

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Loodusteaduskond
Geoloogia instituut

**Tallinn-Helsingi tunneli Eesti poolse portaali kombainlâbendamise
tehnoloogia**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Aleks Strazdin

Juhendaja: Tõnu Tomberg, MSc, Lektor, TalTech

Õppekava: YAEB14/15

Tallinn 2019

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: Aleks Strazdin

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Tõnu Tomberg

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees: Atko Heinsalu

[allkiri ja kuupäev]

Tallinna Tehnikaülikool
Geoloogia instituut
Lõputöö ülesanne

Töö ID	1933B	Õppekava	YAEB14/15
Üliõpilane	Aleks Strazdin	Matrikli nr.	155444YAEB
Töö liik	Bakalaureusetöö	Õppeaine kood	LG40LT
Juhendaja	Tõnu Tomberg	Ülesanne kehtib kuni	Esitamise kuupäev

Töö ülesanne	Tallinn-Helsinki tunneli Eesti poolse portaali kombainlääbindamise tehnoloogia
Topic of the Thesis	Elaboration of technology for developing Tallinn-Helsinki tunnel with roadheaders

Töö sisu põhipunktid	<ol style="list-style-type: none"> 1. Üldteave ja ülesande püstitus 2. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused 3. Tunneli trassi ja konfiguratsiooni valik 4. Lääbindusmahud 5. Lääbindamistechnoloogiate valik erinevates kivimites 6. Lääbindustööde parameetrite määramine 7. Ressursikulu ja hinna prognoos 8. Keskkonnakaitseküsimused 9. Järeldused ja kokkuvõte
----------------------	--

Seotud teadusteema ja/või sihtasutus	RITA
--------------------------------------	------

Tähtajad

Eelkaitsmine 31. mai 2019 Kaitsmine 07. juuni 2019

Üliõpilane	<u>Aleks Strazdin</u>
Juhendaja	<u>Tõnu Tomberg</u>
Konsultant	_____
	<small>nimi allkiri kuupäev</small>

Ülesanne kinnitatud	_____
Ülesanne täpsustatud	_____
Ülesanne pikendatud	_____

Sisukord

Annotatsioon.....	6
Abstract.....	6
Sissejuhatus.....	7
1. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused	8
1.1 Geoloogia	8
1.2 Hüdrogeoloogia.....	10
1.3 Mäenduslikud tingimused.....	11
1.4 Tunnelitrassi valik.....	12
2. Tallinn-Helsingi tunneli kombainläbindamise tehnoloogia.....	14
2.1 Konventsionaalne tunneli läbindamistechnoloogia.....	14
2.2 Läbindamine valikulise tööorganiga kombainiga	15
2.3 Tunneli toestamine	18
2.4 Külmutamine.....	20
3. Läbindustööde parameetrite väljatöötamine	23
3.1 Läbindustööde parameetrid Tiskre liivakivides.....	24
Läbindamine.....	24
Toestamine.....	25
3.2 Läbindustööde parameetrid Sinisavis	26
Läbindamine.....	26
Toestamine.....	28
3.3 Läbindustööde parameetrid Ediacara kompleksis	30
Läbindamine.....	30
Toestamine.....	31
3.4 Läbindustööde parameetrid murenemiskoorikus.....	32
Läbindamine.....	32
Toestamine.....	34
3.5 Läbindustööde parameetrid aluskorras.....	35
Läbindamine.....	35
Toestamine.....	36

3.6	Ventilatsioon läbindustööde ajal	37
3.7	Aja- ja ressursikulu	38
4.	Ohutus ja võimalikud riskid tunneli läbindamisel	40
4.1	Ohutus läbindamisel	40
4.2	Ventilatsioon.....	40
	Kokkuvõte.....	42
	Tänuavaldused	43
	Kasutatud allikad	44
	LISAD	46
	LISA 1 Sandvik MT720 tehnilised parameetrid	46
	LISA 2 Kivimite füüsikalise-mehaanilised omadused	48
	Lisa 3. Puuraugu M17 andmed	49
	Lisa 4. Puuraugu F127 andmed.....	50
	Lisa 5. Puuraugu F126 andmed.....	51
	Lisa 6. Tunneli trassi Geoloogiline läbilõige	52

Annotatsioon

Tallinna ja Helsingi vahel liigub iga aasta ligikaudu 7,5 miljonit reisijat, miljon sõiduauto ja veerand miljonit veokit. Ligikaudselt sõidab iga nädal 30 000 inimest Eestist Soome tööle, mis ilmestab kahe linna vahelist seotust. Helsingi-Tallinna raudteetunnel on Soome ja Baltimaade arenguvision, mille eesmärk on vähendada sõitmiseks kuluvat aega, suurendada mobiilsust ja kasvatada piirkonna konkurentsivõimet (Sweco, 2015). Antud bakalaureusetöö keskendub Tallinn-Helsingi tunneli Eesti-poolse portaali läbindamisele, kasutades selleks valiktööorganiga kombaini. Töö eesmärk on välja töötada esmane tehnoloogia valiktööorgan kombainiga läbindamiseks. Töös arvestatakse kahe raudtunneli ja ühe hooldustunneli paralleelse läbindamisega alates Tiskre liivakividest kuni kristalse aluskorraneni. Töös tuuakse välja valitud trassikoridori geoloogilised ja mäenduslikud tingimused, antakse teoreetiline ülevaade tunneli rajamise tehnoloogiast kombaini abil, läbindustööde parameetritest iga suurema üksuse kohta ning määratakse ligikaudselt tunneli Eesti-poolse portaali maksumus ja läbindamiseks kuluv aeg.

Abstract

Between Tallinn and Helsinki, approximately 7.5 million passengers, a million passenger cars and a quarter of a million trucks are moving each year. Approximately, 30 000 people from Estonia travel to Finland each week to work, which illustrates tight connection between the two cities. The Helsinki-Tallinn Railway Tunnel is a development vision for Finland and the Estonia aimed at reducing the time spent driving, increasing mobility and increasing the competitiveness of the region (Sweco, 2015). This BSc thesis focuses on development of the Estonian side portal for the Tallinn-Helsinki Tunnel. Main topic of this thesis is selection of optimal technology and equipment for tunnel construction. The aim of this work is to select and elaborate primary tunnelling technology, selection of optimal equipment for tunnel construction. The work takes into account the parallel construction of two railway tunnels and one service tunnel from the sandstones of Tiskre to the crystalline basement. This thesis is based on the geological data of the selected road corridor, it provides theoretical overview of tunnel-constructing technology with roadheaders. It provides an overview of the excavation parameters for each larger geological unit. The thesis also approximates the cost of construction of the Estonian side of tunnel portal. It estimates the time for the excavation with roadheaders and other tunnel construction processes.

Sissejuhatus

Tänapäeva kiirelt arenevas majandusruumis on suurenenud vajadus modernsete transpordisõlmede järele, mis tagavad inimeste ja kaupade efektiivse liikumise riikide vahel. Tallinna ja Helsingi vahel liigub iga aasta ligikaudu 7,5 miljonit reisijat, miljon sõiduautot ja veerand miljonit veokit. Ligikaudselt sõidab iga nädal 30000 inimest Eestist Soome tööle mis ilmestab kahe linna vahelist seotust. Helsingi-Tallinna raudteetunnel on Soome ja Baltimaade arenguvision, mille eesmärk on vähendada sõitmiseks kuluvat aega, suurendada mobiilsust ja kasvatada piirkonna konkurentsivõimet (Sweco, 2015).

Tunneli rajamise juures on üks olulisemaid aspekte töötada välja efektiivne ja tõhus projekt, et saavutada võimalikult kiire ajaga turvaline ja töökindel lahendus. Tunneli rajamise üks peamisi etappe on läbindamine. Tänapäeval on kasutusel mitmeid erinevaid võimalusi tunnelite läbindamiseks, ning õige meetodi kasutamine aitab säästa nii aega kui raha (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Antud bakalaureusetöö keskendub Tallinn-Helsingi tunneli Eesti-poolse portaali läbindamisele kasutades selleks valiktööorganiga kombaini. Teema on aktuaalne, sest hetkel on käimas Tallinn-Helsingi tunneli rajamisega seoses suured riikidevahelised arutelud, ning investorite huvi on väga suur. Parima võimaliku tunneli läbindamise tehnoloogia välja töötamine annaks suure tõuke kogu projekti arengule, mis omakorda aitaks kaasata veelgi suuremahulisemaid investeeringuid. Uudsuse tagab antud tööle see, et eelnevalt pole valiktööorganiga kombaini rakendamist Eesti-poolse portaali läbindamiseks keegi kavandanud.

Töö eesmärk on välja töötada esmane tehnoloogia, valiktööorgan kombainiga läbindamiseks. Töös arvestatakse kahe raudtunneli ja ühe hooldustunneli paralleelse läbindamisega alates Tiskre liivakividest. Välja on jäetud läbindamine kvaternaarisetetes, sest kvaternaari puhul ei pruugi kombainiläbindamine olla kõige otstarbekam. Efektiivsem on kvaternaari setted täies mahus eemaldada ja alustada tunneli rajamist Tiskre kihistust. Lisaks ei arvestada töös läbindamismahtude arvestamisel ristlääbikäikude ja rõhualandus lõõridega.

Töö on jaotatud neljaks suuremaks peatükiks:

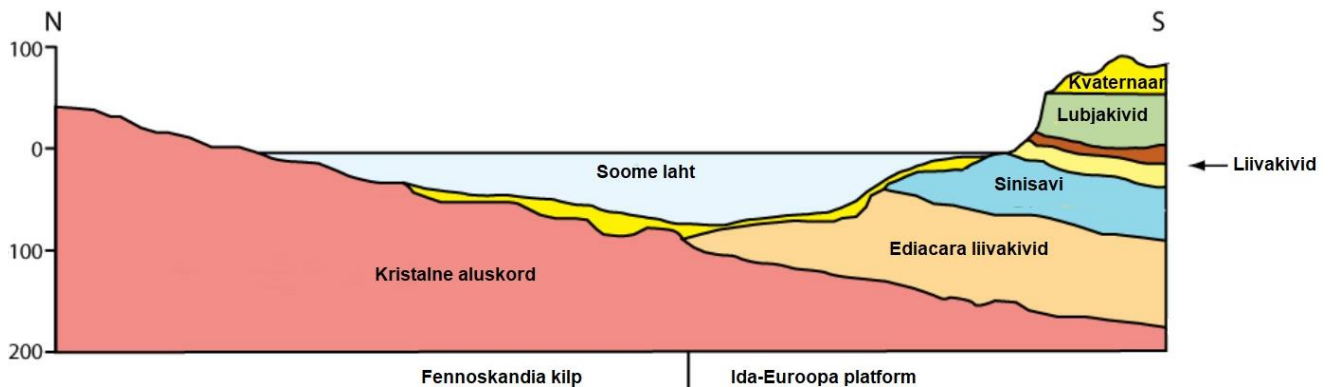
1. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused
2. Tallinn-Helsingi tunneli kombainiläbindamis tehnoloogia
3. Läbindustööde parameetrite väljatöötamine
4. Ohutus tunneli läbindamisel

Esimese peatükis tuuakse välja geoloogilised ja mäenduslikud tingimused ning tuuakse välja trassi valik. Teises peatükis antakse teoreetiline ülevaade tunneli rajamise tehnoloogiast kombaini abil. Kolmandas peatükis antakse ülevaade läbindustööde parameetritest iga suurema üksuse kohta ning neljandas peatükis tuuakse välja ohutusega seonduv.

Töö teostati projekti RITA 11 (Maapõueressursside efektiivsemate, keskkonnasõbralikumate ja säästvamate kasutusvõimaluste väljatöötamine) Raames.

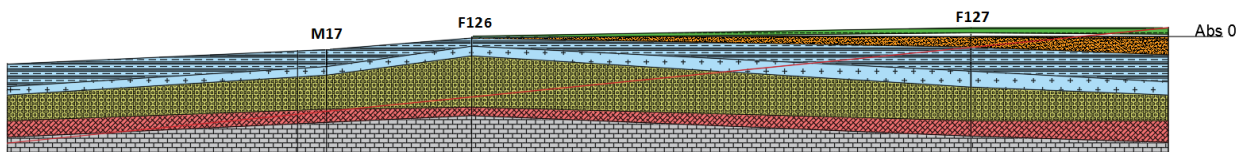
1. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused

Kavandatav Tallinn-Helsingi tunnel paikneb Fennoskandia kilbi ja Ida-Euroopa Platvormi piirilal. Fennoskandia kilpi katab Eesti alal settekivimitest koosnev aluspõhi, mis Tallinna juures võib olla 200 m paksune. Tunneli kavandataval trassialal leidub Ediacara, Kambriumi ja Ordoviitsiumi ajastu settekivimeid (Joonis 1) (Alvi, 2017).



Joonis 1. Lihtsustatud tunneli trassi geoloogiline läbilõige. (Alvi, 2017)

Kasutades tunneli trassile jäävate puuraukude F127, F126 (Petersell jt 1971) ja M17 (Talpas jt, 1994) andmeid, loodi interpoleerimise abil geoloogiline läbilõige, millega määrati kindlaks, millistes kihtides ja mis mahus tunnel kulgema hakkab (Joonis 2). Tunneli lisamisel joonisele arvestati, et tunneli kalle on 1%. Tunneli kalle valiti 1%, et vältida liigset energiakulu. Kallaku suurenemisel suureneb rongi energiakulu hüppeliselt (McGonigal, 2006). Tunneli Eesti-poolse portaali kogupikkuseks valiti 20 km. Allpool kirjeldatakse iga kihi geoloogiat, hüdrogeoloogiat ja mäenduslike tingimusi täpsemalt.



Joonis 2. Interpoleerimise abil loodud geoloogiline läbilõige (Lisa 6).

1.1 Geoloogia

Kristalse aluskorra pealispind lasub alal 100–160 m tasemel ja see laskub, kui mõningad erandid Naissaare massiivi lõunapiiril välja arvata, lõuna suunas 2–3 m kilomeetri kohta. Ala lauskurrutatud kristalne aluskord, mis on esindatud migmatiidistunud moondekivimitega (biotiidgneisid, kvartspäevakivigneisid, alumiiniumirikkaid mineraale sisaldavad vilgugneisid, biotiitamfiboolgneisid, amfiboliidid), kuulub struktuurselt Jägala kompleksi (Koppelmaa, 2000).

Pindmises osas on aluskorra kivimid 1–20 m ulatuses murenenud, moodustades pindmise **murenemiskooriku**. Selle paksus on sõltuvuses nii aluskorra kivimite mineraalsest koostisest

(rabakivigraniitide levialal on see õhem ja vilgugneisside levialal paksem), aga ka nende lõhelisusest. Esialgne murenemiskoorik oli alal kindlasti paksem, kuid osa sellest on mattumisele eelnenud erosiooni käigus kulutatud. Kulutuse ulatusele viitab murenemiskooriku tsonaalsus: läbilõigetel, kus on säilinud murenemiskooriku kõik 3 tsooni (ülalt alla): III ehk pude murenemiskoorik, II ehk savikas murenemiskoorik ja I – vähe murenenud kivimid, on see enam-vähem täielikult säilinud. Mida sügavam erosioonilõige, seda vähem on läbilõikes säilinud tugevamini murenenud kivimeid (Suuroja jt, 2003).

