiseks kogu tippkoormuse perioodi jooksul on vajalik puhvervaru 12 672 t. Lõhketööde sageduse hindamisel saadi tulemuseks, et ühe lõhkamisega saadav kobestatud materjali varu kestab sõltuvalt lõhkamismahust ja päevakoormusest ligikaudu 2,4-9 tööpäeva.

Töö tulemusena selgus, et Orava lubjakivikarjäär suudab kavandatud kogumahu poolest Rail Baltica IV objekti ja lisaklientide samaaegselt teenindada. Rail Baltica IV objekti põhikoormus on olemasoleva masinapargiga kaetav, kuid lisaklientide samaaegsel teenindamisel muutub tootmine tippkoormuse juures piiripealseks. Selle katmiseks on vaja kasutada kombineeritud töökorraldust, vähemalt 12 tunniseid tööpäevi, lõhketööde korralduse peab siduma tootmisvajadusega ning eelnevalt on tarvis moodustada puhvervaru.

# **Planning mining operations at the Orava limestone quarry for a major construction project, using the Rail Baltic Rapla IV site as an example**

## **Abstract**

This bachelor's thesis develops a mining plan for the Orava limestone quarry to supply the Rail Baltica IV construction site and additional customers during the same period. The study evaluates whether the quarry's current machinery and work organisation can achieve the required production volumes. It analyses the geological and technical conditions of the quarry, spatial planning of mining stages, production scenarios, machinery productivity, blasting frequency requirements, and the necessity of a buffer stockpile.

The thesis utilises source data including the environmental permit and mining project documentation for the Orava limestone quarry. Additional data sources comprise area and depth measurements from a DJI Terra 3D model, production records from OÜ Merko Kaevandused, and observational data collected onsite.

Volume calculations indicate that the planned total mass for the four mining stages is 696,072 t. This amount exceeds the combined demand of the Rail Baltica IV site and additional customers, estimated at 600,000 t, by 96,072 t. Consequently, the planned volume is sufficient for the period under consideration.

Production scenario analysis shows that the average daily production volume is approximately 2,098 t/d. The base-load requirement for the Rail Baltica IV site is 2,900 t/d, while serving additional customers increases the maximum daily load to 5,400 t/d. Two backhoe excavators operating 12-hour shifts can jointly produce 6,312 t/d, and the wheel loader's daily output is 4,296 t/d. During peak load periods, this results in a deficit of 192 t/d. To address this shortfall, a buffer reserve of 12,672 t is required for the peak period. The stock of loosened material from a single blast lasts between 2.4 and 9 working days, depending on the blasting volume and daily load.

In conclusion, the Orava limestone quarry can supply the Rail Baltica IV site and additional clients at the planned capacity. The current machinery is sufficient to meet the primary demand for Rail Baltica IV. However, when serving additional clients during peak periods, production approaches its operational limits. To manage these conditions, a combined work organisation with a minimum of 12-hour shifts is recommended. Blasting operations should be scheduled to align with production requirements, and a buffer reserve should be established in advance.

## Jooniste loetelu

<b>Joonis 1.</b> Orava lubjakivikarjääri mäeeraldise ja teenindusmaa asukoht. ....	10
<b>Joonis 2.</b> Orava lubjakivikarjääri mäeeraldise geoloogilised läbilõiked I–I' ja II–II'. ....	11
<b>Joonis 3.</b> Orava karjääri olemasolevat olukorda illustreeriv joonis DJI Terra 3D mudelist. ....	22
<b>Joonis 4.</b> Kaevandamisetappide kujutus illustreerival kaardil DJI Terra 3D mudelist. ....	23

## Tabelite loetelu

<b>Tabel 1.</b> Masinate kirjeldused .....	14
<b>Tabel 2.</b> Tootmisstsenaariumites kasutatud lähteandmed .....	16
<b>Tabel 3.</b> Indikatiivsed päevased tootmis- ja tarnemahud perioodide kaupa .....	17
<b>Tabel 4.</b> Mahuarvutuse tulemused .....	24
<b>Tabel 5.</b> Stsenaarium A päevased kontrollmahud Rail Baltica objekti teenindamisel.....	25
<b>Tabel 6.</b> Stsenaarium B kontrollväärtused Rail Baltica ja lisaklientide samaaegsel teenindamisel.....	25
<b>Tabel 7.</b> Caterpillar 330B LN arvutuslik päevane ümbertõstevõimekus eri tööaja korral .....	26
<b>Tabel 8.</b> Caterpillar 330B LN koormusprotsendi arvutus.....	26
<b>Tabel 9.</b> Volvo EC380DL arvutuslik päevane ümbertõstevõimekus eri tööaja korral.....	27
<b>Tabel 10.</b> Volvo EC380DL koormusprotsendi arvutus.....	27
<b>Tabel 11.</b> Rataslaaduri arvutuslik päevane väljastusvõimekuse eri tööaja korral .....	28
<b>Tabel 12.</b> Rataslaaduri VOLVO L-180E koormusprotsendi arvutus.....	28
<b>Tabel 13.</b> Ekskavaatorite kombineeritud võimekus ja reserv 12-tunnise tööpäeva korral .....	29
<b>Tabel 14.</b> Rataslaaduri puudujäägi vähendamine ekskavaatorite reservvõimekuse abil .....	30
<b>Tabel 15.</b> Puhvervaru vajadus .....	31
<b>Tabel 16.</b> Ühe lõhkamisega saadav kobestatud kivimi varu .....	31
<b>Tabel 17.</b> Kobestatud materjali varu kestus kontrollväärtuse korral.....	31

## 1. Sissejuhatus

Lubjakivi on Eestis oluline ehitusmaavara, mille nõudlus kasvab eriti suurte taristuprojektide elluviimisel. Üheks selliseks projektiks on Rail Baltica, mille rajamine eeldab stabiilset ja mahukat ehitusmaterjalide varustust. Rail Baltica on rahvusvaheline raudteetaristu projekt, mille eesmärk on ühendada Balti riigid Euroopa raudteevõrgustikuga. Raudtee loob ühenduse Helsingi, Tallinna, Pärnu, Riia, Panevėžyse, Kaunase, Vilniuse ja Varssavi vahel (RB Rail AS, 2026). Põhitrassi ehitus läbib ka Rapla maakonda, mis suurendab vajadust lubjakivikillustiku ja täitematerjalide järele. Seetõttu on oluline hinnata kohalike karjääride tootmisvõimekust (RB Rail AS, 2024).

Rail Baltica Eesti lõikude mineraalmaterjalide varustusuuringus on Rapla lõigu vajalikeks materjalimahtudeks 282 000 m<sup>3</sup> killustikku rööbastee ballastiks, 277 000 m<sup>3</sup> KG1 killustikku, 93 000 m<sup>3</sup> killustikku teede aluste ja hooldusteede jaoks ja 1 828 000 m<sup>3</sup> täitematerjale raudteetammideks ning 1 391 000 m<sup>3</sup> muid täitematerjale teede ja hooldusteede rajamiseks (RB Rail AS, 2018, lk 7). Varustusuuringu järgi on materjalivajadus suurim ehituse esimesel kolmel kuni neljal aastal, mil rajatakse aluskonstruksioone, sildu, viadukke, ligipääsuteid ja teede ristumisi. Seetõttu on karjääri tootmisvõimekuse hindamisel oluline arvestada mitte ainult kogumahuga, vaid ka lühikese aja jooksul vajalike suurte päevaste tootmismahutudega (RB Rail AS, 2024).

Rail Baltica Rapla IV objekti teenindamine seab Orava lubjakivikarjäärile kõrged nõudmised. Vajalik päevane lõhatud lubjakivi tootmismahut võib ulatuda kuni 2900 tonnini, objekti aastaseks kogumahuks on hinnanguliselt määratud 300 000 tonni. Samal ajal tuleb arvestada ka teiste klientide vajadustega.

Sellises olukorras muutub määravaks mäetööde nõuetekohane planeerimine. Tootmise järjepidevuse tagamiseks tuleb hinnata kaevandamisjärjestust, lõhketööde korraldust ning masinapargi tootlikkust. Lisaks mõjutavad mäetööde kavandamist ilmastikuolud, ligipääsuteede kasutatavus ja tööfrondi paiknemine.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on koostada Orava lubjakivikarjääri mäetööde planeering Rail Baltica Rapla IV objekti ja samaaegsete lisaklientide teenindamiseks, hinnates karjääri tootmisvõimekust, tööde järjekorda ning tehniliste ressursside vajadust.

Töö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised uurimisülesanded:

1. Kirjeldada Orava lubjakivikarjääri geoloogilisi ja tehnilisi tingimusi
2. Koostada Rail Baltica Rapla IV objekti ja lisaklientide teenindamiseks tootmisstsenarium
3. Hinnata olemasoleva masinapargi tootlikkust ja koormust erinevate päevamahtude korral
4. Hinnata lõhketööde ja puhvervaru vajadust tootmisrütmi tagamiseks

Töös otsitakse vastuseid järgmistele uurimisküsimustele:

- Kas Orava lubjakivikarjääri olemasolev tehnika võimaldab katta Rail Baltica Rapla IV objekti vajaliku päevase tootmismahu?

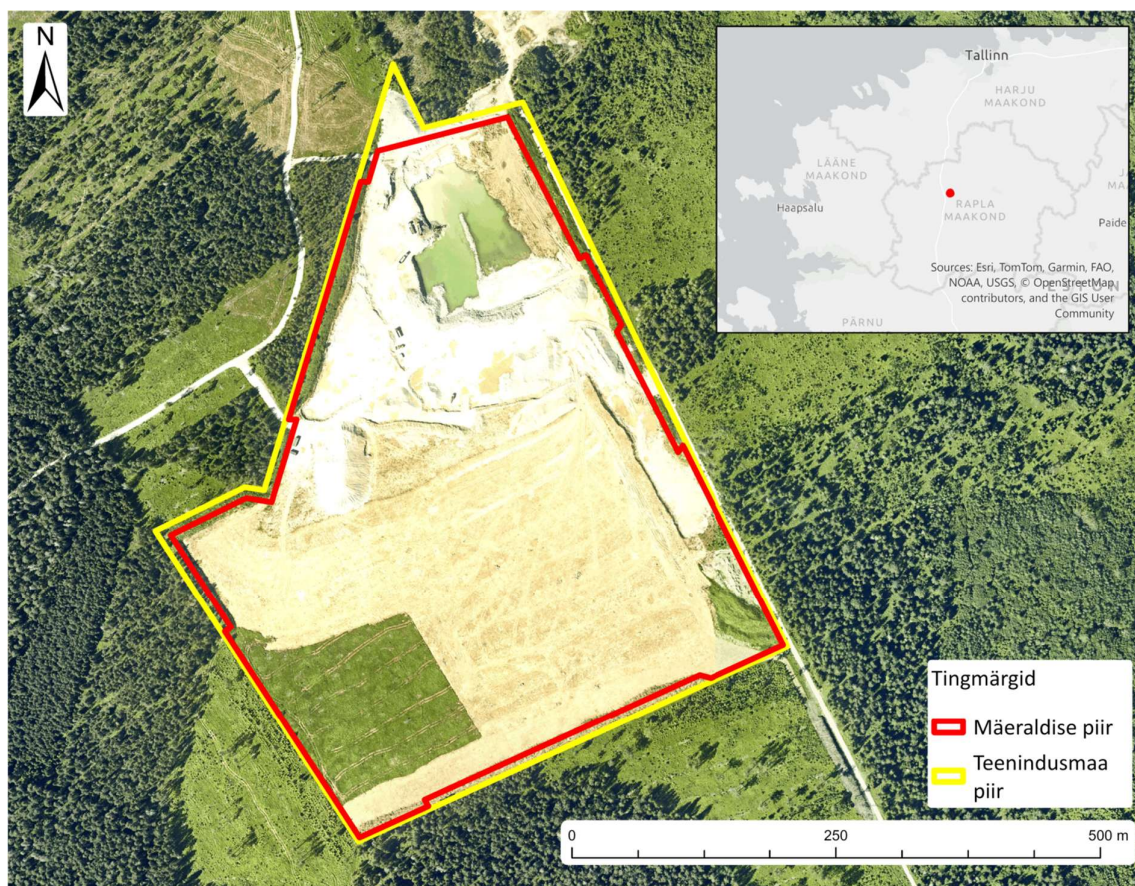
- Kuidas mõjutab lisaklientide samaaegne teenindamine karjääri tootmisvõimekust ja tehnika koormust?
- Millised tehnilised ja korralduslikud muudatused on vajalikud tippkoormuse katmiseks?

