



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Loodusteaduskond
Geoloogia instituut

**TALLINN-HELSINGI TUNNELI LÄBINDAMISE PUUR-
LÕHKETÖÖDE PARAMETRITE VÄLJATÖÖTAMINE SINISAVIS
JA GRANIIDIS**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Kristo Martin Vinni

Juhendaja: Tõnu Tomberg, MSc
Õppekava: YAEB14/15

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

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: Kristo Martin Vinni

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Tõnu Tomberg

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees: [nimi]

[allkiri ja kuupäev]

Tallinn-Helsinki tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Tallinna Tehnikaülikool

Geoloogia instituut

Lõputöö ülesanne

Töö ID		Õppekava	YAEB14/15
Üliõpilane	Kristo Martin Vinni	Matrikli nr.	143070YAEB
Töö liik	Bakalaureusetöö	Õppeaine kood	LG40LT
Juhendaja	Tõnu Tomberg	Ülesanne kehtib kuni	

Töö ülesanne

Tallinn-Helsinki tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis
--

Topic of the Thesis

Elaboration of parameters for blasting in development of Tallinn-Helsinki tunnel for blasting in blue clay and granite
--

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 keskkonnakaitseküsimused7. Järeldused

Seotud teadusteema ja/või sihtasutus

--

Tähtajad

Eelkaitsmine	01.06.2018	Kaitsmine	08.06.2018
--------------	------------	-----------	------------

Üliõpilane

Juhendaja

Konsultant

_____	_____	_____
nimi	alkkiri	kuupäev

Ülesanne kinnitatud

Ülesanne täpsustatud

Ülesanne pikendatud

_____	_____	_____
-------	-------	-------

Abstract

The Tallinn-Helsinki tunnel would be the fastest railway connection between Estonian and Finnish capitals. The tunnel has a total length of 103 km. Inclined part of the tunnel from Estonian side from earth surface to the crystalline rocks is about 19,3 km. In the Estonian side the tunnel will start from the port of Muuga in Viimsi peninsula. The slope of the route is 1% to ensure the safety of fast-moving trains. The tunnel has a maximum depth of 180 m below the sea level. Maximum rock pressure at the lowest point is 5,9 MPa. In total, two railway tunnels and one maintenance tunnel will be built, crossings will be developed after every 250 m and the channels for reducing the air pressure will be developed after every 200 m.

Mining conditions on the Estonian side of the tunnel are complicated due to artesian water and high rock pressure. To reach the crystalline basement, layers of sedimentary rocks must be passed through which the tunneling of each layer is different due to the variability of the mining conditions. Drilling and blasting method was selected as a tunneling technology. Tunneling starts with three parallel tunnels at the same time by drilling and blasting. The tunneling technology and rock pressure were taken into account for choosing the tunnels configurations to find the optimal shape which guides the rock pressure away from the tunnel.

In this work, the parameters for drilling and blasting was elaborated in blue clay and granite. With each drilling and blasting cycle the frontline moves 2,5 m in blue clay and in granite it's 3,4 m. After each blasting, the excavation site must be ventilated and supported with concrete.

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise suur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Sissejuhatus

Lõputöö eesmärgiks oli uurida Tallinn-Helsinki tunneli rajamise võimalusi ja tingimusi. Leida parameetrid tehnoloogiale, millega on võimalik rajada Tallinn-Helsinki tunnel. Antud töö käsitleb ainult Eesti poolset kaldosa sinisavis ja graniidis.

Antud raudteetunnel on väga vajalik pikendus tulevasele Rail Balticule, mis ühendaks Soome, Põhja-Rootsi ja Põhja-Norra Baltimaadega ühisesse raudteevõrku. Tunnel suurendaks turistide ja tööliste liikumist kahe pealinna vahel. Samuti lihtsustab ka kaupade vedu erinevate riikide vahel.

Tunnel on ka tähtis sõjalis-strateegiline ehitis. Seda kaudu saab konflikti ajal evakueerida tsiviilelanikke ja haavatuid Soome. Samuti on võimalik sõjatehnikat ja muud abisaadetisi tunneli kaudu Eestisse toimetada. Tunneli eelis on see, et Läänemere blokaadi korral on seda ikkagi võimalik kasutada.

Esimene eeluuring teostati 2015 veebruaris, kus Sweco Projekt AS ja teised poolt koostatud eeluuring Helsingi ja Tallinna vahelise merealuse tunneli maksumusest ja majanduslikust väljavaatest. Antud töö peaesmärk oli uurida, kas on põhjust raudteetunneli täiemahuliseks tasuvusuuringuks. Uuringust selgus, et merealuse raudteetunneli ehitamise ja halduskulud tasuks end reisipiletite- ja kaubaveotasudena ära 40 aasta jooksul. Suur osa reisija- kui kaubavoogudest jääks ka tunneli valmides laevaliiklusele.[1]

Tänan oma juhendajat Tõnu Tombergi igakülgse abi eest. Lisaks tänan heade soovitude ja nõuannete eest Geoloogia instituuti ja Rutt Hintsu ning tänan ka kõiki teisi, kes aitasid käesoleva töö tegemisel kaasa.

Sisukord

Autorideklaratsioon	2
Abstract	4
Sissejuhatus.....	5
1 Geoloogiline iseloomustus	10
1.1 Hüdrogeoloogia.....	11
2 Raudteetunneli trassi valik	12
2.1 Tunneli suudme asukoht.....	12
2.2 Trassi pikkus ja kallak	13
2.3 Tunneli läbindamine	13
3 Mäenduslikud tingimused	15
4 Läbindustehnoloogia valik.....	17
4.1 Variant 1.....	17
4.2 Variant 2.....	18
4.3 Tehnoloogia valik	18
5 Tunneli konfiguratsiooni valik	19
5.1 Variant 1.....	19
5.2 Variant 2.....	20
5.3 Tunneli konfiguratsiooni valik.....	20
6 Puur-lõhketööde tehnoloogia ja parameetrid	21
6.1 Raudteetunnel graniidis.....	22
6.2 Hooldustunnel graniidis.....	23
6.3 Ristläbipääsud graniidis	24

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise suur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

6.4 Löörid õhu rõhu vähendamiseks graniidis	25
6.5 Raudteetunnel savis.....	26
6.6 Hooldustunnel savis	27
6.7 Ristlääbipääsud savis	28
6.8 Löörid õhu rõhu vähendamiseks savis	29
7 Läbindamise tehnoloogia	30
7.1 Läbindamise maht.....	30
7.2 Kasutatavad mäemasinad	31
7.3 Toestik ja hüdroisolatsioon.....	32
7.4 Tuulutus eksploatatsiooni ajal	33
7.5 Tuulutuse protsess ja skeemid.....	33
Kasutatud kirjandus.....	37

Joonised

Joonis 1 Lihtsustatud geoloogiline läbilõige soome lahest [8]	10
Joonis 2 Tallinn-Helsingi tunneli võimalikud trassikoridorid [8]	12
Joonis 3 Valitud Tallinn-Helsingi tunneli trass [8]	12
Joonis 4 Trassi läbilõige [3].....	14
Joonis 5 Esimese variandi tunneli konfiguratsioon [3].....	19
Joonis 6 Teise variandi tunneli konfiguratsioon [3]	20
Joonis 8 Puuraukude sügavused sinisavis külgvaates	21
Joonis 7 Puuraukude sügavused graniidis külgvaates.....	21
Joonis 9 Puuraukude sügavused sinisavis pealtvaates.....	21
Joonis 10 Puuraukude jaotus ristlõikes	22

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Joonis 11 Puuraukude jaotus ristlõikes	23
Joonis 12 Puuraukude jaotus ristlõikes	24
Joonis 13 Puuraukude jaotus ristlõikes	25
Joonis 14 Puuraukude jaotus ristlõikes	26
Joonis 15 Puuraukude jaotus ristlõikes	27
Joonis 16 Puuraukude jaotus ristlõikes	28
Joonis 17 Puuraukude jaotus ristlõikes	29
Joonis 18 Puurvanker Sandvik (rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/mining-jumbos/dd422ie-development-drill-rig/)	31
Joonis 19 Komatsu kápplaadur (mining.komatsu/product-details/14bu27)	31
Joonis 20 Tunneli toestiku kihid savis (learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/11/7F-004-Figure-3.png)	32
Joonis 21 Tunneli tuulutamise üldine põhimõte [3]	34
Joonis 22 Põhimõtteline tupik ee tuulutus skeem [12].....	34
Joonis 23 Põhimõtteline tupikkaeveõõne tuulutus skeem [12].....	34