Ediacara kompleksi Kotlini lademesse kuuluvad neoproterosoilise vanusega (ca 610 Ma) purdkivimid (liivakivid, aleuroliidid, savid) lasuvad transgressiivselt, kirdesse түseneva 40–60 m paksuse lasundina aluskorra murenemiskoorikul. Kaardilehtede alal need ei paljandu, on aga avatud enam kui paarikümne puurauguga. Gdovi ja Voronka kihistu ei ole alal teineteisest enam selgelt eristatavad (neid eraldavad Kotlini kihistu savikamad kivimid on välja kiildunud) ja seetõttu vaadeldaks alal Vendi ühtsena Kroodi kihistu (V2 kr) koosseisus. Kroodi kihistu koosneb pisi- kuni keskterisest, nõrgalt kuni keskmiselt tsementeerunud kollakashallist liivakivist, milles erinevatel tasemetel (põhiliselt kihistu ülaosas) esineb kirjuvärvilise (punakaspruun kollakate ja rohekashallide laikudega) õhukesi (alla 1 m) savika aleuroliidi vahekihte. Kihistu alumisel piiril on kohati kuni 1 m paksune, jämeterisest nõrgalt kuni keskmiselt tsementeerunud liivakivist, graveliidist või peenkonglomeraadist koosneva basaalkonglomeraadi kiht (Suuroja jt, 2003).

Kambriumi ladestu on alal esindatud purdkivimitega (liivakivid, aluriidid, savid) ja selle paksus siin on 100 m ja veidi enam. Ladestus on eristatavad 4 kihistut (alt üles): Lontova, Lükati, Tiskre ja Ülgase. Kolm viimast paljanduvad klindivööndis mitmel pool Suurupi ja Viimsi poolsaare vahelisel alal (Suuroja jt, 2003).

Lontova kihistu (Є1ln) paksus on 65–80 m ja see on alal settekivimilise pealiskorra түsedaimaks kivimkehaks (litostratigraafiliseks üksuseks). Kihistu koosneb rohekashallist kuni kirjuvärvilisest (rohekashall, violetsete ja punakaspruunide laikudega), vähesel määral aleuriiti ja liiva sisaldavast argilliidilaadsest savist – sinisavist. Kihistus on eristatavad, ja seda põhiliselt aleuriidi ja liiva sisalduse alusel, 4 kihistikku (alt üles): Sämi (15–20 m liivakivi ja sinisavi vaheldumist), Mahu (umbes 10 m liiva lisandiga sinisavi), Kestla (30–40 m puhast argilliidilaadset sinisavi) ja Tammneeme (kuni 10 m glaukoniitliiva sisaldavat sinisavi). Lontova lademe piiritlemisel on põhilisteks diagnostilisteks tunnusteks rõngussi (Platysolenites) jäljendid ja püriidistunud ussikäigud (Suuroja jt, 2003).

Lükati kihistu (Є1lk), paksusega 10–16 m, moodustab sinisavilasundi ülaosa ning sellele on iseloomulik aleuroliidi või pisiterise kvartsliidakivi vahekihtidega rohekashall aleuriitsavi (60–70 %), mis sisaldab kohati Volborthellatenuise väikeseid (1–2 mm läbimõõdus) koonusjaid kodusid. Kihistu ülaosas on valdavaks liivakivi, alaosas – savi. Kihistu alumisel piiril on tavaliselt mõne sentimeetri paksune, fosfaatsetest veeristest basaalkonglomeraadi kiht. Sinisavilasund on kindlaimaks veepidemeks Põhja-Eestis (Suuroja jt, 2003).

Tiskre kihistu (Є1ts) (11–20 m) koosneb suhteliselt ühetaolisest, hele- kuni kollakashallist jämeterisestkvartsaleuroliidist või pisiterisest kvartsliidakivist (Kakumäe kihistik). Kihistu alaosas on rohkesti rohekashalli, glaukoniiti sisaldava savika aleuroliidi vahekihte (Rannamõisa kihistik). Kihistu

paksus on minimaalne sellel lasuva Ülgase kihistu levialal. Tiskre liivakivid on oluliseks põhjavett kandvaks kihidiks. Alal asuvad nii Kakumäe (Kakumäe pangal) kui ka Rannamõisa kihistiku (Rannamõisa pangal), aga samuti ka Tiskre kihistu (Tiskre pangal) stratotüüp (Suuroja jt, 2003).

1.2 Hüdrogeoloogia

Planeeritava tunneli läbindamisel tuleb arvestada Kvaternaari, Ordoviitsiumi-Kambriumi, Kambriumi-Vendi ja Alam-Proterosoikumi veekihtidega. Kvaternaari veekihtiga antud töös ei arvestata, sest tunneli läbindamist uuritakse Kvaternaari setetest allpool.

Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihtiga peab arvestama Tiskre ja Lükati kihistus. Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihi põhjavesi on oluliseks ühisveevarustuse allikaks Põhja-Eestis (Põhjaveekomisjon, 2004).

Kambriumi-Vendi (Cm-V) põhjaveekihtid levivad Kambriumi ja Vendi ladestu terrigeensetes kivimites üle Põhja-Eesti (Joonis 3), sealhulgas ka mere all Soome lahe lõunaosas. Kambriumi-Vendi põhjavesi on hästi kaitstud maapinnalt lähtuva reostuse eest. Põhjavesi on survealine. Vesi liigub vettandva liivakivi ja aleuoliidi poorides ja kohati ka lõhedes. Mattunud orgude läheduses on Kambriumi-Vendi veekihtides vesi moodustunud jääajal Eesti ala katnud mandrijää sulamisveest ja tänapäeva sademete infiltratsiooniveest. Mattunud orgudest kaugemal on vesi kümneid kordi vanem. Kui teised Eesti põhjaveekihtid toituvad infiltreeruvast sademeveest, karstiveest ja lasuvate aluspõhjakihitide infiltratsiooniveest, siis Kambriumi-Vendi veekihtide toitumisel on määrav osa mattunud orgude veel ja vee juurdevoolul Soome lahe põhjasetetest aladel, kus veetaseme survepind on allpool merepinda (Põhjaveekomisjon, 2004). Kambriumi-Vendi põhjaveekihtid muudavad läbindamise Ediacara kompleksis äärmiselt keeruliseks.



Joonis 3. Kambriumi-Vendi veekihtide levik maismaal põhjaveekogumitena (Põhjaveekomisjon 2004)

Alam-Proterosoikumi veekiht hõlmab aluskorra mõnekümne meetri paksuse pealmise osa, kus moonde- ja tardkivimite lõhedes leidub vähesel määral soolakat või soolast vett, kohati esineb vett

ka kristalsete kivimite peal olevas murenemiskoorikus (Põhjaveekomisjon, 2004). Selle veekihi vett veevarustuses ei kasutata. Veekiht raskendab läbindamist murenemiskoorikus.

1.3 Mäenduslikud tingimused

Mäenduslikud tingimused Tallinn-Helsingi tunneli Eesti-poolse portaali rajamisel on vastavalt geoloogilistele kihtidele erinevate omadustega. Tunneli läbindamise käigus tuleb läbida mitmeid erinevate omadustega kihte, mis muudavad tunneli rajamise keerukaks.

Esimese kihina tuleb läbindada Tiskre kihistu liivakivid. Antud kihis muudab läbindamise keerukaks liivakivide suur abrasiivsus, mis oluliselt aeglustab läbindamist kombainiga, sest lõikehambaid tuleb tihedalt vahetada. Lisaks suurele abrasiivsusele muuda olukorra keerukamaks ka Ordoviitsiumi-Kambriumi veekiht, mis raskendab märgatavalt kivimite stabiilsust ning muudab toestamise keerukamaks. Üldiselt on mäenduslikud tingimused tunneli rajamiseks Tiskre liivakivides rasked.

Tiskre liivakividele järgneb Lontova kihistu sinisavi. Sinisavis on mäenduslikud tingimused läbindamiseks palju soodsamad, kui Tiskre liivakivides. Sinisavi on looduslik veepide, mistõttu ei pea arvestama põhjaveega. Suurim probleem on sinisavi suur kleepuvus märgumisel, mis võib oluliselt aeglustada materjali väljavedu. Üldiselt on mäenduslikud tingimused sinisavis head.

Kõige keerukamad mäenduslikud tingimused valitsevad Ediacara kompleksis. Keerukaks muudab tingimused kivimite suur abrasiivsus, surveiline Kambriumi–Vendi põhjaveekiht ja kivimikihtide ettearvamatu kihilisus. Surveline põhjavesi ja ettearvamatu kihilisus muudavad mäenduslikud tingimused väga raskeks, sest kivimitel puudub stabiilsus. Üldiselt on mäenduslikud tingimused Ediacara kompleksis äärmiselt keerulised.

Murenemiskoorikus on mäenduslikud tingimused muutlikud. Murenemiskooriku ülemises osas muudab tingimused raskeks põhjaveekiht, mis muudab kivimid ebastabiilseks. Murenemiskoorikus muutuvad kivimite tugevusomadused vastavalt sellele, kui sügavale on edenetud. Üldiselt on mäenduslikud tingimused murenemiskoorikus rasked.

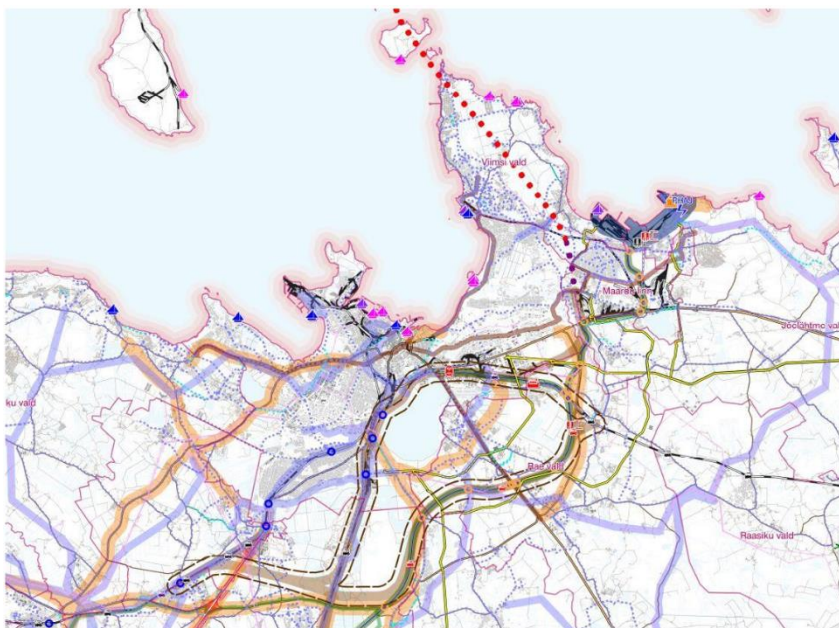
Oluline on mäenduslike tingimuste juures ka mäerõhk, mis tunneli edenemisel järk-järgult suureneb. Mäerõhud kihtide kaupa on välja toodud *Tabelis 1*. Kivimite täiendavad füüsikalismehaanilised omadused on välja toodud *Lisas 2*.

Tabel 1. Määrõhud vastavalt kivimi kihtidele (Rebane, 2018)

Kiht	Paksus	Mahumass		Määrõhk		
	m	kg/m ³		Mpa		
		Min	Max	Min	Max	Max suurenevalt
Kvaternaari setted	8.6	1500	2200	0.126	0.185	0.185
Tiskre kihistu	7.4	1950	2100	0.141	0.152	0.338
Lükati kihistu	17	1900	2000	0.317	0.333	0.671
Sinisavi	41.1	2300	2400	0.926	0.967	1.638
Sämi	27.3	2250	2350	0.602	0.629	2.266
Ediacara	57.1	2000	2300	1.119	1.287	5.253
Murenenud kristalne aluksord	20	2000	2600	0.392	0.510	5.763
Rabakivigraniit	15	2650	2650	0.390	0.390	6.152
		Kokku		5.713	6.152	

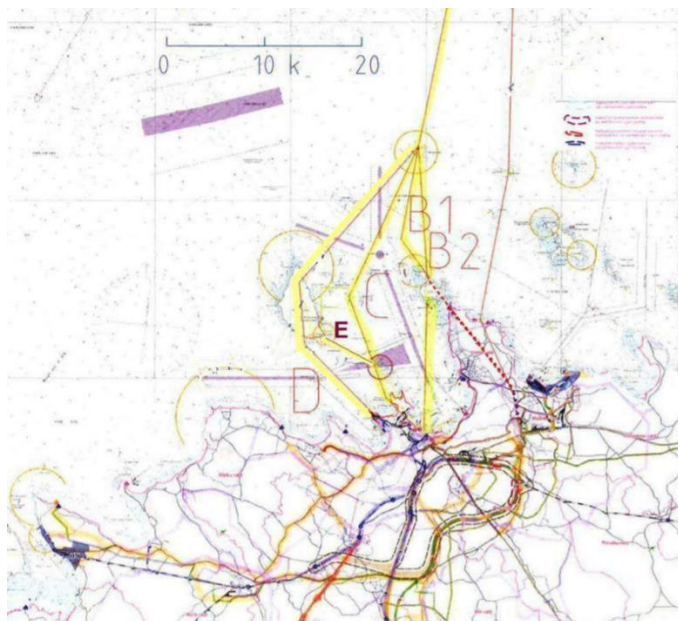
1.4 Tunnelitrassi valik

Tunnelitrassi valikul lähtuti Soome Geoloogiateenistuse poolt läbiviidud sesimoakustilisest uuringust (Alvi, 2017), mis kirjeldas võimalikke trassikoridore. Uuringute tulemusena selgus, et Eesti-poolne tunneli väljumisportaal on kõige otstarbekam rajada Viimsi poolsaarele (Joonis 4). Viimsi poolsaare geoloogia ja mäenduslikud tingimused on kõige soodsamad tunneli rajamiseks.



Joonis 4. Eesti-poolse tunneliportaali asendiplaan Viimsi poolsaarel (Alvi, 2017),

Teiste võimalike trasside puhul (Joonis 5) oleksid geoloogilised ja mäenduslikud tingimused palju halvemad, ning tunneli rajamine võtaks oluliselt kauem aega.



Joonis 5. Tallinn-Helsingi tunneli võimalikud trassikoridorid (Alvi, 2017),

2. Tallinn-Helsingi tunneli kombainlâbindamise tehnoloogia

Tunneli rajamine koosneb kahest peamisest etapist - tunneli lâbindamine (koos tunneli toestamisega) ja tunneli lõplik viimistlemine (ventilatsioonisüsteem, valgustus, ohutus jne). Antud töös käsitletakse ainult tunneli lâbindamise osa.

Tunneli lâbindamiseks on tänapäeval kasutusel kolm peamist tehnoloogiat, milleks on konventsionaalne meetod, mehhaniseeritud meetod ja *cut and cover* meetod. Töös kirjeldatakse lähemalt konventsionaalset tunnelilâbindamisemeetodit.

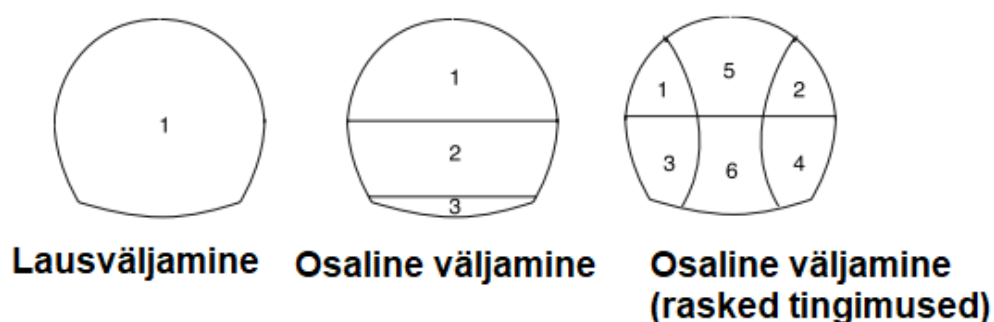
2.1 Konventsionaalne tunneli lâbindamistehnoloogia

Vastavalt International Tunnelling Association'i definitsioonile (ITA, 2009) on konventsionaalne tunneli rajamistehnoloogia tsükliline protsess, mis koosneb järgnevatest etappidest:

- Lâbindamine, kasutades puur-lõhketõid või mehaanilist kombaini (välja arvatud kilplâbinduskombain)
- Materjali koristamine (laadimine ja ee transport)
- Toestiku paigaldamine

Konventsionaalne meetod on parim lahendus projektidele, kus on keerulised geoloogilised ja mäenduslikud tingimused. Konventsionaalse meetodi eeliseks on see, et tema tsüklilisuse tõttu on võimalik kiirelt reageerida uutele tingimustele mis lâbindamisel ette tulevad. Vastavalt tingimustele saab vastu võtta otsuseid, mis aitavad lâbindamist ja toestamist efektiivsemaks muuta ning ära hoida ohtlike intsidente (ITA, 2009).