Töö praktiline väärtus seisneb selles, et selle tulemusena koostatakse mäetööde planeering ja võimalik tootmisstsenaarium, mida saab kasutada Orava lubjakivikarjääris sarnaste suurprojektide teenindamisel.

## 2. Uuringuala tutvustus ja teoreetilised alused

### 2.1. Orava karjääri asukoht ja üldiseloomustus

Orava lubjakivikarjäär asub Rapla maakonnas Märjamaa vallas Põlli külas (Joonis 1). Mäeeraldise pindala on 21,00 ha ning mäeeraldise teenindusmaa pindala 22,67 ha (Vilu, 2021). Karjääri keskkonnalaoga registrinumbr on Rapm-034 ning loa omajaks on OÜ Merko Kaevandused. Tegevuskoht asub Orava kruusakarjääri katastriüksusel tunnusega 50401:006:0063 ning loaga reguleeritavaks tegevuseks on maavara kaevandamine (Keskkonnaamet, 2026).



**Joonis 1.** Orava lubjakivikarjääri mäeeraldise ja teenindusmaa asukoht. Uuringuala asukoht on näha üleval paremal nurgas Eesti kaardilt. Kaardi koostas autor ArcGIS Pro tarkvaras; aluskaardid: Maa- ja Ruumiamet Esri; mäeeraldise ja teenindusmaa piirid: KOTKAS. (Esri, 2017; Maa- ja Ruumiamet, s.a.)

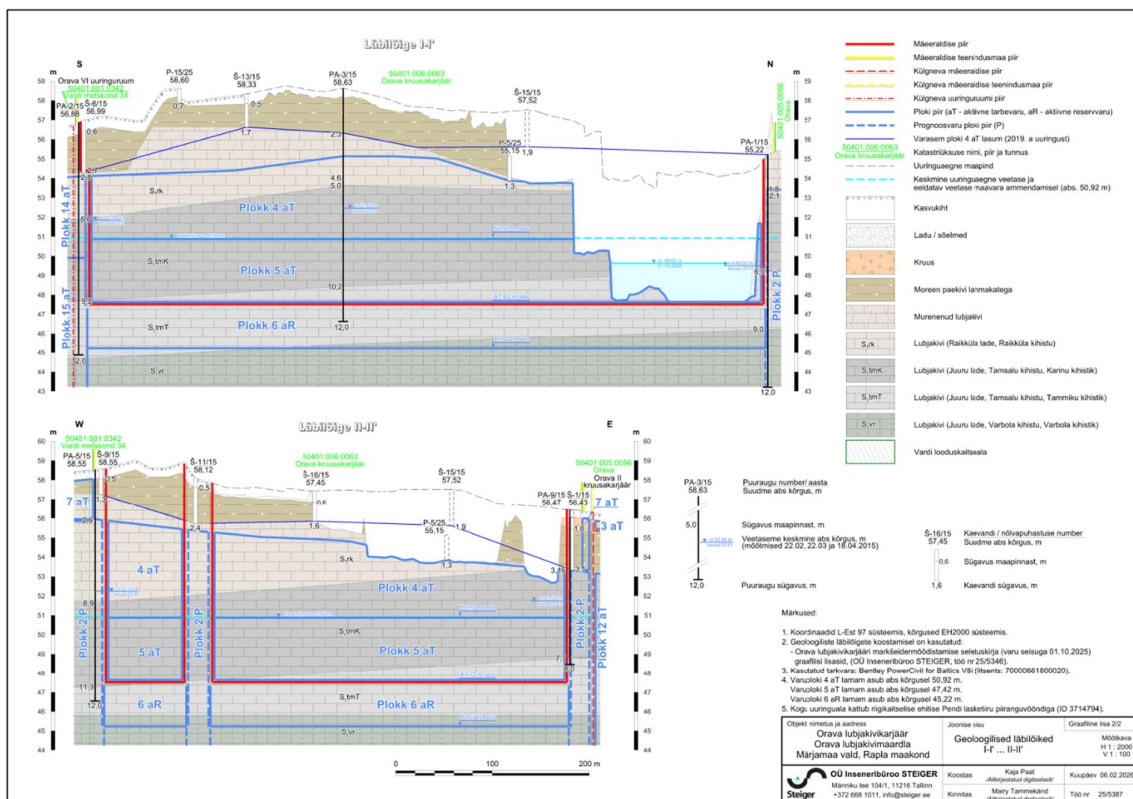
Karjäär paikneb hajaasustusega piirkonnas, jäädes Märjamaa alevist ligikaudu 10 km kirde suunas ning riigimaanteeade Tallinn–Pärnu–Ikla ja Vanamõisa–Nurme ristumiskohast umbes 2,5 km kirde poole (Vilu, 2021). Mäeeraldis ja teenindusmaa külgnevad mitme metsa- ja maatulundusmaa sihtotstarbega katastriüksusega. Mäeeraldise idapiir külgneb Pendi metsateega, mida kasutatakse veoteena. Lähimad elamud paiknevad ligikaudu 900 m kaugusel mäeeraldise lõunapiirist (Kukk, 2020).

Mäeeraldisel ja selle teenindusmaal ei paikne hoonestust, kommunikatsioone, kultuurimälestisi, muinsuskaitseobjekte ega Natura 2000 alasid. Samas külgneb teenindusmaa lääneserv osaliselt Vardi looduskaitsealaga (Kukk, 2020). Mäeeraldisest vahetult kirdes, osaliselt teenindusmaa alal, paikneb II kaitsekategooria taimeliigi püst-linalehiku kasvukoht (Keskkonnaamet, 2024). Mäeeraldisest umbes 650 m kaugusel kirdes asub Kõrvetaguse peakraav, mis kulgeb kagu-loode suunaliselt ja põhjas suubub Ohukotsu oja (Keskkonnaamet, 2026; Vilu, 2021).

### 2.1.1. Geoloogilised tingimused

Orava maardla asub Harju lavamaa tasase ja lainjalt liigestatud paese aluspõhjaga piirkonnas. Maardla on geomorfoloogiliselt seotud Balti jääpaisjärve rannavalliga, mida ümbritseb moreentasandik. Piirkonna kvaternaarisetted on jääjärve abrasioonilise tegevuse tõttu üldiselt väikese paksusega (Kukk, 2020; Vilu, 2021).

Orava maardla geoloogiline läbilõige koosneb kvaternaarisetetest ja nende all lasuvast Alam-Siluri karbonaatsest aluspõhjast (Joonis 2). Katend koosneb kasvupinnasest ja kvaternaarisetted on mäeeraldise piires valdavalt esindatud nõrgalt kulutatud veeriselise savika kruusaga, mis kohati vaheldub kruusa vahekihtidega. Jämedapurdmaterjalid domineerivad väheümarunud karbonaatkivimid (Vilu, 2021).



Joonis 2. Orava lubjakivikarjääri mäeeraldise geoloogilised läbilõiked I-I' ja II-II' (Kukk, 2020).

Kvaternaarisetete all lasub Alam-Siluri ladestiku lubjakivi, mis paikneb Raikküla lademe avamusel. Karbonaatkivimid on valdavalt esindatud lubjakiviga, kuid esineb ka dolomiidistunud lubjakivi.

Lubjakivi on valdavalt detriidikas kuni detriitjas ning peene- kuni mikrokristalliline. Lubjakivi läbilõikes esineb mergli õhukesi vahekihte, mille sagedus suureneb sügavuse suunas (Kukk, 2020). Kronostratigraafiliselt asub mäeeraldise kasulik kiht Raikküla lademes ning Juuru lademe Karinu, Tammiku ja osaliselt Varbola kihistuses. Varbola kihistiku lubjakivis esineb stromatopooride kivistisi (Vilu, 2021).

Mäeeraldise piires on kattekihi paksus vahemikus 0,0-0,8 m, keskmiselt 0,6 m. Kvaternaari setete kasuliku kihi paksus on kaevandite järgi 1,0–3,9 m, keskmiselt 1,5 m. Lubjakivi kasuliku kihi keskmine paksus on veepealses osas 4,5 m ja veealuses osas 3,5 m (Kukk, 2020).

Materjali kvaliteedi seisukohalt käsitletakse Orava mäeeraldise kivimit ehitusotstarbelise lubjakivina. Kivim vastab praktiliselt kogu mahus lubjakivi nõuetele, kuid survetugevuse alusel on tegemist madalamargilise karbonaatkivimiga. Los Angelese teguri keskmiseks kategooriaks on LA35 ning killustik vastab IV klassi nõuetele. Seega mäeeraldise põhimaavaraks on madalamargiline ehituslubjakivi ning kaas maavaraks täitekruus (Kukk, 2020).

Orava lubjakivikarjääri kaevandatav varu paikneb 4. ja 5. plokis. Mõlema ploki kasutusala on ehituslubjakivi ning maavaraks madalamargiline ehituslubjakivi. Keskkonnanala järgi on 4. ploki aktiivne tarbevaru 583,393 tuh m<sup>3</sup> ja 5. ploki aktiivne tarbevaru 638,69 tuh m<sup>3</sup>. Loa kohaselt on madalamargilise ehituslubjakivi kaevandatav varu kokku 1 222,083 tuh m<sup>3</sup> (Keskkonnaamet, 2026).

### **2.1.2. Hüdrogeoloogilised tingimused**

Orava maardla piirkonna hüdrogeoloogilises läbilõikes esinevad Kvaternaari, Siluri, Ordoviitsiumi, Ordoviitsium-Kambriumi ja Kambrium-Vendi veekompleksid. Lubjakivi katvates purdsetetes püsivad pinnasevett ei esine. Vesi võib neis setetes esineda vaid sporaadiliselt, peamiselt sademete rohkete perioodidel või lume sulamisel, kui maapinnale langeva vee hulk ületab infiltreerumisvõime ning lohkudesse tekivad ajutised veekogud. Suhteliseks põhjavett kandvaks kihiks S-O veekompleksi vahel võib pidada Varbola kihistu mergli vahekihtidega tihedat lubjakivi (Kukk, 2020).

Geoloogiliste uuringute käigus mõõdeti veetaset puuraukudes vahetult pärast puurimist ning jälgiti kolme kuu vältel. Saadud andmete põhjal määrati keskmiseks põhjavee tasemeks ligikaudu 50,9 meetrit ülemerepinnast (Vilu, 2021).

## **2.2. Mäetööde planeerimise teoreetilised alused**

Orava lubjakivikarjääri kaevandamisviis on pealmaaevandamine aukkaevandamise meetodil, kus maapinnalähedase maavara väljamine toimub tööalade ja astangute kaupa (Kukk, 2020). Tööde planeerimisel on oluline tagada tööfrondi järjepidev liikumine ja piisav tootmismahut. Karjääris esineb nii mehaaniliselt väljatavat materjali kui ka puur-lõhketöödega kobestatavat lubjakivi, seega mõjutavad mäetööde korraldust kivimi ekskaveeritavus, lõhatavus ja kobestustegur (Tomberg, 2023a).

