



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Loodusteaduskond
Geoloogia instituut

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Kaarel Rebane

Juhendaja: Tõnu Tomberg, TTÜ, MSc

Õppekava: AAGB 02/09

Tallinn 2018

Tallinn-Helsingi tunneli suur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

Kaarel Rebane

.....

(allkiri ja kuupäev)

Juhendaja: *Tõnu Tomberg*

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

.....

(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

Geoloogia instituudi lõputöö ülesanne

Tallinna Tehnikaülikool

Geoloogia instituut

Lõputöö ülesanne

| | | | |
|------------|-----------------|----------------------|------------|
| Töö ID | | Õppekava | AAGB02/09 |
| Üliõpilane | Kaarel Rebane | Matrikli nr. | 155950AAGB |
| Töö liik | Bakalaureusetöö | Õppeaine kood | LG40LT |
| Juhendaja | Tõnu Tomberg | Ülesanne kehtib kuni | |

| | |
|---------------------|---|
| Töö ülesanne | Tallinn-Helsinki tunneli puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides |
| Topic of the Thesis | Elaboration of parameters for blasting in development of Tallinn-Helsinki tunnel in Ediacara sandstone |

| | |
|----------------------|--|
| Töö sisu põhipunktid | <ol style="list-style-type: none">1. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused2. Tunneli trassi ja konfiguratsiooni valik3. Läbindusmahud4. Läbindamistehnoloogia valik5. Puur- lõhketööde meetodi valik ja parameetrite arvutus6. Ohutus ja keskkonnakaitse7. Järeldused |
|----------------------|--|

| | |
|--------------------------------------|--|
| Seotud teadusteema ja/või sihtasutus | |
|--------------------------------------|--|

Tähtajad:

Eelkaitsmine: 01.06.2018 Kaitsmine: 08.06.2018

Üliõpilane _____
Juhendaja _____
Konsultant _____

nimi allkiri kuupäev

Ülesanne kinnitatud _____
Ülesanne täpsustatud _____
Ülesanne pikendatud _____

Abstract

Tallinn and Helsinki constitute a business environment of nearly 1.5 million inhabitants, which is closely linked to the movement of goods and passengers between the two countries. Estimated increase of inhabitants in both cities only adds to the volume of passengers and freight traffic [9]. The proposed Tallinn-Helsinki tunnel is an underground link between the two capitals, which unlike ship and air traffic is not dependent on weather.

Fixed connection between Tallinn and Helsinki must be linked to important public transport nodes of both countries. Travel time between the two cities should be within 30 minutes. The tunnel configuration takes into account the speed of the high-speed train (250 km/h).

The objective of this Bachelor's thesis is to choose the best available technology for the Tallinn-Helsinki tunnel, based on available geological data and, depending on this, also select the tunnel configuration.

This Bachelor's thesis is directed to designing drilling and blasting parameters on the Estonian geological cross section of the tunnel.

Drilling and blasting parameters of Estonian geological cross section are evaluated in two baccalaureate collaborations. In addition to this work, which assesses the parameters of drilling and blasting works through the water-saturated Ediacara sandstone, Kristo Martin Vinni examines the possibilities of tunneling through Lontova deposit blue clay and granite crystalline base.

Sissejuhatus

Tallinn ja Helsingi moodustavad kahe riigi vahel toimuvale tihedale kauba- ja reisijate liikumisele ligi 1,5 miljoni elanikuga majanduskeskkonna. Mõlema linna prognoositud elanike arvu kasv [9] suurendab oluliselt reisijate- ja kaubaveo mahtu. Tallinn-Helsingi tunnel on kahe riigi pealinna vahele loodav maa- ja merealune ühendus, mille toimine erinevalt laeva- ja lennuliiklusest ei sõltu ilmastikutingimustest.

Tallinn-Helsingi püsiühendus peab ühilduma mõlema riigi oluliste ühistranspordisõlmedega. Sõiduahelates kuluv sõiduaeg kahe linna vahel jääks 30 minuti raamesse. Tunneli konfiguratsioonis arvestatakse kiirrongi (250 km/h) liikumiskiirusega.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on valida Tallinn-Helsingi tunneli läbindamiseks parim võimalik tehnoloogia, tuginedes olemasolevatele geoloogilistele andmetele ning lähtuvalt sellest valida ka tunneli konfiguratsioon.

Bakalaureusetöö on suunatud puur-lõhketööde eelprojekteerimisele Tallinn-Helsingi tunneli Eesti poolse otsa läbindamisele kaldosas.

Tunneli Eesti poolse geoloogilise läbilõike puur-lõhketööde parameetrid hinnatakse kahe bakalaureusetöö koostöona. Lisaks käesolevale tööle, kus hinnatakse puur-lõhketööde parameetreid läbindamisel veega küllastunud Ediacara liivakividest, uurib Lontova ladestu sinisavi ja graniitse kristalse aluskorra läbindamise võimalusi Kristo Martin Vinni bakalaureusetöö.

Sisukord

| | |
|--|----|
| Geoloogia instituudi lõputöö ülesanne | 3 |
| Abstract | 4 |
| Sissejuhatus | 5 |
| Sisukord..... | 6 |
| 1 Geoloogiline iseloomustus | 10 |
| 1.1 Kvaternaari setted..... | 10 |
| 1.2 Settekivimiline pealiskord..... | 10 |
| 1.3 Kristalne aluskord | 12 |
| 1.4 Hüdrogeoloogilised tingimused | 12 |
| 2 Mäenduslikud tingimused | 14 |
| 3 Tunneli trassi valik | 16 |
| 3.1 Tunneli suudme asukoht | 16 |
| 3.2 Tunneli trassi pikkus | 18 |
| 4 Läbindustehnoloogia valik | 20 |
| 4.1 Tunneli läbindamine..... | 20 |
| 4.2 Läbindamine puur-lõhketöödega | 20 |
| 4.3 Läbindamine kilpläbinduskombainiga | 21 |
| 4.4 Läbindamise tehnoloogia valik | 23 |
| 5 Tunneli konfiguratsiooni valik | 24 |
| 5.1 Tunneli liik..... | 24 |
| 5.2 Tunneli konfiguratsiooni variandid..... | 24 |
| 5.3 Variant 1 | 24 |
| 5.4 Variant 2..... | 25 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.5 | Tunneli konfiguratsiooni valik..... | 25 |
| 6 | Puur-lõhketööde tehnoloogia ja parameetrid..... | 26 |
| 6.1 | Kivimite kihi külmutamine | 26 |
| 6.2 | Läbindamine Ediacara liivakivides | 27 |
| 6.3 | Raudteetunneli puur-lõhketööde parameetrid | 29 |
| 6.4 | Hooldustunneli puur-lõhketööde parameetrid..... | 31 |
| 6.5 | Ristläbipääsude puur-lõhketööde parameetrid | 33 |
| 6.6 | Tuulutuslõõri puur-lõhketööde parameetrid | 35 |
| 7 | Läbindamise tehnoloogia..... | 37 |
| 7.1 | Läbindamise mahud | 37 |
| 7.2 | Kasutatavad mäemasinad | 38 |
| 8 | Toestamine ja hüdroisolatsioon..... | 40 |
| 8.1 | Tunneli toestamine Ediacara liivakivides | 40 |
| 9 | Tuulutus..... | 42 |
| 9.1 | Läbindamise ajal | 42 |
| 9.2 | Tunneli ekspluatatsiooni ajal..... | 43 |
| 10 | Ohutus ja keskkonnakaitse..... | 45 |
| 11 | Kokkuvõte..... | 47 |
| 12 | Lisad..... | 48 |
| 12.1 | Lõhketööde arvutamise meetodika..... | 48 |
| 13 | Kasutatud kirjandus | 50 |

TABELID

| | |
|--|----|
| Tabel 1 Läbindatav geoloogiline läbilõige ja arvatud mäerõhud..... | 14 |
| Tabel 2 Füüsikalised-mehaanilised omadused, kus: 1-mahukaal; 2-survetugevus; 3-poorsus; 4-P-lainete kiirus s; 5-kihi paksus..... | 15 |
| Tabel 3 Raudteetunneli puur-lõhketööde parameetrid..... | 29 |
| Tabel 4 Hooldustunneli puur-lõhketööde parameetrid..... | 31 |
| Tabel 5 Ristlääpääsude puur-lõhketööde parameetrid..... | 33 |
| Tabel 6 Tuulutussõõri puur-lõhketööde parameetrid..... | 35 |
| Tabel 7 Läbindamise mahud Ediacara liivakivides..... | 37 |

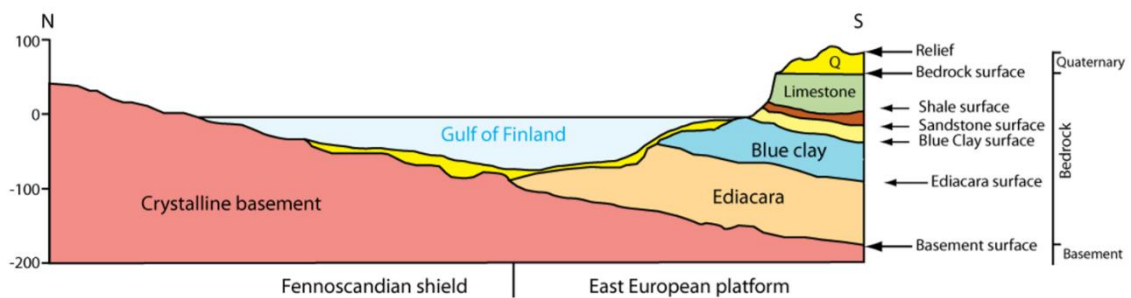
JOONISED

| | |
|---|----|
| Joonis 1 Lihtsustatud geoloogiline läbilõige Soome lahest [8]..... | 10 |
| Joonis 2 Tallinn-Helsingi tunneli võimalikud trassikoridorid..... | 17 |
| Joonis 3 Variandi B1 tunneli trass..... | 18 |
| Joonis 4 FinEst Linki esitlus kavandatavast tunneli trassist (http://www.finestlink.fi/et/2018)..... | 19 |
| Joonis 5 Trassi läbilõige..... | 20 |
| Joonis 6 Läbindamine puur-lõhketöödega (http://www.tunnel-online.info/en/index.html)..... | 21 |
| Joonis 7 Kilplääbinduskombain (www.herrenknecht.com)..... | 22 |
| Joonis 8 Võlvprofiiliga tunneli konfiguratsioon..... | 24 |
| Joonis 9 Ringikujulise läbilõikega tunneli konfiguratsioon..... | 25 |
| Joonis 10 Vedellämmastikuga külmutamise skeem: 1) Sisendi toru 2) Aurustunud lämmastikku ärajuhtiv toru (http://www.metro.ru/library/stroitelstvo_metropolitenov/512/)..... | 27 |
| Joonis 11 Puuraukude sügavused külmutatud Ediacara liivakivides..... | 28 |
| Joonis 12 Raudteetunneli puur-lõhketööde laengute paigutus..... | 30 |
| Joonis 13 Hooldustunneli puur-lõhketööde laengute paigutus..... | 32 |
| Joonis 14 Ristlääpääsude puur-lõhketööde laengute paigutus..... | 34 |
| Joonis 15 Õhukanalite puur-lõhketööde laengute paigutus..... | 36 |
| Joonis 16 Sandvik DD422iE puurvanker (https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/mining-jumbos/dd422ie-development-drill-rig/)..... | 38 |
| Joonis 17 Kääplaadur (https://mining.komatsu/product-details/14bu27)..... | 39 |
| Joonis 18 Pritsbetoon toestustööd (http://www.rmfttraining.co.uk/crossrail-lessons-inform-new-sprayed-concrete-guide/)..... | 41 |
| Joonis 20 Tunneli ventileerimine läbindamisel..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Joonis 21 Paraleelkaeveõõnte läbindamise tuulutusskeem, kus sinisega värske ja punasega kasutatud õhk | 43 |
| Joonis 22 Ventileerimise hajutatud jadaühendus ja epüür..... | 43 |
| Joonis 23 Kolviefekti vähendavad tuulutustõõrid Eurotunnelis..... | 44 |

1 Geoloogiline iseloomustus

Eesti jääb Ida-Euroopa platvormil asuva Vene lava loodepiirile. Aluspõhja ehituses on selgelt eritatavad kaks eriilmelist struktuurset korrust: alumine – tard- ja moondekivimeist koosnev proterosoiline kristalne aluskord ja ülemine – paleosoilistest settekivimeist ja pudedatest kvaternaarisetetest koosnev ning eelmisel monokliinaalselt lasuv pealiskord (Joonis 1)[15].