Lâbindamine toimub konventsionaalse meetodi korral vastavalt sellele, millised on geoloogilised ja mäenduslikud tingimused. Lâbindamiseks on kasutusel kolm põhilist skeemi (Joonis 6), mida vastavalt tingimustele kasutatakse.



Joonis 6 . Konventsionaalse meetodi kolm peamist lâbindamis skeemi.

Antud töös kasutatakse lâbindamiseks valiktööorganiga lâbinduskombaini, mille valikul lähtuti Tabelis 2 esitatud andmetest. Geoloogiliste ja mäenduslike tingimuste võrdlemisel tabelis olevate

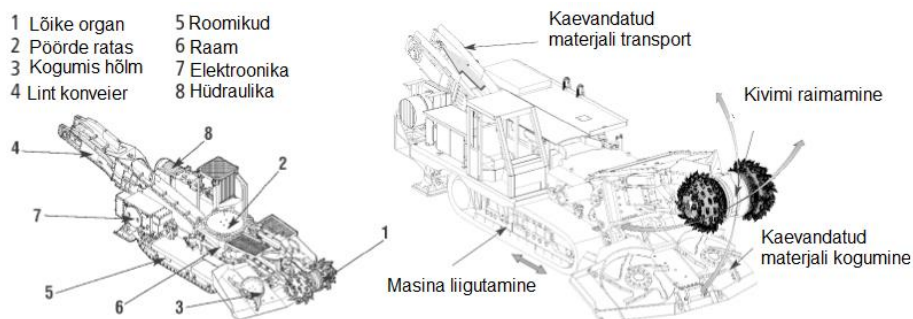
väärtustega otsustati, et kõige efektiivsem oleks kasutada valikulise tööorganiga kombaini. Läbindatavate kivimite madalad survetugevused loovad valikulise tööorganiga kombainile head tingimused töötamiseks efektiivselt kõikides kihtides välja arvatud kristalne aluskord.

Tabel 2. Mehaanilise kombaini valik vastavalt mäenduslikele tingimustele (Müller, 1972).

KIVI TÜÜP	PUUDE KIVIM	KALJUNE KIVIM			
Kivimi omadused	pehme	väikse tugevusega	keskmise tugevusega	tugev	väga tugev
Survetugevus	madal	kuni 60 MPa	60-120 MPa	120-220 MPa	üle 220 MPa
Tunneli kuju					
Läbindamis-tüüp	Osaline väljamine	Lausväljamine	Osaline väljamine	Lausväljamine	
Lõikesüsteem	Võnkuv Pöörlev	Pöörlev Wohlmeyer			Pöörlev Elektrotermiline
Lõikeorgan	Lõikamine	Lõikamine Jahvatamine Ketas-lõikurid	Jahvatamine Lõikamine joaga	Ketas-lõikurid Nööp-lõikurid Rull-lõikurid	Ketas-lõikurid Nööp-lõikurid Rull-lõikurid
Edasi liikumine	Hüdrauliline Roomikutel	Sammuv	Roomikutel	Sammuv	
Lõikeorgani jõudlus	Elektriline Hüdrauliline	Elektriline	Hüdrauliline	Elektro-mehaaniline	Elektriline Elektro-mehaaniline

2.2 Läbindamine valikulise tööorganiga kombainiga

Valikulise tööorganiga kombainid läbindavad profiili mitmes järgus. Nad on multifunktsionaalsed masinad, mis läbindavad tunnelit, laevad raimatud materjali konveierile ning transpordivad selle masina taha. Masinatel on liikumiseks roomikud (Joonis 7), mis muudavad nad mobiilseteks ning tagavad kiire liikumisvõimekuse, kui on vajadus masinaid ümberpaigutada (Maidl, Thewes, Maidl, 2013). Kombainid on elektriajamiga, mille abil välditakse diiselmootorite kasutamist.



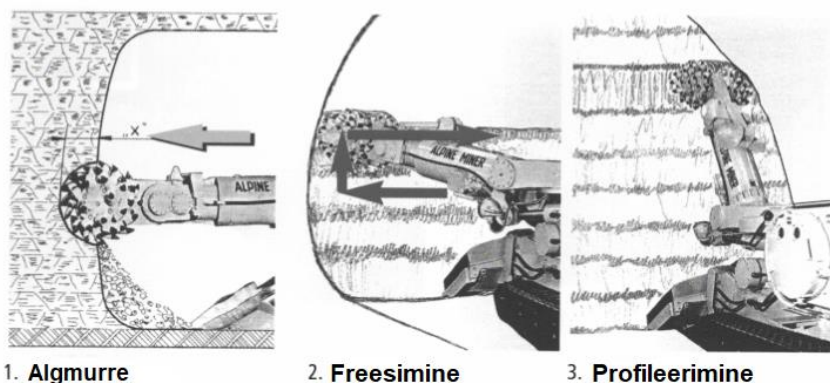
Joonis 7. Valikulise tööorganiga kombaini ehitus ja funktsioonid (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Valikulise tööorganiga kombaini valikul tuleb lähtuda tunneli parameetritest ja kivimite survetugevustest. Erinevate masinate puhul erinevad peamiselt masina mass ja tööorgani võimsus. Kombaine on erinevates raskusklassides ning erinevate võimsustega. Sobiva masina valikul on oluline töö efektiivsus ja parim tulusus. Masinate massid ja võimsused on esitatud Tabelis 3. Lisaks on tabelis esitatud masinate optimaalsed ja maksimaalsed tööparameetrid. Tabelist järeldub, et suurema tunneli pindala korral väheneb masina võime toime tulla suuremate survetugevust omavate kivimitega.

Tabel 3. Valik tööorganiga kombaini valiku tabel(Lammer, Gehring,1998).

Masinad	Mass	Lõikeorgani võimsus	Läbinduskombainid			
			Normaal töö parameetrid		Maksimaalsed töö parameetrid	
	[t]	[kW]	Tunneli pindala [m ²]	Max. σ_c [Mpa]	Tunneli pindala [m ²]	Max. σ_c [Mpa]
Kerge.....	8–40	50–170	≈ 25	60–80	≈ 40	20 – 40
Keskmine.....	40–70	160–230	≈ 30	80–100	≈ 60	40 – 60
Raske	70–100	250–300	≈ 40	100–120	≈ 70	50 – 70
Väga raske ...	> 100	350–400	≈ 45	120–140	≈ 80	80 – 110

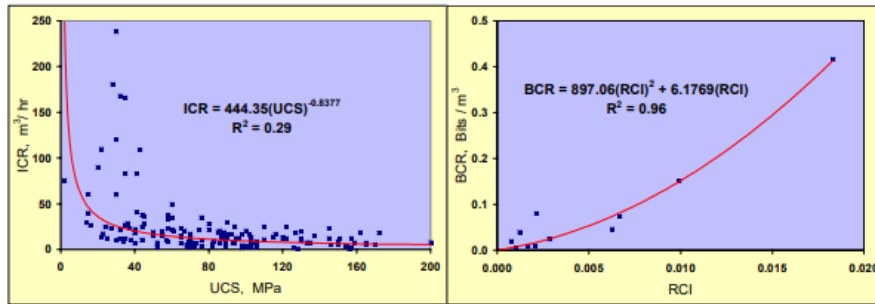
Läbindamistsükkel koosneb järgnevatest etappidest (Joonis 8). Esimese etapina toimub materjali sisselõikumine, seejärel freesimine ning kolmandana kontuurimine. Tsükli kiirus sõltub materjali survetugevusest ja abrasiivsusest. Abrasiivsus ei mõjuta läbindamise kiirust otseselt, kuid tööorgani lõikehammade kulumine ning nende vahetamine tekitab täiendavalt aja- ja materjalikulu.



Joonis 8. Läbindamistsükli kolm etappi (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Läbindamistsükli kiirust ja lõikehammade kulumist on võimalik ligikaudselt prognoosida, kasutades matemaatilist mudelit, mille on välja töötanud H. Copur, L. Ozdemir ja J. Rostmi. Nende välja töötatud matemaatiline mudel on rajatud empiirilistele andmetele, mis baseeruvad erinevate projektide raames saadud kogemustel. Valemites kasutatavad konstandid on välja töötatud

statistilise analüüsi käigus (Joonis 9). Valemite eesmärk on anda ligikaudne vahemik, et prognoosida, milline võib etteantud tingimustes olla läbindamiskiirus ja lõikeorgani kulumine.



Joonis 9. Matemaatilise statistika abil välja töötatud valemid. (Copur, Ozdemir, Rostmi, 1998)

$$ICR = 444,35 * (UCS)^{-0,8377} \quad (1)$$

Kus: ICR – Läbindamise kiirus (m³/h)

UCS – Survetugevus (MPa)

Läbindamisel lõikehambad kuluvad ning vastavalt sellele saab ligikaudselt arvestada, kui tihedalt tuleb lõikehambaid vahetada. Ligikaudselt saab arvutada välja lõikehammade kulumise kasutades valemid 2 ja 3.

$$RCI = \frac{UCS}{P * W * CHD} \quad (2)$$

$$BCR = 897,06 * (RCI)^2 + 6.1769 * RCI \quad (3)$$

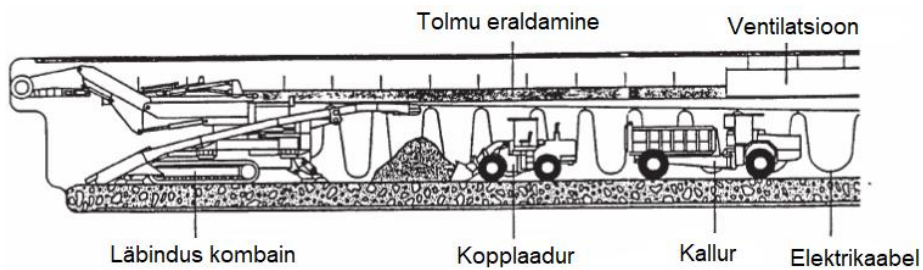
Kus: RCI – Lõikeorgani kulumis indeks

BCR – Lõikehammade kulumine (tk/m³)

P – Lõikeorgani võimsus (kW)

W – Kombaini kaal (t)

Valikulise tööorganiga kombaini tehnoloogiline skeem koosneb läbindamisest, materjali transpordist konveieriga, selle ümberlaadimist kopplaaduriga kallurile ning kalluriga tunnelist väljavedu (Joonis 10). Suuremate tunnelite korral on võimalik teha mitmeid töid paralleelselt, et muuta kogu protsess kiiremaks. Näiteks võib läbindamisega paralleelselt toimuda külmutusvõrgu aukude puurimine. Kaks tegevust toimuvad paralleelselt ning selle tagajärjel säästetakse nii aega kui ka raha.



Joonis 10. Valikulise tööorganiga kombaini üldine tööskeem (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

2.3 Tunneli toestamine

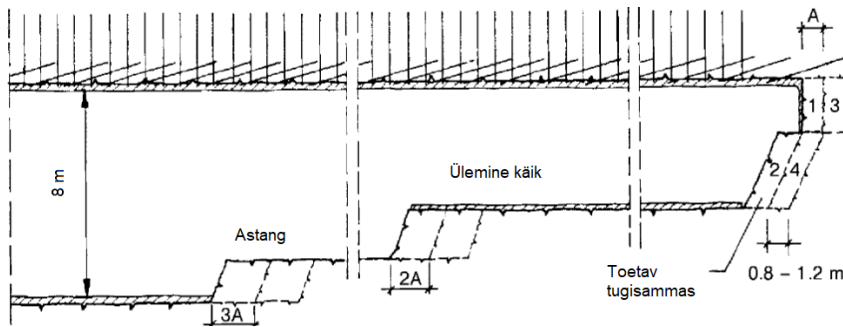
Konventsionaalse tunneliläbindamise meetodi korral toimub tunneli toestamine kohe pärast läbindamist ning tunneli stabiilsus saavutatakse pärast esmast toestamist. Toestamise muudavad keerukamaks rasked mäenduslikud tingimused, mis võivad muutuda väga kiiresti (Palmstöm, Nilsen, 2000). Tunneli toestamise edukuse tagamiseks tuleb luua rajatava toestiku jaoks projekt, mis arvestab järgnevate aspektidega (Maidl, Thewes, Maidl, 2013):

- tunneli konfiguratsiooni valik;
- sobivate meetodite ja operatsioonide valik;
- sobiva toestiku valik;
- sobiva läbindamistehnoloogia valik.

Üks laialdasemalt kasutatavaid toestamismeetodeid on toestamine pritsbetooniga. Seda tüüpi toestamise käigus pritsitakse betoon tunneli seinale, mille abil tagatakse esmane toestik (Joonis 11). Pritsbetooni peamised eelised on järgmised (Palmstöm, Nilsen, 2000):

- võimalus toestada igal võimalusel;
- pole vaja toestikku;
- saab kasutada ebatasastel pindadel;
- lihtne kombineerida teiste meetoditega;
- paindlikud deformatsiooni omadused.

Tunneli toetamine pritsbetooniga peab toimuma juba eelnevalt stabiilseks muudetud alal või tuleb paigaldamise ajaks kasutada ajutist toestikku, mis kaitseb pritsbetooni operaatorit kukkuvate objektide eest. Tunneli pikkuse suurenemisel tuleb pidevalt kontrollida massiivide stabiilsust ja mäenduslike tingimusi, et vältida võimalikke ohutegureid inimestele (SWA, 2013). Astmelise eel läbindamise korral (Joonis 12) toimub toetamine järk-järgult. Selline skeem tagab inimeste ohutuse toetamise ajal. Esmane toetus on antud juhul tagatud ankrutega ja toetavate tugipostidega.



Joonis 12. Astmelise eega tunneli läbindamine (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Esmane kiht pritsbetooni on õhuke, mistõttu lisatakse toestiku tugevdamiseks ankrud, terasvõrk ja tri-armatuur (SWA, 2013). Selline toestiku skeem on põhiline, mida kasutatakse ebastabiilsetes tingimustes.

Tri-armatuuri sarnaneb omaduste poolest terasraamidega (Joonis 13). Tri-armatuuri on kasutatud alates 1970. aastast ning ta on oma kerge konstruktsiooni tõttu asendanud järk-järgult terasraamid. Tri-armatuuri peamised eelised on järgmised (Komselisjt, 2005):

- lihtne ja kiire paigaldamine;
- hea tugi ankrutele;
- pritsbetooni tugevdamiseks kuni selle piisava tugevuse saavutamiseni;
- kiire toetus tunneli läbindamisel.

Tri-armatuuri peamised miinused on:

- tuleb valmistada vastavalt nõutavatele standarditele, mistõttu võib tarneaeg olla pikk;
- kasutatava pritsbetooni suurenenud kulu (Joonis 14).



Joonis 13. Tri-armatuur tunneli toetamiseks (Jorimann, 2010).