Tabelid

Tabel 1 Läbindamise pikkused erinevates kivimikihtides	13
Tabel 2 Mäerõhu arvutus kihtide kaupa	15
Tabel 3 Füüsikalise-mehaanilised omadused. [13]	16
Tabel 4 Puurlõhketööde parameetrid graniidis	22
Tabel 5 Puurlõhketööde parameetrid graniidis	23
Tabel 6 Puurlõhketööde parameetrid graniidis	24
Tabel 7 Puurlõhketööde parameetrid graniidis	25

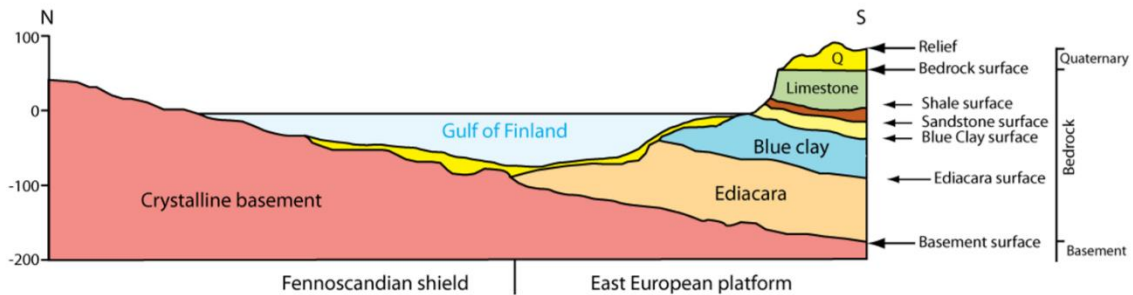
Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Tabel 8 Puurlõhketööde parameetrid savis	26
Tabel 9 Puurlõhketööde parameetrid savis	27
Tabel 10 Puurlõhketööde parameetrid savis	28
Tabel 11 Puurlõhketööde parameetrid savis	29
Tabel 12 Läbindamise mahud sinisavis	30
Tabel 13 Läbindamise mahud graniidis	30

Tallinn-Helsinki tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

1 Geoloogiline iseloomustus

Tunneli Tallinna poolne ots asub Ida-Euroopa platvormil ja Helsinki poolne ots asub Fennoskandia kilbil. Soome lahe lõunarannikul moodustavad geoloogilise aluskorra Proterosoikumi kristalsed kivimid. Nendel lasuvad Ediacara (Vendi), Kambriumi ja Ordoviitsiumi settekivimid ning kvaternaari setted (Joonis 1).



Joonis 1 Lihtsustatud geoloogiline läbilõige soome lahest [8]

Ordoviitsiumi ajastu kivimite paksus kokku on umbes 25 m, millest 17 m moodustab Kesk-Ordoviitsium ja 8m Alam-Ordoviitsium. Kesk-Ordoviitsiumi kompleks koosneb glaukoniiti sisaldavast lubjakivist, savikast lubjakivist või puhtast lubjakivist. Alam-Ordoviitsiumi kompleks koosneb glaukoniitliivakivist, oobulusliivakivist või graptoliitargiliidist. [15]

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 Viimsipoolsaare vahelisel alal. [2]

Tiskre kihistu (11–20 m) koosneb suhteliselt ühetaolisest, hele- kuni kollakashallist jäme-terisest kvartsaleuroliidist või pisiterisest kvartslivakivist. Kihistu alaosas on rohkesti rohekashalli, glaukoniiti sisaldava savika aleuroliidi vahekihte. Tiskre liivakivid on oluliseks põhjavett kandvaks kihindiks. Kihistu paksus on minimaalne sellel lasuva Ülgase kihistu levialal. [2]

Lükati kihistule, paksusega 10–16 m, on iseloomulik aleuroliidi või pisiterise kvartslivakivi vahekihtidega rohekashall aleuriitsavi (60–70 %), mis moodustab sinisavilasundi ülaosa. Kihistu ülaosas on valdavaks liivakivi, alaosas – savi. Kihistu alumisel piiril on tavaliselt mõne sentimeetri paksune, fosfaatsetest veeristest basaalkonglomeraadi kiht. Põhja-Eestis on kõige paremaks veepidemeks sinisavilasund [2]

Lontova kihistu on 65–80 m paks ja see on alal settekivimilise pealiskorra kõige paksem kivimkeha. Kihistu koosneb rohekashallist kuni kirjuvärvilisest, vähesel määral aleuriiti ja liiva sisaldavast argilliidilaadset savist – sinisavist. Kihistus on eristatavad, ja seda põhiliselt aleuriidi ja liiva sisalduse alusel, 4 kihistikku (ülevallt alla): Tammneeme (kuni 10 m glaukoniitliiva sisaldavat sinisavi), Kestla (30–40 m puhast argilliidilaadset sinisavi), Mahu (umbes 10 m liiva lisandiga sinisavi) ja Sämi (15–20 m liivakivi ja sinisavi vaheldumist). Lontova lademe piiritlemisel on põhilisteks diagnostilisteks tunnusteks rõngussi jäljendidja püriidistunud ussikäigud. [2]

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise suur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Kroodi kihistu koosneb pisi- kuni keskterisest, keskmiselt kuni nõrgalt tsementeerunud liivakivist, milles erinevatel tasemetel esineb kirjuvärvilise (punakaspruun kollakate ja rohekashallide laikudega) õhukesti savika aleuroliidi vahekihte. Kihistu alumisel piiril on kohati kuni 1 m paksune, jämeterisest keskmiselt kuni nõrgalt tsementeerunud liivakivist, graveliidist või peenkonglomeraadist koosneva basaalkonglomeraadi kiht. [2]

Vendi kompleks Kotlini lademesse kuuluvad neoproterosoilise vanusega purdkivimid lasuvad transgressiivselt, kirdesse pakseneva 40–60 m paksuse lasundina aluskorra murenemiskoorikul. Gdovi ja Voronka kihistu ei ole alal teineteisest enam selgelt eristatavad ja seetõttu vaadeldaks alal Vendi ühtsena Kroodi kihistu koosseisus. [2] Sämi kihistu koosneb vahelduvatest liivakivi ja savikilda kihtidest, mis sisaldavad glaukoniiti. [16]

Kristalse aluskorra pealispind lasub alal 100–160 m allpool merepinda ja see laskub lõuna suunas 2–3 m kilomeetri kohta. Ala lauskurrutatud kristalne aluskord, mis on esindatud migmatiidistunud moondekivimitega kuulub struktuurilt Jägala kompleksi. Pindmises osas on aluskorra kivimid 1–20 m ulatuses murenenud, moodustades pindmise murenemiskooriku, mis on veega küllastunud. Selle paksus on sõltuvuses nii aluskorra kivimite mineraalsest koostisest, aga ka nende lõhelisusest. [2]

1.1 Hüdrogeoloogia

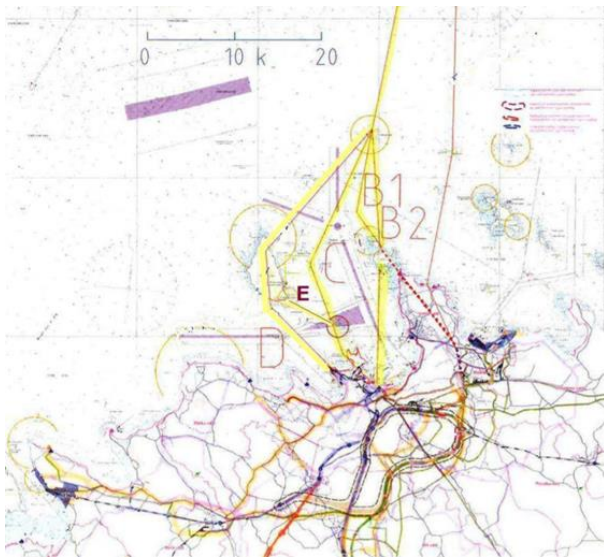
Geoloogiliste ja hüdrogeoloogiliste tingimuste tõttu on mäendustingimused keerulised. Arvestada tuleb suure vee eritumisega Ediacara liivakivides ning kristalse aluskorra murenemiskoorikus. Karbonaatkivimid on suure tõenäosusega kihilised ja lõhkelised- mõjutab lae püsivust ning on samuti täiendava vee juurdepääsu allikaks.[6] Põhja Eestis on looduslikes tingimustes voronka põhjaveekihi potentsiaalne survepind 3-5 m üle mere pinna. Kristalses aluskorras on põhjaveega küllastunud ainult ülemine murenenud osa, kus põhjavee looduslik potentsiaalne survepind ühtib Kambrium-Vendi põhjaveekihiga. [16]