Joonis 1 Lihtsustatud geoloogiline läbilõige Soome lahest [8]

1.1 Kvaternaari setted

Eesti kuulub jää-aja liustike erosiooni alasse ning seetõttu on kvaternaari kate üsna õhuke [15]. Kvaternaari setted katavad suurt osa vaadeldavast piirkonnast. Pinnakatte paksus varieerub kümnetest sentimeetritest alvaritel kuni 150 m mattunud orgudes ning selle koostis võib olla väga erinev [2]. Pinnakatte moodustavad kasvukiht, aleuriidikas liiv, veeriste ning munakatega moreen, mistõttu on nende füüsikalise-mehaanilised omadused laias ulatuses varieeruvad.

Piirkonna põhjaosas lasuvad pudedad setted kohati ka vahetult aluskorra kivimitel. Näiteks Naissaare puuraugus lasub 123,5 m paksune Kvaternaari setete kompleks vahetult aluskorral. Merepõhjas on setete paksus reegilina 20-60 m ja setteläbilõiked koosnevad erinevatest muda, savi ja viirsavi kihtidest.

1.2 Settekivimiline pealiskord

Neoproterosoilistest ja paleosoilistest kivimeist koosnev settekivimiline pealiskord lasub suure ajalise lünga ja põiksusega kristalsel aluskorral. Pealiskorra paksus suureneb põhja poolsele maismaa-alal 110-120 meetrilt kuni ca 220 meetrini lõunas ja selle struktuurid jälgivad põhiliselt kristalse aluskorra pealispinna reljeefi. Suurema osa settekivimite

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

läbilõikest võtavad enda alla Ediacara ja Kambriumi ladestu nõrgalt kuni keskmiselt tsementeerunud purdkivimid [1].

Ediacara ladestu (Vendi kompleksi) Kotlini lademesse kuuluvad ca 610 Ma purdkivimid (liivakivid, aleuroliidid, savid) lasuvad transgressiivselt, kirdesse түseneva 40-60 m paksuse lasundina aluskorra murenemiskoorikul [1].

Uuritaval alal eristatakse Kotlini lademe piires ainult ühte kihistut. **Kroodi kihistu** koosneb pisi- kuni keskterisest, nõrgalt kuni keskmiselt tsementeerunud kollakashallist liivakivist, milles erinevatel tasemetel esineb kirjuvärvilise 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 [1].

Kambriumi ladestu on esindatud purdkivimitega (liivakivid, aleuroliidid, savid) ja selle paksus on veidi üle 100 m. Ladestus on eristatavad neli erinevat kihistut (alt üles): Lontova, Lükati, Tiskre ja Ülgase. Kolm viimast paljanduvad klindivööndis mitmel pool Suurupi ja Viimsi poolsaare vahelisel alal [1].

Lontova kihistu paksus on 65-80 m ja on vaadeldaval alal settekivimilise pealiskorra түsedamaiks kivimikehaks. Kihistu koosneb rohekashallist kuni kirjuvärvilisest sinisavist. Kihistus on põhiliselt aleuriidi ja liiva sisalduse alusel eristatavad 4 kihistikku (alt üles): **Sämi** (15-20 m vaheldumisi liivakivi ja sinisavi), **Mahu** (umbes 10 m liiva lisandiga sinisavi), **Kestla** (30-40 m puhas argilliidilaadne sinisavi) ja **Tammneeme** (kuni 10 m glaukoniitliiva sisaldav sinisavi). Sinisavilasund on kindlaimaks veepidemeks Põhja-Eestis [1].

Lükati kihistule paksusega 10-16 m, mis moodustab sinisavilasundi ülaosa, on iseloomulik aleuroliidi või pisiterise kvartsliaivakivi vahekihtidega rohekashall aleuriitsavi (60-70 %). Kihistu ülaosas on valdavaks liivakivi, allosas savi. Samuti leidub kihistu ülemisel piiril tavaliselt mõne sentimeetri paksune, fosfaatsetest veeristest basaalkonglomeraadi kiht. [1].

Tiskre kihistu (11-20 m) koosneb suhteliselt ühetaolisest, hele- kuni kollakashallist jämeterisest kvartsaleuroliidist või pisiterisest kvartsliaivakivist (Kakumäe kihistik). Kihistu alaosas on sagedased rohekashalli, glaukoniiti sisaldava savikas aleuroliidi vahekihid (Rannamõisa kihistik). Tiskre liivakivid on oluliseks põhjavett kandvaks kihindiks [1].

Ülgase kihistu paksus on kõigest 1-6 m ja kuulub vanuseliselt Hilis-Kambriumisse. Kihistu on enamjaolt esindatud peen- kuni pisiterise, vähesel määral peent puudulukuliste brahhiopoodide (oobuluste) purdu sisaldava kvartsliaivakiviga [1].

Ordoviitsiumi ladestu avamusega on hõlmatud Põhja-Eesti klindist lõunasse jääv ala. Vaadeldaval alal jääb ladestu paksus 20-30 meetrile [1].

Alam-Ordoviitsiumi ladestiku paksus on 8-12 meetrit ja selle koosseisus oleva kolme lademe (Pakerort, Varangu ja Hunneberg) piires on eristatavd neli kihistut: Kallavere, Türisalu, Varangu ja Leetse. Ladestik paistab silma kivimilise mitmekesisuse poolest: esindatud on nii oobulusliivakivi ehk fosforiit (Kallavere kihistu), diktüoneemakilt ehk graptoliitargilliit (Türisalu kihistu), glaukoniidirikas hallikas bentoniitsavi (Varnagu kihistu) ja glaukoniitliivakivi (Leetse kihistu) [1].

Kesk-Ordoviitsiumi ladestik paksusega 15-20 m hõlmab suure osa klindipealsest alast. Ladestik on esindatud 6 lademe (Billigeni, Volhovi, Kunda, Aseri, Lasnamäe ja Uhaku) karboniitkivimitega mille piires eristub 6 kihistut (alt üles): Toila, Sillaoru, Loobu, Aseri, Vao ja Kõrgekalda. Ladestik on esindatud enamasti halli, nõrgalt savika, pisi- kuni peenkristalsest, detriidikast sageli dolomiidistunud lubjakivist [1].

1.3 Kristalne aluskord

Uuritava piirkonna kristalse aluskorra iseloomustus tugineb mitmete kaardistustööde käigus puuritud, aluskorda avavatele puuraukude ja geofüüsikalistele uuringutele. Vahelduva koostise ja keerulise struktuuriga, sügavalt mattunud moondekivimite kompleks (Jägala kompleks) hõlmab põhilise osa alast, kuid selle loodeossa ulatub ka ulatuslikuma Naissaare rabakivimassiivi lõunaosa [1].

Kristalse aluskorra pealispind lasub alal 100-160 m amp tasemel ja laskub lõuna suunas 2-3 m kilomeetri kohta. Ala lauskurrutatud kristalne aluskord, mis on esindatud migmatiidistunud moondekivimitega (biotiidgneissid, kvarts-päevakivigneisid, alumiiniumirikkaid mineraale sisaldavad vilgugneisid, biotiit-amfiboolgneisid, amfiboliidid), kuulub struktuurselt Jägala kompleksi [1].

Pindmises osas on aluskorra kivimid 1-20 m ulatuses murenenud, moodustades pindmise murenemiskooriku. Selle paksus sõltub nii aluskorra minealsest koostisest (rabakivigraniitide levialal õhem ja vilgugneisside levialal paksem), aga ka nende lõhelisusest [1].

1.4 Hüdrogeoloogilised tingimused

Kvaternaari (pinnakatte) setetes esinevad valdavalt surveta vett sisaldavad ja vahetult meteoroloogilistele mõjuritele alluvad poorsed põhjaveekihid. Pinnakattesse tungib kogu infiltratsioon ja seda läbib suurem osa põhjavee äravoolust. Suuremal osal alast esineb maapinnalt esimene aluspõhjaline veekiht Ordoviitsiumi lõhelistes ja karstunud karbonaatseis kivimeis, kus põhjavee liikumise kiirus on suur lõhedes ja maapinnalähedastes karstiõõnsustes. Lükati-Lontova regionaalne veepide levib kogu alal ja on esindatud eelnimetatud kihistute argilliidilaadsete savidega (sinisavi) ja ülemises ca 5 m läbilõikes kohati aleuroliidiga. See on läbilõike tusedaim (kuni 75 m, vaid abradeeritud klindilahtedes 35–40 m) ja suurima isolatsioonivõimega veepide.

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

Aluskorra lõheded esinev kõrgendatud mineraalsusega vesi on praktiliselt liikumatu [1].

2 Mäenduslikud tingimused

Tunneli ehitusel on Eesti poolsed mäenduslikud tingimused üsna keerulised. Läbindada tuleb mitu erinevate omadustega kihti sealhulgas kogu settekivimite kompleks kuni stabiilsema kritalse aluskorrani, mis tõuseb Eesti poolt Soome (Tabel 1).

Settekivimites läbindamist raskendab abrasiivsete kvartsliidakivide suur ulatus. Umbes poole settekivimite kompleksist moodustab erineva terasuuruse ja keeruliste hüdrogeoloogiliste tingimustega liivakivid. Abrasiivsete kivimite läbindamine jätkub ka aluskorras, kus esinevad kvartsi sisaldavad kivimid [13].

Läbida tuleb suure vee-erituvusega survelisi veekihte, põhiliselt Ediacara liivakivides, kuid ka murenenud kristalliinse aluskorra ülemised 20 m. Seejuures on veega küllastunud Ediacara liivakivid väga ebakorrapärase ehitusega. Leidub nii tsementeerunud liivakivide pesasid kui ka pudedaid veega segunenud alasid. Veekihtide kvaliteetne läbindamine on tähtis, et erinevad veehorisondid oleks peale tunneli rajamist teineteisest isoleeritud ja ei toimiks segunemist erinevate kihtide vahel. Vältida tuleb ka veekihtide reostamist, kuna veekihid on piirkonna ühisveevarustuse allikad.

Karbonaatsed kivimid on suure tõenäosusega kihilised ja lõhelised, mis mõjutavad kaeveõõnte lae püsivust. Graptoliit-argiliidi läbindamisel tuleb arvestada võimaliku radooni eritumisega kivimitest ja selle kogunemisega kaeveõõntes [8].

Tabel 1 Läbindatav geoloogiline läbilõige ja arvatud mäerõhud

| Kiht | Paksus | Mahumass | | Mäerõhk | | |
|------------------------------|--------|-------------------|------|---------|-------|-----------------|
| | 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 | |

Erinevate kivimikihtide paksused tuginevad Viimsi poolsaarel puuritud puuraugule F-127. Tabelis 1 sinisega märgitud kihid on küllastunud survealise põhjaveega, millest lisandub veerõhk. Sellest tulenevalt on kivimikihtide summaarsele mäerõhule kokkuvõttes lisatud 1,7 Mpa.

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

Tabel 2 Füüsikalise-mehaanilised omadused, kus: 1-mahukaal; 2-survetugevus; 3-poorsus; 4-P-lainete kiirus; 5-kihi paksus [2].