Mäetööde planeerimise eesmärk on siduda maardla geoloogilised tingimused, kaevandamise ruumiline lahendus, tööde tehnoloogiline järjekord, kasutatav tehnika ja nõutav tootmisvõimsus. Avakaevanduse kavandamisel tuleb arvestada karjääri geomeetriat, kaevandamisjärjestust ning masinate tootlikkust (Darling, 2011; Hustrulid ja Kuchta, 2006). Lühiajalisel planeerimisel

keskendatakse tavaliselt päevade, nädalate või kuude lõikes tööfrondi, tootmismahude ja tehnika kasutuse kooskõlastamisele (Blom jt, 2019).

### **2.2.1. Kaevandamisjärjestuse ja tööfrondi liikumise alused**

Kaevandamisjärjestuse ja tööfrondi liikumise planeerimisel määratakse, millises suunas ja milliste etappidena kaevandamine mäeeraldisel areneb. Eesmärgiks on säilitada ligipääs kaevandatavale varule, tagada veeteede toimivus ning vältida olukorda, kus osa maavarast jääb ligipääsu kadumise tõttu ajutiselt või püsivalt kasutamata. Etapiline kaevandamine võimaldab tööfronte arendada nii, et järgmise ala ettevalmistamine saab toimuda enne eelmise ala täielikku ammendumist. See aitab säilitada tootmise järjepidevust ja vähendada seisakute riski (Darling, 2011).

Tööfrondi liikumine kirjeldab kaeve-ee edasilikumist ajas ja ruumis ning näitab, kui suur osa maavarast tuleb kindla perioodi jooksul välja võtta. Selle hindamisel lähtutakse kavandatud kaevandamismahust, astangu kõrgusest, tööfrondi laiuusest ja kasutatava masinapargi tegelikust tootlikkusest. Tööfrondi liikumise hindamisel tuleb kasutada eelkõige efektiivset või eksploatatsioonilist tootlikkust. Selline lähenemine võimaldab hinnata, kas tööfront liigub piisava kiirusega, et saavutada kavandatud tootmismahud ilma laadimis-, veo- või töötlemisprotsessi ülekoormamata (Hustrulid ja Kuchta, 2006). Selline käsitlus on kooskõlas lühiajalise tootmisplaneerimisega, kus kaevandatavad alad, tööfronidid ja tootmismahud määratakse lühemate planeerimisperioodide kaupa (Blom jt, 2019).

Orava lubjakivikarjääri jätkatakse kaevandamist karjääri põhjaosast. Kruusa kaevandamisel liigub tööfront üldiselt põhjast lõuna suunas ning lubjakivi kavandamisel põhjaosast lõuna suunas ja idast läände. Nii säilib juurdepääs mäeeraldisel lääneosale ja on võimalik karjäär järkjärgult täielikult ammendada (Kukk, 2020).

### **2.2.2. Tootmisvõimsuse hindamine**

Karjääri tootmisvõimekust tuleb hinnata kogu tootmisahela alusel, sest karjääri läbilaskevõime sõltub järjestikuste tööprotsesside toimimisest, mis sõltub kõige väiksema tootlikkusega tööprotsessist. Orava lubjakivikarjääris mõjutavad tootmisvõimsust katendi eemaldamine, maavara mehaaniline raimamine või lõhketöödega kobestamine, laadimine ja ladustamine. Rail Baltica Rapla IV objekti teenindamiseks tuleb hinnata, kas masinapargi tootlikkus, tööfrondi liikumine ja lõhketööde rütm võimaldavad vajaliku mahu saavutada (Hustrulid ja Kuchta, 2006; Kukk, 2020).

Oluline on eristada masina teoreetilist tootlikkust ja eksploatatsioonilist ehk tegelikes töötingimustes saavutatavat tootlikkust. Teoreetiline tootlikkus lähtub masina tehnilistest näitajatest ja töötsükli kestvusest, kuid eksploatatsiooniline tootlikkus arvestab ka tööprotsessis tekkivate ajakuludega ja laadimis- ning veotsükli korraldusega (Ritter ja Stoyan, 2018). Laadimis- ja veotsükli mõjutavad töötingimustest tulenevad tegurid, sealhulgas kopa täituvus, töötsükli kestus, laadimiskoha asukoht ja materjali omadused (Manyele, 2017; Mnzool jt, 2024).

### **2.2.3. Kasutatav tehnika ja tööprotsess**

Orava lubjakivikarjääri kaevandamine on projekteeritud kolme astanguga. Esimese astangu moodustab täitekruusa kiht, mille kaevandamisele eelneb kasvukihi ja katendi eemaldamine. Teine astang on Raikküla lademe lubjakivi, mida saab väljata mehaaniliselt ekskavaatoriga. Arvestades

kruusakihi ja Raikküla lademe lubjakivi kihi paksuse muutlikkust ei ole karjääris otstarbekas I ja II astangut eraldi väljata. Maavara kaevandamisel seisab ekskavaator astangu lael, ammutades kaevise kuni III astanguni. Seejärel tõstetakse materjal ajutisse puistangusse või veetakse karjäärist välja. Astanguid ühiselt väljates tuleb arvestada mõlema astangu ohualade liitumisega (Kukk, 2020).

Kolmanda astangu moodustab Juuru lademe lubjakivi, mida on vaja kobestada puur-lõhketöödega. Selleks puuritakse lõhatavasse astangusse laenguaugud. Need laetakse lõhkeainega ja lõhatakse vastavalt lõhketööde projekti järgi. Lõhatud materjal laaditakse pöördkoppekskavaatoriga kas astangu laele valli, veetakse karjäärist välja või ajutisse puistangusse (Kukk, 2020). Ajutises puistangus olev materjal moodustab puhvervaru, mis võimaldab kaevandamise, laadimise ja väljastamise erinevat jõudlust tasakaalustada ning vähendada tootmisahela üksikute lülide piirangutest tekkivaid seisakuriske (Jupp jt, 2024).

Orava lubjakivikarjääris kasutatakse kaevandamiseks, laadimiseks ja ümbertõstmiseks pöördkoppekskavaatoreid Caterpillar 330B LN ja Volvo EC380DL. Valmistoodangu või puistangus oleva materjali laadimiseks veokitesse ning vajadusel materjali teisaldamiseks ja ajutistesse puistangutesse paigutamiseks kasutatakse VOLVO L-180E rataslaadurit (Tabel 1).

<b>Tabel 1.</b> Masinate kirjeldused (OÜ Merko Kaevandused, 2026b).		
Masin	Roll töös	Kopa maht (m <sup>3</sup> )
Caterpillar 330B LN	lubjakivi kaevandamine ja ümbertõstmine	1,5
Volvo EC380DL	lubjakivi kaevandamine ja ümbertõstmine	2
Volvo L-180E	materjali laadimine veokitesse	4,4

Tootmisstsenariumite hindamisel on masinate tehnilised näitajad olulised, sest laadimise ja veo jõudlus sõltub muu hulgas kopa mahust, tõstevõimest, veoki kandevõimest, töötsükli kestusest ja kasutustegurist (Tomberg, 2023b).

#### 2.2.4. Lõhketööde hindamise teooria

Lubjakivikarjäärides kasutatakse lubjakivi kobestamisel enamasti lõhkeaugumeetodit, mille puhul paigutatakse lõhkeaine kivimimassiivi puuritud lõhkeaukudesse (Tomberg, 2023d). Lõhketööde kvaliteet mõjutab otseselt kogu tootmisahelat, sest killustatus määrab, kui tõhusalt saab materjali laadida, vedada ja purustada. Lõhatud kivimi fragmentatsioon mõjutab otseselt edasise laadimise ja veo efektiivsust ning tootmiskulusid (Deressa jt, 2025).

Orava lubjakivikarjääris kasutatakse puur-lõhketöid III astangu ehk Juuru lademe lubjakivi kobestamiseks. Kaevandamisprojekti kohaselt on otstarbekas puur-lõhketöid teha paaris-plokkide kaupa, et protsess oleks võimalikult ohutu ja efektiivne. Lõhkamisel tuleb kasutada lühiviitlõhkamist, mis on oluline ka tootmisvõimsuse seisukohalt ja kasutatav lõhkeaine peab olema tasakaalustatud või vähese positiivse hapnikubilansiga (Kukk, 2020).

Lõhketööde planeerimisel tuleb tagada, et Juuru lademe lubjakivi oleks kobestatud piisavas mahus ja sobiva killustusega, et ülejäänud tööprotsessid saaksid toimida ilma seisakuteta. Mitmerealine lühiviitlõhkamine vähendab ülemõõduliste kivimitükkide osakaalu ning parandab laadimise jõudlust,

sest ühtlase tükisuurusega materjali on ekskavaatori või laaduriga lihtsam laadida (Tomberg, 2023c). Lõhkamiste sageduse määrab kobestatud kaevis laadimiskiirus. Järgmise ploki lõhkamine toimub vajaliku kvaliteediga kaevis lõppemisel eelmises plokis. Tuleb vältida liigset ettelõhkamist, et ennetada kaevis võimalikku tihenemist (Kukk, 2020).

### 3. Andmed ja meetodid

#### 3.1. Kasutatud lähteandmed

##### 3.1.1. Geoloogilised ja tehnilised lähteandmed

Orava lubjakivikarjääri geoloogiliste ja tehniliste lähteandmetena kasutati karjääri kehtivat keskkonnaluba Rapm-034 (Keskkonnaamet, 2026), KOTKAS süsteemist kättesaadavaid loa lisasid, mäeeraldise plaani ja geoloogilisi läbilõikeid (Vilu, 2021) ning Orava lubjakivikarjääri maavara kaevandamise projekti (Kukk, 2020). Nende andmete põhjal kirjeldati mäeeraldise ja teenindusmaa piire, plokkide paiknemist, katendi ja kasuliku kihi paksust, maavara kvaliteeti ja kaevandamise tehnoloogilisi tingimusi.

Geoloogiliste lähteandmete abil hinnati millistes karjääri osades on mäetöid kõige mõistlikum arendada ning millise järjestusega tööprotsesse planeerida. Andmed on ka olulised lõhketööde vajaduse ja tööfrondi liikumise hindamisel.

Masinapargi tootlikkuse ja koormuse hindamisel kasutati OÜ Merko Kaevandused poolt esitatud tehnilisi andmeid ja karjääris kogutud vaatlusandmeid. Rataslaaduri VOLVO L-180E vaatlusandmete põhjal oli ühe veoki keskmine laadimisaeg 4 minutit ja 16 sekundit (Lisa 1).

##### 3.1.2. Rail Baltica Rapla IV ja lisaklientide indikatiivsed lähteandmed

Rail Baltica Rapla IV objekti tootmisstsenaariumite koostamisel kasutati OÜ Merko Kaevanduse esitatud indikatiivseid planeerimisandmeid (Tabel 2) (AS Merko Kaevandused, 2026b). Analüüsis käsitleti lõhatud paekivi tarneperioodina ajavahemikku 01.06.2025–01.07.2026. Rail Baltica Rapla IV objekti ligikaudse kogumahuna arvestati 300 000 t ja lisaklientide täiendava mahuna 88 000 t jaanuaris ja veebruaris ning aprillist juulini oli tarnemaht 220 000 t. Seega lisaklientide kogumaht ulatub 300 000 t. Karjääri kogutootlus on seega 600 000 t.

<b>Tabel 2.</b> Tootmisstsenaariumites kasutatud lähteandmed (OÜ Merko Kaevandused, 2026b).	
Lähteandmed	Väärtus
Rail Baltica kogumaht (t)	300 000
Lisaklientide kogumaht (t)	300 000
Kogumaht kokku (t)	600 000
Rail Baltica tippkoormus (t/p)	2900
Rail Baltica tavakoormus (t/p)	2600
Lisaklientide päevane koormus (t/p)	2000–2500
Tööpäevi kuus	22
Tööpäeva pikkus (h)	10
Lubjakivi mahumass (t/m <sup>3</sup> )	2,6
Kobestustegur	1,3
Veoki koorma mass (t)	30

Lähteandmete põhjal koostati perioodide kaupa tootmis- ja tarnekoormuste jaotus, mida kasutatakse hiljem tootmisvõimsuse, tehnika koormuse ja lõhketööde vajaduse hindamisel (Tabel 3).