Kambrium-Vendi põhjaveekihid levivad üle kogu Eesti Kambriumi ja Vendi ladestu terrigeensetes kivimites sealhulgas ka mere all Soome lahe lõuna osas. Kambrium-Vendi põhjavesi on hästi kaitstud maapinnalt lähtuva reostuse eest. Antud põhjavesi on survealine, kus vesi liigub vett andva liivakivi ja aleuroliidi poorides ja kohati ka lõhkedes. Mattunud orgude läheduse on Kambriumi–Vendi veekihtide vesi moodustunud jääajal Eesti ala katnud mandrijää sulamisveest ja tänapäeva sademete infiltratsiooniveest. Mattunud orgudest kaugemal on vesi kümneid kordi vanem. [14]

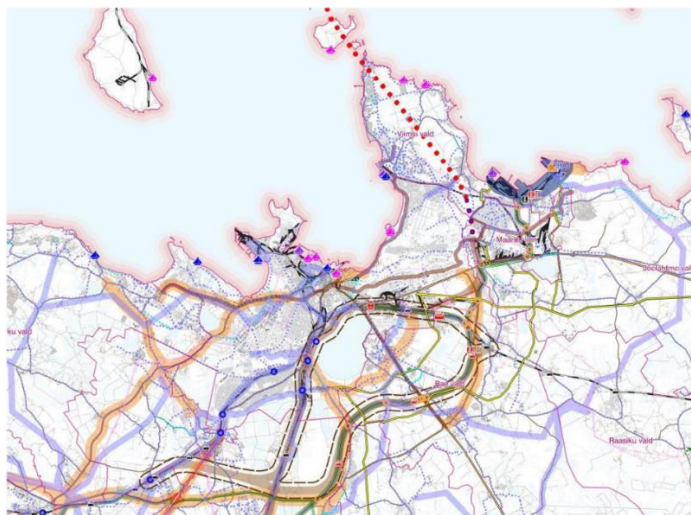
2 Raudteetunneli trassi valik

2.1 Tunneli suudme asukoht

Antud projekti raames on vajalik arvestada asjaoluga, et tulevane raudtee tunnel oleks võimalik hõlpsasti ühendada olemasoleva raudteetrassiga, millega saab tagada sujuva kaupade ja reisijate veo. Tunneli Tallinna poolses otsas on välja pakutud viis erinevat tunneli trassi (Joonis 2). Arvestades piirkonna geoloogiat ja Soome Geoloogiateenistuse seismoakustilist uuringut valiti parimaks trassi variandiks B1. Valitud variandi puhul läheb raudteekoridor pikki Viimsi poolsaart ning seda saab ühendada kohaliku Maardu raudteevõrguga (Joonis 3).



Joonis 2 Tallinn-Helsingi tunneli võimalikud trassikoridorid [8]



Joonis 3 Valitud Tallinn-Helsingi tunneli trass [8]

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise suur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

2.2 Trassi pikkus ja kallak

Eelnevas peatükis valitud raudteetrassi kogupikkuseks tuleb Tallinnast Helsingisse 103 km. Rajatav raudtee ühendatakse Maardu lähisel olemasoleva raudteega, mis tagab lihtsama ühenduse ülejäänud raudtee võrguga. Tagamaks rongide ohutu sõitmise tunnelis suurtel kiirustel võib trassi kalle olla maksimaalselt 2%.

Profiili kalle on kõige olulisem faktor raudteerajatise juures. Lubatud kalle sõltub tavaliselt raudtee pikkusest, tunneli ristlõikest ja sõitude tihedusest. Hollandlased on leidnud, et teostatav on raudteetunnel mille kalle on 2,5%. Näiteks Seika tunnel Jaapanis on maksimaalse kaldega 1,2% ja Mt. Macdonaldi tunnel Kanadas on 0,7% kaldega. [10]

2.3 Tunneli läbindamine

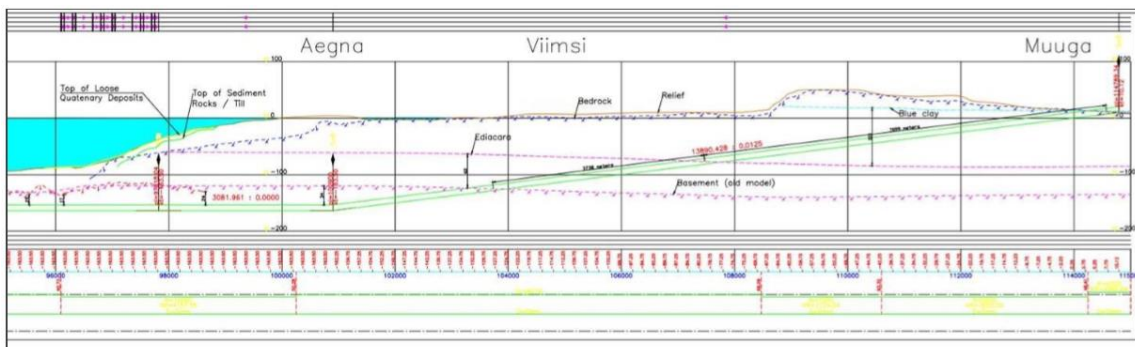
Kristallse aluskorrani jõudmiseks on Eesti poolse tunneli rajamisel läbida mitu settelist kivimikihti (Tabel 1). Antud töös on käsitletud tunneli läbindamist Eesti poolse kaldosa sinisavis ja graniidis (Joonis 4). Peale kaldosa läheb tunnel üle horisontaalseks kuni hakkab Helsingi pool jälle tõusma. Enamus tunneli pikkusest toimub läbindamine Proterosoikumi kristalsetes kivides – graniitides, gneissides, kus on läbindus tööde tegemine suhteliselt lihtne.

Kivimite kihtide paksused ja nendest tulenevad läbindamise pikkused on võetud 1971 aasta puursüdamiku geoloogilisest kirjeldusest Maa-ameti Geoportaalist puuraugu nimega F127 Merivälja.

Tabel 1 Läbindamise pikkused erinevates kivimikihtides

Kiht	Läbindamise pikkus, km
Kvaternaari setted	0,86
Tiskre kihistu	0,74
Lükati kihistu	1,7
Lontova savi	4,11
Sämi kihistik	2,73
Ediacara liivakivid	5,71
Kristallne aluskord	3,5

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni



Joonis 4 Trassi läbilõige [3]

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

3 Mäenduslikud tingimused

Tallinn-Helsingi tunneli rajamise mäendustingimused on keerulised. Rajatava tunneli pikkus on 103 km ja maksimaalne sügavus on kuni 180 meetrit merepinnast. Mäerõhu suurus kõige alumistes kihtides on kuni 5,9 MPa (Tabel 2).

Vee eritumus on kõige suurem Ediacara liivakivides, mis on oluline põhjavee allikas Tallinna linna ja selle ümbruses. Sealse Kambrium-Vendi põhjavee kihi potentsiaalne surve on 2-5 meetrit üle mere pinna. Põhjavee surve Vendi põhjavee kihis on ligikaudu 1,7 MPa. [16] Samuti on veega küllastunud murenenud kristalse aluskorra ülemised 20 m. Läbindamise võivad muuta keeruliseks abrasiivsed liivakivid ja pudedad setted. Samuti tuleb arvestada, et kristalse aluspõhja 1-20 m paksune ülemine osa on murenenud. Läbindamisel graptoliit-argilliiti, tuleb arvestada võimaliku radooni eritumisega kivimitest ja selle kogunemist kaeveõntes. [4]

Kivimikihtide füüsikalise-mehaanilised omadused on toodud tabelis (Tabel 3).