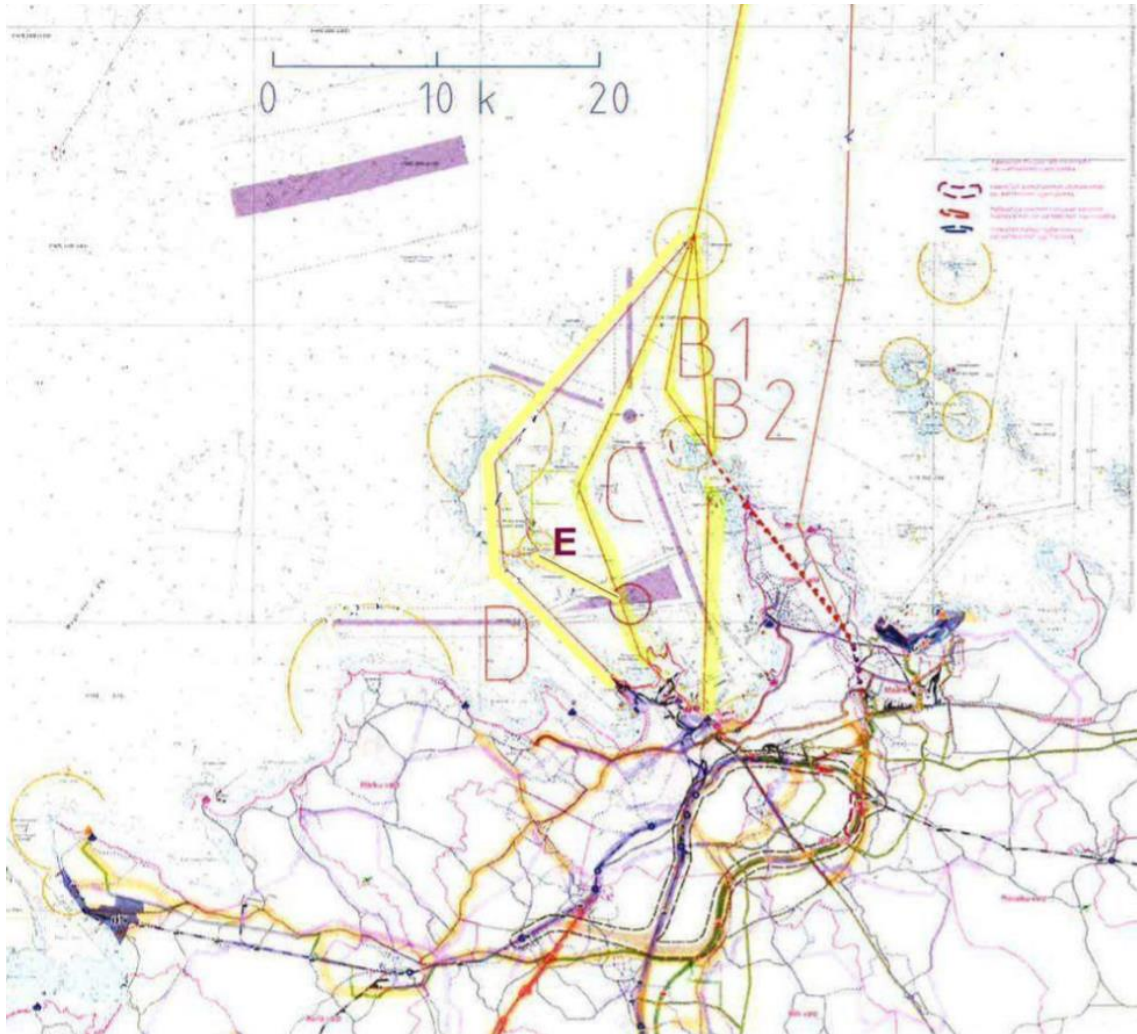
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|-------------------|---------|---------|-----------|------|
| | | G/cm ³ | MPa | % | m/s | m |
| Proterosoikumi gneiss | A | 2,65-2,75 | 110-240 | 0,1-0,2 | 6000-6300 | |
| Rabakivigraniit | B | 2,65 | 100-200 | 0,1 | 6000-6500 | |
| Murenenud kristalliline aluskord | 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 |
| Aleuroliit | 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 |
| <p>A- Jägala kompleksi kivimid; B- Naissaare ja Neeme rabakivigraniit; C- murenenud kristalliinsed kivimid; D- Ediacara liivakivid; E- Ediacara aleuroliit; 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.</p> | | | | | | |

3 Tunneli trassi valik

Plaanitava Tallinn-Helsingi tunneli trassi geoloogia määramiseks viis Soome Geoloogiateenistus võimalikes trassikoridorides läbi seismoakustilisi uuringuid. Uuringute eesmärk oli selgitada välja Proterosoikumi kristalliinsete kivimite sügavus erinevatel pakutud trassikoridoridel. Lisaks sellele uuriti erinevate trassikoridoride sobivust projektiga.

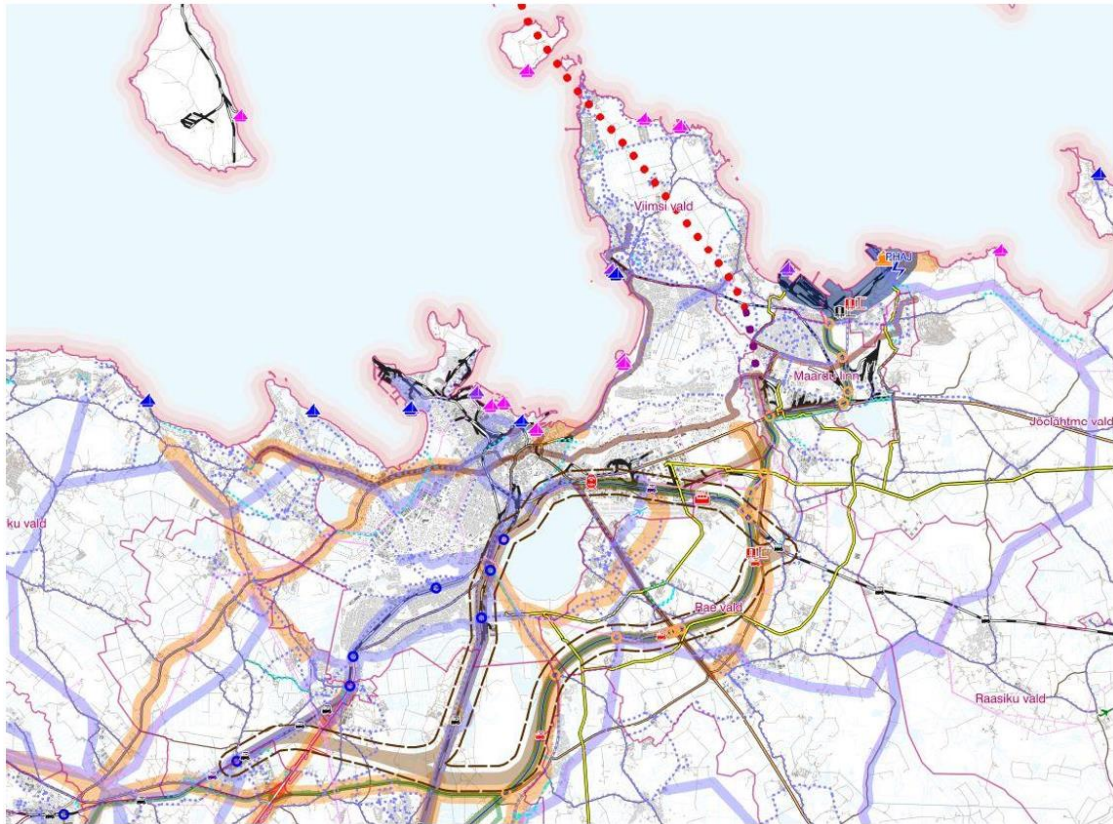
3.1 Tunneli suudme asukoht

Tunneli suudme asukoha valikul tuleb eelkõige arvestada olemasolevate raudteetrassidega, et tagada sujuv kaupade ja reisjate vedu, arvestades sealhulgas nii ohutust kui ka keskkonnaaspekte. Tallinna tingimustes pakuti Soome Geoloogiateenistuse uuringus välja viis võimalikku trassi B1, B2, C, D ja E (Joonis 2).



Joonis 2 Tallinn-Helsingi tunneli võimalikud trassikoridorid [8]

Mitme alternatiivi seast valiti kavandatava tunneli trassiks variant B1 [8]. Variandi B1 puhul tuleb tunnel Soome poolt läbi Tallinna madala, avaneb Viimsi poolsaarel ja raudteekoridor ühendub kohaliku raudteevõrguga Maardus, jõudes lõpuks Ülemistesse (Joonis 3). Siinkohal tuleb silmas pidada, et täpne trassikoridor koos peatuste, terminalide ja deпоode asukohtadega selgub projekti konkreetsemal kavandamisel.



Joonis 3 Variandi B1 tunneli trass [8]

3.2 Tunneli trassi pikkus

Raudteetrassi kogupikkuseks kujuneb Tallinnast Helsingisse 103 km (Joonis 4) ja ulatub kuni 180 m sügavusele merepinnast. Soomes tuleb kolm peatust: Helsingi kesklinnas, Pasilas ja Helsingi-Vantaa lennujaamas. Terminalid ja depood rajatakse lennujaama müra-aladesse. Kaubaterminalid on ühendatud teedevõrgu ja piirkonnas asuvate logistikaterminalide ja Hanko-Hyvinkää raudteega, et need suudaksid teenindada tervet Soomet.

Tallinnas on tunneli peatuseks planeeritud Ülemiste linnaosa kui kasvav äripiirkond Tallinna lennujaama lähedal, mis ühtlasi on ühendatud trammiliinidega kesklinna. Ka Eesti poolsed terminalid ja depood on kavandatud lennujaama müra-alasse ning asuvad logistikakeskuste läheduses. Mõistlik on tunneli trass ühendada kaubatranspordi tarbeks Muuga intermodaalse terminaliga, mis on Eesti suurim kaubasadam. Tunnel läheb maa alla Viimsi poolsaarel, kus juba 2011. aastal kehtestatud planeeringu järgi on keelatud ehitada ligi 60 hektarisel maa-alal, kuhu on planeeritud raudteetrass ja tunnelisüue.

Tallinn-Helsingi tunneli suur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

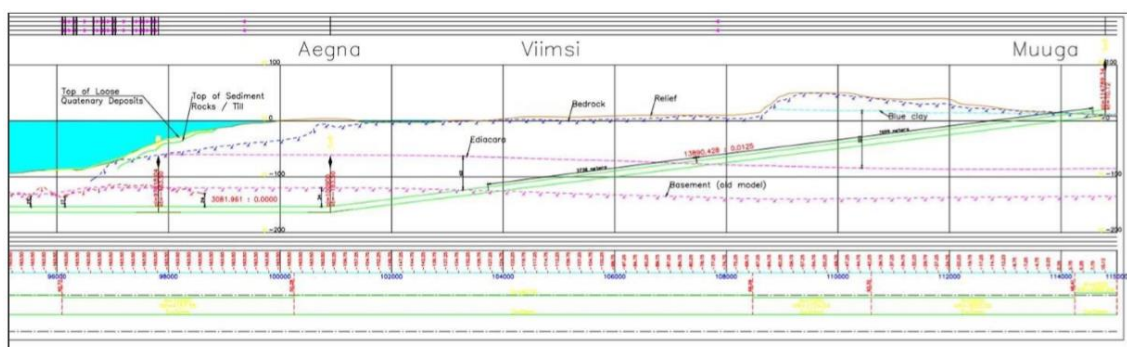


Joonis 4 FinEst Linki esitlus kavandatavast tunneli trassist (<http://www.finestlink.fi/et/> 2018)

4 Läbindustehnoloogia valik

4.1 Tunneli läbindamine

Tunneli läbindamine toimub suures osas Proterosoikumi kristalliinsetes kivimites – graniitides ja gneissides, millel on võrdlemisi stabiilsed mäenduslikud tingimused. Eesti poolel kritsalliinse aluskorrani jõudmiseks on vaja läbindada keeruline sette kivimiline pealiskord pikkusega 17,85 km (Joonis 5). Rongide ohutuks liiklemiseks tunnelis ei tohi trassi kalle ületada 2% [13].



Joonis 5 Trassi läbilõige [8]

Mäendustingimuste tõttu on just Eesti poolel tunneli läbindamine keeruline. Tunneli läbindamiseks on kaks erinevat võimalust: läbindamine puur-lõhketöödega või läbindamine kilpläbinduskombainiga.

4.2 Läbindamine puur-lõhketöödega

Puur-lõhketöödega läbindamisel tuleb veega küllastunud kihid täielikult külmutada, mis tähendab, et antud piirkonda külmutatakse nii kaua kuni pinnasest on moodustunud monoliit. Alles pärast külmutamist saab läbi viia puur-lõhketöid, millele järgneb tunneli toestamine. Korraga läbindatakse kolme tunnelit, mis võimaldab lõhketööde läbiviimisel varjuda paralleelsesse tunnelisse ja tööesi korralikult tuulutada.