Joonis 14. Tri-armatuur paigaldatuna pritsbetooni alla (Jorimann, 2010)

2.4 Külmutamine

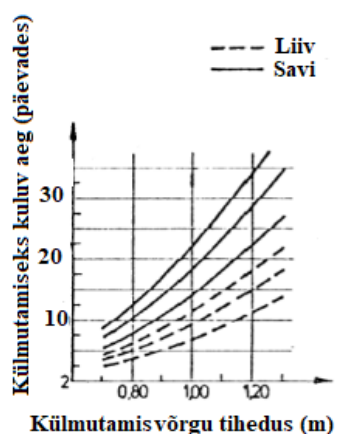
Tehislik maapinna külmutamine on laialdaselt kasutatud meetod nõrkade ja veega küllastunud kivimikihtide ja pinnaste stabiliseerimiseks. Külmutamine toimub külmutusvõrgu abil, kuhu pumbatakse külmutusaine, mis torus liikudes neelab energiat oma temperatuuri tõstmiseks. Peamised meetodid on soolalahuse ja vedellämmastiku kasutamine (Vakulenko, 2018).

Külmutamise edukaks läbiviimiseks on vajalik eelnev põhjalik projekteerimine, et tagada töö sujuv kulgemine ja efektiivsus. Eelnevalt on oluline teada kuidas pinnas termaalselt ja füüsiliselt külmutades käitub. Kui külmutamine on vajalik ning otstarbeks, tuleb arvesse võtta järgmisi samme (Vakulenko, 2018):

- külmutamise tehnoloogia valik;
- külmutusvedeliku omadused (tüüp, töö temperatuur);
- külmutusaukude arv;

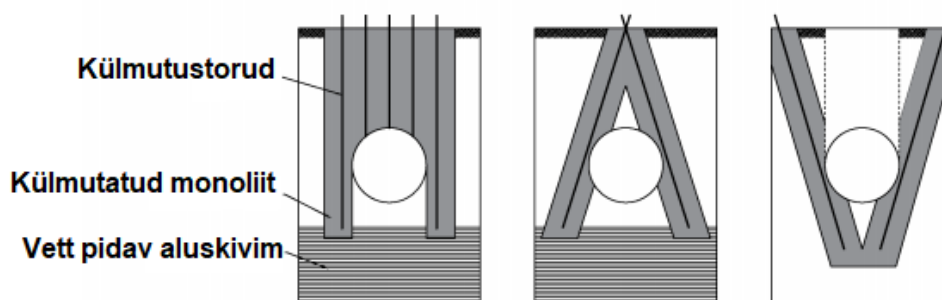
- külmutustorude parameetrid;
- külmutamise aeg;
- vajalik energikulu.

Külmutamisvõrgu tiheduse määramiseks on loodud empiiriline graafik (Joonis 15), mille kaudu leitakse ligikaudne külmutuspuuraukude arv (Green, Greenwood, Partenio, 2014). Õigesti valitud külmutusvõrgu tihedus tagab eduka ja efektiivse külmutamise, mille tulemusel saavutatakse külmutatud monoliitne mass võimalikult väikeste aja- ja ressursikuludega.

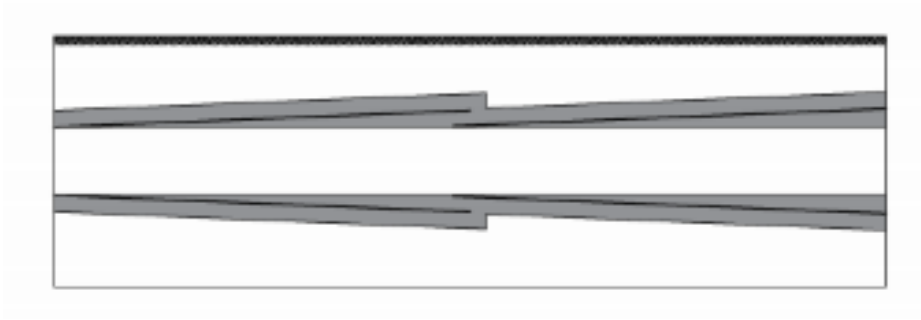


Joonis 15. Graafik külmutusvõrgu tiheduse valimiseks (Green, Greenwood, Partenio, 2014)

Külmutusvõrgu paigutus sõltub tunneli konfiguratsioonist ja sügavusest maapinnast. Võimalik on paigutada külmutusvõrk vertikaalselt (Joonis 16) või horisontaalselt (Joonis 17). Külmutusvõrgu paigutus on üks peamine aspekt, mida külmutamisprojekti loomisel tuleb arvesse võtta (Vakulenko, 2018). Maapinna lähedal kulgevate tunnelite puhul on otstarbekas kasutada vertikaalset külmutusvõrku. Vertikaalse külmutusvõrgu puhul ei sega külmutusvõrgu paigaldamine tööd tunnelis.

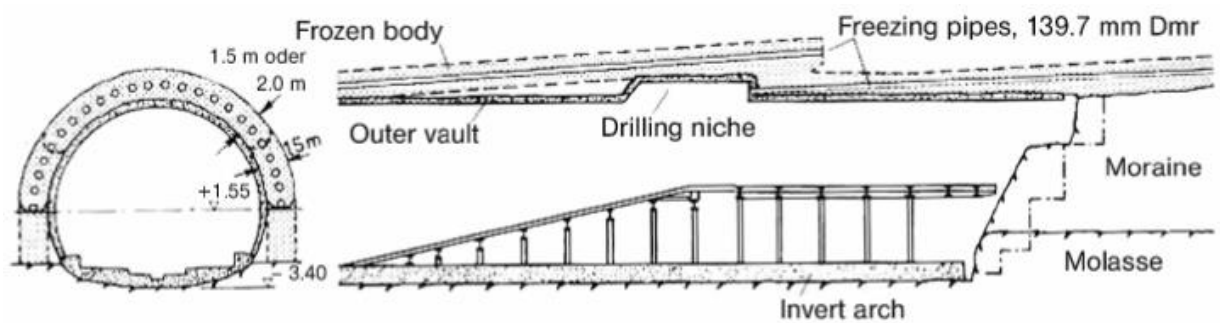


Joonis 16. Külmutusvõrgu võimalikud vertikaalsed paigutused (Vakulenko, 2018)



Joonis 17. Külmutusvõrgu horisontaalne paigutus (Vakulenko, 2018)

Kui tunnel asub maapinnast oluliselt sügavamal ning seetõttu ei ole vertikaalset külmutusvõrku enam otstarbekas kasutada, tuleb kasutusele võtta horisontaalne külmutusvõrk. Külmutusvõrgu rajamine horisontaalselt toimub tunneli seest puurimisega ning selle üldskeem on esitatud Joonisel 18 (Maidl, Thewes, Maidl, 2013). Horisontaalse külmutusvõrgu rajamine on aeganõudev protsess, kuna tunnelis tuleb süvendada täiendavad süvendid, mille kaudu külmutusvõrgu puuraugud puuritakse.



Joonis 18. Horisontaalse külmutamisvõrgu üldine skeem (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).





3. Läbindamistöõde parameetrite väljatöötamine

Läbindamistöõde parameetrite väljatöötamisel arvestati, et kasutatakse kombaini Sandvik MT720 (Joonis 19), mille lõikepea diameeter on 1.1 m. MT720 on disainitud töötama väga tugevate ja abrasiivsete kivimitega, mille survetugevus on üle 120 MPa. Kombainil on väga võimas lõikeorgan, mille võimsus on 300 kW. Masinale on paigaldatud veesüsteem, mis aitab läbindamise ajal vähendada tolmu ja jahutada lõikeorganit. Masin on disainitud nii, et masina ülalpidamiskulud oleksid minimaalsed ja tulemus sellevõrra efektiivsem (Sandvik, 2019).



Joonis 19 . Valik tööorganiga kombain Sandvik MT720 (Sandvik, 2019)

Tunneli konfiguratsioon valiti ringikujuline. Ringikujulist konfiguratsiooni kasutatakse tunneli rajamisel, kui mäerõhk avaldab survet kõikidest suundadest koos survealuse põhjaveega (Joonis 20). Eesti-poolse tunnelitrassi läbindamisel tuleb läbida kaks kihti, kus on mõjuteguriks survealine põhjavesi. Vastavalt tunneli läbindamisele kasutatavale konventsionaalsele meetodile on võimalik tunnelikonfiguratsiooni vastavalt vajadusele muuta. Näiteks aluskorra läbindamisel on võimalik kasutada eliptilist või paraboolset konfiguratsiooni.

	Ristkülik Kasutusel kui mäerõhk ei avalda purustavat mõju tunneli konstruktsioonile
	Parabool, poolring Kasutusel kui mäerõhk avaldab survet vertikaalselt
	Eliptiline Kasutusel kui mäerõhk avaldab survet horisontaalselt ja vertikaalselt
	Ring Kasutusel kui mäerõhk avaldab survet kõikidest suundadest koos survealuse põhjaveega

Joonis 20 . Tunneli konfiguratsiooni valik vastavalt mõjuvatele mäerõhkudele (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

3.1 LÄBINDUSTÖÖDE PARAMEETRID TISKRE LIIVAKIVIDES

LÄBINDAMINE

Raudteetunneli läbindamine valiktöorgan kombiniga Tiskre liivakivides toimub 2,33 km ulatuses. Läbindamist raskendavateks teguriteks on liivakivide suur abrasiivsus ja survealine põhjavesi, mis loob tunneli läbindamiseks rasked tingimused. Läbindamismahud Tiskre liivakivides kahe raudteetunneli ja ühe hooldustunneli läbindamisel on välja toodud Tabelis 4.

Läbindamiseks kuluvat aega saab ligikaudselt prognoosida valemiga 1.

$$ICR = 444,35 * 5^{-0,8377} = 36,1 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

Tabel 4. Läbindamismahud Tiskre liivakivides

Tiskre liivakivid	Kogus	Pindala (m ²)	Pikkus (m)	Läbindamismaht (m ³)
Raudteetunnel	2	50.24	2330	234118
Hooldustunnel	1	28.26	2330	65846
			Kokku	299964

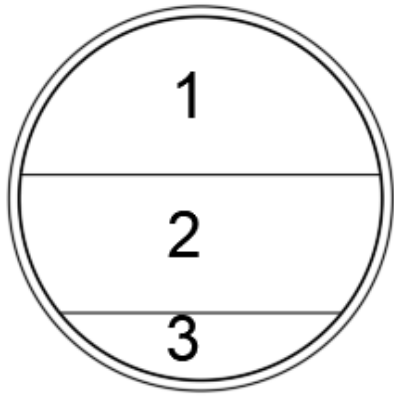
Läbindamisel tööorganid kuluvad, vastavalt sellele saab ligikaudselt arvutada, kui tihti tuleb lõikehambaid vahetada. Ligikaudselt lõikehammaste kulumise arvutamiseks saab kasutada valemeid 2 ja 3.

$$RCI = \frac{5}{135 * 300 * 1.1} = 0.00493 \quad (2)$$

$$BCI = 897,06 * (0,000206)^2 + 6.1769 * 0,000206 = 0,0007 \quad (3)$$

Antud valem arvestab ainult kivimi survetugevusega. Täpsema tulemuse saamiseks on vaja arvestada lisaks kivimi abrasiivsust. Valem töötab kivimite puhul, mille abrasiivsus ei ole väga kõrge ning seetõttu on kvartsirikaste Tiskre liivakivide puhul tulemus ebatäpne. Täpsema tulemuse saamiseks tuleb läbi viia täiendavaid uuringuid Tiskre liivakivide abrasiivsuse kohta.

Läbindamine toimub astmelise eega kolmes järgus. Esimesena toimub läbindamine ülemises ees, mille järel paigaldatakse toetus. Järgnevalt väljatakse keskmine osa tunneli ristlõikest ning seejärel viimane, alumine osa, mille tulemusena saadakse lõplik tunneli kuju. Antud meetod tagab ohutuma töökeskkonna, kuna toestamine toimub järk-järgult ning ülevalt alla, mis on ebastabiilsetes tingimustes kõige turvalisem lahendus. Joonisel 21 on näidatud, millises järjekorras toimub läbindamine Tiskre liivakivides.



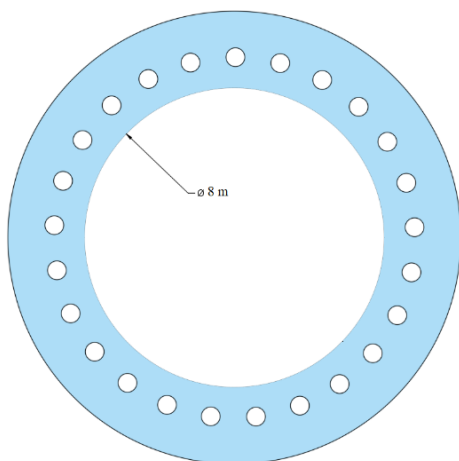
Joonis 21 . Läbindamise skeem Tiskre liivakivides.

Toestamine

Tiskre liivakivides leiduva põhjavee tõttu on tunneli rajamisel väga oluline luua läbindamise ajaks ajutine toetus mis aitaks säilitada tunnelis töötavate inimeste ja masinate turvalisuse. Ajutiseks toestamiseks ja põhjavee juurdepääsu tõkestamiseks tuleks antud kihis kasutada eelnevalt kivimite külmutamist. Külmutamise eesmärgiks on luua monoliitne blokk, mis takistaks vee juurdepääsu ning tagaks esmase toestiku (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

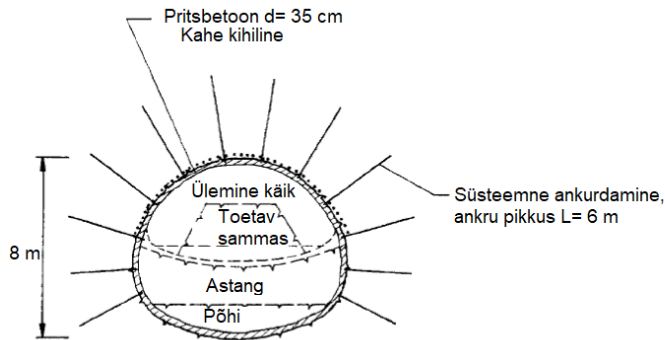
Külmutamine toimub ümber kogu tunneli parameetri (Joonis 21), mis tagab läbindamiseks kuivad tingimused ja loob stabiilse keskkonna läbindamiseks. Külmutamiseks kasutatakse vedellämmastiku (LN_2), et tagada kiire ja efektiivne tulemus. Vedellämmastik külmutab ka kiirelt liikuvad põhjaveekihi, mida $CaCl_2$ lahus ei ole võimeline külmutama (Green, Greenwood, Partenio, 2014).

Külmutamisvõrgu parameetrite väljatöötamisel lähtuti Joonisest 15, mille järgi paigutati jahutusvõrgustik 1 m vahedega. Tunneli ümbermõõdule vastavalt paigutati külmutusvõrku 25 külmutuspuurauku.



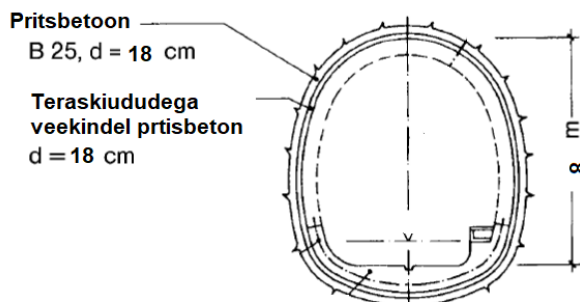
Joonis 21. Külmutusvõrgu parameetrid Tiskre liivakivides.

Külmutamisele järgneb toestamine pritsbetooniga. Pritsbetooniga luuakse mitmekihiline toestik, mille eesmärgiks on toestada tunnelit, takistada veetungimine tunnelisse ja luua läbindamiseks soodsad tingimused. Püsiva toestiku loomiseks lisatakse pritsbetoonile ankurtoestik, mis muudab toestiku stabiilsemaks (Joonis 22).