Tabel 2 Mäerõhu arvutus kihtide kaupa

Kiht	Paksus	Mahumass	Kivimi mäerõhk		Mäerõhk kivimis
	m	kg/m ³	Pa	Mpa	Mpa
Kvaternaari setted	8,6	1850	155918	0,16	0,16
Tiskre kihistu	7,4	2025	146853	0,15	0,30
Lükati kihistu	17	1950	324870	0,32	0,63
Sinisavi	41,1	2350	946533	0,95	1,57
Sämi	27,3	2300	615342	0,62	2,19
Survelise põhjavee rõhk			1700000	1,70	3,89
Ediacara	57,1	2150	1203097	1,20	5,09
Murenenud kristalliline aluksord	20	2300	450800	0,45	5,54
Rabakivigraniit	15	2650	389550	0,39	5,93
		Kokku	5932963	5,93	

Tabel 3 Füüsikalised-mehaanilised omadused. [13]

		Mahukaal	Survetugevus	Poorsus	P-lainete kiirus	Kihi paksus
		G/cm ³	MPa	%	m/s	m
Kvaternaarisetted	L	1,5-2,2	<1	10-30	1500-2000	0-60
Lubjakivi	K	2,55-2,65	100-150	0,1-5,5	4000-5500	20
Graptoliit-argilliit	J	1,9-2,0	40-50	1-10	3500-4000	3,5
Glaukoniitliivakivi	I	1,95-2,1	1-20	1-10	2500-3000	2
Liivakivi	H	2,1-2,8	1-40	1-20	2500-3500	3-8
Sinisavi	G	2,3-2,4	2-4 MPa	8-10	2000-2500	45
Liivakivi	F	2,1-2,2	1-5 MPa	20-25	2500-3000	15
Aleuroliit	E	2,25-2,35	5-25	10-15	2500-3500	1-2
Liivakivi	D	2,0-2,3	1-25	10-20	2000-3000	60
Murenenud kristallne aluskord	C	2,0-2,6	1-100	1-20	2000-5000	1-20
Rabakivigraniit	B	2,65	100-200	0,1	6000-6500	
Proterosoikumi gneiss	A	2,65-2,75	110-240	0,1-0,2	6000-6300	

A- Jägala kompleksi kivimid; B- Naissaare ja Neeme rabakivigraniit; C-murenenud kristalsed 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- Kvaternaarisetted.

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

4 Lâbindustehnoloogia valik

Tallinn-Helsingi tunneli lâbindamine on keeruline, sest Tallinna poolt on vaja lâbindada mitu erinevat settekivimite kihti. Iga kiht nõuab tãnu oma muutuvate fûsikalise mehaaniliste omaduste tõttu erinevaid lâbindamise viise. Tunneli lâbindamiseks on kaks erinevat võimalust: puur-lõhketõõd, lâbindamine kilplâbinduskombainiga.

4.1 Variant 1

Esimene variandi puhul kasutatakse tunneli lâbindamiseks puur-lõhketõõd, kus veega küllastunud kihtides tuleb kasutada maapinna külmutamist. Lõhkeaukude puurimiseks kasutatakse puurvankreid. Lõhkeaukude sügavus oleneb kivimi omadustest ja ee ristlõike pindalast. Peale lõhkeaukude puurimist toimub lõhkeaukude laadimine lõhkeainega. Laengu initsieerimiseks kasutatakse viitega detonaatoreid. Peale lõhkamist transporditakse raimatud materjal välja ja ladustatakse vastaval platsil maa peal. Tunneli lagi ja seinad toestatakse. Peale toestamist võib alustada uue puur-lõhketõõde tsükliga. Lõhketõõde optimaalsed parameetrid esitatakse lõhketõõde projektis. [3]

Kõige keerulisemad tingimused puur-lõhketõõd teha on veega küllastunud kihtides. Kõige paksem kiht (60 m) on Ediacara liivakivid, kus on survealine põhjavesi. Antud põhjaveekiht on kõige olulisem puhta joogivee allikas Tallinna linnale ja selle lâhiõmbrusele. Sellistes oludes lâbindamisel tuleb kivimikihti külmutada nii kaua kuni pinnas moodustab monoliidi, seejãrel saab alustada puur-lõhketõõde tsükliga. Veerikastes kihtides on vajalik kasutada hõdroisolatsiooni. [3]

Geoloogilisest lâbilõikest moodustavad suure osa liivakivid, milles on raskendatud lõhkeaukude puurimine. Liivakivid on vãga abrasiivsed, mistõttu ei saa seal kasutada tavapãrast keerdpuurimist, selle asemel tuleks kasutada lõõk-keerdpuurimist, mis aitab vãltida puurpeade suurt kulumist ja pikendab nende tõõiga. Savides ja graniidis on puur-lõhketõõde tegemine lihtsam. [3]

Õheajaliselt alustatakse kolme tunneli lâbindamist. Selline variant võimaldab lõhketõõde lâbiviimisel varjuda paralleelsesse tunnelisse ja peale lõhkamist tõõfront korralikult tuulutada. Peale lõhkamist tuleb kaevis koheselt koristada ning tunnel toestada, et saaks alustada uue puur-lõhketõõde tsükliga. Toestamisega paralleelseselt pikendatakse ka raudteerõõpaid. [3]

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

4.2 Variant 2

Teise variandina saab kasutada tunneli läbindamiseks kilpläbinduskombaini (TBM). Efektiivseks kombainiga läbindamiseks on vaja valida läbinduskombain, mis vastab kivimite füüsikalismehaanilistele omadustele ja geoloogilistele tingimustele. Kilpläbinduskombain on võimeline läbindama erinevate omadustega kivimeid, nt graniidid, liivad. Kombaini läbindamisel tekib ümmarguse ristlõikega kaeveõõs, mille läbimõõt võib olla kuni 20 m.[3]

Kilpläbinduskombaini eeliseks on pidev läbindamine. Üheaegselt toimub materjali raimamine, purustamine, transportimine ning tunneli toestamine. Kombaini kasutamisel on mõju ümbritsevale keskkonnale väiksem kui puur-lõhketöödel. [3]

Tallinn-Helsingi tunneli Eesti poolel on tegemist keeruka pinnasega, kus kihiti vahelduvad erinevate füüsikalismehaaniliste omadustega kivimid. Kombaini läbindamisel tuleb arvestada suure mäerõhuga ning survele põhjaveega. [3]

Ettevõtte Herrenknecht toodab kilpläbinduskombaine, mis on projekteeritud läbindama ühekorraga erinevates geoloogilistes kivimites. Kombainiga saab läbindada tunneleid raadiusega kuni 19 meetrit. Kombaini esiosas on kaks kambrit, millest üks on täidetud suspensiooniga et toetada töö ett, teises kambri toimub mäerõhule vasturõhu hoidmine suruõhuga. Kombaini suletud süsteemi tõttu saab seda kasutada ka veega küllastunud pinnases. [3]

Lõikehambad on paigutatud nii, et vähendada detailide kulumist ning et materjali liikumine tööfrondis oleks optimaalne. Raimamise käigus tekkivate ülegabariidiliste kivimite purustamiseks on kombain varustatud lõugpurustiga, mis purustab raimatud materjali sobiva suurusega tükkideks. [3]

Tunneli sügavus on üks võtme faktoritest kilpläbinduskombaini kasutamisel ja potentsiaalne ülekoormus, mis tekib suurest mäerõhust, väiksest kivimi tugevusest ja tekkivatest pingetest. Neid tavaliselt ei kasutata pikkades ja sügavates tunnelites, kus suur mäerõhk ja nõrgad kivimid tekitavad masinale suuri ülekoormuseid. [17] Kilpläbinduskombaine on kasutatud võrdlemisi palju maailmas. Peamiselt kasutatakse neid suurlinnades metroo tunnelite läbindamisel. Teadaolevalt on läbindamisel maksimaalne mäerõhk olnud 1,5 MPa. [3] Eesti tingimustes on arvutuslik mäerõhk 5,9 MPa, mis on ca 4 korda suurem kui seni maailmas praktiseeritud.

4.3 Tehnoloogia valik

Arvesse võttes geoloogilisi ja mäenduslikke tingimusi antud trassi ulatuses tuleb läbindamiseks valida puur-lõhke tööd. Tähtsamaks teguriks on suur mäerõhk ja survele põhjavees töötamine. Liivakivi läbindamisel tuleb kasutada koos puur-lõhketöödega ka külmutamist. Igas kihis on vajalik kasutada erinevaid puurimis tehnoloogiaid. Graniidis tuleb puurida löök-keerd puurimisega, savis aga keerd-löök puurimisega. Läbindamine toimub kõigis kolmes tunnelis, mis võimaldab lõhketööde toimumise ajal varjuda paralleelsesesse tunnelisse.