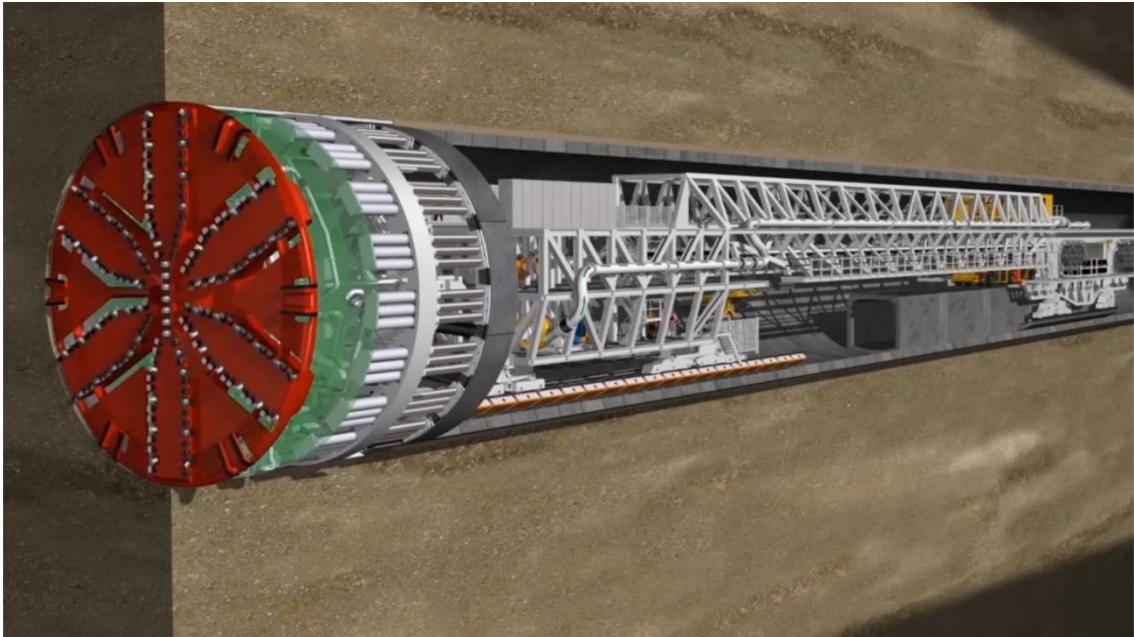
Joonis 6 Läbindamine puur-lõhketöödega (<http://www.tunnel-online.info/en/index.html>)

Puurvankritega puuritakse nii külmutus- kui ka lõhkeaugud. Lõhkeaukude sügavus sõltub ühes tsükli läbindatava eepikkusest. Peale lõhkeaukude puurimist laaditakse need lõhkeainega. Laengu initseerimiseks kasutatakse viitega detonaatoreid. Peale lõhkamist tööfront tuulutatakse ja raimatud massiv transporditakse tunnelist välja ning ladustatakse selleks ette nähtud platsil. Enne uue puur-lõhketööde tsükli alustamist tuleb tunneli lagi ja seinad isoleerida ning toestada. Lõhketööde optimaalsed parameetrid esitatakse lõhketööde passis.

Läbindatavatest kivimitest moodustavad suure osa liivakivid. Külmutatud massiivina on need väga abrasiivsed, mis raskendab lõhkeaukude puurimist. Tavapärase keerdpuurimise asemel tuleks kasutada löök-keerdpuurimist, mis aitab vähendada puurpeade suurt kulumist. Savides, lubjakivides ja kristalses aluskorras on puur-lõhketööde tegemine lihtsam.

4.3 Läbindamine kilpläbinduskombainiga

Teise variandina saab tunneli läbindamiseks kasutada kilpläbinduskombaini (Tunnel Boring Machine - TBM) (Joonis 7). TBM koosneb tüüpiliselt rotateeruvast lõikerattast, millele järgneb tõukesüsteem, tunneli toestussüsteem ja läbindamise toetusmehhanismid. Kasutatava masina tüüp sõltub projektile iseloomulikust geoloogiast, põhjavee kogusest, mäerõhust ja muudest teguritest.



Joonis 7 Kilpläbinduskombain (www.herrenknecht.com)

Kilpläbinduskombain on võimeline läbindama väga erinevate omadustega kivimeid sealhulgas Tallinn-Helsingi tunneli geoloogiale iseloomulikke savi, liiva ja graniite. Kombaini läbindamisel tekib ümmarguse ristlõikega, kuni 20 m läbimõõduga kaeveõõs. Tema eeliseks on pidev läbindamine. Üheagselt toimub kivimimassiivi raimamine, purustamine, transportimine ja tunneli toestamine. Kombainiga läbindamine on tunduvalt kiirem kui puur-lõhketöödega, samuti avaldab ta väiksemat mõju ümbritsevale keskkonnale.

Tallinn-Helsingi tunneli Eesti poolne pinnase geoloogia on keerukas, kus vahelduvad kihiti erinevate füüsikalise-mehaaniliste omadustega kivimid (Tabel 2). Kombainiga läbindamisel tuleb arvestada suure mäerõhu ja survealuse põhjaveega.

Ettevõtte Herrenknecht valmistab kilpläbinduskombaine, mis on projekteeritud läbindama samaaegselt erinevate omadustega kivimeid. Kombainid on võimelised läbindama 4,8 kuni 19 meetrise raadiusega tunneleid. Kombaine saab kasutada ka pinnastes, mis on veega küllastunud [3].

Lõikeratas on disainitud nii, et vähendada hammaste kulumist ja et raimatud materjali liikumine tööfrondis oleks optimaalne. Läbindamisel tekkivate ülegabariidiliste kivimite purustamiseks on kombain varustatud lõugpurustiga, mis purustab raimatud massiivi sobiva suurusega tükideks [3]. Kombainile avalduvat mäerõhku võtab vastu suruõhk.

4.4 Läbindamise tehnoloogia valik

Arvestades tunneli trassi iseloomustavaid geoloogilisi ja mäenduslike tingimusi valiti läbindamiseks puur-lõhketööd. Kuigi kilpläbinduskombaini kasutamine oleks kiirem ei ole neid masinad varem kasutatud oludes, kus esineb nii suur mäerõhk. Autorile teadaolevalt on veega küllastunud settekivimites kombainiga läbindamisel maksimaalne mäerõhk olnud 1,5 MPa. Tallinn-Helsingi tunneli tingimustes on arvutuslik mäerõhk kuni 6,1 MPa, mis on ligi 4 korda suurem kui seni maailmas praktiseeritud. Projektile iseloomulikku mäerõhku ei suuda olemasolevad kombainid vastu võtta. Probleemseks kujuneks ka abitööde läbiviimine nagu näiteks lõikeratta lõikepeade vahetamine, mille käigus inimesed viibiks kompressioonialas.

5 Tunneli konfiguratsiooni valik

5.1 Tunneli liik

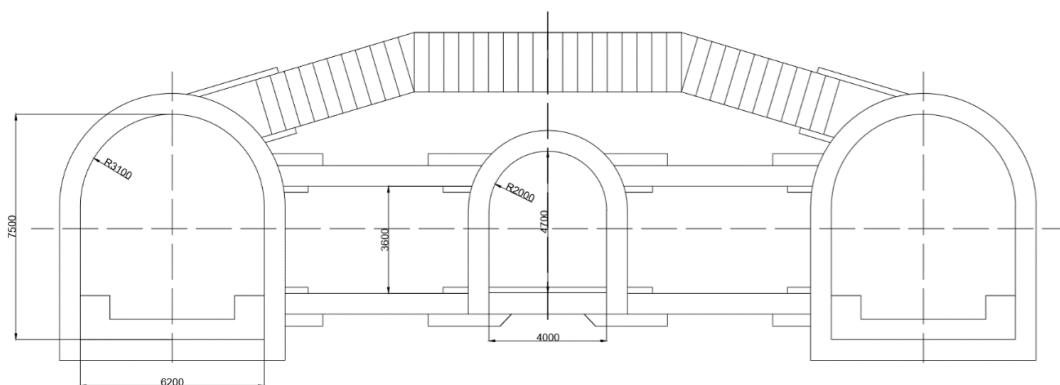
Tunneli liigi valiku raames on eri tunnelitüüpide ja nende ristlõigete kaalumise juures olulisel kohal ühendus olemasolevate transpordisüsteemidega mõlemas riigis. Varasemates uuringutes on arutletud võimaluse üle rajada maanteetunnel või maanteed ja raudteed ühendav kombineeritud tunnel. Üldiste turvakaalutuste ja ohuolukordade valguses oleks äärmiselt keeruline lubada sõiduaautosid nii pikka veealusesse tunnelisse. Euroopa Liidu määrused turvasüsteemidele, tunnelite ja päästemehhanismide kohta kasvataksid sellise lahenduse investeeringu- ja opereerimiskulud väga suureks, mistõttu võib tunneli rajamine osutada ebamõistlikuks. Nendel põhjustel baseerub käesolev uuring raudteetunneli lahendustele [9].

5.2 Tunneli konfiguratsiooni variandid

Tunneli konfiguratsiooniks on valida kahe variandi vahel, mis sõltuvad läbindamise tehnoloogiast. Esimene variandi puhul on tunneli läbilõige võlvprofiil (Joonis 8). Teise variandi puhul on tunneli läbilõikeks ring (Joonis 9). Ristlääbipääsud ehitatakse iga 250-300 m tagant ja ülerõhku vähendavad kanalid iga 200-250 m tagant [7].

Pidades silmas tunneli ehitamise keerukust, keskkonnamõju, maksumust ja aega peab tunneli konfiguratsioon olema läbimõeldult minimaalne. Tunneli läbilõike suurus valitakse lähtuvalt rongi, ventilatsiooniseadmete ja teiste vajalike piirete mõõtmetest.

5.3 Variant 1



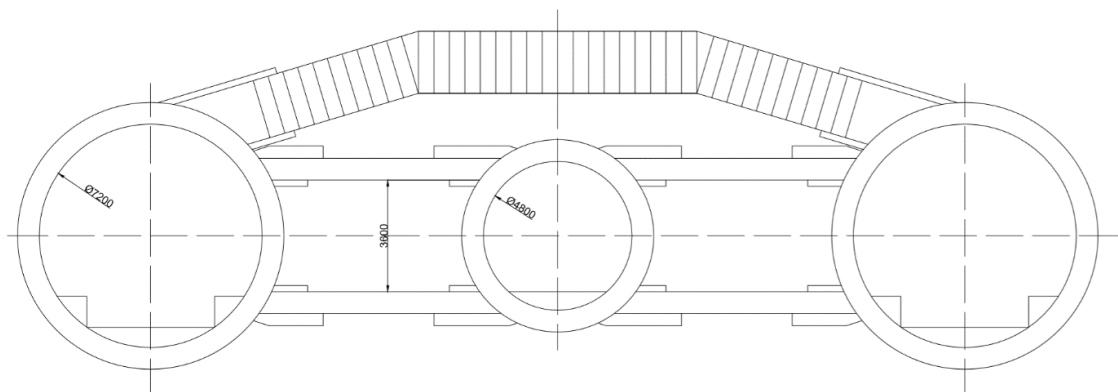
Joonis 8 Võlvprofiiliga tunneli konfiguratsioon [7]

Esimese variandina on tunneli konfiguratsioon võlvikujuline. Valmis tunneli sisemine laius on 6,2 m, kõrgus 7,5 m võlvi raadiusesga 3,1 m. Hooldustunneli sisemine laius on 4 m,

kõrgus 4,7 m ja võlvi raadius 2,0 m. Raudteetunnelid ja hooldustunnelid ühendava ristlâbipääsu sisemine laius on 3 m, kõrgus 3,6 m ja võlvi raadius 1,5 m. Ülerõhku vähendavate kanalite ristlâbipääsuks on ring läbimõõduga 2 m.

Joonis 8 esitatud tunneli konfiguratsioon on kõige optimaalsem puur-lõhketöödega läbindamisel.

5.4 Variant 2



Joonis 9 Ringikujulise läbilõikega tunneli konfiguratsioon [7]

Teise variandina on tunneli läbilõikeks ring, mille sisemine diameeter on 7,2 m. Kahe raudteetunneli vahel jooksva hooldustunneli diameetrik on 4,8 m. Raudteetunnelid hooldustunneliga ühendav ristlâbipääs on 3,6 m diameetriga. Ülerõhku vähendavate kanalite läbimõõt on 2 m.

Joonis 9 toodud tunneli konfiguratsiooni määrab kilplâbinduskombaini kasutamine ja võimalused.

5.5 Tunneli konfiguratsiooni valik

Lähtuvalt tunneli läbindustehnoloogia valikust valitakse tunneli konfiguratsiooniks esimene variant. Võlvprofiil on parim mäerõhku kaeveõõnest ümber suunav läbilõige ja kõige optimaalsem tunneli konfiguratsioon puur-lõhketöödega läbindamisel.

6 Puur-lõhketööde tehnoloogia ja parameetrid

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamistehnoloogiaks valiti puur-lõhketööd ja kõige optimaalsemaks tunneli konfiguratsiooniks võlvprofiiliga läbilõige.

Enne kaevetööde alustamist tuleb suudme asukoht ette valmistada. Luua taristu, toimetada kohale kõik vajalikud masinad, ette valmistada laoplatz, lõhkeainete ladu, raimatud materjali vaheladu, toestusmaterjalide ladu.

Kogu settekivimiline pealiskord, välja arvatud Lontova sinisavi kiht, on küllastunud survelise põhjaveega. Selleks, et tagada ohutu puur-lõhketööde läbiviimine on vajalik maapind esmalt külmutada.