<b>Tabel 3.</b> Indikatiivsed päevased tootmis- ja tarnemahud perioodide kaupa (OÜ Merko Kaevandused, 2026b)				
Periood	Rail Baltica koormus ( t/p)	Lisaklientide koormus (t/p)	Kogukoormus (t/p)	Selgitus
01.06.2025–31.10.2025	2600–2900	0	2600–2900	RB (kuivem periood)
01.11.2025–31.12.2025	1800–2200	0	1800–2200	RB (keerulised tee- ja ilmastikuolud)
01.01.2026–28.02.2026	2600–2900	2000	4600–4900	RB + lisakliendid
01.03.2026–31.03.2026	1800–2200	0	1800–2200	RB (sulaperioodi mõju)
01.04.2026–01.07.2026	2600–2900	2500	5100–5400	RB + lisakliendid

Tabelis 3 esitatud päevamahud ei väljenda kogu perioodi iga kalendripäeva püsivat toodangut, vaid kirjeldavad eeldatavaid aktiivsete tootmis- ja tarnepäevade koormustasemeid. Seetõttu kasutatakse töös eraldi kogumahu kontrolli ja tippkoormuse kontrolli.

## 3.2. Metoodika

### 3.2.1. Mahuarvutuse metoodika

Mahuarvutusega määratakse analüüsitava lubjakivikoguse geomeetiline maht ning teisendatakse see tootmis- ja tarneanalüüsis kasutatavaks massiks. Arvutustes lähtutakse karjääri kasuliku kihi pindalast ja keskmisest paksusest, sest lihtsustatud mahuarvutuses saadakse maht pindala ja keskmise paksuse korrutisena. Arvutusala jagatakse etappide kaupa väiksemateks osadeks ja arvutatakse iga etapi maht eraldi ning liidetakse lõpuks kogumahuks. Kuna tootmis- ja tarneandmeid käsitletakse tonnides, teisendatakse kivimi maht massiks mahumassi kaudu (Hustrulid ja Kuchta, 2006).

Arvutustes kasutati lähteandmetena droonimõõdistuste põhjal koostatud 3D-mudelit DJI Terra tarkvarast. Mudelist võeti arvutusteks vajalikud pikkused ja kõrgusandmed.

Etapi maht arvutati valemiga

$$V = A \times h \quad (1)$$

kus  $V$  on maht ( $m^3$ ),  $A$  on pindala ( $m^2$ ),  $h$  on keskmine väljamissügavus ( $m$ ).

Materjali mass arvutati valemiga

$$M = V \times \rho \quad (2)$$

kus  $M$  on mass ( $t$ ),  $V$  on maht ( $m^3$ ) ja  $\rho$  on lubjakivi mahumass ( $t/m^3$ ).

### 3.2.2. Tootmisstsenaariumite arvutusmetoodika

Tootmisstsenaariumite arvutusmetoodika eesmärk on hinnata Orava lubjakivikarjääri tootmisvõimekust Rail Baltica Rapla IV objekti teenindamisel ning samaaegsete lisaklientide mõju karjääri koormusele. Arvutused põhinevad indikatiivsetel tootmis- ja tarneandmetel.

Kõigepealt arvutati antud perioodi keskmine päevane tootlikkus. Kogumahu puhul liideti

$$M_{kokku} = M_{RB} + M_{LK} \quad (3)$$

kus  $M_{RB}$  on Rail Baltica kogumaht (t) ja  $M_{LK}$  on lisaklientide kogumaht (t).

See jagati perioodi tööpäevade arvuga, mis saadi eeldusel, et kuus on 22 tööpäeva

$$P = M_{kokku} \div T_p \quad (4)$$

kus P on päevane tootmismah (t/p),  $M_{kokku}$  on perioodi jooksul toodetav või tarnitav kogumaht (t/p),  $T_p$  on vastava perioodi tööpäevade arv.

### 3.2.3. Tehnika koormuse hindamise metoodika

Tehnika koormuse hindamisel lähtuti masina arvutuslikust eksploatatsioonilisest tootlikkusest, kuna tegelikus karjääritöös mõjutavad jõudlust lisaks masina konstruktiivsetele parameetritele ka kivimi omadused, töötsükli kestus, transpordist tingitud seisakud ja töökorralduslikud ajakaod (Ritter ja Stoyan, 2018)

Eesmärgiks on kontrollida, kas olemasolev tehnika suudab katta tootmisstsenaariumites vajaliku päevamahu. Hindamisel võrreldakse vajalikke päevamahte masinapargi hinnangulise tootlikkusega. Kui tehnika päevane tootlikkus on suurem kui vajalik päevamaht, siis on tehnika piisav. Kui väiksem, siis tekib puudujääk või vajadus lisatehnika, pikema tööaja või töökorralduse muutmise järele. Kuna tootmisahel toimib järjestikuste tööprotsessidena, määrab kogu süsteemi jõudluse kõige väiksema tootlikkusega lüli (Hustrulid & Kuchta, 2006).

Masinate tootlikkus arvutati eraldi pöördkoppekskavaatoritele ja rataslaadurile. Ekskavaatorite puhul lähtuti kopa mahust, materjali mahumassist, kopa täitetegurist, ühe töötsükli kestusest ja masina kasutegurist. Ekskavaatori tunnitootlikkus arvutati tsükliajal põhineva arvutusmeetodiga, kus arvestatakse kopa mahtu, materjali mahumassi, kopa täitetegurit, ühe töötsükli kestust ja masina kasutustegurit (Manyele, 2017).

$$Q_t = \frac{V_k \times \rho \times f \times 60}{t_s} \times k \quad (5)$$

kus  $Q_t$  on ekskavaatori tunnitootlikkus (t/h),  $V_k$  on kopa maht kuupmeetrites,  $\rho$  on materjali mahumass ( $t/m^3$ ),  $f$  on kopa täitetegur,  $t_s$  on ühe laadimistsükli kestus (min),  $k$  on masina kasutustegur.

Kopa täitetegur näitab, kui suur osa kopa nimimahust tegelikult materjaliga täitub. Seda tähistatakse tavaliselt  $f$  või *fill factor*. Kopa täiteteguri määramisel lähtuti ligikaudsetest väärtustest, mille järgi on hästi lõhatud kivimi täitetegur 80–95%, keskmiselt lõhatud kivimi täitetegur 75–90% ja halvasti lõhatud

kivimi täitetegur 60–75% (Caterpillar, 2026). Kuna Rail Baltica Rapla IV objekti puhul käsitletakse peamise materjalina lõhatud paekivi, kasutati arvutustes väärtusena kopa täitetegurit 0,85. Tegemist on keskmise hinnanguga, mis jääb keskmiselt lõhatud kivimi vahemikku.

Kasutustegurit rakendati selleks, et arvestada tegelikus tööprotsessis tekkivaid ajakadusid. Nende hulka kuuluvad abioperatsioonid, transpordist tingitud seisakud, töökorralduslikud pausid ja tehnilised seisakud. Selline käsitus vastab eksploatatsioonilise tootlikkuse mõistele, mille korral hinnatakse reaalselt saavutatavat töömahtu konkreetse tehnoloogia ja töökorralduse tingimustes (Ritter ja Stoyan, 2018; Tomberg, 2023b). Antud töös määrati kasuteguriks 0,85, mis tähendab, et 85% töövahetuse ajast käsitletakse efektiivse tootva tööajana ja 15% ajast arvestatakse vältimatute ajakadudena.

Masina päevane tootlikkus arvutati tunnitootlikkuse ja tööpäeva pikkuse korrutisena:

$$Q_{päev} = Q_t \times h \quad (6)$$

kus  $Q_{päev}$  on masina päevane tootlikkus (t/p),  $Q_t$  on masina tunnitootlikkus ja  $h$  on töötundide arv päevas.

Arvutustes hinnati masinate tootlikkust 10 h, 12h, 15h tööpäeva korral, et võrrelda, kuidas tööpäeva pikendamine mõjutab masina võimekust katta vajalikku päevamahtu tippkoormuste korral.

Rataslaaduri väljastusvõimekust hinnati laadimistsükli põhineva lähenemisega, sest laadimis- ja veotsükli kestus mõjutab otseselt avakaevanduse tootlikkust (Mnzool, 2024).

Rataslaaduri tootlikkuse hindamisel lähtuti veokite laadimise jõudlusest. Esmalt arvutati, mitu veokit suudab rataslaadur ühe tunni jooksul laadida:

$$n = \frac{60}{t_l} \quad (7)$$

kus  $n$  on laaditavate veokite arv tunnis ja  $t_l$  on ühe veoki keskmine laadimisaeg minutis.

Seejärel arvutati rataslaaduri tunnitootlikkus:

$$Q_t = n \times q \times k \quad (8)$$

kus  $Q_t$  on rataslaaduri tunnitootlikkus (t/h),  $n$  on laaditavate veokite arv tunnis,  $q$  on ühe veoki koorma mass (t), ja  $k$  on kasutegur.

Rataslaaduri päevane tootlikkus arvutati sama meetodiga nagu pöördkoppekskavaatoritel.

Masina koormusprotsent arvutati vajaliku päevamahu ja masina päevase tootlikkuse suhtena:

$$K_t = \frac{P}{Q_{päev}} \times 100 \quad (9)$$

kus  $K_t$  on masina koormusprotsent (%),  $P$  on vajalik päevane tootmis- või tarnemaht (t/p),  $Q_{päev}$  on masina arvutuslik päevane tootlikkus (t/p).

Kui koormusprotsent jääb alla 100%, suudab masina katta vajaliku päevase mahu ning masinal jääb ka tootmisreservi. Kui koormusprotsent ületab 100%, ei suuda masin antud tööpäeva pikkuse korral vajalikku päevamahtu katta. Sellises olukorras prooviti tootlikkust katta pikema tööpäeva või kombineeritud töökorraldusega.

Arvutati ka ekskavaatorite kombineeritud päevane tootlikkus. Selleks liideti Caterpillar 330B LN ja Volvo EC380DL 12-tunnise tööpäeva päevased tootlikkused:

$$Q_{eks,kokku} = Q_{CAT} + Q_{Volvo} \quad (10)$$

Ekskavaatorite reserv arvutati kombineeritud tootlikkuse ja vajaliku päevamahu vahena:

$$R_{eksk} = Q_{eks,kokku} - P \quad (11)$$

kus  $R_{eksk}$  on ekskavaatorite reserv (t/p),  $Q_{eks,kokku}$  on ekskavaatorite kombineeritud päevane tootlikkus (t/P) ja  $P$  on vajalik päevamaht (t/p)

Rataslaaduri puhul hinnati, kas selle 12 tunnise tööpäeva tootlikkus suudab katta vajaliku päevamahu. Kui see jäi väiksemaks arvutati puudujääk:

$$D = P - Q_{RL} \quad (12)$$

kus  $D$  on rataslaaduri puudujääk (t/p) ja  $Q_{RL}$  on rataslaaduri päevane tootlikkus (t/p).