Joonis 22. Tunneli toestamine pritsbetooni ja ankrutega (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Kahekihilise pritsbetooni alumise kihi moodustab kuivseguna paigaldatud tavaline pritsbetoon ja pealmise kihi moodustab teraskiududega veekindel pritsbetoon (Joonis 23). Kihid on võrdsete paksustega ning nad parandavad üksteise tugevusomadusi. Järgnevalt lisatakse toestikule tri-armatuur, mis tagab täiendava toestiku. Tri-armatuur kaetakse tulekindla pritsbetoonikihiga, et võimaliku tulekahju korral tunneli toestik jääks kahjustusteta, mis võivad mõjutada kogu tunneli stabiilsust (Shuttleworth, 2001).



Joonis 23. Pritsbetooni kihtide paigutus (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

3.2 Läbindustööde parameetrid Sinisavis

Läbindamine

Raudteetunneli läbindamine sinisavis toimub 4,28 km ulatuses. Sinisavi läbindamisel võib muutuda raskendavaks teguriks sinisavi suur kleepuvus, mis võib olulisel määral aeglustada kaevandatud materjali transporti. Lisaks kleepuvusele pole sinisavi piisavalt püsiv, mistõttu on vajalik sinisavi osaline külmutamine, et tagada ohutus läbindamisel. Läbindamismahud sinisavis kahe raudteetunneli ja ühe hooldustunneli läbindamisel on esitatud Tabelis 5.

Läbindamiseks kuluvat aega saab ligikaudselt prognoosida valemiga 1.

$$ICR = 444,35 * 4^{-0,8377} = 139,1 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

Tabel 5. Läbindamismahud sinisavis.

Sinisavi	Kogus	Pindala (m ²)	Pikkus (m)	Läbindamismaht (m ³)
Raudteetunnel	2	50.24	4280	430054
Hooldustunnel	1	28.26	4280	120953
			Kokku	551007

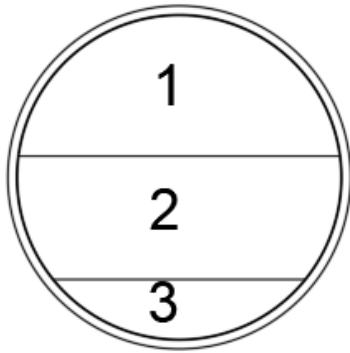
Läbindamisel tööorganid kuluvad ning vastavalt sellele tuleb ligikaudu arvestada kui tihedalt tuleb löikehambaid vahetada. Ligikaudselt saab prognoosida löikehammade kulumist kasutades valemeid 2 ja 3.

$$RCI = \frac{5}{135 * 300 * 1.1} = 0,000988 \quad (2)$$

$$BCI = 897,06 * (0,000206)^2 + 6.1769 * 0,000206 = 5,3 * 10^{-6} \quad (3)$$

Savi väikse abrasiivsuse ja madala survetugevuse tõttu kuluvad löikehambad savis läbindamisel minimaalselt. Kulumist võivad põhjustada savikihtide vahel olevad kõvemad kivimid, mille survetugevus on oluliselt suurem savi omast. Nende kihtide hulk on kogu kompleksi arvestades väga väike ning nende ilmumise korral on võimalik läbindamist ajutiselt muuta, sest kogu läbindamine toimub tsükliliselt.

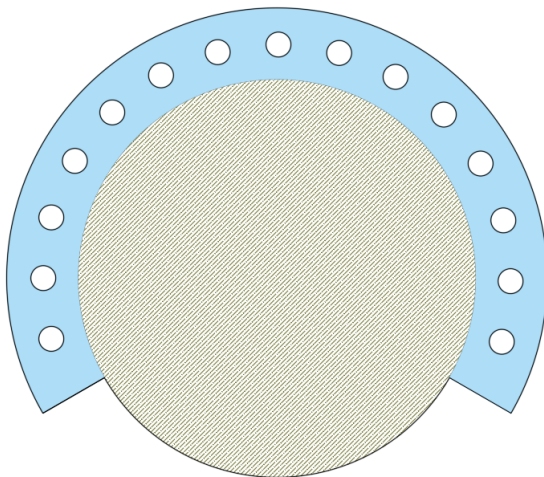
Läbindamine toimub astmelise eega kolmes järgus, sarnaselt Tiskre liivakividega. Esimalt toimub läbindamine ülemises ees, mille järel paigaldatakse toetus. Järgnevalt väljatakse keskmine osa tunneli ristlõikest ning seejärel viimane, alumine osa, mille tulemusena saadakse lõplik tunneli kuju. Selline meetod aitab tagada ohutuma töökeskkonna, kuna toestamine toimub järk-järgult ja ülevalt alla, mis on ebastabiilsetes tingimustes kõige turvalisem lahendus. *Joonisel 24* on näidatud, millises järjekorras toimub läbindamine sinisavis.



Joonis 24 . Läbindamise skeem sinisavis.

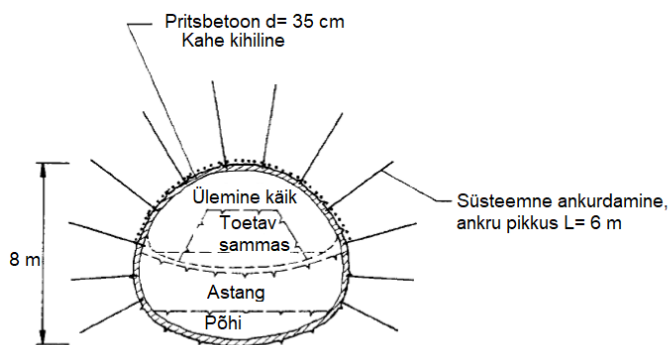
Toestamine

Esmase stabiilsuse ja ohutu töökeskkonna loomiseks külmutatakse sinisavi osaliselt ümber tunneli (Joonis 25). Külmutusvõrku lisati 15 külmutusauku. Külmutamiseks kasutatakse vedellämmastiku (LN_2), sest külmutamiskiirus on madala temperatuuri tõttu oluliselt kiirem, kui näiteks soolahusel (NaCl_2). Kuna sinisavil on väga head vettpeidavad omadused, siis on külmutamise eesmärk ainult ajutine toestamine ohutuse tagamiseks.



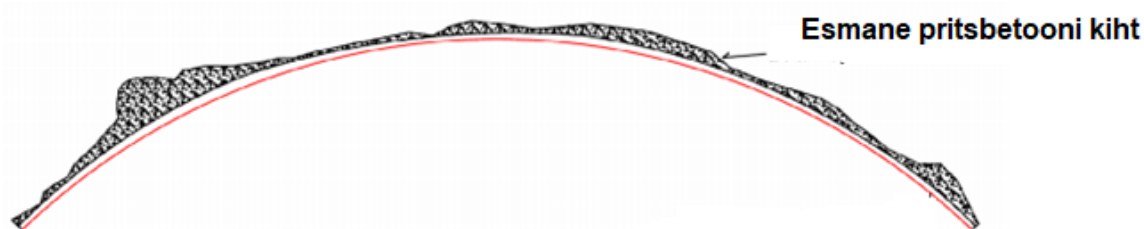
Joonis 25. Savi külmutamisvõrk esmase stabiilsuse saavutamiseks.

Läbindamise järel toimub toestamine pritsbetooniga (Joonis 27). Pritsbetooniga luuakse mitmekihiline toestik, mille eesmärgiks on toestada tunnelit, takistada vee tungimine tunnelisse ja luua läbindamiseks soodsad tingimused. Püsiva toestiku loomiseks lisatakse pritsbetoonile ankurdus, mis muudab toestiku stabiilsemaks (Joonis 26). Üldine toestamisskeem on sama nagu Tiskre liivakivides. Ainuke vahe on savi hea vettpeidavus, mistõttu pole veekindla pritsbetooni kasutamine otseselt vajalik, kuid ettevaatusabinõuna tasub sinisavi korral kasutada samuti vettpeidavat teraskiududega pritsbetooni.

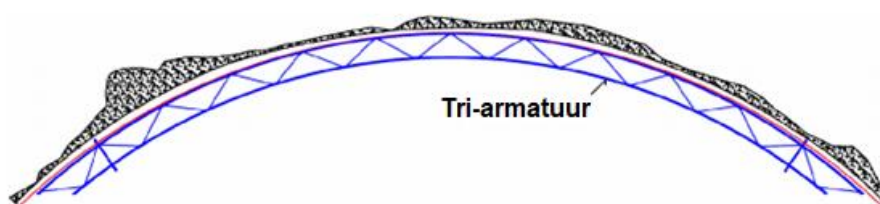


Joonis 26. Tunneli toestamine pritsbetooni ja ankrutega (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

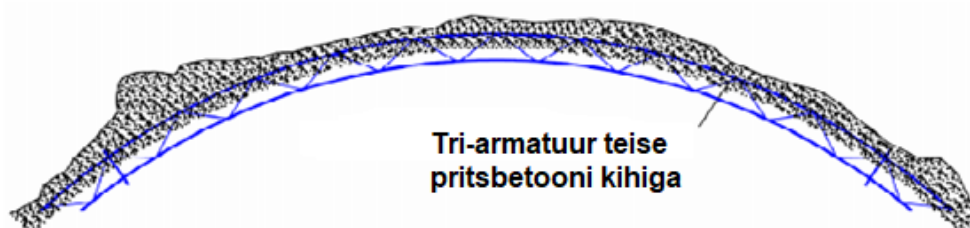
Tri-armatuuriga toestamine toimub peale pritsbetooni kasutamist ning aitab luua püsiva toestiku (Joonis 28). Tri-armatuuri võib lisada paralleelselt teise pritsbetooni kihiga (Joonis 29). Selle põhjuseks on savi hea veepidavus, mille tõttu ei ole vaja veekindlat pritsbetooni liigselt kasutada. Tri-armatuuri lisamine teise kihiga paralleelselt aitab ennetada pritsbetooni kukkumist tööalale. Tri-armatuur kaetakse tulekindla pritsbetoonikihiga, et võimaliku tulekahju korral tunneli toestik ei saaks kahjustusi, mis võivad mõjutada kogu tunneli stabiilsust (Shuttleworth, 2001).



Joonis 27 . Pritsbetooni kihide paigutus (Shuttleworth, 2001).



Joonis 28 . Tri-armatuur paigaldatakse esmase pritsbetooni kihi peale (Shuttleworth, 2001).



Joonis 29. Tri-armatuurile lisatakse teine kiht pritsbetooni (Shuttleworth, 2001).

3.3 L bindust ode parameetrid Ediacara kompleksis

L bindamine

Raudteetunneli l bindamine Ediacara kompleksis toimub 6,44 km ulatuses. Ediacara kompleksi l bindamisel on raskendavaks teguriks liivakivide suur abrasiivsus, mis võib olulisel m aeral kiirendada lõikeorgani kulumist. Lisaks suurele abrasiivsusele on probleemiks ka survealine põhjavesi, mis muudab kivimi ebapüsivaks, ning kivimite kihilisus, mis ei võimalda prognoosida piisava täpsusega mäenduslike tingimusi. Läbindamise jaoks on vaja ümber tunneli täies mahus külmutamine mille eesmärk on luua esmane toetus ja veet ke. Välistatud ei ole ka täielik külmutamine mille võib tingida kivimite ebastabiilsus, mis võib l bindamise ajal inimesed ohtu seada. Läbindamismahud Ediacara kompleksis kahe raudteetunneli ja ühe hooldustunneli l bindamisel on välja toodud Tabelis 6 .

L bindamiseks kuluvat aega saab ligikaudselt prognoosida valemiga 1.

$$ICR = 444,35 * 15^{-0,8377} = 36,1 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

Tabel 6. Läbindamismahud Ediacara kompleksis

Ediacara kompleks	Kogus	Pindala (m ²)	Pikkus (m)	Läbindamismaht (m ³)
Raudteetunnel	2	50.24	6440	647091
Hooldustunnel	1	28.26	6440	181994
			Kokku	829086

Liivakivide suure abrasiivsuse tõttu l ikehambad kuluvad ning vastavalt sellele tuleb ligikaudu arvestada kui tiheidalt tuleb l ikehambaid vahetada. Ligikaudselt saab arvutada välja l ikehammade kulumise kasutades valemeid 2 ja 3.

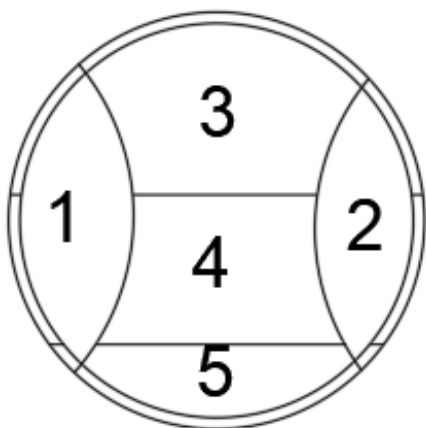
$$RCI = \frac{15}{135*300*1.1} = 0,00493 \quad (2)$$

$$BCI = 897,06 * (0,000337)^2 + 6.1769 * 0,000337 = 0,00067\text{tk}/\text{m}^3 \quad (3)$$

Antud valem arvestab ainult kivimi survetugevusega, et aga saada täpsemat tulemust oleks vaja arvestada ka kivimi abrasiivsust. Valem t otab kivimite puhul mille abrasiivsus ei ole väga kõrge ning seetõttu on kvartsirikaste Ediacara liivakivide puhul tulemus ebatäpne. Täpsema tulemuse saamiseks tuleks läbi viia täiendavaid uuringuid Ediacara liivakivide abrasiivsuse kohta, ning täiendada valemit 3 lisades sinna ka teguri mis arvestab kivimite abrasiivsust.

Ediacara kompleksi kihilisuse ja ebastabiilsete mäenduslike tingimuste tõttu tuleb läbindada osaliste sektsioonidega (Joonis 30). Sektsioonide järjekord on vastav, et vältida varisemisohtu. L bindades esmalt sektsioonid 1 ja 2 hoiab keskel paiknev tervik lage üleval (Joonis 31 .) (Egger, K

jt 2004). Pärast läbindamist toimub seksioonide 1 ja 2 toestamine mis aitab kindlustada seksiooni 3. Edasine läbindamine toimub sarnaselt astmelise skeemiga.



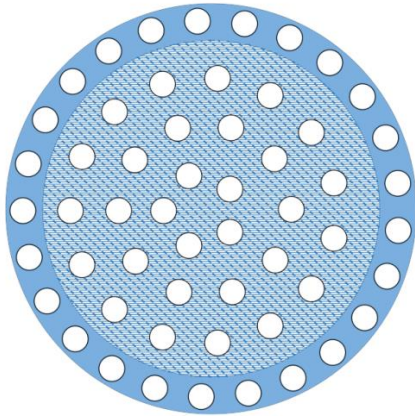
Joonis 30 . Läbindamise skeem Ediacara liivakivides



Joonis 31 . Läbindamise seksioonidega (Egger, K jt 2004).

Toestamine

Toestamine Ediacara liivakivides võib osutuda väga keerukaks, sest survealine põhjavesi, kivimikihtide kihilisus ja ebastabiilsed mäenduslikud tingimused muudavad kogu toestiku planeerimise väga keerukaks. Üldine toestamine toimub sama skeemi alusel nagu Tiskre liivakivide puhul. Esimesena tuleb kasutusele võtta külmutamine, et luua monoliitne plokk. Seoses Ediacara liivakivide ebastabiilsete omaduste tõttu on vajalik külmutamine kogu ristlabilõike ulatuses (Joonis 32). Sellisel juhul välditakse kivimite varisemist läbindamisel. Sellise meetodi kasutamisel tuleb luua külmutusvõrk mis koosneb 55st külmutus august. Kogu ristlabilõike külmutamiseks tuleb kasutada vedellämmastiku (LN_2), sest survealine põhjavesi omab suurt hüdrotermaalset soojust mille külmutamiseks tavalisest soolhappe lahusest ei piisa.