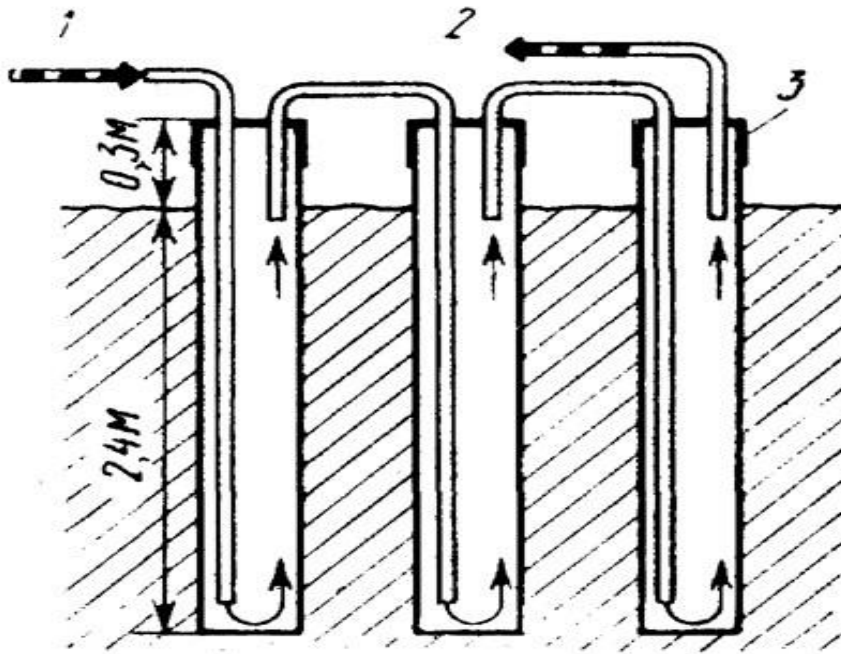
Paralleelselt toimuvad lõhketööd kuni viies ees. See võimaldab lõhketööde läbiviimisel varjuda tunnelisse. Nii külmutuse kui lõhketööde ajal peab tööfrondis toimuma korralik veekõrvaldus ja tuulutus.

6.1 Kivimite kihi külmutamine

Kivimimassiivi külmutamine on ehitustehnika moodus, mida kasutatakse juhul, kui maapind tuleb stabiliseerida, et see ei variseks ehitusobjektile või takistaks saasteainete sattumist põhjavette [6]. Taoline maapinna stabiliseerimise meetod on olnud kasutusel juba üle 100 aasta.

Ajalooliselt on jahutina kasutatud soolahust, kuid märksa efektiivsem ja odavam on tänapäeval kasutada vedelat lämmastikku. Spetsiaalsetes tehastes toodetud vedel lämmastik on värvitu vedelik, millel on väga madal aurustumiskiirus (atmosfäärirõhk - 195,8 °C). Erinevalt soollahusega külmutamisest ei ole vedela lämmastiku kasutamisel tööde läbiviimiseks vajalik eraldi külmutusjaamu ja torustikke. Vedelat lämmastikku pumbatakse otse spetsiaalsetest tsiternidest jahutustorudesse.

Külmutamistöodeks viiakse kivimimassiivi sisse torustik, milles paigutatakse külmutustorustik, kus ringleb külmutamise efekti teostav jahutusvedelik (Joonis 10).



Joonis 10 Vedellämmastikuga külmutamise skeem: 1) Sisendi toru 2) Aurustunud lämmastikku ärajuhtiv toru (http://www.metro.ru/library/stroitelstvo_metropolitenov/512/)

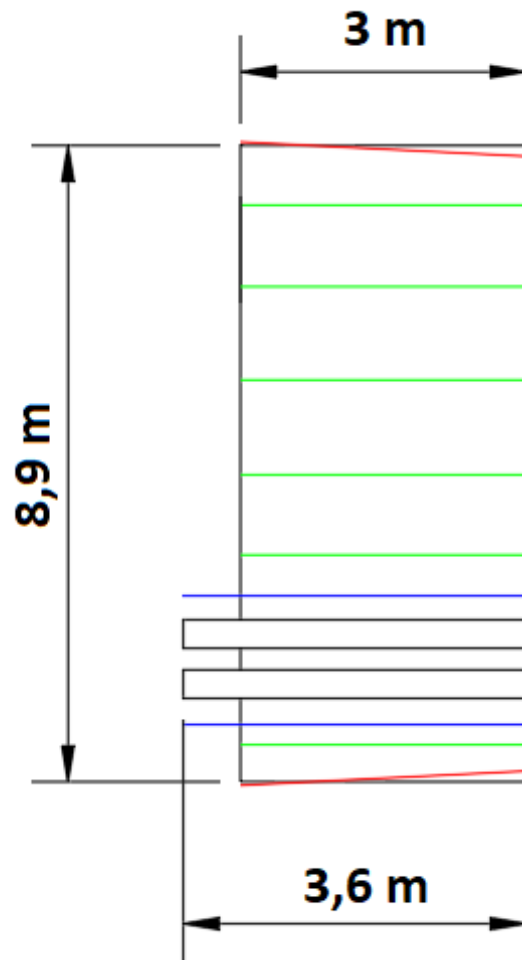
Üks tsükkel kestab nii kaua, kuni maapinnast on moodustunud monoliit, milles saab läbi viia puur-lõhketöid. Külmutuse ajal peab tunnelis toimuma korralik veekõrvaldus.

6.2 Läbindamine Ediacara liivakivides

Külmutatud Ediacara liivakivides viiakse lõhketöid läbi ühe vaba pinnaga ja oste algmurretega. Puuripeade kulu vähendamiseks kasutatakse löök-keerdpuurimist. Algmurdeaugud puuritakse põhja lähedale ristlõike keskele. Puuraukude sügavused on toodud Joonis 11 .

Lõhketöödeks kasutatakse külmakindlat dünaamiiti. Suurem osa kivimimassiivist kobestatakse raimalaengutega. Algmurde- ja raimalaenguaukude läbimõõdud on vastavalt 400 mm ja 50 mm. Raimalaenguaegud tuleb korralikult topistada.

Kontuurlaengute lõhkamisega antakse kaeveõõnele projektis ettenähtud kuju ja mõõtmed. Need lõhkeaugud puuritakse 3% kaldega kaeveõõne kontuuri suunas, 50 kuni 100 mm kontuurist väljapoole [12]. Kontuuraukude läbimõõt on 45 mm, need laetakse üle ühe ja ei topistata.



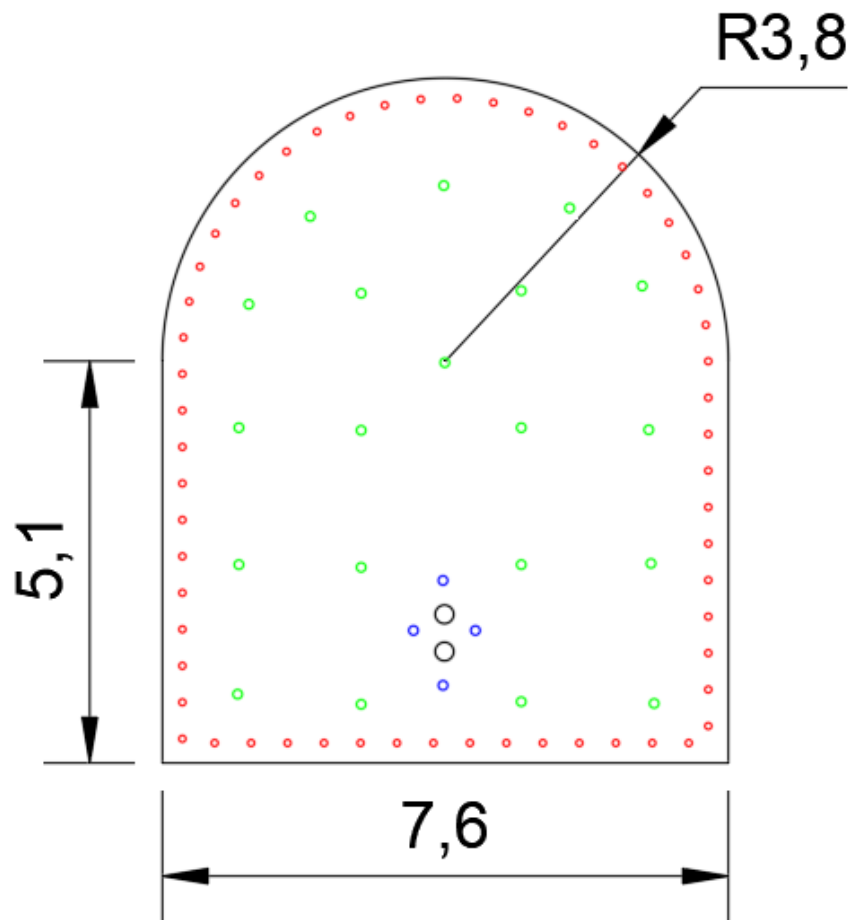
Joonis 11 Puuraukude sügavused külmutatud Ediacara liivakivides

6.3 Raudteetunneli puur-lõhketööde parameetrid

Projektis on ette nähtud kahe paralleelse raudteetunneli läbindamine. Tunnelite übermõõt on ligikaudu 30 meetrit. Algmurdeks on valitud prisma algumurre (Joonis 12). Kuna kivimimassiiv on külmutatud ei esine lõhelisust. Ee edasinihe on aruvutustes valitud alla 3 m, et lõhkamised ei tekitaks liialt suuri pragusid ja lõhesid tunneli ristlõike ümbruses.

Tabel 3 Raudteetunneli puur-lõhketööde parameetrid

| | |
|--|-------|
| Lõhkeaugu pikkus, m | 3.0 |
| Algmurdeaugu läbimõõt, mm | 400 |
| Kontuuraugu läbimõõt, mm | 45 |
| Raima-augu läbimõõt, mm | 50 |
| Ee edasinihke samm, m | 2.6 |
| Ee ristlõike pindala, m ² | 61.4 |
| Korraga lõhatava kivimi maht, m ³ | 156.6 |
| Suletustegur k _s | 1.1 |
| Lõhkeaine erikulu | 0.9 |
| Vajalik lõhkeaine kogus | 148.4 |
| Algmurde lõhkeaukude arv n* | 2 |
| Algmurde puuraukude pikkus, m | 3.6 |
| Raimalaengute mass, kg | 3.4 |
| Kontuurlaengute mass, kg | 2.4 |
| Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m | 0.6 |
| Kontuurlaengute arv | 29 |
| Raimalaengute arv | 20 |
| Lõhkeaine tegelik kulu, kg | 150.2 |
| Padrunite arv | 75.1 |
| Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³ | 1.0 |
| Puurtööde maht, m | 253.2 |
| Puurtööde erimaht, m/m ³ | 1.6 |



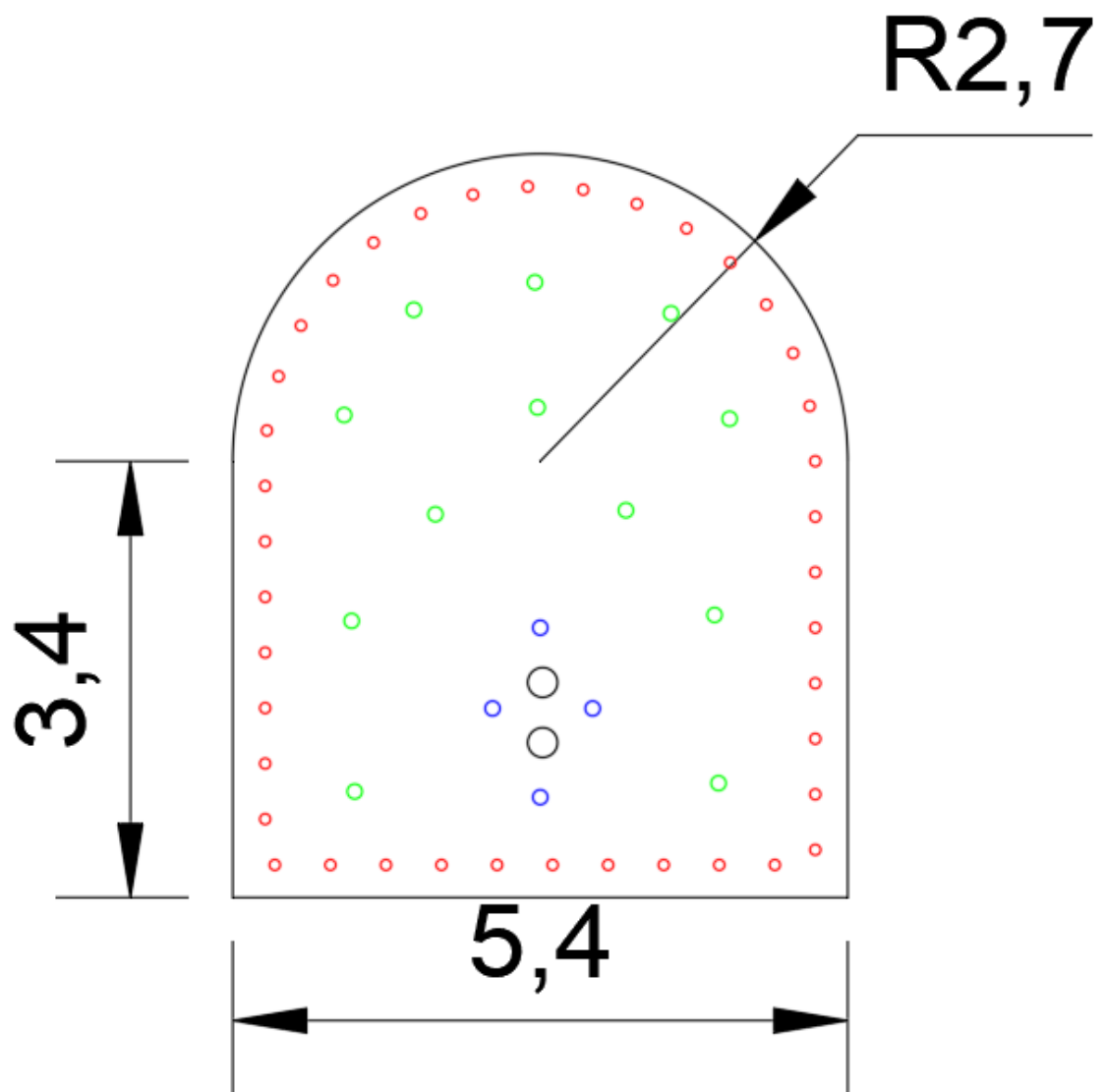
Joonis 12 Raudteetunneli puur-lõhketööde laengute paigutus