Seejärel hinnati, kas rataslaaduri puudujääki on võimalik katta või vähendada ekskavaatorite reservvõimekusega, mis eeldab töökorralduslikku ümberjaotust, kus osa materjali etteandmisest või veokite laadimisest oleks korraldatud ekskavaatorite töövõimekust kasutades. Selleks leiti korrigeeritud võimekus, mis arvutati rataslaaduri tootlikkuse ja kasutatava ekskavaatorite reservi summana:

$$Q_{korr} = Q_{RL} + R_{kasut} \quad (13)$$

kus  $Q_{korr}$  on korrigeeritud võimekus (t/p),  $Q_{RL}$  on rataslaaduri päevane tootlikkus (t/p) ja  $R_{kasut}$  on rataslaaduri puudujäägi katmiseks kasutatud ekskavaatorite reservvõimekus (t/p).

Lõplik ülejääk või puudujääk arvutati korrigeeritud võimekusest vajaliku päevamahu lahutustehtena:

$$J = Q_{korr} - P \quad (14)$$

kus  $J$  on lõplik puudujääk (t/p).

Maksimaalsel tippkoormusel hinnati ka puhvervaru vajadust (Jupp jt, 2024). Seda kasutati juhul kui korrigeeritud tehniline võimekus ei suutnud katta vajalikku päevamahtu ja puudujääki saaks katta ka eelevalt loodud laoga:

$$M_{varu} = D_{päev} \times d \quad (15)$$

kus  $M_{varu}$  on vajalik puhvervaru (t),  $D_{päev}$  päevane puudujääk (t/p), d on tippkoormuse kestvus päevades.

### 3.2.4. Lõhketööde sageduse ja kobestatud materjali varu kestuse hindamine

Lõhketööde sageduse hindamisel kasutati lihtsustatud tootmisbilansi meetodit. Kuna töö eesmärk on karjääri tootmisvõimekuse hindamine, arvatati, kui palju kobestatud lubjakivi saab ühe lõhkamisega ja mitmeks tööpäevaks sellest jätkub erinevate päevakoormuste korral. Arvutustes käsitleti lõhketöid kobestuslõhkamisena, mille eesmärk on kivimi purustamine ja kobestamine edasiseks laadimiseks, veoks ja purustamiseks (Tomberg, 2023d).

Kobestatud materjali varu ei ole sama mis valmistoodangu puhvervaru, vaid kirjeldab lõhkamisega ette valmistatud kivimi kogust, mille arvelt saab toimuda edasine laadimine ja töötlemine. Puhvervaru on puistangus olev materjal, mis antud töös katab tehnikapuudujääki tippkoormusel (Jupp jt, 2024).

Ühe lõhkamisega saadav kivimikogus:

$$M_1 = V_1 \times \rho \quad (16)$$

kus  $M_1$  on ühe lõhkamisega saadav kivimimass tonnides,  $V_1$  on ühe lõhkamisega kobestatava kivimi maht  $m^3$  ja  $\rho$  on lubjakivi mahumass.

Ühe lõhkamisega kobestatava kivimi mahu määramisel lähtuti karjääri varasemast praktikast või indikatiivsest lõhkamise mahust.

Kobestatud materjali varu kestus tööpäevades:

$$I = \frac{M_1}{P} \quad (17)$$

kus I on kobestatud materjali varu kestus (p),  $M_1$  on ühe lõhkamisega saadav kobestatud kivimi mass tonnides ja P on päevane tootmisvajadus tonnides.

### 3.2.5 Arvutuste piirangud

Töös esitatud tootlikkuse ja mahuarvutused on käsitletavad planeerimistasandi kontrollarvutustena. DJI Terra 3D mudelist pärit pindalad ja keskmised väljamissügavused ei asenda markseidermõõdistusi. Masina tootlikkuse arvutused põhinevad valitud tsükliaegadel, kasuteguritel ja vaatlusandmetel, mistõttu tegelik tootlikkus võib erineda. Seetõttu kasutatakse tulemusi karjääri tootmisvõimekuse hindamiseks ja kriitiliste koormusperioodide tuvastamiseks, mitte lõpliku tootmisgraafikuna.

## 4. Mäetööde planeering

### 4.1. Olemasoleva olukorra analüüs

Planeeringu koostamise algseisu järgi paikneb karjääri põhjapoolses osas veega täitunud süvend, mille keskel paiknevad tööalad, karjäärisisesed teed ja ladustatud materjali alad. Karjääri teede võrk ühendab kaeve- ja ladustusalasid ning võimaldab materjali liikumist karjääri eri osade vahel.

Olemasoleva olukorra põhjal on kaevandamise jätkamine kõige mõistlikum juba avatud tööalaga külgneval alal, sest seal on ligipääs ja materjali liigutamiseks vajalikud karjäärisisesed teed ja ladustatava materjali alad juba olemas. See vähendab vajadust uute ligipääsuteede rajamiseks ning võimaldab tööfronti järkjärguliselt arendada. Karjääri keskosas paiknevad ladustatud materjali alad on tootmisrütmi seisukohalt olulised, sest sinna on võimalik moodustada ajutine puhvervaru.

Joonisel 3 on näha ka veel paljandamata ala, mille kasutuselevõtt eeldab ettevalmistus töid, vajadusel paljandamist ja karjäärisiseste teede ümberkorraldamist, mida antud töös ei planeerita.



**Joonis 3.** Orava karjääri olemasolevat olukorda illustreeriv joonis DJI Terra 3D mudeli alusel. (OÜ Merko Kaevandused, 2026a)

## 4.2. Kaevandamisetaappide planeering

Kaevandamisetaappide planeering koostati DJI Terra 3D-mudeli põhjal määratud alade ja sügavuste alusel. Etappide jaotus lähtus karjääri olemasolevast olukorrast, veetaseme paiknemisest, tööalade ligipääsetavusest ning Rail Baltica Rapla IV objekti ja lisaklientide teenindamiseks vajalikust tootmisrütmist. Etappide määramisel eristati veealust ja veetasemeni väljatavat osa.

Perioodi lõikes on planeeritud teostada neli erinevat etappi. Esimeses etapis väljatakse olemasoleva veega täitunud süvendi idaküljel paiknev veealune osa lamamini. Selle etapi eesmärk on jätkata kaevandamist olemasoleva veekoguga seotud alalt ning valmistada ette edasiste tööetappide ruumiline areng. Teine etapp on 18 300 m<sup>2</sup> suurune ala, mis kaevandatakse kuni veepiirini. Kolmandas etapis on planeeritud 20 900 m<sup>2</sup> suuruse ala kaevandamine veetaseme lähedase kõrguseni. Antud etapis jäetakse ligikaudu 1 m paksune kiht enne veetaset lõhkamata, sest sealne kiht on kivimis tugevama ja ühtlasema ehitusega, mis võimaldab masinate liikumist ja tööprotsesside läbiviimist stabiilsemal tööalusel. Neljandas etapis väljatakse pärast teise ja kolmanda etapi lõppu alles jääv, umbes 3 m paksune, veealune osa kuni lamamini.



**Joonis 4.** Kaevandamisetaappide kujutus illustreerival kaardil. Etappide jaotuse koostas autor; alusmudel: DJI Terra 3D mudelist.

Joonisel pole välja toodud 4. etappi, kuna tegemist on 2. ja 3. etapi all asuva veealuse kihiga. Etappe käsitletakse eelkõige kaevandamise ruumilise järjestusena, mille eesmärk on tagada tööfrondi loogiline liikumine, ligipääs kaevandatavale varule ja piisav tootmisvõimekus. Kuna Rail Baltica ja

lisaklientide tarnevajadus muutub periooditi, tuleb väiksema tarnevajadusega perioodidel toota ka puhvervaru, mida oleks võimalik kasutada suurema koormusega perioodidel.

### 4.3. Mahuarvutuse tulemused

Mahuarvutuste tulemuste põhjal on nelja kaevandamisetaapi kogumass 696 072 tonni (Tabel 4). Suurima massiga on teine etapp, mille kolme osa summaarne mass on umbes 237 900 t. Esimese etapi massiks on 95 700 tonni, kolmanda etapi summaarne mass on veidi alla 217 400 tonni ja neljanda etapi massiks on 145 000 tonni. Mahuarvutused on tehtud valemite (1) ja (2) järgi.

Etapp	Pindala (m <sup>2</sup> )	Keskmine väljamissügavus (m)	Lubjakivi mahumass (t/m <sup>3</sup> )	Mass (t)
1	5260	7	2,6	95732
2	9500	5	2,6	123500
2	3300	5	2,6	42900
2	5500	5	2,6	71500
3	9500	4	2,6	98800
3	11400	4	2,6	118560
4	18600	3	2,6	145080
Kokku:	63060			696072

Nelja etapi kogumass ületab 96 072 t uuritava perioodi nõudluse, sest Rail Baltica IV objekti ja lisaklientide teenindamiseks arvestati summaarse koguvajadusega 600 000 t. Seega on kogumahu järgi planeeritud kaevandatav materjalikogus piisav.

### 4.4. Hooajaliselt muutuvad koormusstsenaariumid

Käesolevas peatükis määratakse koormus stsenaariumite kontrollväärtused, mida kasutatakse edasises masinapargi tootlikkuse, puhvervaru ja lõhketööde vajaduse hindamisel. Kuna Rail Baltica Rapla IV objekti ja lisaklientide tootmismahud ei jaotu perioodi jooksul ühtlaselt, eristatakse kogumahu keskmist koormust ning lühiajalisi tippkoormusi.

Kontrollväärtustena kasutatakse ainult neid päevamahte, mis on töö edasistes arvutustes määravad: kogu perioodi keskmine päevamaht, Rail Baltica põhikoormus ning Rail Baltica ja lisaklientide samaaegse teenindamise tippkoormused. Selline lähenemine võimaldab hinnata, kas olemasolev masinapark suudab katta nii tavapärase tootmisvajaduse kui ka suurema koormusega perioodid.

#### 4.4.1. Keskmine vajalik päevane maht

Eeldusel, et karjäär suudab uuritava perioodi jooksul kokku toota 300 000 t Rail Baltica ja 300 000 t lisaklientidele, leiti valem (3) kasutades perioodi kogumaht

$$300\,000 + 300\,000 = 600\,000\,t$$

kui perioodi 01.06.2025-01.07.2026 pikkus on umbes 13 kuud ja ühe kuu tööpäevade arvuks arvestada 22 päeva, võib perioodi tööpäevade arvuks arvestada ligikaudu 286 päeva. Seega on kogu perioodi keskmine vajalik päevane tootmiskaht leitud valemiga (4):

$$600\ 000 : 286 = 2098\ t/p$$

Keskmine vajalik päevamaht on väiksem, kui Rail Baltica ja lisaklientide samaaegse teenindamise perioodidel esinev päevamaht. Seetõttu ei piisa tootmisvõimsuse hindamisel ainult perioodi keskmisest mahust, vaid tuleb kontrollida ka lühiajalisi tippkoormusi.

#### 4.4.2. Stsenaarium A — Rail Baltica

Stsenaarium A käsitleb olukorda, kus Orava lubjakivikarjäär teenindab ainult Rail Baltica Rapla IV objekti. Sellisel juhul sõltub päevane tootmisvajadus peamiselt ehitusobjekti tarnegraafikust ning hooajalistest tingimustest. Kuivemal perioodil on arvestatud suurima päevamahuga 2900 t/päevas, keerulisemate teeolude korral 2200 t/päevas ning talvisel külmunud pinnasega perioodil 2600 t/päevas (Tabel 5).

Periood	Rail Baltica päevamaht (t/p)	Kontrollväärtus (t/p)
Kuiv periood	2600–2900	2900
Keerulised teeolud/ sula	1800–2200	2200
Tippkoormus		2900

Stsenaarium A puhul kasutatakse edasises masinapargi tootlikkuse hindamises Rail Baltica põhikoormuse kontrollväärtusena 2900 t/p.

#### 4.4.3. Stsenaarium B — Rail Baltica ja lisakliendid

Stsenaarium B käsitleb olukorda, kus Orava lubjakivikarjäär teenindab nii Rail Baltica Rapla IV objekti ja lisakliente. Lisaklientide koormus tekib perioodidel jaanuari algus kuni veebruari lõpp ja aprillist juuli alguseni (Tabel 6).