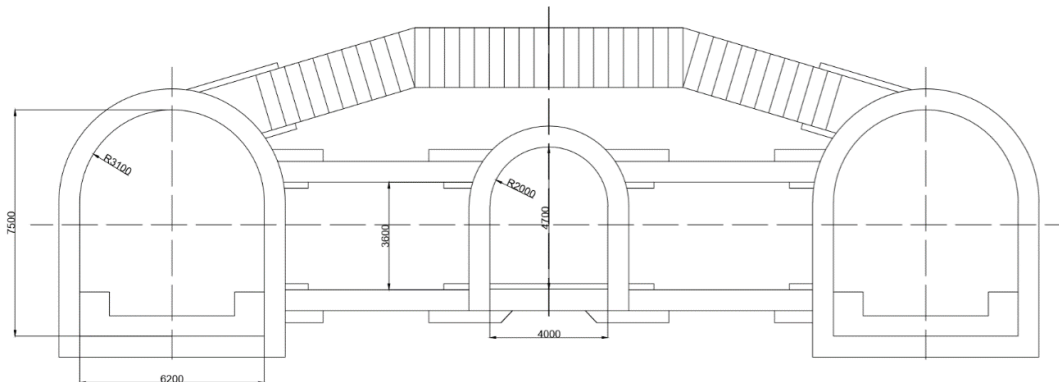
Antud tunneli läbindamisel kilpläbinduskombainiga on suurimateks puudusteks tihendid, mis ei pea nii suurele mäe ja vee rõhule vastu. Samuti on probleem lõikepeade vahetamisega, sest töölisel ei saa viibida pikalt suure rõhuga kambri, mille järel peavad nad olema pikalt dekompressiooni kambri.

5 Tunneli konfiguratsiooni valik

Tunneli konfiguratsiooniks pakutakse välja kaks variant. Esimene variandi tunneli läbilõige on võlvprofiil (Joonis 5). Teise variandi tunneli läbilõikeks on ring (Joonis 6). Lõõrid ülerõhu vähendamiseks ehitatakse iga 200-250 meetri ja ristlõikepääsud iga 250-300 m tagant. Tunneli konfiguratsioon peab olema läbimõeldult minimaalne, see tähendab, et tunneli läbilõike suurus valitakse lähtuvalt rongi, ventilatsiooniseadmete, perrooni ja vajalike piirete mõõtmetest. [3]

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 ohtlik lubada sõiduautosid nii pikka veealusesse tunnelisse. Euroopa Liidu määrused turvasüsteemidele, tunnelite ja päästemehhanismide kohta suurendaksid sellise lahenduse investeringu- ja opereerimiskulud väga suureks, mistõttu võiks tunneli rajamine osutada ebamõistlikuks. Nendel põhjustel baseerub käesolev uuring raudteetunneli lahendustele. [11]

5.1 Variant 1



Joonis 5 Esimese variandi tunneli konfiguratsioon [3]

Tunneli konfiguratsiooni esimeses variandis on tunneli läbilõige võlvikujuline. Tunneli sisemine laius on 6,2 m, kõrgus 7,5 m ja võlvi raadius 3,1 m. Raudteetunneli ja hooldustunnelit ühendab ristlõikepääs. Ristlõikepääsu laius on 3 m ja kõrgus 3,6 m ja võlvi raadius 1,5 m. Hooldustunneli laius on 4 m ja kõrgus 4,7 m ja võlvi raadius 2 m. Ülerõhu vähendamiseks on lõõr, mille läbimõõt on 2 m. [3]

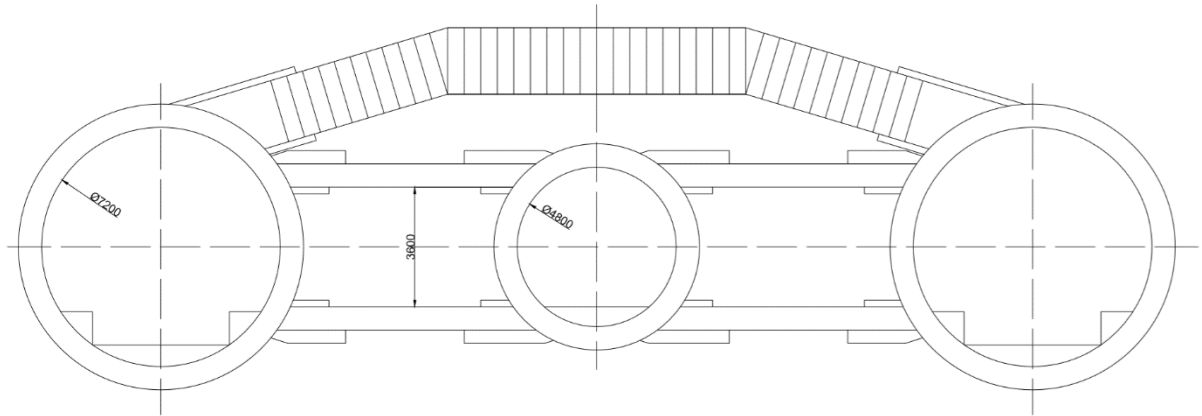
Antud tunneli konfiguratsioon on kõige optimaalsem puur-lõhketöödega läbindamisel.

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

5.2 Variant 2

Tunneli konfiguratsiooni teises variandis on läbilõikeks ring, mille sisemine diameeter on 7,2 m. Hooldustunnelit ja raudteetunnelit ühendav ristlõbipääs on diameetriga 3,6 m. Hooldustunneli diameeter on 4,8 m. Ülerõhu vähendamiseks ehitatakse lõõrid, mille läbimõõt on 2 m. [3]

Antud tunneli konfiguratsioon on sobilik kilpläbinduskombainiga läbindamisel.



Joonis 6 Teise variandi tunneli konfiguratsioon [3]

5.3 Tunneli konfiguratsiooni valik

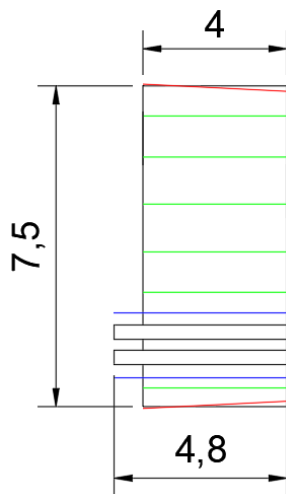
Peatükis 4.3 valitud puur-lõhketööde tehnoloogia alusel valitakse tunneli kujuks variant 1, kus tunneli ristlõige on võlvikujuline. Tulenevalt võlvi teoriast on selline läbilõige parim mäerõhu ümbersuunamiseks kaeveõõnes. Raudtee tunneli laius on valitud piisav, arvestades rongi laiust ja perrooni, et vajaduse korral oleks võimalik rongist ohutult väljuda. Tunnelite vahekaugused on valitud piisavalt suureks, et nende vahelised tervikud oleks võimelised vastu pidama suurenenud mäerõhule.

6 Puur-lõhketööde tehnoloogia ja parameetrid

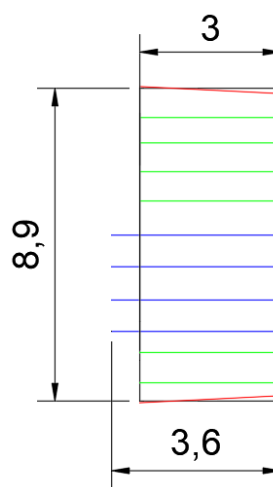
Lõhkamiseks kasutatakse padrundatud dünamiiti, laengute initsieerimiseks kasutatakse programmeeritavaid elektrilisi detonaatoreid ja kõik lõhkeaugud initsieeritakse suudme poolt. Lõhates on algmurde, raima- ja kontuurlaengud eraldi viiteseeriates. Täiendava vaba pinna tekkides pärast algmurde laengute plahvatamist järgneb raimalaengute lõhkamine, kus kasutatakse lühiviitlõhkamist ning lõhkamine toimub spiraalselt. Viimases viiteseerias on kontuurlaengud, mis laetakse üle ühe. Nii tekitatakse kontuurlõhkelaengute vahele täiendav vaba pind, mille suunas lõhkeauk töötab. Kontuurlaengud initsieeritakse sarnaselt raimalaengutega spiraalselt vabapinna ümber. Lõhkamine toimub korraga ainult ühes ees. Lõhkamise ajal tuleb varjuda paralleelsesse tunnelisse.