6.4 Hooldustunneli puur-lõhketööde parameetrid

Kahe raudteetunneli vahele läbindatakse hooldustunnel, mille läbimõõt on ligikaudu 20 meetrit. Algurdeks on valitud prisma algmurre (Joonis 13). Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ning tegelik lõhkeaine kulu oleks lähedane teoreetilisele erikulule (Tabel 4).

Tabel 4 Hooldustunneli puur-lõhketööde parameetrid

| | |
|--|-------|
| Lõhkeaugu pikkus, m | 3.0 |
| Algmurdeaugu läbimõõt, mm | 400 |
| Kontuuraugu läbimõõt, mm | 45 |
| Raima-augu läbimõõt, mm | 50 |
| Ee edasinihke samm, m | 2.6 |
| Ee ristlõike pindala, m ² | 28.5 |
| Korruga lõhatava kivimi maht, m ³ | 72.8 |
| Suletustegur k _s | 1.7 |
| Lõhkeaine erikulu | 1.4 |
| Vajalik lõhkeaine kogus | 101.1 |
| Algmurde lõhkeaukude arv n* | 2 |
| Algmurde puuraukude pikkus, m | 3.6 |
| Raimalaengute mass, kg | 3.4 |
| Kontuurlaengute mass, kg | 2.4 |
| Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m | 0.6 |
| Kontuurlaengute arv | 20 |
| Raimalaengute arv | 12 |
| Lõhkeaine tegelik kulu, kg | 101.8 |
| Padrunite arv | 50.9 |
| Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³ | 1.4 |
| Puurtööde maht, m | 175.2 |
| Puurtööde erimaht, m/m ³ | 2.4 |



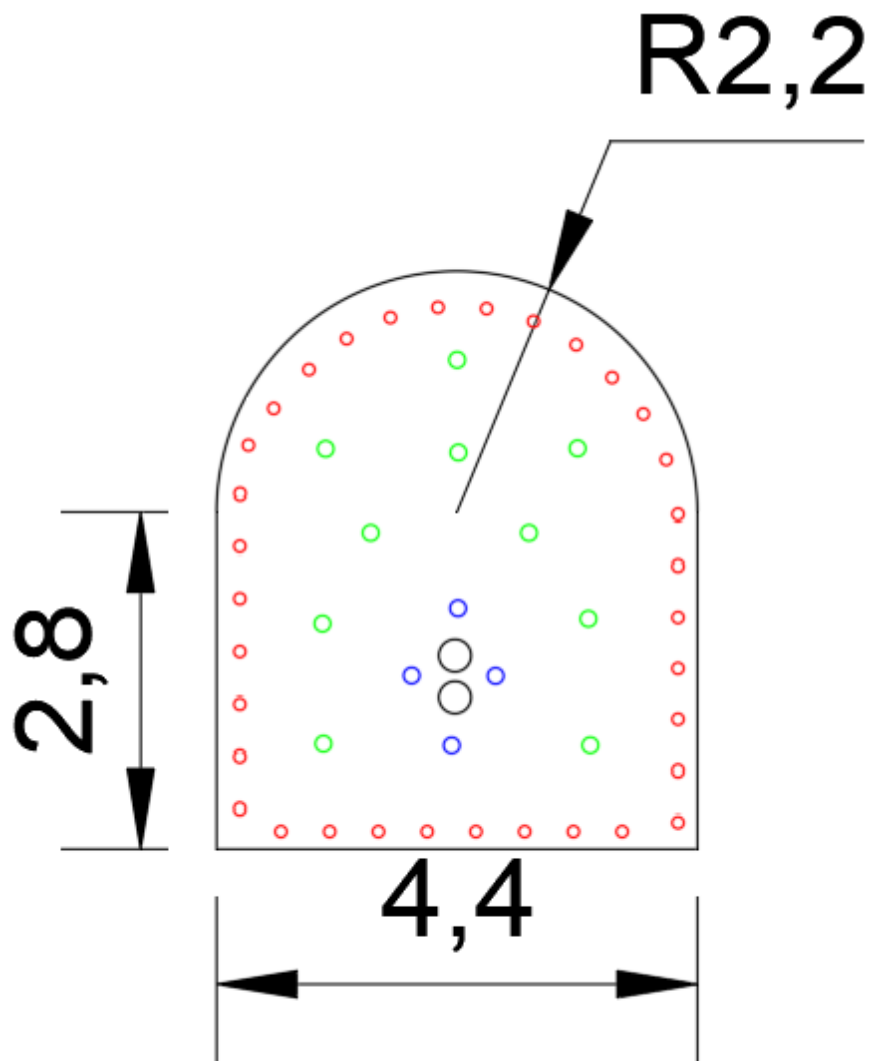
Joonis 13 Hooldustunneli puur-lõhketööde laengute paigutus

6.5 Ristlääbipääsude puur-lõhketööde parameetrid

Raudteetunnelid hooldustunneliga ühendavad ristlääbipääsud läbindatakse iga 250 – 300 m tagant. Ristlääbipääsude ümbermõõdud on ligikaudu 17 meetrit. Algmurdeks on valitud prisma algumurre (Joonis 14).

Tabel 5 Ristlääbipääsude puur-lõhketööde parameetrid

| | |
|--|-------|
| Lõhkeaugu pikkus, m | 3.0 |
| Algmurdeaugu läbimõõt, mm | 400 |
| Kontuuraugu läbimõõt, mm | 45 |
| Raima-augu läbimõõt, mm | 50 |
| Ee edasinihke samm, m | 2.6 |
| Ee ristlõike pindala, m ² | 19.9 |
| Korruga lõhatava kivimi maht, m ³ | 50.8 |
| Suletustegur k _s | 2.0 |
| Lõhkeaine erikulu | 1.7 |
| Vajalik lõhkeaine kogus | 84.5 |
| Algmurde lõhkeaukude arv n* | 2 |
| Algmurde puuraukude pikkus, m | 3.6 |
| Raimalaengute mass, kg | 3.4 |
| Kontuurlaengute mass, kg | 2.4 |
| Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m | 0.6 |
| Kontuurlaengute arv | 17 |
| Raimalaengute arv | 10 |
| Lõhkeaine tegelik kulu, kg | 87.8 |
| Padrunite arv | 43.9 |
| Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³ | 1.7 |
| Puurtööde maht, m | 151.2 |
| Puurtööde erimaht, m/m ³ | 3.0 |



Joonis 14 Ristläbipäasude puur-lõhketööde laengute paigutus

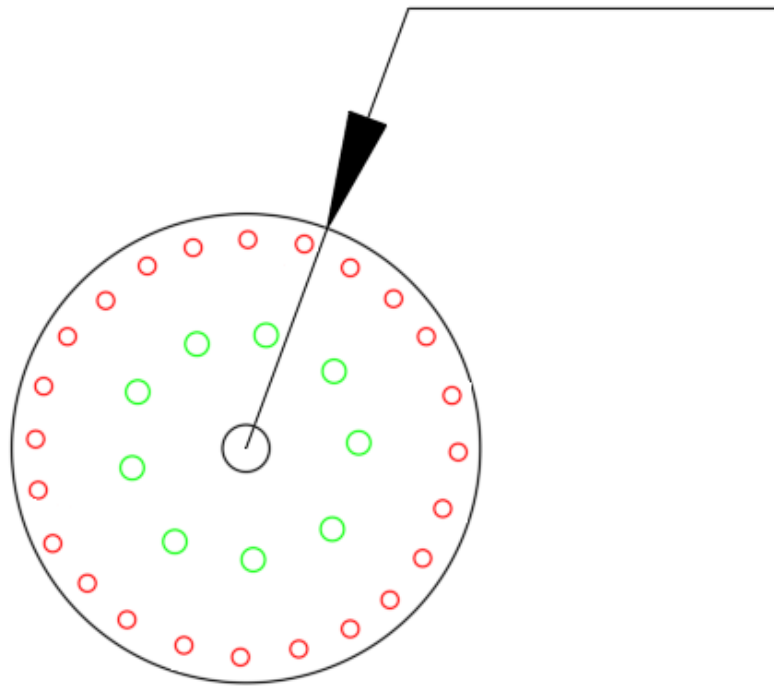
6.6 Tuulutyslõõri puur-lõhketööde parameetrid

Raudteetunnelites ülerõhku vähendavad õhukanalid läbindatakse iga 200-250 m tagant. Õhukanalite läbimõõdud on ligikaudu 10,7 meetrit. Algmurdeks on valitud üks täiendav vaba pind (Joonis 15).

Tabel 6 Tuulutyslõõri puur-lõhketööde parameetrid

| | |
|---|-------|
| Lõhkeaugu pikkus, m | 3.0 |
| Algmurdeaugu läbimõõt, mm | 400 |
| Kontuuraugu läbimõõt, mm | 45 |
| Raima-augu läbimõõt, mm | 50 |
| Ee edasinihke samm, m | 2.6 |
| Ee ristlõike pindala, m ² | 9.1 |
| Korraaga lõhatava kivimi maht, m ³ | 23.1 |
| Suletustegur k _s | 3.0 |
| Lõhkeaine erikulu | 2.5 |
| Vajalik lõhkeaine kogus | 57.0 |
| Algmurde lõhkeaukude arv n* | 1 |
| Algmurde puuraukude pikkus, m | 3.6 |
| Raimalaengute mass, kg | 3.4 |
| Kontuurlaengute mass, kg | 2.4 |
| Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m | 0.6 |
| Kontuurlaengute arv | 12 |
| Raimalaengute arv | 9 |
| Lõhkeaine tegelik kulu, kg | 59.0 |
| Padrunite arv | 29.5 |
| Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³ | 2.6 |
| Puurtööde maht, m | 102.6 |
| Puurtööde erimaht, m/m ³ | 4.4 |

R1,7



Joonis 15 Õhukanalite puur-lõhketööde laengute paigutus

7 Läbindamise tehnoloogia

Tunneli läbindamisel on kokku 5 ett: 2 raudteetunnelit, hooldustunnel, 2 ristläbipääsu ja õhukanal.

Läbindamisel arvestatakse Tallinn-Helsingi tunneli Eesti poolse osa kaldšahti, mis ulatub kristalsesse aluskorda. Läbindamise toimub puur-lõhketöödega. Laenguaugud lõhatakse viidetega. Esimena detoneeritakse lühikeste viidetega algmurdeaugud. Enne raimalaenguaugude lõhkamist on kuni sekundiline paus, et saaks tekkida täiendav vaba pind. Seejärel detoneeritakse üksteise järel raimalaengud. Viimasena lõhatakse kontuurlaengud, mis on laetud üle ühe. Kontuurlaengud on nõrgemad kui raimalaengud ning annavad tunnelile soovitud kuju.

Lõhkamise ajal varjutakse paralleelsesesse tunnelisse, mis on lõhkamise eest õhukindlate ustega isoleeritud. Pärast tööfrondi tuulutamist koristatakse raimatud kaevis, selleks kasutatakse mööda raudteed sõitvaid vagonette. Toestikku ja raudteerööpaid hakatakse paigaldama vahetult pärast lõhatud kivimi koristust. Peale toetuse intalleerimist alustatakse puur-lõhketööde uue tsükliga.