Periood	Rail Baltica päevamaht (t/p)	Lisakliendid (t/p)	Kogukoormus (t/p)	Kontrollväärtus (t/p)
01.01.2026– 28.02.2026	2600–2900	2000	4600–4900	4900
01.04.2026– 01.07.2026	2600–2900	2500	5100–5400	5400

Stsenaarium B puhul kasutatakse edasises masinapargi tootlikkuse hindamises kontrollväärtusena 4900 t/p ja 5400 t/p. Väärtus 4900 t/p iseloomustab perioodi jaanuarist veebruarini, kus lisaklientide koormus on väiksem ning veeteede kandevõime võib külmunud pinnase tõttu olla parem. Väärtus 5400 t/p iseloomustab aprillist juuli alguseni tekkivat maksimaalset tippkoormust, mil Rail Baltica põhikoormusele lisandub suurem lisaklientide päevamaht.

## 4.5. Masinapargi tootlikkus ja koormus eri stsenaariumites

### 4.5.1. Pöördkoppekskavaatorite Caterpillar 330B LN arvutuslik võimekus

Caterpillar 330B LN puhul hinnati ekskavaatori arvutuslikku ümbertõstmisvõimekust, kasutades valemit (5). Arvutustes kasutati kopa mahtu  $1,5 \text{ m}^3$ , lubjakivi mahumassi  $2,6 \text{ t/m}^3$ , kopa täitetegurit  $0,85$ , kasutustegurit  $0,85$  ning ühe töötsükli kestust  $0,75$  minutit (OÜ Merko Kaevandused, 2026b).

$$V_k = 1,5 \text{ m}^3$$

$$\rho = 2,6 \text{ t/m}^3$$

$$f = 0,85$$

$$t_s = 0,75 \text{ min}$$

$$k = 0,85$$

$$Q_{CAT,t} = \frac{1,5 \times 2,6 \times 0,85 \times 60}{0,75} \times 0,85 = 225 \text{ t/h}$$

Seega on Caterpillar 330B LN arvutuslik tootlikkus  $225 \text{ t/h}$ . Sellest tulenevalt arvutati masina päevane ümbertõstevõimekus, kasutades valemit (6), 10-tunnise, 12-tunnise ja 15-tunnise tööpäeva korral (Tabel 7).

<b>Tabel 7.</b> Caterpillar 330B LN arvutuslik päevane ümbertõstevõimekus eri tööaja korral			
Tehnika	Tootlikkus (t/h)	Töötundide arv	Päevane võimekus (t/p)
CAT 330B LN	225	10	2254
CAT 330B LN	225	12	2705
CAT 330B LN	225	15	3381

Erinevate tööaegade järgi arvatud päevaste tootlikkuste aluselt leiti koormusprotsent valemiga (9). Arvutustest selgub, et ekskavaator suudab katta üksi väiksema koormusega perioodi kuni  $2200 \text{ t/p}$  ning 15-tunnise tööpäeva korral ka Rail Baltica kuiva perioodi koormuse  $2600\text{--}2900 \text{ t/p}$ . Samas ei kata üks Caterpillar 330B LN lisaklientidega seotud tippkoormusi (Tabel 8).

<b>Tabel 8.</b> Caterpillar 330B LN koormusprotsendi arvutus				
Stsenaarium	Kontrollväärtus (t/p)	10 h	12 h	15 h
Keskmine päevane maht	2098	98%	78%	62%
RB põhikoormus	2900	129%	107%	86%
RB + lisakliendid jaan–veebr	4900	217%	181%	145%
RB + lisakliendid apr–juuni	5400	240%	200%	160%

#### 4.5.2. Pöördkoppekskavaatori Volvo EC380DL võimekus

Volvo EC380DL puhul kasutades samuti valemit (5), et tulemused oleksid Caterpillar 330B LN näitajatega võrreldavad. Volvo suurem kopa maht 2,0 m<sup>3</sup> annab sellele masinale suurema arvutusliku tootlikkuse.

$$V_k = 2,0 \text{ m}^3$$

$$\rho = 2,6 \text{ t/m}^3$$

$$f = 0,85$$

$$t_s = 0,75 \text{ min}$$

$$k = 0,85$$

$$Q_{VOLVO,t} = \frac{2,0 \times 2,6 \times 0,85 \times 60}{0,75} \times 0,85 = 300,6 \text{ t/h}$$

Kasutatud eelduste põhjal on Volvo EC380DL arvutuslik tootlikkus ligikaudu 301 t/h. Selle abil arutati masina päevane ümbertõstevõimekus, kasutades valemit (6), 10-tunnise tööpäeva, 12-tunnise tööpäeva ja 15-tunnise tööpäeva korral (Tabel 9).

Tehnika	Tootlikkus (t/h)	Töötundide arv	Päevane võimekus (t/p)
Volvo EC380DL	301	10	3006
Volvo EC380DL	301	12	3607
Volvo EC380DL	301	15	4508

Volvo EC380DL suudab koormusprotsendi arvutuse alusel, mis leiti valem (9) abil, katta Rail Baltica põhikoormuse, sealhulgas 2900 t/p kuivema perioodi vajaduse. Samas ei ole üks Volvo piisav lisaklientidega stsenaariumites, mil tuleb rakendada kombineeritud töökorraldust (Tabel 10).

Stsenaarium	Kontrollväärtus (t/p)	10 h	12 h	15 h
Keskmine päevane maht	2098	70%	58%	47%
RB põhikoormus	2900	96%	80%	64%
RB + lisakliendid jaan–veebr	4900	163%	136%	109%
RB + lisakliendid apr–juuni	5400	180%	150%	120%

### 4.5.3. Rataslaadur VOLVO L-180E võimekus

Rataslaaduri VOLVO L-180E puhul hinnati vaid kivimi veokitele laadimise ehk väljastusvõimekust. Vaatlusandmete (Lisa 1) põhjal oli ühe veoki keskmine laadimisaeg 4 minutit ja 16 sekundit ehk 4,27 minutit. Selle järgi saab leida ühes tunnis laaditavate veokite arv valem (7) abil:

$$\frac{60}{4,27} = 14,04 \text{ veokit tunnis}$$

Rataslaaduri kasutusteguriga korrigeeritud väljastusvõimekus arvatati valemiga (8), kui kasutegur on 0,85 ja ühe veoki koormaks arvestati 30 t siis teoreetiline tunnivõimekus on:

$$14,04 \times 30 \times 0,85 = 358,3 \text{ t/h}$$

Kasutatud eelduste põhjal on Volvo L-180E arvutuslik tootlikkus ligikaudu 358 t/h. Selle abil arvatati masina päevane ümbertõstevõimekus, valemiga (9), 10-tunnise tööpäeva, 12-tunnise tööpäeva ja 15-tunnise tööpäeva korral (Tabel 11).

Väljastusvõimekus (t/h)	Töötundide arv	Päevane võimekus (t/p)
358	10	3580
358	12	4296
358	15	5370

Koormusprotsendi arvutuse alusel, milleks kasutati valemit (9), suudab Rataslaadur VOLVO L-180E katta nii Rail Baltica kuiva kui ka keerulisema perioodi. Lisaklientide lisandumisel tuleb rakendada kombineeritud töökorraldust (Tabel 12).

Stsenaarium	Kontrollväärtus (t/p)	10 h	12 h	15 h
Keskmine päevane maht	2098	59%	49%	39%
RB põhiväärtus	2900	81%	68%	54%
RB + lisakliendid jaan–veebr	4900	137%	114%	91%
RB + lisakliendid apr–juuni	5400	151%	126%	101%

#### 4.5.4. Puudujäägi katmine kombineeritud töökorraldusega

Kahe ekskavaatori kombineeritud võimekuse leidmiseks kasutati valemit (10). Arvestades, et Caterpillar 330B LN ja Volvo EC380DL töötavad mõlemad kaevise ümbertõstmise ja puistangusse etteandmise tööprotsessis, on tippkoormuse hindamisel otstarbekas käsitleda nende tootlikkust ühiselt (Tabel 13).

$$Q_{EK, kokku} = 2705 + 3607 = 6312 \text{ t/p}$$

Kui ekskavaatorite kombineeritud võimekus ületab konkreetse stsenaariumi päevase vajaduse, käsitleti tekkinud ülejääki reservvõimekusena, kasutades valemit (11). Saadud tulemust kasutati rataslaaduri koormuse vähendamiseks etteandmise, ümbertõstmise või osalise laadimistöe toetamise kaudu.

Arvutustes kasutati 12-tunnist tööpäeva, kuna see kujutab endast realistlikku pikendatud tööaja varianti tippkoormuse perioodil.

<b>Tabel 13.</b> Ekskavaatorite kombineeritud võimekus ja reserv 12-tunnise tööpäeva korral					
Stsenaarium	Kontrollväärtus, (t/p)	CAT 330B LN (t/p)	Volvo EC380DL (t/p)	Ekskavaatorid kokku (t/p)	Ekskavaatorite reserv (t/p)
Keskmine päevane maht	2098	2705	3607	6312	4214
RB põhiväärtus	2900	2705	3607	6312	3412
RB + lisakliendid jaan–veebr	4900	2705	3607	6312	1412
RB + lisakliendid apr–juuni	5400	2705	3607	6312	912

Tabelist 13 selgub, et kahe ekskavaatori kombineeritud võimekus on 12-tunnise tööpäeva korral 6312 t/p. See ületab kõikide tootmisstsenaariumite päevase vajaduse. Seetõttu tekib ekskavaatoritel igas stsenaariumis arvutuslik reservvõimekus.

Rataslaaduri Volvo L-180E 12-tunnise tööpäeva arvutuslik väljastusvõimekus on 4296 t/p (Tabel 11). Järgnevalt hinnati (Tabel 14), kas ekskavaatorite arvutuslikku reservvõimekust saab kasutada rataslaaduri puudujäägi, mis leiti valemiga (12), vähendamiseks perioodidel, kus rataslaaduri võimekus jääb tippkoormusele alla. Selleks leiti rataslaaduri korrigeeritud võimekus valemiga (13) ja lõplik puudujääk valemiga (14).

<b>Tabel 14. Rataslaaduri puudujäägi vähendamine ekskavaatorite reservvõimekuse abil</b>						
Stsenaarium	Kontrollväärtus (t/p)	Rataslaadur (t/p)	Rataslaaduri puudujääk (t/p)	Ekskavaatorite reserv (t/p)	Korrigeeritud võimekus (t/p)	Puudujääk (t/p)
Keskmine päevane maht	2098	4296	0	4214	4296	0
RB põhiväärtus	2900	4296	0	3412	4296	0
RB + lisakliendid jaan–veebr	4900	4296	604	1412	4900	0
RB + lisakliendid apr–juuni	5400	4296	1104	912	5208	192

Tabelis 14 esitatud kombineeritud töökorralduse puhul käsitletakse võimalusena ekskavaatori reservvõimekust tööülesannete ajutise ümberjaotusena. Tavapärase töökorralduse kohaselt valmistavad ekskavaatorid ette kobestatud lubjakivi puistanguid, kust rataslaadur saab valmis materjali veokitele laadida. Juhul, kui rataslaaduri väljastusvõimekus jääb päevasele kontrollväärtusele alla, saab puudujääki vähendada ekskavaatorite vaba töövõimekusega. See tähendab, et osa tööpäevast peavad ka ekskavaatorid toetama väljastusprotsessi, võimalusel laadides valmis materjali veokitele.