Joonis 32 . Külmutusvõrgu skeem kogu ristlääbilõike külmutamiseks.

Järgmise sammuna toestiku juures lisatakse pärast läbindamist esimene kiht pritsbetooni. Pritsbetooniga paralleelselt lisatakse toestikule ka ankrud, et esmalt hoida betooni kuni tema tugevuse saavutamiseni. Ankrutel on ka oluline roll lõpliku toestiku tugevdamisel. Ediacara liivakivides paikneva survealise põhjavee tõttu tuleb võtta kasutusele täiendavad meetmed, et vältida vee tungimist tunnelisse. Selle jaoks tuleb esimese ja teise pritsbetooni kihi vahele panna täiendavalt veekindel geomembraan (Joonis 33) mis takistab vee tungimist tunnelisse. Õige veekindla geomembraani kasutamine on väga oluline nii tehniliselt kui majanduslikult (Atarfil, 2019).



Joonis 33 . Veekindel geomembraan tunneli hüdroisoleerimiseks (Atarfil, 2019).

Teise pritsbetooni kihi peale tuleb tri-armatuur mis tagab tunneli lõpliku toestiku. Tri-armatuur kaetakse tulekindla pritsbetoonikihiga, et võimaliku tulekahju korral tunneli toestik ei saaks kahjustusi mis võivad mõjutada kogu tunneli stabiilsust (Shuttleworth, 2001).

3.4 Läbindustööde parameetrid murenemiskoorikus

Läbindamine

Raudteetunneli läbindamine murenemiskoorikus toimub 4,05 km ulatuses. Murenemiskooriku läbindamisel võib muutuda raskendavaks teguriks murenemiskooriku suur survetugevus mis

aeglustab läbindamiskiirust. Survetugevus võib muutuda väga suures vahemikus mis tõttu on tsüklilise läbindamise puhul võimalik igale muutusele reageerida. Murenemiskooriku ülemises osas võivad tingimused sarnaneda Ediacara liivakividele. Mida sügavamale murenemiskoorikus jõutakse seda rohkem hakkavad tingimused sarnanema aluskorraga. Läbindamismahud murenemiskoorikus kahe raudteetunneli ja ühe hooldustunneli läbindamisel on välja toodud Tabelis 7.

Läbindamiseks kuluvat aega saab ligikaudselt prognoosida valemiga 1.

$$ICR = 444,35 * 100^{-0,8377} = 9,4 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

Tabel 7. Läbindamismahud murenemiskoorikus

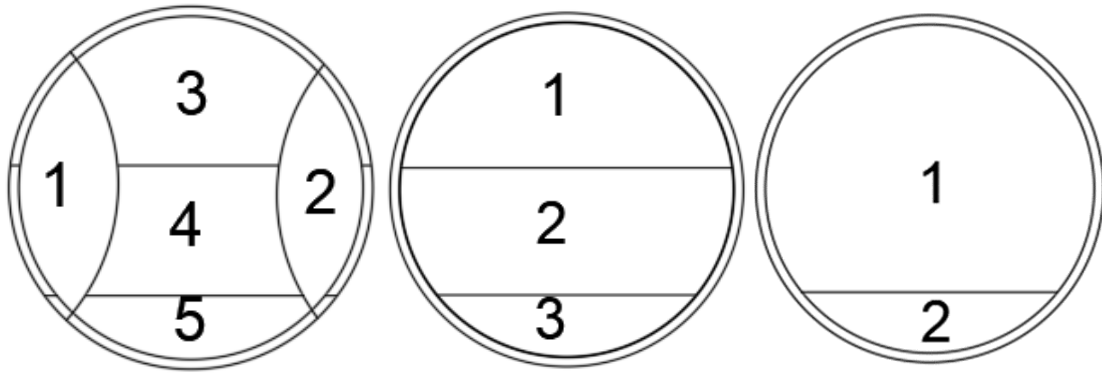
Murenemiskoorik	Kogus	Pindala (m ²)	Pikkus (m)	Läbindamismaht (m ³)
Raudteetunnel	2	50.24	4050	406944
Hooldustunnel	1	28.26	4050	114453
			Kokku	521397

Lõikehammaste kulumine murenemiskoorikus muutub vastavalt sellele kui sügavale murenemiskoorikusse on jõutud Ülemises osas kus murenemiskooriku survetugevus on sarnane Ediacara liivakividega toimub lõikehammaste kulumine aeglasemalt, kuid mida lähemale me kristalsele aluskorrale jõuame, seda kiiremini lõikehambad kuluma hakkavad. Lõikehammaste ligikaudse kulumise arvutamise jaoks võeti survetugevuseks maksimaalne väärtus antud kihis ning kasutati valemeid 2 ja 3.

$$RCI = \frac{100}{135 * 300 * 1.1} = 0,024691 \quad (2)$$

$$BCI = 897,06 * (0,002245)^2 + 6.1769 * 0,002245 = 0,0834 \quad (3)$$

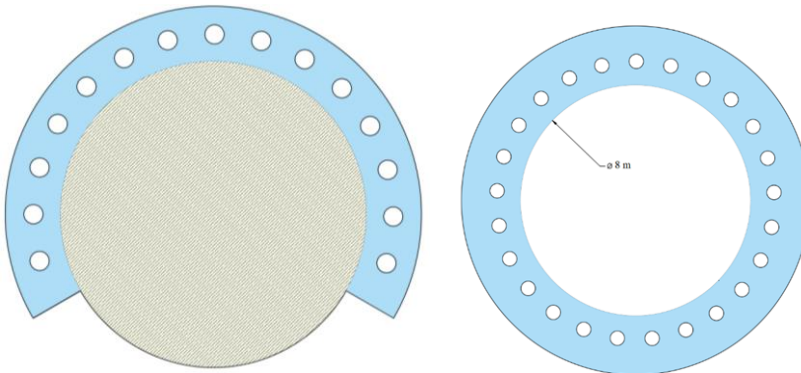
Läbindamine murenemiskoorikus toimub kolme üldise skeemi alusel. Läbindamise skeemi valimine (Joonis 34) sõltub mäenduslikest tingimustest. Murenemiskooriku ülemises osas on kõige otstarbekam ja ohutum kasutada läbindamiseks osalist sektsioonidega väljamist. Sellise skeemi kasutamine on tingitud murenemiskooriku ülemise osa madalast survetugevusest ja kivimite ebastabiilsusest. Kui mäenduslikud tingimused muutuvad paremaks saab üle minna astmelisele väljamisele. Astmelise väljamise puhul toimub väljamine sarnaselt Tiskre liivakividega ja sinisaviga. Erinevus peitub aga läbindamiskiiruses mis murenemiskoorikus on tunduvalt aeglasem. Kui mäenduslikud tingimused muutuvad paremaks ja kivimite stabiilsus on piisavalt suur siis on võimalus üleminna ka laus-väljamisele. Laus-väljamine ei pruugi aga olla parim variant, sest suure ristlõikepindala tõttu võib valiktööorganiga kombainil tekkida raskusi ülemiste kivimite läbindamisel. Mida kõrgemalt peab kombain raimama, seda väiksem on tema lõikeorgani võimsus.



Joonis 34 . Võimalikud variandid murenemiskoorikus läbindamiseks.

Toestamine

Toestamine murenemiskoorikus muutub vastavalt sellele kui sügavale on edenetud. Murenemiskooriku ülemises osas tuleb kasutada külmutamist ümber kogu tunneli ristlõikepindala. Sellega tagatakse esmane stabiilsus ja hoitakse ära Ediacara liivakivides oleva põhjavee tungimine tunnelisse. Murenemiskoorikus edenedes võib vastavalt tingimustele muuta külmutamisvõrgu paigutust, et mitte külmutada üleliigselt (Joonis 35). Väga stabiilsete tingimuste juures võib juba külmutamise ära jätta, sest massiv ei ole enam varisemis ohtlik ning väikeste tsüklitega läbindamisel saame toestiku kiiresti paigaldada.



Joonis 35 . Külmutamisvõrgu skeemid murenemiskoorikus.

Külmutamisele järgneb pritsbetooni paigaldamine. Murenemiskooriku ülemises tuleb toetada nagu Ediacara liivakivides. Tuleb kasutada kahe pritsbetooni kihi vahel täiendavalt vettpidavat geomembraani (Joonis 33). Stabiilsemate tingimuste juures kus põhjavett enam ei esine võime geomembraani kasutamise ära jätta ja kasutada ainult vettpidavat teraskiududega pritsbetooni. Lisaks pritsbetoonile lisatakse toestamiseks ka ankrud, et saavutada piisavalt turvaline töökeskkond betooni tugevnemise ajaks. Ankrud mängivad olulist rolli ka lõpliku toestiku stabiilsuses.

Pritsbetoonile järgneb tri-armatuuri paigaldamine mis annab toestikule lõpliku tugevuse. Tri-armatuur kaetakse tulekindla pritsbetoonikihiga, et kaitsta toestiku elemente tulekahjukorral.

3.5 Läbindustööde parameetrid aluskorras

Läbindamine

Raudteetunneli läbindamine aluskorras toimub 1,92 km ulatuses. Aluskorras on suure survetugevuse tõttu valiktööorgan kombainiga läbindamine raskendatud. Sellises olukorras soovib autor kasutada aluskorras puur-lõhketöid, et vältida liigset ressursikulu. Antud töö kontekstis tehakse aga arvutused valik tööorganiga kombaini kohta. Läbindamismahud aluskorras kahe raudteetunneli ja ühe hooldustunneli läbindamisel on välja toodud Tabelis 8.

Läbindamiseks kuluvat aega saab ligikaudselt prognoosida valemiga 1.

$$ICR = 444,35 * 150^{-0,8377} = 6,7m^3/h \quad (1)$$

Tabel 8. Läbindamismahud aluskorras

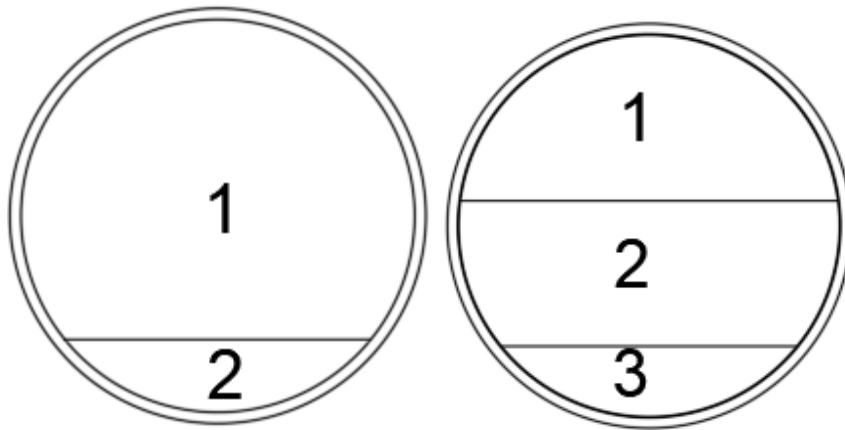
Aluskord	Kogus	Pindala (m ²)	Pikkus (m)	Läbindamismaht (m ³)
Raudteetunnel	2	50.24	1920	192922
Hooldustunnel	1	28.26	1920	54259
			Kokku	247181

Suure survetugevuse tõttu kuluvad kombaini lõikehambad kiiresti. Ligikaudselt saab arvutada välja lõikehammade kulumise kasutades valemeid 2 ja 3.

$$RCI = \frac{150}{135*300*1.1} = 0,037037037 \quad (2)$$

$$BCI = 897,06 * (0,000206)^2 + 6.1769 * 0,000206 = 0,28151 \quad (3)$$

Läbindamiseks on aluskorras kaks võimaliku lahendust. Esimene oleks kombainiga laus-väljamine. Laus-väljamine on aga raskendatud, sest suure ristlabilõike tõttu ei ole masin võimeline kõrgelt tööd tegema. Aluskorra kivimite suur survetugevus on masina lõikeorgani jaoks maksimaalse kõrguse juures liiga suur mille tõttu pole raimamine antud survetugevuse juures võimalik. Teine võimalus on läbindamine astmelise eega. Astmelise ee korral on ristlabilõige väiksem ning kombain saab töötada normaal tingimustes(Joonis 36).



Joonis 36 . Võimalikud variandid läbindamiseks aluskorras.

Toestamine

Toestamine aluskorras on väga lihtne, sest kogu läbindamine toimub monoliitses masiivis mis on väga stabiilne. Kõige keerukamateks kohtadeks võivad osutuda rikked mille korral tuleb toestamine täpsemalt läbi planeerida. Rikete korral aluskorras on võimalik kasutada täiendavalt rikete toestamiseks terasvõrku mis ankrute abil rikke stabiliseerivad (Joonis 37) (Hjálmarsson, 2011).



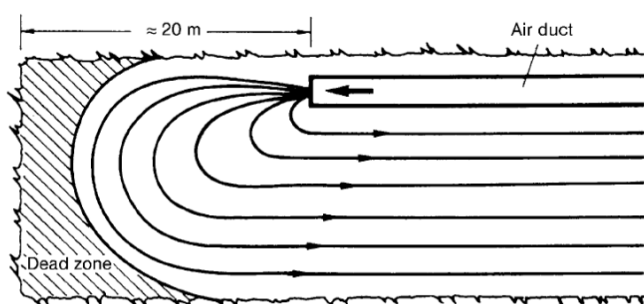
Joonis 37 . Rikke korral kasutatakse terasvõrku koos ankrutega (Hjálmarsson, 2011).

Üldine toestamine aluskorras toimub kahekihilise pritsbetooniga mille tugevdamiseks lisatakse ankrud. Täiendavate ohutusnõuete täitmiseks on soovitatav kasutada ka tri-armatuuri mis tagab stabiilse toestiku.

3.6 Ventilatsioon läbindustööde ajal

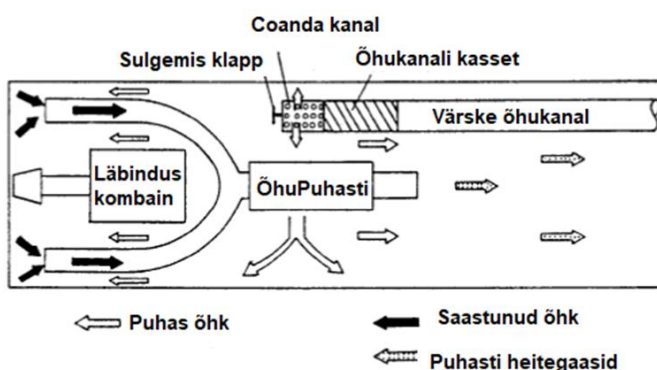
Ventilatsioon läbindamise ajal on äärmiselt oluline, et tagada inimeste töökohtadesse hästi ventileeritud õhk. Selleks, et vähendada ohtlike gaaside ja tolmu sisaldust õhus tuleb luua hästi toimiv ventilatsioon, et vältida inimestele tekkivaid täiendavaid terviseriske (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Ventilatsiooni rajamiseks läbindamise ajaks on mitmeid erinevaid võimalusi kuid siin keskendume üle-rõhul toimivale ventilatsioonile (Joonis 38.). Üle-rõhul toimiva ventilatsiooni eesmärk on läbi õhukanali tuua tunnelis töötavatele inimestele puhas õhk. Saastunud õhk liigub mööda tunnelit välja. Värskeõhukanal peab olema toodud võimalikult töö ee lähedale, et vältida surnud tsooni tekkimist. Surnud tsooniks nimetatakse ala kus õhk ei liigu ja kuhu kogunevad ohtlikud gaasid.