7.1 Läbindamise mahud

Külmutatud Ediacara ladestu läbindatakse 1 % kaldega. Kalle on valitud rongide ohutuks liikumiseks tunnelis [13]. 1 % kalle tähendab, et 100 m peale langeb tunnel 1 m, sellest tulenevalt on raudtee- ja hooldustunneli läbindamise pikkus 5710 m. Tunnelite, ristläbipääsude ja kanalite pindalad on arvutatud valitud tunneli konfiguratsioonist. Rehkendatud läbindamise mahud on esitatud Tabel 7.

Tabel 7 Läbindamise mahud Ediacara liivakivides

| Ediacara liivakivid | Kogus | Pikkus (m) | Pindala (m ²) | Läbindamise maht (m ³) |
|--------------------------|-------|------------|---------------------------|------------------------------------|
| Raudteetunnel | 2 | 5710.3 | 61.43 | 701567 |
| Hooldustunnel | 1 | 5710.3 | 28.53 | 162915 |
| Ristläbipääsud | 20 | 13.3 | 19.92 | 5299 |
| Rõhu vähendamise kanalid | 25 | 20.2 | 9.07 | 4580 |
| | | | Kokku | 874361 |

Läbindamise maht veega küllastunud Ediacara ladestus on 874 361 m³.

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

7.2 Kasutatavad mäemasinad

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamiseks on vaja mitmeid erinevaid elektriajamitega masinaid. Külmutus- ja lõhkeaukude puurimiseks on sobilik puurvanker Sandvik DD422iE (Joonis 16).



Joonis 16 Sandvik DD422iE puurvanker (<https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/mining-jumbos/dd422ie-development-drill-rig/>)

Kivimassiivi külmutamiseks valitakse turul olev sobilik külmutusagregaat. Lõhkeaukude laadimine ja topistamine toimub käsitsi, milleks kasutatakse tõstukit. Raimatud massiivi tööfrondis koristatakse käpplaaduriga ja laaditakse ümber kraapkonveieriga, milleks sobib Komatsu loader Joy 14BU27 (Joonis 17). Lõhatud massiiv transporditakse maapinnale mööda raudteerööpaid vagonettidega.

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane



Joonis 17 Kápplaadur (<https://mining.komatsu/product-details/14bu27>)

Pritsbetooni segamiseks kasutatakse betoonisegistit ja pritsimiseks sobib Normet Spraymec 8100 VC, mille analoog ja tööpõhimõte on näidatud Joonis 18.

8 Toestamine ja hüdroisolatsioon

Tunneli toetus ja hüdroisolatsioon valitakse selliselt, et oleks tagatud tunneli konstruktsioonide püsivus, transpordivahendite ja inimeste ohutus ning põhjavee juurdepääsu takistamine tunneli ristlabilõikesse kogu tunneli eksploatatsiooni ajal [5].

Lähteparameetrid toestiku ja hüdroisolatsiooni jaoks määrab projektile iseloomulikud geoloogilised ja hüdrogeoloogilised tingimused ning tunneli valitud ristlabilõikele (Joonis 8) avalduv mäerõhk (Tabel 1).

Tunnel hüdroisoleeritakse ümbritsevast keskkonnast. Põhjavee lekkimine tunnelisse põhjustab tunneli konstruktsioonide, elektriseadmete ja raudteerööbaste korrosiooni. Lisaks sellele mõjub vee jäätumine negatiivselt tunneli portaali lähistel konstruktsioonide püsivusele ja eale [5].

Kaeveõhne püsivuse tagamiseks on toestamine geoloogiliste tingimuste tõttu jagatud kahte etappi. Esimene etappi käigus toestatakse tunnel portaalist kuni kristalse aluskorrani. Teise etappi käigus toestatakse tunnel kristalses aluskorras. Kuna kristalne aluskord on oma struktuurilt püsivam, ei ole seal vajalik teostada võrdväärseid toetus- ja isolatsioonitöid nagu settekivimilises pealiskorras. See võimaldab säästa nii aja- kui ka materjaalset ressursi. Antud töös keskendutakse toestustööde esimesele etapile.

Toestiku ja hüdroisolatsiooni paksus tööde esimeses etapis on 700 mm, millest pritsbetoon 75 mm, geomembraan 3 mm ja raudbetoon 622 mm [5].

8.1 Tunneli toestamine Ediacara liivakivides

Vahetult pärast lõhketööde läbiviimist ja raimatud materjali koristamist tööfrondist, tuleb alustada tunneli isoleerimis- ja toestustöödega. Turvalise eksploatatsiooni ning hoolduskulude vähendamiseks hüdroisoleeritakse tunnel kogu ulatuses ümbritsevast põhjaveest täielikult [5].

Tunneli seinale ja põhjale kantakse mitmekihiline pritsbetoon vooderdus. Toestamiseks kasutatav betoon transporditakse tunneli tööpiirkonda, mis spetsiaalse betoonipritsiga (Joonis 18) kantakse tunneli ümberkivimitele [16]. Betooni tõmbe- ja paindetugevuse suurendamiseks segatakse mörtil terasfiibrid läbimõõduga 1 mm.



Joonis 18 Pritsbetoon toetustööd (<http://www.rmfttraining.co.uk/crossrail-lessons-inform-new-sprayed-concrete-guide/>)

Aluskiht on naket tekitav esmane tihendav kiht. Teiseks installeeritakse sünteetiline geomembraan tunneli täielikuks hüdroisoleerimiseks ümbritsevast keskkonnast. Geomembraani peale kantakse vett juhtiv kiht, et tunneli betoonvoodri kuivamisel vaba vesi tunneli põhjale veekogurisse suunata.

Pristbetooni ja hüdroisolatsiooni paigaldamise ning tunneli põhja kindlustamise järel armeeritakse tunneli seinad. Armeerimistöödega paralleelselt paigaldatakse tunneli põhjale ajutised relsid, millel hakkab liikuma betoonvoodri valuks vajalik hüdrauliline saalung-vanker. Armeeringu valmides viiakse vanker tööalasse, kus betoonvooder valatakse. Saalungid surutakse paika hüdrauliliste tungraudadega ja seejärel pumbatakse betoon kaeveõõne ristlõike perimeetrile, millest kivistumisel moodustub ühtne monoliit [5]. Viimase etapina pritsitakse tunneli ristlõikele tulekindel betoonkiht, et võimaliku tulekahju korral tunneli toestik ei deformeeruks.

Hooldustunneli ja ristlõikepääsude toestamine ning hüdroisoleerimine toimub samasuguselt raudteetunneliga. Ülerõhku vähendavate kanalite hüdroisoleerimine toimub samasuguselt teiste tunneli osadega, kuid toestatakse betoon-tüübingtoestikuga. Tüübingtoestik ühendatakse omavahel teraspoltidega [5].

9 Tuulutus

Tunneli õhu kvaliteet sõltub mitmest erinevast tegurist nii tunneli läbindamise kui kasutamise ajal. Lisaks läbindamistöodele ja kasutamisele mõjutab tunneli õhukvaliteeti gaasierituvus ning aeglased keemilised reaktsioonid ümbritsevates kivimites.

Tuulutamise eesmärk on viia tunnelisse värsket õhku sellises koguses ja sellise survega, et tunnelis töötavatele inimestele oleks tagatud ohutud ja võimalikult tervislikud töötingimused. Kaeveõõntes, kus viibivad või võivad viibida inimesed, peab olema vähemalt 20 % hapnikku ja mitte rohkem kui 0,5 % mahust süsinikdioksiidi. Talvel ei tohi tunneli õhutemperatuur olla madalam kui 2 °C ja suveperioodil mitte üle 25 °C [17].

9.1 Läbindamise ajal

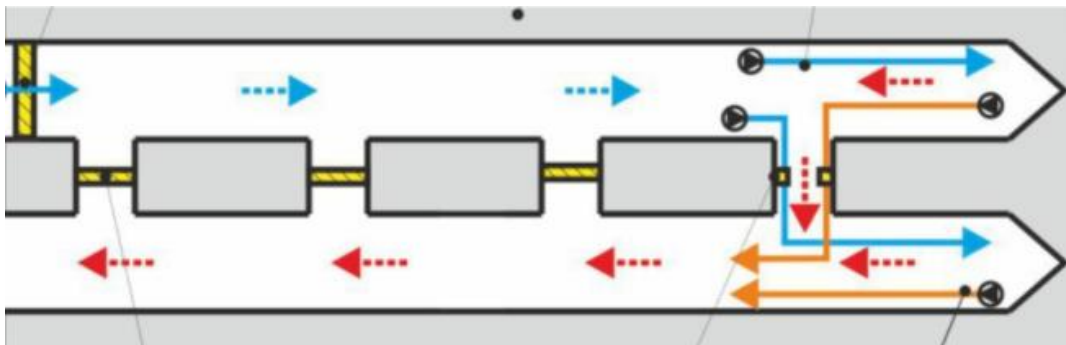
Tunneli läbindamise ajal mõjutab õhu kvaliteeti enim puur-lõhketööd, aga ka inimeste hingamine ja õhu liikumiskiirus kaeveõõntes. Õhukvaliteedi huvides tuleks vältida sisepõlemismootoreid ehk kõik kasutatavad masinad ja seadmed peaksid töötama elektriajamitega.



Joonis 19 Tunneli ventileerimine läbindamisel [17]

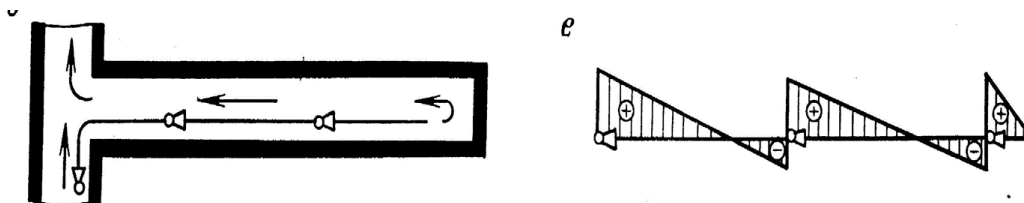
Lõhketöödega kaasneb toksiliste gaaside (süsinikdioksiid, lämmastikoksiidid jt) vabanemine töö ees. Enne töötajate tööfronti lubamist tuleb töö esi korralikult tuulutada. Pidev ventilatsioon peab tagama õhukvaliteedi vähemalt 60 % ulatuses normaalist.

Ettevalmistuskaeveõõnte ventilatsioon toimub suruskeemil kohaliku tuulutuse ventilaatorite abil. Paraleelkaeveõõnte läbindamisel kasutatakse õhu juhtimiseks ühest paralleelharust teise teisaldatavaid vaheseinu ja tuulutustorusid (Joonis 20) [17].



Joonis 20 Paraleelkaeveõõnte läbindamise tuulutusskeem, kus sinisega värske ja punasega kasutatud õhk [17]

Kuna tegemist on pikkade kaeveõõntega, tuleb kaeveõõne depressiooni ületamiseks kasutada ventilaatorite hajutatud jadaühendust (Joonis 21).



Joonis 21 Ventileerimise hajutatud jadaühendus ja epüür [17]

9.2 Tunneli eksploatatsiooni ajal

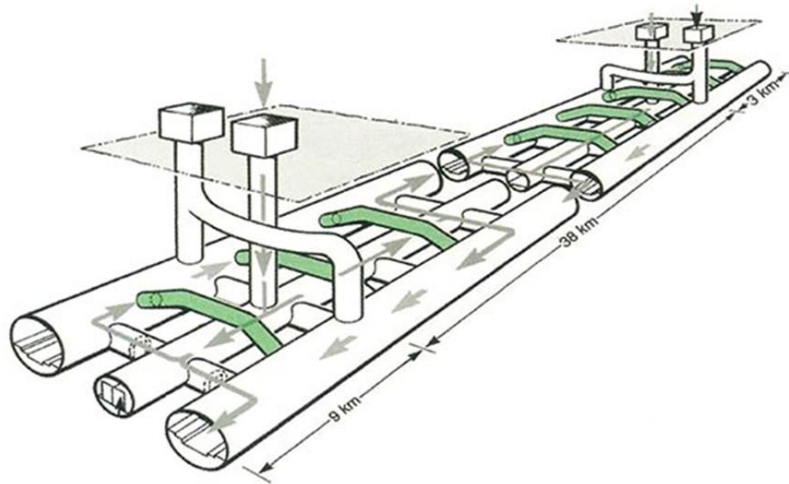
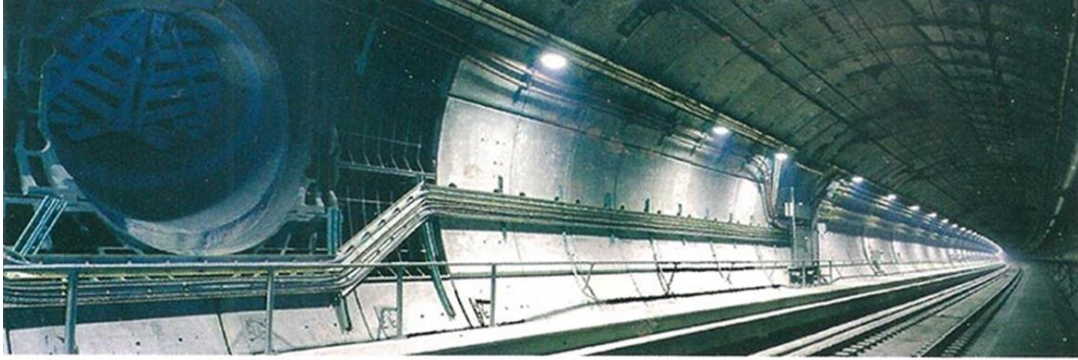
Raudteetunnelite ventilatsioon on vajalik kahjulike gaaside kontsentratsiooni vähendamiseks vastuvõetava tasemeni, ettenähtud temperatuuri režiimi kehtestamiseks, tolmuõhu kõrvaldamiseks, võimalike tulekahjude summutamiseks ning jää moodustumise vältimiseks [11].