Keskmise päevamahu ja Rail Baltica põhikoormuse stsenaariumites, kus kontrollväärtused on 2098 t/p ja 2900 t/p on rataslaaduri 12-tunnine väljastusvõimekus piisav ning ekskavaatorite reservi ei ole vaja kasutada. Jaanuarist veebruarini kestvas lisaklientidega stsenaariumis tekib rataslaaduril 604 t/p puudujääk, mille katta ekskavaatorite 1412 t/p reservvõimekusest täielikult, kui on võimalik muuta ekskavaatorite töökorraldust nii, et osa materjali laadimisest veokitele teostatakse ekskavaatoritega.

Maksimaalse 5400 t/p tippkoormuse korral on rataslaaduri puudujääk 1104 t/p. Ekskavaatorite reserv on samas stsenaariumis 912 t/p, mistõttu saab puudujääki vähendada, kuid mitte täielikult katta. Rataslaaduri korrigeeritud võimekus on seega 5208 t/p ning lõplik puudujääk 192 t/p. Sellisel juhul ei piisa enam ajutisest töökorralduse ümberjaotamisest, vaid osa ekskavaatorite tavapärasest ettevalmistustööst peab olema tehtud enne tippkoormuse perioodi. See tähendab, et vajalik materjal peab olema eelnevalt kobestatud ja puistangusse paigutatud, et ekskavaatorid ei oleks tippkoormuse ajal seotud kogu päevase tootmismahu ettevalmistamisega, vaid saaksid osa tööajast suunata väljastusprotsessi toetamisele

Seega jääb maksimaalse koormuse korral 12-tunnise tööpäeva juures puudujääk, mida tuleb katta puhvervaru eelneva loomisega. Puhvervaru eesmärk on vähendada tippkoormuse ajal pöördkoppekskavaatorite ettevalmistustööde koormust ja muuta töökorraldust paindlikumaks.

#### 4.5.5. Puhvervaru vajadus maksimaalse tippkoormuse korral

Maksimaalse 5400 t/p tippkoormuse korral jääb 12-tunnise tööpäeva ja kombineeritud tehnika kasutamise järel puudujääk 192 t/p (Tabel 14). Kasutades valemit (15), saab leida puhvervaru vajaduse (Tabel 15).

Näitaja	Väärtus
Maksimaalne kontrollkoormus (t/p)	5400
Korrigeeritud võimekus 12 h tööpäevaga (t/p)	5208
Päevane puudujääk (t/p)	192
Tipuperioodi tööpäevade arv	66
Vajalik puhvervaru (t)	12 672

Seega kui tippkoormus kestab 66 tööpäeva, on kogu perioodi puudujäägi katmiseks vajalik puhvervaru 12 672 t. Selle tootmine saab jääda näiteks märtsi kuu väiksema päevase vajaliku tootmisega perioodi, kus karjäär teenindab ainult Rail Baltica IV objekti.

#### 4.6. Lõhketööde sagedus ja kobestatud materjali varu

Kuna ühe lõhkamise täpne maht sõltub astangu mõõtmetest, lõhkeaukude võrgust ja tööfrondi paiknemisest, hinnati lõhkamise sagedust kobestatud materjali varu kestuse kaudu. Selleks võrreldi kolme võimaliku lõhkamismahtu: 5000 m<sup>3</sup>, 8000 m<sup>3</sup> ja 10 000 m<sup>3</sup>, kasutades valemit (16) (Tabel 16).

Ühe lõhkamise maht (m <sup>3</sup> )	Mahumass (t/m <sup>3</sup> )	Ühe lõhkamisega saadav mass (t)
5000	2,6	13 000
8000	2,6	20 800
10 000	2,6	26 000

Sõltuvalt lõhatava ploki mahust annab üks lõhkamine ligikaudu 13 000–26 000 t kobestatud lubjakivi. See materjal moodustab tootmisvaru (Tabel 17), mille arvelt saab toimuda laadimine, purustamine ja väljastamine kuni järgmise lõhkamiseni. Lõhketööde keskmine vahe tööpäevades leiti valemida (17)

Ühe lõhkamise maht (m <sup>3</sup> )	Ühe lõhkamisega saadav mass (t)	Varu kestus 2900 t/p korral	Varu kestus 5400 t/p korral
5000	13 000	4,5	2,4
8000	20 800	7,2	3,9
10 000	26 000	9	4,8

Tabelist selgub, et Rail Baltica põhikoormuse ehk 2900 t/p korral jätkub ühe lõhkamisega saadavast kobestatud lubjakivist sõltuvalt lõhkamismahest ligikaudu 4,5-9 ööpäevaks. Tippkoormusel, ehk 5400 t/p korral väheneb sama varu kestus ligikaudu 2,4-4,8 tööpäevani.

Seega peab tippkoormuse perioodil olema lõhketööde rütm oluliselt tihedam. Kui 5000 m<sup>3</sup>, tuleb iga 2-4 tööpäeva jooksul lõhketöid sooritada. Lõhates korruga 8000-10 000 m<sup>3</sup>, jätkub tippkoormusel

materjali umbes 4-5 tööpäevaks. Sellest tulenevalt on suurema koormusega perioodidel vajalik kas suurema mahuga lõhkamised või tihedam lõhketööde graafik. Arvestada tuleb ka puhvervaruga, mis on tippkoormusel tööde toimimiseks vajalik.

#### **4.7. Peamised tootmisriskid ja piirangud**

Orava lubjakivikarjääri tootmisvõimekust mõjutavad peamiselt hooajalised tingimused, lõhketööde rütm, tehnika koormus, materjali varu olemasolu ning karjääri ruumilised ja keskkonnaalased piirangud. Arvestades, et Rail Baltica Rapla IV objekti teenindamisel võib päevane tootmisvajadus olla 2900 t/p ja lisaklientide samaaegsel teenindamisel kuni 5400 t/p, tuleb tootmisprotsessi planeerimisel arvestada eelkõige tippkoormuse perioodiga.

Üheks olulisemaks probleemiks on lõhatud ja kobestatud materjali varu ebapiisavus. Lõhketööde arvutustest selgus, et ühe lõhkamisega saadav materjalivaru võib tippkoormuse korral katta vaid mõne tööpäeva tootmisvajaduse. Kui järgmise ploki etapi ettevalmistamine, puurimine või lõhkamine viibib, võib see põhjustada järgnevate tööprotsesside seisaku. Samas ei ole otstarbekas liiga suur kogust ette lõhata, sest pikemalt seisnud lõhatud kaevis võib tihenedes raskemini käideldavaks.

Teiseks piiranguks on tehnika ja tootmisahela väikseima läbilaskevõimega lüli. Isegi, kui lõhatud materjali on piisavalt, võib tootmismahutu piirata ekskavaatori, rataslaaduri või veokite teenindamise võimekus. Seega peab tippkoormuse perioodi hindama olemasoleva masinapargi võimekusest katta 5400 t/p suurst koormust või on vajalik tööaega pikendada, täiendavat masinaparki kasutada või moodustada suurem puhvervaru.

Kolmandaks mõjutavad tootmist ilmastik ja muud hooajalised tegurid mis on arvestatud OÜ Merko Kaevandused praktika kohaselt. Kuivematel perioodidel on veoteede ja tööalade kasutatavus parem ning võimalik tootmismahut suurem. Sulaperioodil ja sademete rohkel ajal on kõik tööprotsessid raskendatud teostatavusega. Talvisel külmunud pinnasega perioodil on teeolud eeldatavasti paremad mis paranda veokite liikumis võimalusi, kuid samal on lõhkamine raskendatud ja suuremad hooldusvajadused.

Keskkonnaalasteks piiranguteks on eelkõige põhjaveetaseme mittealandamise nõue, kaitsealuse taimeliigi püst-linalehiku kasvukoht (Kukk, 2020). Antud tingimused seavad piiranguid veealuse lubjakivi kaevandamisele, lõhketööde korraldamisele ja väljaveo toimimisele.

Kokkuvõttes on Orava lubjakivikarjääri tootmisriskid seotud eelkõige tippkoormusel tekkiva nõudluse katmisega. Kas kobestatud materjalivaru on piisav ja kas tehnika tootlikkus suudab päevaseid mahte täita. Sellepärast tuleb planeerimises lähtuda mitte ainult keskmisest tootmismahust, vaid ka lühiajaliselt tippkoormusest, mille korral võib kogu tootmisahela piiravaks teguriks kujuneda üksik tööprotsess.

## 5. Arutelu ja järeldused

Käesoleva töö eesmärk oli hinnata, kas Orava lubjakivikarjääri suudab olemasoleva töökorralduse ja masinapargiga teenindada Rail Baltica IV objekti ja samaaegselt arvestada lisaklientide materjalivajadusega. Analüüsis käsitleti tootmisvajadust kahest vaatenurgast, nii vaadeldava perioodi kogumahuna kui ka lühiajaliste tippkoormustena. Selline lähenemine oli vajalik, sest perioodi keskmise päevamaht 2098 t/p ei näita, kas karjäär suudab katta lühiajaliste tippkoormusega 5400 t/p perioode. Mahuarvutuse põhjal on nelja planeeritud kaevandamisetaapi kogumass ligikaudu 696 072 t, et katta lihtsustatud arvutustest tulenevaid ebatäpsusi ja tegelik kaevandatav kogus võib vähendada ülejääki. Seega on planeeritud etappides arvutuslikult piisav materjalivaru ning kogumahu seisukohalt ei ole vaadeldav tootmisplaan piiratud kaevandatava kivimi puudusega. Planeeritud maht ületab hinnanguliselt vajadust ligikaudu 96 000 t võrra. See muudab tööde ruumilise planeerimise paindlikumaks ja võimaldab jooksvalt moodustada ka puhvervaru. Piisav kogumaht ei tähenda aga automaatselt, et kõik perioodilised tootmisvajadused on probleemideta kaetavad.

Tootmise piirangud tekivad eelkõige päevase tootmisvõimekuse ja tippkoormuse hindamisel. Tootmisstsenariumite põhjal on Rail Baltica põhikoormuse kontrollväärtuse, 2900 t/p, mis on olemasoleva masinapargiga kaetav. Caterpillar 330B LN suudab seda 15-tunnise tööpäeva korral üksi katta (koormusprotsent 86%), Volvo EC380DL juba 12-tunnise tööpäevaga (80%) ning Volvo L-180E rataslaadur 10-tunnise tööpäevaga (81%). Seega, kui Orava lubjakivikarjäär teenindaks ainult Rail Baltica IV objekti, ei oleks tootmisvõimekus kriitiline piirang. Lisaks on masinapargil väiksema koormusega perioodidel (1800-2200 t/p) arvutuslik tootmisreserv, mida saab kasutada puhvervaru moodustamiseks, et katta tulevasi tippkoormusi. Oluliselt kriitilisemaks muutub olukord lisaklientide samaaegsel teenindamisel. Päevane kogukoormus võib tõusta jaanuarist veebruarini kuni 4900 t/p ning aprillist juuli alguseni kuni 5400 t/p. Stsenariumite arvutused näitasid, et kahe pöördkoppekskavaatori kombineeritud võimekus 12-tunnise tööpäeva korral on 6312 t/p, ületades maksimaalse tippkoormuse, ei ole kaevandamine ja kaevise ümbertõstmise tootmisahela piiravas lülis. Tulemuste analüüsi käigus selgus, et tegelik kitsaskoht on valmistoodangu väljastamine veokitele. Rataslaaduri Volvo L-180E 12-tunnise tööpäeva arvutuslik väljastusvõimekus jäi maksimaalsele tippkoormusele 1104 t/p võrra alla. Seega saab käesolevat tööst järeldada, et avakaevanduse tootmisahela tegelik läbilaskmisvõime sõltub otseselt kogu ahela väikseima tootlikkusega lülist, milleks antud töös osutus laadimis- ja väljastusprotsess. See järeldus on kooskõlas Blom jt (2019) seisukohaga, mille kohaselt tuleb lühiajalises planeerimises tähelepanu pöörata kogu tootmisahela tasakaalustamisele, mitte üksikute masinate teoreetilisele võimsusele.