Peale raimalaengute laadimist on vaja laenguaugud korralikult topistada. Topiseks kasutatakse saviliiva segu. Kontuurlõhkeauke ei topistata, et vähendada lõhede tsooni lõhkeaukude taga. Graniidis puuritakse täiendavaks vabaks pinnaks suurema läbimõõduga puurauk läbimõõduga 400(Joonis 7). Sinisavis kasutatakse kaldlaengutega püstkiil algmurret (Joonis 8)(Joonis 9). Lõhkeaugu on kahe erineva läbimõõduga, raima- ja algmurde augud on 50mm läbimõõduga ja kontuurlaengud on 45mm.

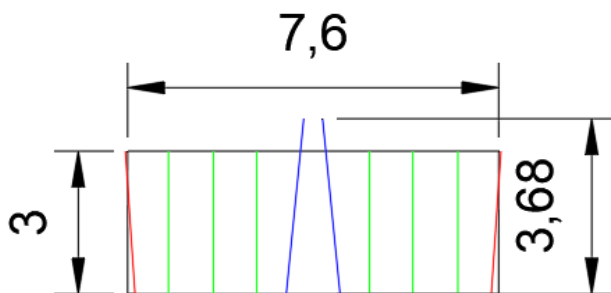
Kontuurlaengute lõhkamisega antakse kaeveõõnele projektis ettenähtud kuju ja mõõtmed. Need lõhkeaugud puuritakse kuni 3% kaldu kaeveõõne kontuuri suunas, kusjuures pehmetes kivimites lõhkamisel ulatuvad kontuurlõhkeaukude otsad kaeveõõne kontuurini, tugevdes kivimites aga 5...10 cm kontuurist väljapoole. [9]



Joonis 8 Puuraukude sügavused graniidis külgvaates



Joonis 7 Puuraukude sügavused sinisavis külgvaates



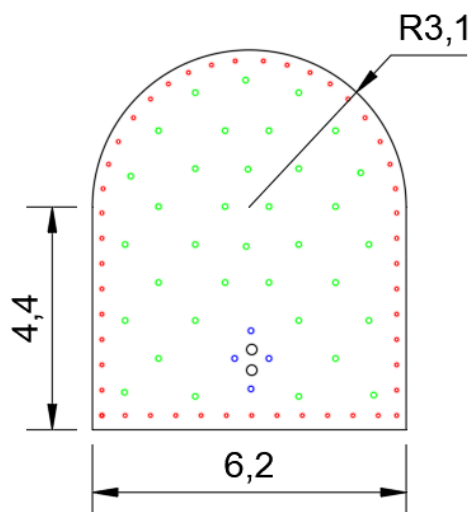
Joonis 9 Puuraukude sügavused sinisavis pealtvaates

6.1 Raudteetunnel graniidis

Algmurdeks on valitud prisma algmurre koos ette puuritud suure läbimõõduga puurauguga (Joonis 10). Kuna kivim on habras ja monoliitne, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 4 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 4). Antud kaeveõone ristlõike pindala on 44,6 m².

Tabel 4 Puurlõhketööde parameetrid graniidis

Lõhkeaugu pikkus, m	4
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	3,4
Ee ristlõike pindala, m ²	44,6
Korraga lõhatava kivimi maht, m ³	152
Suletustegur k _s	1,8
Lõhkeaine erikulu	1,5
Vajalik lõhkeaine kogus	224,7
Algmurde lõhkeaukude arv n*	4
Algmurde puuraukude pikkus, m	4,8
Raima- ja kontuurlaengute mass, kg	3,8
Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m	0,8
Kontuurlaengute arv	24
Raimalaengute arv	31
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	245
Padrunite arv	122
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	1,6
Puurtööde maht, m	351,2
Puurtööde erimaht, m/m ³	2,3



Joonis 10 Puuraukude jaotus ristlõikes

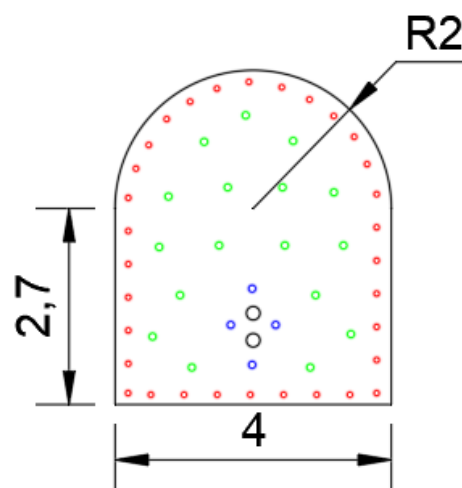
Tallinn-Helsinki tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

6.2 Hooldustunnel graniidis

Algmurdeks on valitud prisma algmurre koos ette puuritud suure läbimõõduga puurauguga (Joonis 11). Kuna kivim on habras ja monoliitne, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 4 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 5). Antud kaeveõõne ristlõike pindala on 18,5 m².

Tabel 5 Puurlõhketööde parameetrid graniidis

Lõhkeaugu pikkus, m	4
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	3,4
Ee ristlõike pindala, m ²	18,5
Korruga lõhatava kivimi maht, m ³	63
Suletustegur k _s	2,8
Lõhkeaine erikulu	2,3
Vajalik lõhkeaine kogus	144,7
Algmurde lõhkeaukude arv n*	4
Algmurde puuraukude pikkus, m	4,8
Raimalaengute mass, kg	4,5
Kontuurlaengute mass, kg	3,2
Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m	0,8
Kontuurlaengute arv	16
Raimalaengute arv	17
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	145
Padrunite arv	73
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	2,3
Puurtööde maht, m	231,2
Puurtööde erimaht, m/m ³	3,7



Joonis 11 Puuraukude jaotus ristlõikes

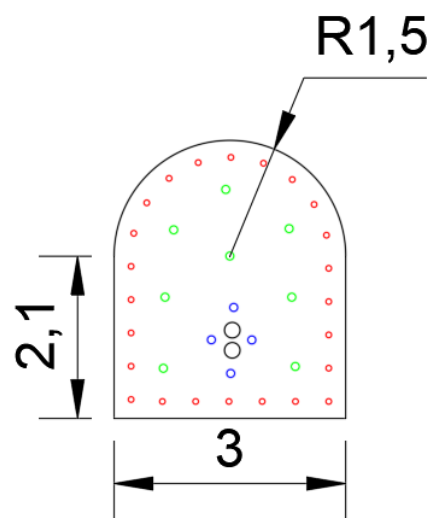
Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

6.3 Ristlõikepääsud graniidis

Algmurdeks on valitud prisma algmurre koos ette puuritud suure läbimõõduga puurauguga (Joonis 12). Kivim on habras ja monoliitne, kuid tänu väiksele ristlõike pindalale oleks suletustegur ja lõhkeaine erikulu põhjendamatult liiga suur, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 3 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 6). Antud kaeveõõne ristlõike pindala on 10,9 m².

Tabel 6 Puurlõhketööde parameetrid graniidis

Lõhkeaugu pikkus, m	3
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	2,5
Ee ristlõike pindala, m ²	10,9
Korraga lõhatava kivimi maht, m ³	28
Suletustegur k_s	2,7
Lõhkeaine erikulu	2,2
Vajalik lõhkeaine kogus	62,5
Algmurde lõhkeaukude arv n^*	4
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	8
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	69
Padrunite arv	35
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	2,5
Puurtööde maht, m	122,4
Puurtööde erimaht, m/m ³	4,4



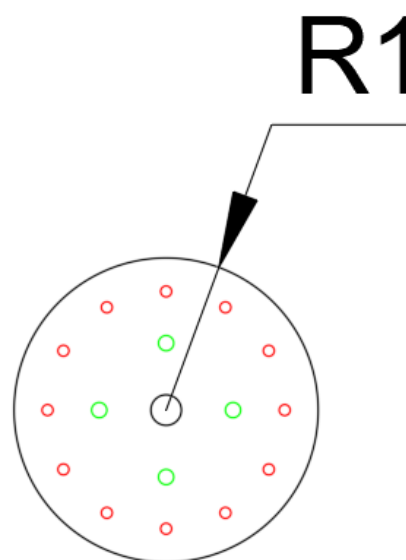
Joonis 12 Puuraukude jaotus ristlõikes

6.4 Lõõrid õhu rõhu vähendamiseks graniidis

Algmurdeks on valitud ettepuuritud algmurre (Joonis 13). Kivim on habras ja monoliitne, kuid tänu väiksele ristlõike pindalale oleks suletustegur ja lõhkeaine erikulu põhjendamatult liiga suur, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 3 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 7). Antud kaeveõõne ristlõike pindala on 3,6 m².