Tallinn-Helsingi tunneli tingimustes sobib kasutamiseks pikisuunaline ventilatsioonisüsteem, kus õhk kantakse kogu tunneli osas kiirusel vahemikus 5-6 m/s. Tunneli lage mööda paigaldatakse iga 40-60 m järel suure kiirusega ventilaatorid (30-40 m/s). Kogu ventilatsioonisüsteemide juhtimine ja jälgimine toimub automaatselt.

Kolviefekti ehk suure kiirusega rongi ees õhu kokkusurumise poolt tekitatud õhujoo vähendamiseks disainitakse raudteetunnelitesse õhurõhku vähendavad kanalid (Joonis

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

22). Tunneli õhukvaliteedi tagamiseks rajatakse mõlema riigi rannikumere vähem kui 10 m sügavustele madalikele tuulutusšaht.



Joonis 22 Kolviefekti vähendavad tuulutussõõrid Eurotunnelis [17]

10 Ohutus ja keskkonnakaitse

Tunneli läbindamisel tuleb kaeveõõnes viibivate inimeste ohutuse tagamiseks järgida järgnevaid ohutusnõudeid [5]:

- 1) Allmaakaeveõõnes viibivate isikute üle tuleb pidada arvestust. Arvestuse pidamise kord peab tagama, et igal ajal oleks võimalik tuvastada kõik allmaakaeveõõnes viibivad isikud.
- 2) Tunneli läbindamisel peab toimuma veekõrvaldus. Veerohketes kivimites töötades peavad olema rakendatud täiendavad abinõud ootamatu ohtlikult suure veekoguse paiskumisel kaeveõõnde, et vältida õnnetusjuhtumeid.
- 3) Lõhkematerjale käideldakse lõhkematerjaliseadusega kehtestatud korras.
- 4) Masinaid ja seadmeid tuleb kasutada vastavalt nende kasutusjuhendist tulenevatele nõuetele.
- 5) Inimeste vedu tunnelis ja teenindusalal võib toimuda selleks kohandatud veokiga vastutava spetsialisti poolt määratud marsruudil.
- 6) Tunneli läbindamisel ja kaeveõõne rajamisel on üksi töötamine keelatud.
- 7) 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. septembril 2001. a määruses nr 293 «Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid».
- 8) Kaevanduses peab olema korraldatud õhuproovide võtmine kaeveõõntes, õhu analüüsimine ja määratud kaevanduse tuulutuse eest vastutav isik.
- 9) Tupikkaeveõõne tuulutamiseks paigaldatakse ventilaatorid selle suudmest vähemalt 10 m kaugusele värske õhujoaga kaeveõõnesse, kusjuures tupikkaeveõõne tuulutamiseks ei tohi kulutada üle 70 % ventilaatorseadmete asukohta läbivast õhuhulgast.
- 10) Õhujugasid võib kaeveõõntes reguleerida vaid vastutava spetsialisti või tema poolt selleks volitatud isiku loal. Tuulutusšurfi ventilaatorseadet võib seisata või töörežiimi muuta vastutava spetsialisti või tema poolt selleks volitatud isiku loal.

- 11) Tuulutussüsteemi peab tulekahju korral olema võimalik seisata ja sulgeda. Tuulutussüsteemi toimimist tuleb pidevalt jälgida ja selle tõrgetest tuleb allmaakaevetööde viibivaid isikuid teavitada.
- 12) Bensiini- ja gaasiküttega töötavaid mootoreid ei tohi allmaakaevanduses kasutada. See nõue ei kehti pääste- ja kustutustööde korral.
- 13) Allmaakaevetööde tuleb kasutada selliseid mootoreid, mille heitgaaside lämmastikoksiidide, süsinikmonooksiidi ja tahma sisaldus on võimalikult madal. Kütuse väävlisisaldus peab olema võimalikult madal.
- 14) Allmaakaevetööde töötavad isikud peavad teadma väljapääsuteede asukohti ja evakuatsiooni korraldust.
- 15) Kaevetööde peavad olema tähistatud märkide ja viitadega selliselt, et need aitaksid leida töötajatel vajalikku väljapääsuteed maapinnale. Võimaluse korral kasutatakse helenduvaid märke või viitasid.
- 16) Kaevetööde seisukorda tuleb alati kontrollida pärast lõhketöid.
- 17) Tulekahju ennetamiseks ja võimaliku tulekahju kustutamiseks või tulekahju kontrollimiseks peab kaevanduses olema rakendatud kaevanduse eripäradele vastavad tuleohutusmeetmed.
- 18) Kaevetööde toetusmaterjalid peavad olema mittepõlevast materjalist. Mittepõlevateks materjalideks loetakse betooni, metalli, looduslikke ja sünteetilisi mittepõlevaid kive.
- 19) Aheraine-, katendi-, tooraine-, toodangu- ja muud puistangud ning settebasseinid tuleb projekteerida, ehitada, neid kasutada ja hooldada selliselt, et oleks tagatud nii nende stabiilsus kui ka töötajate ohutus.
- 20) Isesüttimise ohuga jäätmete ladustamine peab toimuma mitte üle 20 m paksuste horisontaalsete kihtidena. Puistangu pealispinna kalle peab tagama sademevee äravoolu.

Veekihtide kvaliteetne läbindamine on tähtis, et erinevad veehorisonid oleks peale tunneli rajamist teineteisest isoleeritud ja ei toimuks segunemist erinevate kihtide vahel. Vältida tuleb ka veekihtide reostamist, kuna veekihtid on piirkonna ühisveevarustuse allikad.

11 Kokkuvõte

Bakalaureusetöö ülesandeks oli vastvalt Eesti poolsele geoloogilisele läbilõikele valida Tallinn-Helsingi tunneli läbindamiseks parim võimalik tehnoloogia ning sellest tulenevalt tunneli konfiguratsioon.

Mäenduslikud tingimused Eesti poolses kaldosas on keerulised survele põhjavee ja suure mäerõhu tõttu. Maksimalne mäerõhk tunneli sügavaimas punktis on kuni 6,1 Mpa. Tunneli läbindamise tehnoloogiaks valiti puur-lõhketööd ja sellest tulenevalt võlvikujuline ristlabilõige. Tunneli kogupikkus on 103 km ja ulatub kuni 180 m sügavusele merepinnast. Kokku läbindatakse kaks raudteetunnelit, hooldus tunnel, iga 250 m tagant ristlābipāāsud ning iga 200 m järel kolviefekti vähendevad tuulutusslōõrid.

Eestis asub tunneli portaal Viimsi poolsaarel. Survelise põhjaveega küllastunud Ediacara liivakivides tuleb enne puur-lõhketööde teostamist kivimimassiiv külmutada ühtseks monoliidiks. Antud töö puur-lõhketööde parameetrid arvutati raudteetunnelitele (Tabel 3), hooldustunnelile (Tabel 4), raudteetunnelit hooldustunneliga ühendavatele ristlābipāāsudele (Tabel 5) ja ülerõhku vähendavatele õhukanalitele (Tabel 6). 1 % kaldega tunneli läbindamismaht 5,71 km Ediacara liivakivides on 874 361 m³. Enne lõhketööde uue tsükli läbiviimist tuleb kaeveõõs tuulutada ja toestada.

12 Lisad

12.1 Lõhketööde arvutamise meetodika

Kaeveõõnte läbindamine ühe vaba pinnaga lõhkamisel [4].

Ee edasinihke samm, m:

$$L_b = l_d \eta$$

l_d – lõhkeaugu sügavus, m

η – lõhkeaugu kasutegur

Korruga lõhatava kivimi maht, m³:

$$V = AL_b$$

A – ee ristlõike pindala, m²

Suletustegur:

$$k_s = \frac{3 \times l_d}{\sqrt{A}}$$

Lõhkeaine erikulu, kg/m³:

$$q = q_1 k_1 k_s K_p$$

q_1 – lõhkeaine erikulu, kg/m³

k_1 – kivimi struktuuritegur

K_p – lõhkeaine parandustegur

Lõhkamiseks vajalik lõhkeaine kogus, kg:

$$Q = qV$$

Laengu keskmine mass ühes lõhkeaugus, kg:

$$Q_l = q_l l_d k_t$$

q_l – laengu jaotatud mass, kg/m

k_t – lõhkeaugu täitetegur

Laengute arv ee lõhkamiseks:

$$n = \frac{Q}{Q_l}$$

Lõhkeaine tegelik kulu, kg:

Tallinn-Helsingi tunneli puur-lõhketööde parameetrite väljatöötamine läbindamiseks Ediacara liivakivides. Kaarel Rebane

$$Q_{tegelik} = nQ_l + (n - n^*)Q_l$$

n^* - almurde lõhkeaukude arv
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m³:

$$q_{tegelik} = \frac{Q}{V}$$

Puurtööde maht, m:

$$PT = n^*l_{algm} + (n - n^*)l_d$$

l_{algm} – almurde lõhkeaukude pikkus, m
Puurtööde erimaht, m/m³:

$$pt = \frac{PT}{V}$$

13 Kasutatud kirjandus

- 1 Suuroja, K., All T., Kaljuläte, K., Kõiv, M., Morgen, E., Vahtra, T., Baaskaardi Tallinna (6334) ja Rohuneeme (7312) lehe geoloogilis-geofüüsikalise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine aruanne, Tallinn 2003.
- 2 Ikavälo, O., Vähäaho, I., Suuroja, S., Soil and Bedrock Conditions to be Expected in Tallinn-Helsinki Tunnel Construction. Strait Crossing. Brgen, 2013.
- 3 Herrenknecht AG. Mixshield TBM. [WWW] <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/mixshield.html> (20.05.2018).
- 4 Tomberg, T., Lõhketööd, TTÜ Mäeinstituut, Tallinn 1998.
- 5 Aasrand, M., kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tomberg, T., TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
- 6 Libman, D., kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tomberg, T., TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
- 7 Veersalu, K., kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tomberg, T., TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
- 8 Alvi, K., Acoustic-seismic survey along the proposed railway tunnel route options, between Helsinki and Tallinn 19.8-1.11.2016. Geological Survey of Finland. 2017.
- 9 Sweco Projekt AS, Vealeidja OÜ, Finantsakadeemia OÜ, Helsingi-Tallinna püsiühenduse tasuvuse eeluuring lõpparuanne, 2015.
- 10 FinEst Link Projekt. [WWW] <http://www.finestlink.fi/et/> (23.05.2018).
- 11 Malõšev, R., kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tomberg, T., TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
- 12 T. Tomberg, K. Veersalu. Mäenduslikud enamlevinud lõhketööd. Loengukonspekt. TTÜ Mäeosakond, Tallinn 2017.
- 13 Kanter, S., Jõhvi rauamaagikaevanduse avamise eelprojekt, magistr töö, TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
- 14 Bickel, J., Thomas R., Kuesel and Elwyn H. King, Tunnel Engineering Handbook – Second Edition, 1996.
- 15 Raukas, A., Teedumäe, A. (eds), Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn 1997.
- 16 King, M., Fire and water, the Crossrail experience. Crossrail. [WWW] <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/fire-water-crossrail-experience/> (27.05.2018)
- 17 Tomberg, T., Allmaarajatiste tuulutus, loengumaterjal, TTÜ Mäeinstituut, Tallinn 2015