Puudujäägi katmiseks pakuti töös välja lahendus, mille kohaselt saab kasutada ekskavaatorite kombineeritud töökorraldust rataslaaduri toetamiseks. See eeldab töökorralduslikku ümberjaotust, kus ekskavaatorid teostavad osaliselt materjali ettevalmistamist või veokite laadimist. Kahe ekskavaatori kombineeritud tootlikkus 12-tunnise tööpäeva jooksul on piisav, et katta 4900 t/p koormus, kuid rataslaadur muutub maksimaalse tippkoormuse juures tootmisahela piiravaks lülis. Rataslaaduri 12-tunnise tööpäeva arvutuslik väljastusvõimekus on 4296 t/p, mis jääb tippkoormuse 5400 t/p kontrollväärtusest 192 t/p võrra väiksemaks. Ekskavaatorite reservvõimekuse ümberjaotamisega, tööjaotuse muudatustega, saab puudujääki vähendada, kuid maksimaalse tippkoormuse korral peab olema eelnevalt ettevalmistatud puhvervaru. Sarnast loogikat järgivad ka

Jupp jt (2024), kes käsitlevad puhvervaru kasutamist tootmisahela üksikute lülide jõudluste tasakaalustamiseks.

Käesoleva töö arvutused põhinevad eeldusel, et masinate kasutustegur on 0,85 ja kopa täitetegur samuti 0,85. Tegemist on heades töötingimustes saavutatavate väärtustega, mis eeldavad stabiilset tootmisrežiimi, ühtlast veokite saabumise rütmi ja heas tehnilises seisukorras masinaid. Manyele (2017) ja Ritter ja Stoyan (2018) on viidanud, et avakaevanduse seadmete reaalne kasutustegur võib jääda allapoole 0,85, kui arvesse võetakse kõik kalendaarsest tööajast tulenevad seisakud, hooldus, vahetustevahetused ja töökatkestused. See tähendab, et käesoleva töö arvutuslikud tootlikkused on käsitletavad pigem ülempiirina kui keskmise ootuspärase tulemusena. Kui tegelik kasutustegur jääks näiteks 0,75-le, väheneksid masinate arvutuslikud päevased tootlikkused umbes 12% võrra ja maksimaalse tippkoormuse korral kasvaks puudujääk 192 t/p-lt ligikaudu 700 t/p-ni. Sellisel juhul ei piisaks ka kombineeritud töökorraldusest ja tuleks kaaluda kas täiendava laadimistehnika kasutamist, suuremat puhvervaru või tööpäeva pikendamist 15 tunnini. See näitab, et töö järeldused on usaldusväärsed eelduste raames, kuid sisendparameetrite tundlikkus on suur ning tegelik tootmisrütm peaks olema pidevalt jälgitav, et vajadusel töökorraldust kohandada.

Töö tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et arvutused põhinevad indikatiivsetel tootmis- ja tarneandmetel ning lihtsustatud tootmisbilansi meetodil. Tegelik tootlikkus võib erineda sõltuvalt ilmastikuoludest, töökorraldusest, kivimikillustatusest, veokite saabumise rütmist, seadmete tehnilisest seisukorrast ja lõhketööde tegelikust mahust. Seetõttu ei tuleks saadud väärtusi käsitleda lõpliku tootmisgraafikuna, vaid planeerimisotsuseid toetava hinnanguna. Töö praktiline väärtus seisneb kriitiliste kontrollväärtuste ja tootmisahela võimalike piirangute tuvastamisel.

## Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö raames koostati Orava lubjakivikarjääri mäetööde planeering Rail Baltica Rapla IV objekti ja samaaegsete lisaklientide teenindamiseks ning hinnati, kas karjääri olemasolev masinapark suudab katta vajalikke tootmiskahte.

Nelja kaevandamisetaapi planeeritud kogumass 696 072 t ületab Rail Baltica IV objekti ja lisaklientide summaarset vajadust 600 000 t umbes 96 000 t võrra, mis on piisav nii põhitarne kui ka puhvervaru moodustamiseks. Rail Baltica IV objekti põhikoormus 2900 t/p on olemasoleva masinapargiga kaetav. Lisaklientide samaaegsel teenindamisel võib päevane kogukoormus ulatuda kuni 5400 t/p, mille puhul muutub kogu tootmisahela piiravaks lüliks valmistoodangu väljastamine veokitele. Rataslaaduri Volvo L-180E 12-tunnise tööpäeva arvutuslik väljastusvõimekus 4296 t/p jääb maksimaalsele tippkoormusele 1104 t/p võrra alla. Ekskavaatorite reservvõimekuse ümberjaotamisega on võimalik puudujääki vähendada, kuid maksimaalse tippkoormuse korral jääb siiski 192 t/p suurune puudujääk, mille katmiseks on vaja eelnevalt moodustada ligikaudu 12 672 t suurune puhvervaru.

Kokkuvõttes võib järeldada, et Orava lubjakivikarjäär suudab kavandatud kogumahu poolest Rail Baltica Rapla IV objekti ja lisaklientide vajadused katta. Rail Baltica IV objekti kogukoormus on olemasoleva tehnikaga kaetav, kuid lisaklientide samaaegsel teenindamisel muutub tootmine tippkoormusel piiripealseks, peamiselt rataslaaduri väljastusvõimekuse tõttu. Maksimaalse koormuse katmiseks on vajalik kombineeritud töökorraldus, vähemalt 12 tunnine tööpäev, lõhketööde sidumine tootmisega ja ligikaudu 12 672 t suurune puhvervaru moodustamine.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma koolipoolset juhendajat Jüri Vassiljevit konstruktiivse tagasiside, väärtuslike nõuannete ja asjatundlike juhiste eest bakalaureus töö koostamisel.

Samuti avaldan siirast tänu oma töö koolivälisele juhendajale Aleks Strazdinile ning OÜ Merko Kaevandustele, kes võimaldasid mul kasutada töö koostamisel karjääriandmeid ning toetasid lõputöö valmimist.

## Kirjanduse loetelu

- AS Merko Kaevandused. (2026a). *Orava lubjakivikarjääri DJI Terra 3D mudel* [Avaldamata andmestik].
- AS Merko Kaevandused. (2026b). *Orava lubjakivikarjääri indikatiivsed tootmis- ja tarneandmed Rail Baltica Rapla IV objekti teenindamiseks* [Avaldamata andmestik].
- Blom, M., Pearce, A. R., & Stuckey, P. J. (2019). *Short-term planning for open pit mines: A review. International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(5), 318–339.  
<https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1448248>
- Caterpillar. (2026). *Bucket fill factors*. [https://www.cat.com/en\\_US/articles/ci-articles/bucket-fill-factors.html](https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/bucket-fill-factors.html)
- Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Deressa, G. W., Choudhary, B. S., & Jilo, N. Z. (2025). Optimizing blast design and bench geometry for stability and productivity in open pit limestone mines using experimental and numerical approaches. *Scientific Reports*, 15(1), 5796. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90242-6>
- Keskonnaamet. (2024). *Püst-linalehiku (Thesium ebracteatum Hayne) kaitse tegevuskava*. EELSI.  
<https://eelis.ee/getdok/867701800>
- Esri. (2017). *Light Gray Canvas Reference* [Kaardikiht]. ArcGIS pro.  
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=1768e8369a214dfab4e2167d5c5f2454>
- Hustrulid, W. A., & Kuchta, M. (2006). *Open pit mine planning & design*. (2nd ed.) Taylor & Francis.
- Jupp, K., Howard, T. J., & Everett, J. E. (2024). *Role of Pre-Crusher Stockpiling for Grade Control in Iron Ore Mining. Mining Technology*, 123(4), 187–195.  
<https://doi.org/10.1179/1743275814Y.0000000045>

- Keskkonnaluba nr Rapm-034. (2026). Keskkonnaamet. nr. Rapm-034. KOTKAS.* [https://kotkas.envir.ee/permits/public\\_document\\_index?represented\\_id=](https://kotkas.envir.ee/permits/public_document_index?represented_id=)
- Kukk, M. (2020). *Orava lubjakivikarjäär (Rapm-034) Maavara kaevandamise projekt.* Mäebüroo Nord OÜ.
- Maa- ja Ruumiamet. (s.a.). *Maa-ameti aluskaardid* [Map]. <https://kaart.maaamet.ee/wms/alus>
- Manyele, S. V. (2017). *Investigation of Excavator Performance Factors in an Open-Pit Mine Using Loading Cycle Time. Sientific Research.* 9(7), 599–624.  
<https://doi.org/10.4236/eng.2017.97038>
- Mnzool, M., Almujiabah, H., Bakri, M., Gaafar, A., Elhassan, A. A. M., & Gomaa, E. (2024). *Optimization of Cycle Time for Loading and Hauling Trucks in Open-Pit Mining. Mining of Mineral Deposits,* 18(1),18–26. <https://doi.org/10.33271/mining18.01.018>
- RB Rail AS. (2018, september 17). *Mineral Material Supply Studies for Rail Baltica Railway Construction.*  
[Aruanne].[https://www.railbaltica.org/wpcontent/uploads/2025/08/Mineral\\_material\\_supply\\_study\\_for\\_Rail\\_Baltica\\_Railway\\_Construction\\_final\\_V2.pdf](https://www.railbaltica.org/wpcontent/uploads/2025/08/Mineral_material_supply_study_for_Rail_Baltica_Railway_Construction_final_V2.pdf)
- RB Rail AS. (2024). *Rail Baltic Estonia sõlmis järgmised Rail Baltica põhitrassi ehituslepingud. RB.*  
<https://www.railbaltica.org/uudised/new-construction-contracts-signed-for-the-rail-baltica-mainline-in-estonia/>
- RB Rail AS,. (2026). *Rail Balticu kohta. RB.* <https://www.railbaltica.org/et/rail-balticast/>
- Ritter, R., & Stoyan, D. (2018). *Modelling Calendar Time Structure for Open Pit Mining Equipment Performance Calculations. Aspects in Mining & Mineral Science,* 2(2).  
<https://doi.org/10.31031/AMMS.2018.02.000537>
- Tomberg, T. (2023a). *Kivimite mäetehnoloogilised parameetrid.* [Loengukonspekt] TalTech

Tomberg, T. (2023b). *Mehaanilise väljamise jõud, töö ja jõudlus*. [Loengukonspekt] TalTech

Tomberg, T. (2023c). *Mäenduslikud lõhketööd*. [Loengukonspekt] TalTech

Tomberg, T. (2023d). *Puur-lõhketöödega väljamine*. [Loengukonspekt] TalTech

Vilu, O. (2021). *Orava lubjakivikarjäär Rapm-034 markšeiderimõõdistus*.

**Lisa 1. Rataslaaduri vaatlusandmed**

<b>Vaatlus nr</b>	<b>Masin</b>	<b>Kopatäidete arv</b>	<b>Veoki laadimisaeg (min)</b>
1	VOLVO L-180E	4	03:36
2	VOLVO L-180E	4	03:52
3	VOLVO L-180E	4	04:28
4	VOLVO L-180E	4	03:36
5	VOLVO L-180E	4	04:54
6	VOLVO L-180E	4	04:08
7	VOLVO L-180E	4	03:59
8	VOLVO L-180E	4	04:02
9	VOLVO L-180E	4	05:05
10	VOLVO L-180E	4	04:53
11	VOLVO L-180E	4	04:22
<b>Keskmine</b>			<b>04:16</b>

## Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>

Mina Hanna Brigita Kört

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Orava lubjakivikarjääri mäetööde planeerimine ehitusprojekti teenindamiseks Rail Baltica Rapla IV objekti näitel,

mille juhendaja on Jüri Vassiljev.

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.

---

29.05.2026

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. jq 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.