Tabel 7 Puurlõhketööde parameetrid graniidis

Lõhkeaugu pikkus, m	2
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	1,7
Ee ristlõike pindala, m ²	3,6
Korraga lõhatava kivimi maht, m ³	6
Suletustegur k _s	3,2
Lõhkeaine erikulu	2,6
Vajalik lõhkeaine kogus	15,9
Algmurde puuraukude arv n*	1
Algmurde puuraukude pikkus, m	2,4
Raimalaengute mass, kg	2,2
Kontuurlaengute mass, kg	1,6
Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m	0,4
Kontuurlaengute arv	6
Raimalaengute arv	4
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	18,6
Padrunite arv	10
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	2,8
Puurtööde maht, m	37,6
Puurtööde erimaht, m/m ³	6,2



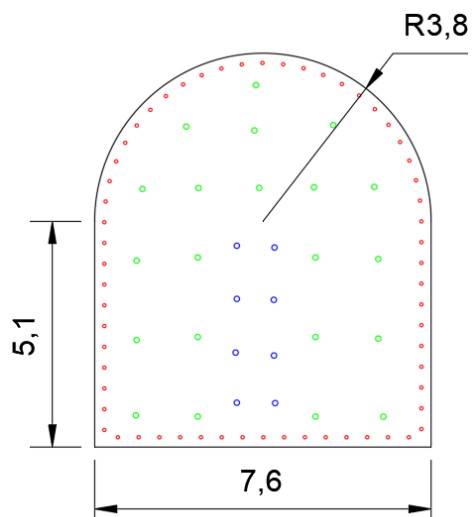
Joonis 13 Puuraukude jaotus ristlõikes

6.5 Raudteetunnel savis

Algmurdeks on valitud püstkiil algmurre (Joonis 14). Kuna kivim on sitke ja monoliitne, siis lõhkeaugu pikkuseks on võetud 3 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 8). Antud kaeveõõne ristlõike pindala on 61,4m².

Tabel 8 Puurlõhketööde parameetrid savis

Lõhkeaugu pikkus, m	3
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	2,55
Ee ristlõike pindala, m ²	61,4
Korraga lõhatava kivimi maht, m ³	157
Suletustegur k _s	1,1
Lõhkeaine erikulu	1,2
Vajalik lõhkeaine kogus	188,9
Algmurde lõhkeaukude arv n*	8
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	30
Raimalaengute arv	21
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	169
Padrunite arv	85
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	1,1
Puurtööde maht, m	281,4
Puurtööde erimaht, m/m ³	1,8



Joonis 14 Puuraukude jaotus ristlõikes

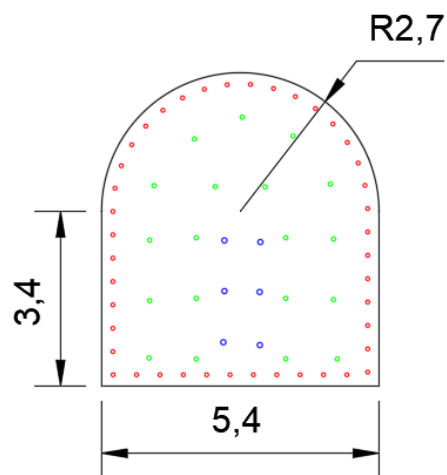
Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

6.6 Hooldustunnel savis

Algmurdeks on valitud püstkiil algmurre (Joonis 15). Kuna kivim on sitke ja monoliitne, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 3 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 9). Antud kaeveõõne ristlõike pindala on 28,5 m².

Tabel 9 Puurlõhketööde parameetrid savis

Lõhkeaugu pikkus, m	3
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	2,55
Ee ristlõike pindala, m ²	28,5
Korraga lõhatava kivimi maht, m ³	73
Suletustegur k _s	1,7
Lõhkeaine erikulu	1,8
Vajalik lõhkeaine kogus	128,7
Algmurde lõhkeaukude arv n*	6
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	21
Raimalaengute arv	19
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	134
Padrunite arv	67
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	1,8
Puurtööde maht, m	215,4
Puurtööde erimaht, m/m ³	3,0



Joonis 15 Puuraukude jaotus ristlõikes

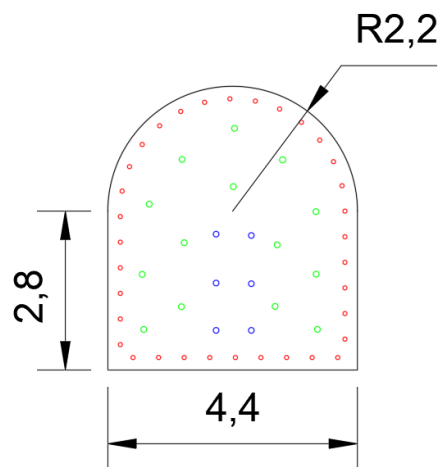
Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

6.7 Ristlõhkepääsud savis

Algmurdeks on valitud püstkiil algmurre (Joonis 16). Kuna kivim on sitke ja monoliitne, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 3 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 10). Antud kaeveõõne ristlõike pindala on 19,9 m².

Tabel 10 Puurlõhketööde parameetrid savis

Lõhkeaugu pikkus, m	3
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	2,55
Ee ristlõike pindala, m ²	19,9
Korraga lõhatava kivimi maht, m ³	51
Suletustegur k _s	2,0
Lõhkeaine erikulu	2,1
Vajalik lõhkeaine kogus	107,6
Algmurde lõhkeaukude arv n*	6
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	14
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	108
Padrunite arv	54
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m ³	2,1
Puurtööde maht, m	176,4
Puurtööde erimaht, m/m ³	3,5



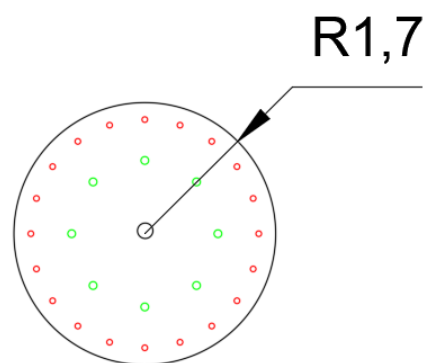
Joonis 16 Puuraukude jaotus ristlõikes

6.8 Lõõrid õhu rõhu vähendamiseks savis

Algmurdeks on valitud suure läbimõõduga puurauk vaba pinna tekitamiseks (Joonis 17). Kuna kivim on sitke ja monoliitne, kuid tänu väiksele ristlõike pindalale oleks suletustegur ja lõhkeaine erikulu põhjendamatult liiga suur, siis laenguaugu pikkuseks on võetud 2 meetrit. Raima- ja kontuurlaengud on valitud nii, et terve ristlõike pind oleks ühtlaselt kaetud ja tegelik lõhkeaine erikulu oleks lähedane teoreetilisele (Tabel 11). läbindamise käigus ei ole välistatud kaldlõhkeaukude kasutamine. Antud kaeveõone ristlõike pindala on $9,1 \text{ m}^2$.

Tabel 11 Puurlõhketööde parameetrid savis

Lõhkeaugu pikkus, m	2
Puuraugu läbimõõt, mm	50
Ee edasinihke samm, m	1,7
Ee ristlõike pindala, m^2	9,1
Korraga lõhatava kivimi maht, m^3	15
Suletustegur k_s	2,0
Lõhkeaine erikulu	2,1
Vajalik lõhkeaine kogus	32,3
Algmurde lõhkeaukude arv n^*	1
Algmurde puuraukude pikkus, m	2,4
Raimalaengute mass, kg	2,2
Kontuurlaengute mass, kg	1,6
Topise pikkus raima- ja kontuurlaengul, m	0,4
Kontuurlaengute arv	10
Raimalaengute arv	8
Lõhkeaine tegelik kulu, kg	34
Padrunite arv	17
Lõhkeaine tegelik erikulu, kg/m^3	2,2
Puurtööde maht, m	58,4
Puurtööde erimaht, m/m^3	3,8



Joonis 17 Puuraukude jaotus ristlõikes

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

7 Lâbindamise tehnoloogia

Arvutustel arvestatakse ainult Eesti poolse osa kaldšahti, mis ulatub kristalse aluspõhjani. Lâbindamine toimub puur-lõhketöödega. Esimesena lõhatakse algmurde laengud üksteise järel lühikese viitega. Peale seda on kuni sekundiline vahe, et täiendav vaba pind saaks tekkida. Seejärel hakkavad detoneerima raima laengud üksteise järel lühikeste viite vahedega. Peale raimalaenguid lõhatakse kontuurlaengud, mis on laetud üle ühe kontuurpuuraukkudesse.