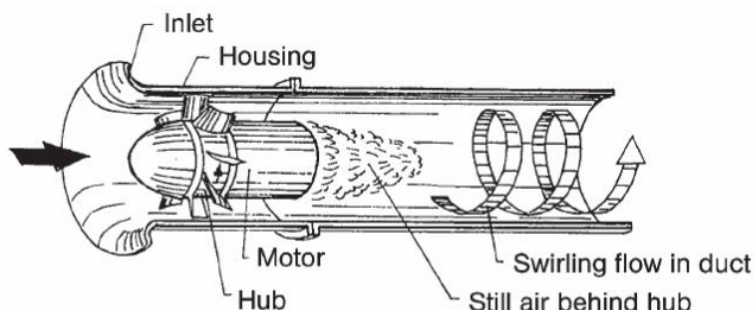
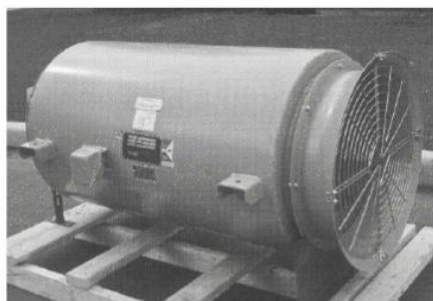
Joonis 38. Tunneli ventilatsiooni skeem (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Tunnelist väljuva saastunud õhu puhastamiseks on soovitatav kasutada vahetult õhukanali kõrval õhupuhastit (Joonis 39.). Õhupuhasti eesmärk on ära hoida liigne saastunud õhu liikumine mööda tunnelit, ning vähendada töötavate inimeste viibimist saastunud õhukäes. Kui õhupuhastit otsustatakse mitte kasutada tuleb tunneli õhu kvaliteeti pidevalt kontrollida, et vältida liiga kõrgeid ohtlike ainete kontsentratsioone õhus. (Maidl, Thewes, Maidl, 2013) Kõrgete kontsentratsioonide tekkimisel tuleb töö tunnelis peatada ja kasutusele võtta täiendavad meetmed tunneli ventileerimiseks ja töötajate ohutuse tagamiseks.



Joonis 39. Õhupuhasti ja ventilatsiooni paiknemis skeem (Maidl, Thewes, Maidl, 2013).

Et tagada õhuliikumine õhukanalis on vaja kasutada ventilaatoreid. Ventilaatorite (Joonis 40) valikul tuleb arvestada vaja minevat värskõhu hulka ja õhukanalite kogu pikkust. Õigesti valitud ventilaatoritele on hästi toimiva ventilatsiooni juures väga oluline roll. Halvalt valitud ventilaatorite tagajärjel võivad töökohtade juures tekkida liiga kõrged saasteainete kontsentratsioonid ja töötajatele võivad tekkida tervisekahjustused (Lexis, 1983).



Joonis 40 . Võimalikud ventilaatorite valikud (Lexis, 1983)

3.7Aja- ja ressursikulu

Tunneli rajamisel on oluline teada ligikaudselt, kui palju tunnel maksma läheb ning kaua kulub tunneli rajamiseks aega. Tunneli rajamiseks kuluva aja ja ressursikulu esialgseks hindamiseks on vaja teada järgnevaid aspekte:

- Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused
- Hüdrooloogilised tingimused
- Geoloogiliste tingimuste vaheldumine
- Tunneli ristlääbilõige
- Tunneli pikkus
- Tunneli kalle
- Tunneli sügavus
- Planeerimise ja eelprojekteerimise kvaliteet
- Ehitustööde kvaliteet

Tunneli läbindamiseks kuluva aja arvutamiseks oleks vaja viia täiendavaid uuringuid, kuid läbindamiseks kuluva aja valiktööorgan kombiniga saab välja arvutada ligikaudselt läbindamiskiiruse järgi. Tabelis 9 on välja toodud läbindamiseks kuluv aeg päevades kui tööd tehakse kolmes vahetuses 24/7.

Tabel 9 .Tunneli läbindamiseks kuluv aeg.

Kiht	ICR (m ³ /h)	Läbindamismahud(m ³)	Läbindamise aeg(päevades)
Aluskord	6,7	186787	1165
Murenemiskoorik	9,4	394004	1750
Ediacara liivakivid	36,1	626516	723
Sinisavi	139.1	416380	125
Tiskre	36.1	226674	261
		Kokku	4024 (11. a)

Tunneli maksumuse ligikaudseks hindamiseks võib kasutada Anttikoski poolt väljatöötatud (Anttikoski, 2007) ligikaudset hinda ühe kilomeetri kohta. Autor toob välja ligikaudse hinna kõvades kivimites rajavate tunnelite kohta ja kihilistes kivimites rajatvate tunnelite kohta. Kihilistes kivimites kulub tunneli rajamiseks 65 miljonit eurot kilomeetrikahta ja kõvades kivimites 25 miljonit kilomeetri kohta.

Tunneli ligikaudne maksumus tuleks 3479 miljonit eurot (Tabel 10) ning läbindamiseks kuluks ligikaudu 5 aastat. Ajakulu tuleb märkimisväärselt pikem sest antud 11 aasta sisse ei ole arvestatud muid töid peale läbindamise. Kuna tegu on konventsionaalse meetodiga siis võib 20 kilomeetrise tunneli läbindamine aega võtta isegi kuni 20 aastat ehk ligikaudu 2 korda kauem.

Tabel 10 . Tunneli ligikaudne maksumus

Tunnel	Pikkus (km)	Hind (mil/km)	Tunnelite arv	Maksumus
Kihilistes kivimites	17.1	65	3	3334.5
Aluskorras	1.92	25	3	144
			Kokku	3478.5

4. Ohutus ja võimalikud riskid tunneli läbindamisel

Tunneli rajamise perioodil tuleb tagada ohutu töökeskkond, mis kindlustab inimeste turvalisuse. Kaevandamise käigus võimalike ohtude tekke kõrvaldamiseks või minimeerimiseks tuleb rakendada erinevaid kontroll- ja ennetusmeetmeid. Antud peatükk keskendub tunneli ehitamise käigus tekkivatele ohtudele ning nende võimalikele ennetamismeetmetele.

4.1 Ohutus läbindamisel

Läbindamisel on võimalikud ohud ja riskid järgmised (SWA, 2013):

- läbindamise käigus tekkinud kildudega pihta saamine;
- kõrgustes töötamine;
- töötaja piiratud nähtavusväli;
- töötajate vaheline piiratud/segatud suhtlus kõrge mürataseme tõttu;
- tulekahju, mis võib tekkida tuleohtlikest vedelikest ja materjalidest;
- kõrgsurve all olevad vedelikud või gaasid, mis võivad plahvatada;
- kõrge müratase
- kuumus (nt põletushaavad lokaliseeritud soojusallikatest);
- õhusaaste kaevetolmust või heitgaasidest;
- laserkiirgus.

Ülaltoodud võimalike riskide ja ohtude ennetamiseks võib välja tuua järgmised lahendused:

- tuleb kasutusele võtta masinate kaugjuhtimine või tuleb tagada masinatel töötavatele inimestele kaitsekabiinid;
- vee kasutamine läbindamisel liigse tolmutekke vastu;
- tuleb kasutusele võtta peeglid ja kaamerad, et tagada parem ülevaade objektist;
- tulekustutusvahendid;
- töötajatele ohutusteemalised koolitused;
- objekt tuleb varustada piisavalt hea valgustuse, ventilatsiooni ning kommunikatsioonivahenditega;
- kõrge ohutusemaga piirkondades tuleb kehtestada keeluala;
- tuleb tagada masinate korrapärane hooldus;
- objektile tuleb tagada tõhus liikluskorraldus;
- masinate automaatne väljalülitamine tuleohtlikus keskkonnas;
- tuleb vähendada tuleohtlike materjalide ladustamist.

Üldiselt tuleb rakendada täiendavaid ohutus meetmeid, et vältida ohuolukordade tekkimist.

4.2 Ventilatsioon

Töökoht peab olema ventileeritud, et vähendada töötajate terviseriske ning tagada ohutu töökeskkond. Kehva ventilatsiooni tagajärjel puutub inimene kokku ülemäärase kuumuse, vähenenud hapnikutaseme, väsimuse ning erinevate ainete aurudega, mis võivad põhjustada

teadvusetust, pikaajalisi terviseprobleeme või isegi surma. Inimeste minimaalne õhukogus peaks olema 1,5 m³ puhast õhku minutis ühe töötaja kohta (SWA, 2013).

Mehaaniline ventilatsioon on üks võimalus, kuidas tagada töötajatele ohutu ja hapnikurikas töökeskkond. Mehaaniline ventilatsioon tagab, et kahjulikud saasteained hajuksid piisava õhuvoolu toimel tööpiirkondadest eemale ning soojas või niiskes keskkonnas töötavad inimesed saaksid piisavalt jahutust (SWA, 2013).

Ventilatsioonisüsteemi puhul tuleb silmas pidada järgmisi nõudeid (Rebane, 2017):

- Kaeveõõne kasutamisel peab olema tagatud piisav tuulutus. Inimeste viibimine kaeveõõnes on keelatud, kui selle õhus on hapniku sisaldus alla 20% või kahjulike gaaside või tolmu sisaldus suurem, kui on sätestatud Vabariigi Valitsuse 18. septembri 2001. a määruses nr 293 «Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid».
- Tupikkaeveõõne tuulutamiseks paigaldatakse ventilaatorid selle suudmest vähemalt 10 m kaugusele värskes õhuga kaeveõõnesse, kusjuures tupikkaeveõõne tuulutamiseks ei tohi kulutada üle 70 % ventilaatorseadmete asukohta läbivast õhuhulgast
- Tuulutussüsteemi peab tulekahju korral olema võimalik seisata ja sulgeda. Tuulutussüsteemi toimimist tuleb pidevalt jälgida ja selle tõrgetest tuleb allmaakaeveõõnes viibivaid isikuid teavitada.
- Tunneli läbindamisel peab olema korraldatud õhuproovide võtmine, õhu analüüsimine ja määratud kaevanduse tuulutuse eest vastutav isik.
- Tunneli läbindamisel tuleb kasutada selliseid mootoreid, mille heitgaaside lämmastikoksiidide, süsinikmonooksiidi ja tahma sisaldus on võimalikult madal. Kütusevävliksisaldus peab olema võimalikult madal.
- Õhujugasid võib tunnelis reguleerida vaid vastutava spetsialisti või tema poolt selleks volitatud isiku loal. Tuulutussurfi ventilaatorseadet võib seisata või töörežiimi muuta vastutava spetsialisti või tema poolt selleks volitatud isiku loal.

Kokkuvõte

Tallinn-Helsingi tunneli Eesti-poolse portaali läbindamise üheks võimalikuks lahenduseks on läbindamine valiktööorgan kombainiga. Antud töös loodi esmased läbindustööde parameetrid kõikide läbindavate kihtide jaoks ning iga kihi kohta loodi esmane tehnoloogia läbindamiseks ja toestamiseks. Lisaks tehnoloogiale, arutati välja ligikaudne aja- ja ressursikulu Eesti-poolse tunneliportaali läbindamiseks.

Tiskre liivakivide läbindustööde parameetrite väljatöötamisel leiti, et esmase toestiku tagamiseks on tunneli parameetri täielik külmutamine hädavajalik. Selle tingib Ordoviitsiumi-Kambriumi veekiht, mis muudab mäenduslikud tingimused ebastabiilseks.

Sinisavis läbindamisel on mäenduslikud tingimused rahuldavad, kuid sellegipoolest tunneli rajamiseks soodsad. Suurimaks probleemiks on potentsiaalselt savi kleepuvus, mis võib aeglustada oluliselt materjali väljavedu.

Suurimaks väljakutseks Eesti-poolse tunneliportaali läbindamisel on Ediacara kompleks, mis oma kihilisuse, abrasiivsuse ja Kambriumi-Vendi veekihi tõttu osutub väga väljakutsuvaks. Toestamise ja ohutuse tagamiseks on läbindamisel vajalik tunneli täielik külmutamine, mis loob esmase kivimite stabiilsuse ja ohutud tingimused läbindamiseks. Kuna veekiht on survealine, on oluline rajada hüdroisolatsioon, mis takistaks vee tungimist tunnelisse.

Murenemiskoorikus on mäenduslikud tingimused muutuvad ja kivimite survetugevus muutub väga suures vahemikus. Survetugevuse muutumine murenemiskoorikus nõuab läbindamisel pidevat tingimuste hindamist, et vältida ohtlike olukordade tekkimist.

Aluskorras on valiktööorgan kombainiga läbindamine raskendatud, sest suur survetugevus võib osutada kombainile liigseks. Selle tulemusena võib läbindamiskiirus muutuda äärmiselt aeglaseks. Selle vältimiseks tuleb läbindada astmelise eega, et kombain saaks töötada oma normaalsetes tööparameetrites.

Töö eesmärk täideti ja esmane tehnoloogia kombainiga läbindamiseks loodi. Tööd saab edasi arendada, näiteks täpsustades erinevaid parameetreid alates külmutamisest ning lõpetades ventilatsiooniga. Töö autoril on soov antud teemat magistriõppes edasi arendada.

Tänuavaldused

Autor soovib tänada töö juhendajat Tõnu Tombergi eduka ja efektiivse juhendamise eest. Sammuti soovib autor tänada kaasaitajaid, Olle Hintsit, Siim Eensood ja Geoloogiafondi. Keelekorrektuuri eest soovib töö autor tänada Gerli Andersoni.

Kasutatud allikad

1. Alvi, K. (2017). Acoustic-seismic survey along the proposed railway tunnel route options, between Helsinki and Tallinn 19.8-1.11.2016. Geological Survey of Finland.
2. Atarfil, (2019). Tunnels. Retrieved from <https://www.atarfil.com/aplicacion/tunnels>
3. Copur, H., Ozdemir, L., & Rostami, J. (1998). Roadheader applications in mining and tunneling industries. PREPRINTS-SOCIETY OF MINING ENGINEERS OF AIME.
4. Egger, K., Mercado, C. H. and Chamorro, G. S. (2004). Santiago's Metro Expands. North American Tunneling Conference, April 17-21, 2004
5. Green, C., Greenwood, W., Partenio, M., (2014) Review of Ground Freezing as a Ground Improvement Technique. The International Information Center for Geotechnical Engineers. Retrieved from <https://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/select-topics-in-ground-improvement/ground-freezing>
6. Hjálmarsson, E. H. (2011). *Tunnel Support. Use of Lattice Girders in Sedimentary Rock* (Doctoral dissertation). University of Iceland
7. Ikavälo, O., Vähäaho, I., Suuroja, S. (2013) Soil and Bedrock Conditions to be Expected in Tallinn-Helsinki Tunnel Construction. Strait Crossing. Bergen
8. International Tunnelling Association, (2009) General report on conventional tunnelling method. ITA
9. Jorimann. (2010). JB-Gitterträger. Walenstadt: Jorimann Stahl-Tunnelbau.
10. Komselis, C., Blayney, N., & Hindle, D. (2005). The use of lattice girders in the construction of tunnels. London, UK: London mining and Mineral Consultants LTD.
11. Koppelmaa, H., (2000). Põhja-Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart. Mõõtkava 1:400 000. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn.
12. Lammer, E., & Gehring, K. (1998). Verbesserung von Schneidwerkzeugen und Schneidsystemen von Teilschnittmaschinen.
13. Lexis, J. (1983). Ventilatoren in der Praxis. Stuttgart: Gentner
14. Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2013). Handbook of tunnel engineering I : Structures and methods. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>
15. Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2014). Handbook of tunnel engineering II : Basics and additional services for design and construction. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>
16. McGonigal, R. (2006) Grades and curves, Railroading's weapons in the battle against gravity and geography. Trains magazine. Retrieved from: <http://trn.trains.com/railroads/abcs-of-railroading/2006/05/grades-and-curves>

17. Müller, L. (1978). Der FelsbauBand III, Tunnelbau. *Stuttgart: Enke.*
18. Palmstöm, A., &Nilsen, B. (2000). Engineering Geology and rock Engineering. Oslo, Norway: NBG.
19. Petersell, V., Puura, V., Koppelmaa, H., Detkovski, S., Kivisilla, J., Keerup, O., Möttus, V., Niin, M., Suuroja, K., (1971). Tallinn–Loksa piirkonna kristalse aluskorra väikesemõõtkavalise süvakaardistamise aruanne (vene keeles). Tallinn, EGF 3163.
20. Põhjaveekomisjon, (2004). Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse. Tallinn
21. Rebane, K. (2018). Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. (Bakalaureusetöö) Tallinna Tehnikaülikool
22. Safe Work Australia, (2013). Guidefor tunnelling work. Retrievedfrom<https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/guide-tunnelling.pdf>
23. Sandvik Mining and Rock Technology. (2019). Sandvik MT720 Crawler-MountedBoomType Roadheader. Retrievedfrom: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/mechanical-cutting-equipment/roadheaders-for-tunneling/mt720-roadheader-for-tunneling/>
24. Shuttleworth, P. (2001, October). Fireprotection of concrete tunnel linings. In Proc. 3rd Int. Conf. on Tunnel Fires and EscapeFromTunnels, Washington DC, USA (pp. 9-11).
25. Suuroja, K., All T., Kaljuläte, K., Kõiv, M., Morgen, E., Vahtra, T.,(2003). Baaskaardi Tallinna (6334) ja Rohuneeme (7312) lehe geoloogilis-geofüüsikalise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine aruanne. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn
26. Talpas, A., Väling, P., Kask, J., Mardla, A., Sakson, M. (1994). Balti mere šelfiala geoloogiline kaardistamine mõõtkavas 1:200 000 (vene keeles). Aruanne. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn, EGF 4860.
27. Vakulenko, I. (2018). Feasibility of groundfreezing as potential stabilizing measure for tunnelling through soil filled depression at Bergåsen road tunnel. *Master Thesis*. Norwegian University of Science and Technology
28. Špačková, O. (2012). Risk management of tunnel construction projects. (DoctoralThesis) Czech technical university in Prague
29. Anttikoski, U. (2007) Fixed transport connections across the Baltic from Finland to Sweden and Estonia. Finland
30. Sweco Projekt AS, Vealeidja OÜ, Finantsakadeemia OÜ, (2015) Helsingi-Tallinna püsiühenduse tasuvuse eeluring lõpparuanne.

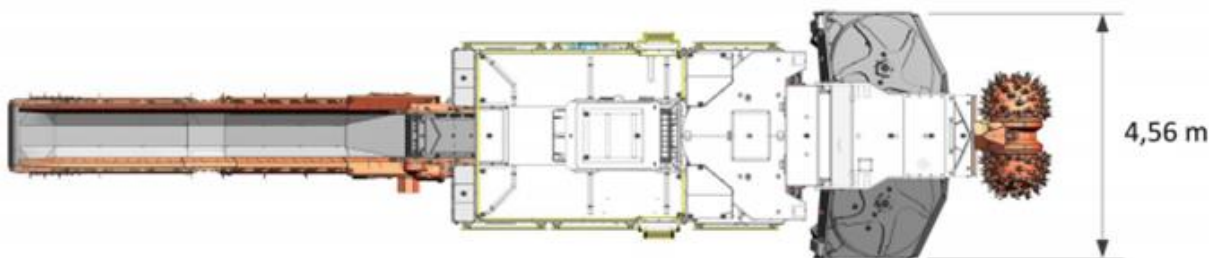
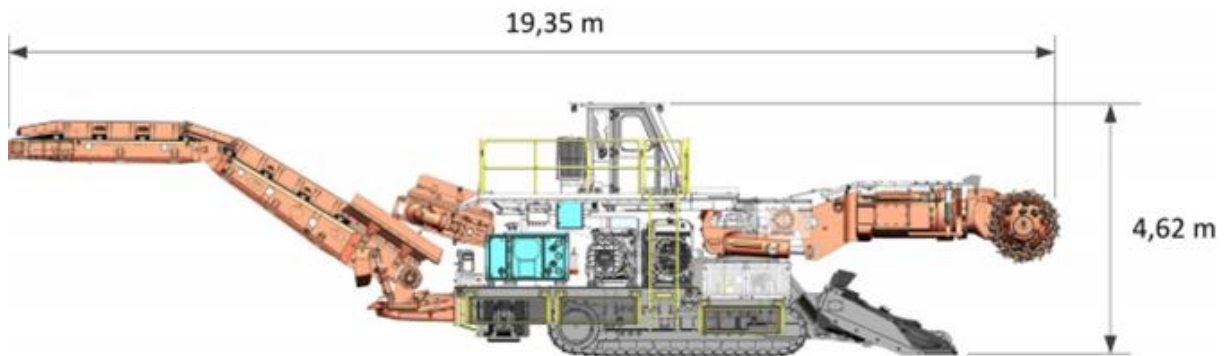
LISAD

LISA 1 Sandvik MT720 tehnilised parameetrid (Sandvik, 2019)



- ① Cutter head designed for a wide range of hard rock conditions
- ② Cutter gearbox for low cutting speed and high torque (ICUTROC®)
- ③ Telescopic cutter boom with strong 300 kW E-Motor
- ④ Water spray system to elongate tool life-time and reduce dust
- ⑤ Turret with rack and pinion system for constant slewing speeds
- ⑥ Loading table for improved material flow
- ⑦ Double chain conveyor for material transfer
- ⑧ Crawler tracks provide the required flexibility
- ⑨ Frame with rear stabilizer with robust design to withstand all high cutting forces
- ⑩ Electrical equipment
- ⑪ Operator's cabin with optional air condition for safe and convenient working conditions
- ⑫ Hydraulic system with three circuits and load sensing technology
- ⑬ Automatic lubrication system of most critical lubrications points to reduce service efforts
- ⑭ Slewing belt conveyor provides flexible loading on haulage equipment

Machine model	MT720
Total weight +/- 5 (t)	130
Machine ground pressure (MPa)	0.25
Overall length (m)	19.35
Height (m)	4.62
Loading table width (m)	4.56
Cutter boom telescope (mm)	650
Cutting height, max. (m)	6.6
Cutting width, max. (m)	9.1
Undercut - extended telescope (mm)	480
Cutter - retracted telescope (mm)	230
Cutting speed, 50 Hz (m/sec)	1.4
Navigable gradient, incline/decline (°)	±18
Capacity of conveyor, max. (m³/h)	400
Electric supply voltage (V)	1000/1140
Cutter motor (kW)	300
Tramming speed (m/min)	0-18
Total installed power (kW)	522



LISA 2 Kivimite füüsikalis-mehaanilised omadused (Rebane, 2017)

Füüsikalis-mehaanilised omadused, kus: 1-mahukaal; 2-survetugevus; 3-poorsus; 4-P-lainete kiirus s; 5-kihi paksus. (Rebane 2017)

		1	2	3	4	5
		G/cm ³	MPa	%	m/s	m
Proterosoikumigneiss	A	2,65-2,75	110-240	0,1-0,2	6000-6300	
Rabakivigraniit	B	2,65	100-200	0,1	6000-6500	
Murenenud kristalliinne aluskord	C	2,0-2,6	1-100	1-20	2000-5000	1-20
Liivakivi	D	2,0-2,3	1-25	10-20	2000-3000	60
Aleuoliit	E	2,25-2,35	5-25	10-15	2500-3500	1-2
Liivakivi	F	2,1-2,2	1-5 MPa	20-25	2500-3000	15
Sinisavi	G	2,3-2,4	2-4 MPa	8-10	2000-2500	45
Liivakivi	H	2,1-2,8	1-40	1-20	2500-3500	3-8
Glaukoniitliivakivi	I	1,95-2,1	1-20	1-10	2500-3000	2
Graptoliit-argilliit	J	1,9-2,0	40-50	1-10	3500-4000	3,5
Lubjakivi	K	2,55-2,65	100-150	0,1-5,5	4000-5500	20
Kvaternaari setted	L	1,5-2,2	<1	10-30	1500-2000	0-60

A- Jägala kompleksi kivimid; B- Naissaare ja Neeme rabakivigraniit; C- murenenud kristalliinsed kivimid; D- Ediacara liivakivid; E- Ediacara aleuoliit; F- Kambriumi kvartslivakivid (Tiskre kihistu); G- Lontova sinisavi; H- Ordoviitsiumi liivakivid (Kallase ja Ülgase kihistu); I- Ordoviitsiumi glaukoniitliivakivid (Leetse kihistu); J- Ordoviitsiumi graptoliit-argilliit (Türisalu kihistu); K- Ordoviitsiumi lubjakivid; L- Kvaternaari setted.

Lisa 3. Puuraugu M17 andmed (Talpas jt, 1994)

Puurauk: M17 Aegna

Korrastatud ID	2049
Asukoht	x: 6605103; y: 542324; Vt kaardil Geoloogia rakenduses Maavarade rakenduses
Suudme abs. kõrgus	9
Sügavus	144.2
Fond	EGF 4860
Asukohatäpsus	Asukoht geoloogilise baaskaardi järgi
PZ_Z	-22,4
QP	31,4
PZ_D	101,6
PC_Z	-124
AP avamus	Ca1ln
Q_G avamus	NA
Q_L avamus	NA
Tüüp	PAAK
Läbitud	1988
Kastide arv	9
Märkused	Teistel andmetel on koordinaadid X 6605120, Y 542448
Rajamise otstarve	Kaard
Strat. algus	Ca1ln
Strat. lõpp	PR1
GB_id	7312AK_0003
geokogud.info ID	36
Kirje sisestatud	Maa-amet 2010-03-04 11:58:24
Kirje muudetud	Maa-Amet 2015-06-12 15:50:33

Geoloogiline kirjeldus, 4 rida:

indeks	Z (abs)	Z suudmest	D	Geoloogiline kirjeldus	Autor	Kirjeldamise aeg	Kirje muudatus
Q	9	0	31.4	-	Jalakas, I.	1993	Maa-amet 2010-03-04 11:58:25
Ca1ln	-22.4	31.4	43.6	-	Jalakas, I.	1993	Maa-amet 2010-03-04 11:58:25
V2kr	-66	75	58	-	Jalakas, I.	1993	Maa-amet 2010-03-04 11:58:25
PP	-124	133	-11.2	-	Niin, M.	1993	Maa-amet 2010-03-04 11:58:25

Lisa 4. Puuraugu F127 andmed (Petersell jt, 1971)

Puurauk: F127 Merivälja

Korrastatud ID	1728
Asukoht	x: 6596651; y: 547434; Vt kaardil Geoloogia rakenduses Maavarade rakenduses
Suudme abs. kõrgus	15
Sügavus	221.2
Fond	EGF 3163
Asukohatäpsus	Teisendatud Pulkovo 42 koordinaatidest
PZ_Z	6,4
QP	8,6
PZ_D	149,9
PC_Z	-143,5
AP avamus	Ca1ts
Südamiku lõpu indeks	PR1
Q_G avamus	NA
Q_L avamus	NA
Tüüp	PAAK
Läbitud	1971
Kastide arv	5
Rajamise otstarve	Süva
Strat. algus	PR1
Strat. lõpp	PR1
GB_id	6334AK_0009
geokogud.info ID	686
Kirje sisestatud	Maa-amet 2010-02-22 11:27:08
Kirje muudetud	Maa-amet 2015-06-12 15:50:31

Geoloogiline kirjeldus, 7 rida:

indeks	Z (abs)	Z suudmest	D	Geoloogiline kirjeldus	Autor	Kirjeldamise aeg	Litoloogia	Kirje muudatus
Q	15	0	8.6		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26
Ca1ts	6.4	8.6	7.4		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26
Ca1lk	-1	16	17		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26
Ca1lnM-K	-18	33	41.1		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26
Ca1lnS	-59.1	74.1	27.3		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26
V2kr	-86.4	101.4	57.1		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26
PP	-143.5	158.5	-62.7		NA	1971	NA	Maa-Amet 2014-05-09 09:33:26

Lisa 5. Puuraugu F126 andmed (Petersell jt, 1971)

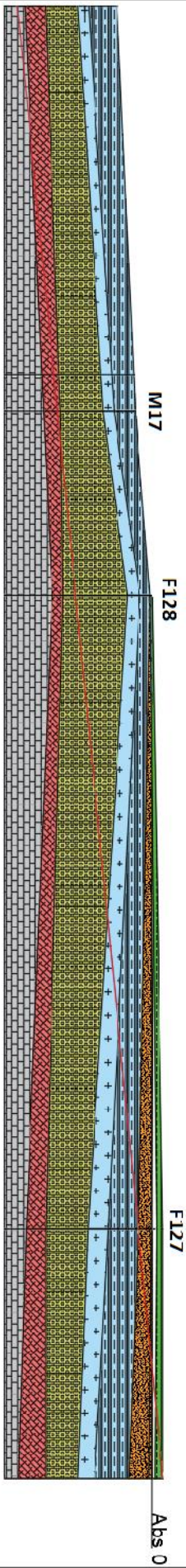
Puurauk: F 126 Rohuneeme

Korrastatud ID	1745
Asukoht	x: 6603467; y: 544900; Vt kaardil Geoloogia rakenduses Maavarade rakenduses
Suudme abs. kõrgus	0.5
Sügavus	190.2
Fond	EGF 3163
Asukohatäpsus	Asukoht geoloogilise baaskaardi järgi
PZ_Z	-2.6
QP	3.1
PZ_D	117.9
PC_Z	-120.5
AP avamus	Ca1ln
Q_G avamus	NA
Südamiku lõpu indeks	PR1
Q_L avamus	NA
Tüüp	PAAK
Kastide arv	8
Rajamise otstarve	Süvakaard
Strat. algus	Ca1ln
Strat. lõpp	PR1
GB_id	7312AK_0002
geokogud.info ID	1011
Kirje sisestatud	Maa-amet 2010-03-04 11:58:24
Kirje muudetud	Maa-Amet 2015-06-12 15:50:33


Geoloogiline kirjeldus, 4 rida:

indeks	Z (abs)	Z suudmest	D	Geoloogiline kirjeldus	Autor	Kirjeldamise aeg	Kirje muudatus
Q	0.5	0	3.1	-	Suuroja, K.	1971	Maa-amet 2010-03-04 11:58:24
Ca1ln	-2.6	3.1	30.5	-	Suuroja, K.	1971	Maa-amet 2010-03-04 11:58:24
V2kr	-33.1	33.6	87.4	-	Suuroja, K.	1971	Maa-amet 2010-03-04 11:58:24
PP	-120.5	121	-69.2	-	Koppelmaa, H.	1971	Maa-amet 2010-03-04 11:58:24

Lisa 6. Tunneli trassi Geoloogiline läbilõige



- Märkused:
1. Kasutatud tarkvara: Autodesk AutoCAD 2018 (litsents: TTÜ Education Stand-alone)

Magistritöö teema	Joonise sisu
Tallinn-Helsingi tunneli Eesti poolse portaali kombinärlahendamise tehnoloogia	Planeeritava tunnelitrassi geoloogiline läbilõige
 Tallinna Tehnikakõrgkooli Geoloogia Instituut Ehilajale lae 5, 10086 Tallinn Tel 620 3010	
Tudengi: Aleks Strazdin, YAEB 155444	Joonise nr 1
Juhendaja: Tõnu Tomberg MSc	Kuupäev: 15.05.2019