Peale lõhkamist tuleb käiku tuulutada kuni plahvatusgaasid on kaeveõõnest eemaldatud. Seejärel saab alustada lõhatud massi laadimisega vagonettidele, mis viivad raimatud kivi mööda raudteed maapinnale.

Toestikku hakatakse paigaldama kohe kui lõhatud kivi on eest ära koristatud. Peale korraliku toestiku paigaldamist hakkab tsükel otsast peale alates puurimisest ja lõhkeaukude laadimisest.

7.1 Lâbindamise maht

Arvustes kasutatud trassi pikkus on 19,35 km, sellel lõigul on 77 ristlâbipääsu ja 96 rõhu vähendamise lõõri. Ristlâbipääsud ehitatakse iga 250 m ja rõhu vähendamise lõõrid iga 200 meetri tagant. Mahu arvutusel arvestatakse toestiku paksuseks 0,7 m.

Lâbindamise maht sinisavis on 630,12 tuh m³ (Tabel 12).

Lâbindamise maht graniidis on 379,97 tuh m³ (Tabel 13).

Tabel 12 Lâbindamise mahud sinisavis

savis	Tk	Pikkus, m	Pindala, m ²	Lâbindamise maht, m ³
Raudteetunnel	2	4110	61,4	504955
Hooldustunnel	1	4110	28,5	117258
Ristlâbipääsud	16	13,3	19,9	4239
Rõhu vähendamise lõõr	20	20,2	9,1	3664
			Kokku	630116

Tabel 13 Lâbindamise mahud graniidis

graniidis	Tk	Pikkus, m	Pindala, m ²	Lâbindamise maht, m ³
Raudteetunnel	2	3500	44,6	311990
Hooldustunnel	1	3500	18,5	64715
Ristlâbipääsud	14	13,3	10,9	2031
Rõhu vähendamise lõõr	17	20,2	3,6	1229
			Kokku	379966

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

7.2 Kasutatavad mäemasinad

Tunneli läbindamise on vaja erinevaid masinaid kõikide töö ülesannete täitmiseks. Arvestades suletud keskkonda ja piiratud tuulutus, siis masinad valitakse elektri ajamil, et vähendada heitgaaside hulka õhus.

Puurvankriks on valitud Sandvik DD422iE development drill rig, mis oma mõõtmetelt ja töö võimekuselt sobiks antud tingimustesse (Joonis 18). Lõhkeaukude laadimine toimub käsitsi. Kõrgemate lõhkeaukudeni ulatamiseks kasutatakse iseliikuvat korvtöstukit. Lõhutud mass koristatakse kápplaaduriga, kust kraapkonveieriga liigub materjal ümberlaadurile ja sellelt vagonettidesse. Kápplaaduriks sobib Komatsu loader Joy 14BU27 (Joonis 19). Toestik paigaldatakse betooni pritsi masinaga Spraymec 8100 VC. Betooni valmistamiseks kasutatakse elektrilise ajamiga betoonisegistit.



Joonis 18 Puurvanker Sandvik (rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/mining-jumbos/dd422ie-development-drill-rig/)



Joonis 19 Komatsu kápplaadur (mining.komatsu/product-details/14bu27)

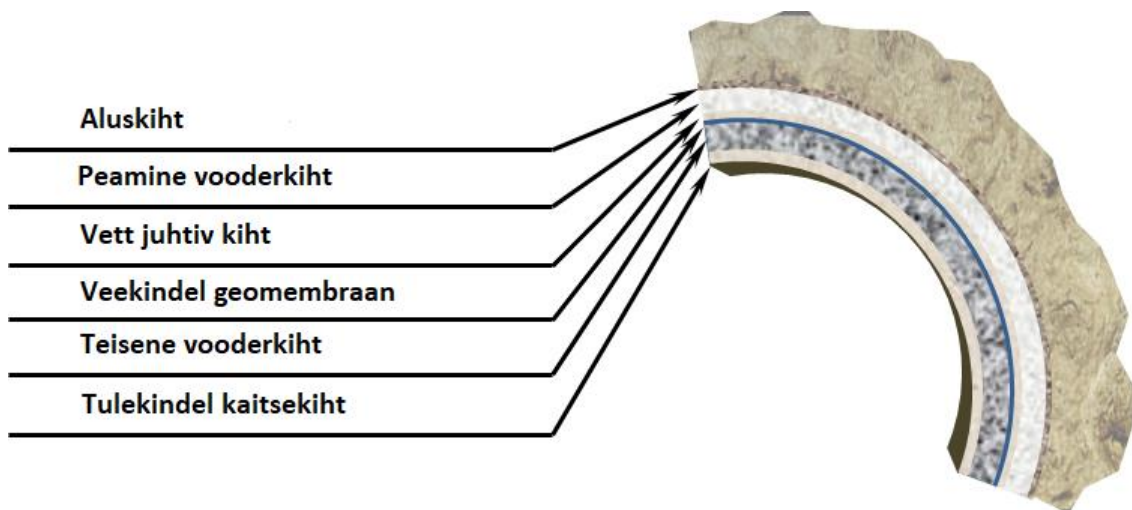
Tallinn-Helsinki tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

7.3 Toestik ja hüdroisolatsioon

Tunneli hüdroisolatsioon ja toestus valitakse arvestades mäenduslike tingimusi selliselt, et oleks tagatud kõikide tunnelite ja käikude püsivus, transpordivahendite ja inimeste ohutus tunnelites ning põhjavee juurdepääs oleks takistatud kogu tunneli ulatuses eksploatatsiooni ajal.

Toestiku ja hüdroisolatsiooni paksus on tunneli portaalist kuni kristalse aluskorrani kõikides tunneli osades ühesugune- 700 mm, millest pritsbetoon 75 mm, geomembraan 3 mm ning raudbetoon 622 mm. Kristalses aluskorras on toestiku ja hüdroisolatsiooni paksus 88 mm, millest 75 mm on esmane pritsbetooni kiht, geomembraan 3 mm ja täiendav pritsbetoon tulekindluse andmiseks 10 mm. Kristalses aluskorras on tegemist püsivate gneisi ja rabakivigraniidi kivimitega. Nende toestamise valikul on kasutatud pikaajalise kogemusega Norras levinud tunneli toestaise analoogi. Toestamiseks kasutatakse pritsbetooni ja vajadusel pannakse ankurpoldid. Kuigi puur- lõhketööde parameetrid valitakse selliselt, et lõhede tsooni laius kivimites oleks minimaalne, ei saa neid täielikult vältida. Selle tõttu on vajalik ankrupoltidega täiendav kindlustamine, mille järel kaetakse kogu tunneli sisepind pritsbetooniga. Samuti toimub hüdroisoleerimine veekindla geomembraaniga. Hüdroisolatsioonile tulekindluse andmiseks kantakse sellele täiendav pritsbetooni kiht. [6]

Aluskiht on naket tekitav esmane tihendav kiht. Teine raudbetoonsarrustega kiht on tunneli esmane toestus. Kolmas kiht omab vett juhtivaid omadusi, et kuivamisel vaba vesi tunneli seintelt nõrguiks põhjale veekogurisse. Neljandaks installeeritakse sünteetiline geomembraan tunneli täielikuks hüdroisoleerimiseks ümbritsevast keskkonnast. Geomembraani peale pritsitakse raudbetoonsarrustega tunneli teisene toestuskiht. Viimane pritsbetoonikiht on tulekindel, mis võimaliku tulekahju korral takistab tunneli toestiku deformeerumist (Joonis 20). [18]



Joonis 20 Tunneli toestiku kihid savis (learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/11/7F-004-Figure-3.png)

Sinisavi toestamise eelduseks on lae ja külgkivimite stabiilsus hüdroisolatsiooni paigaldamise algusest kuni toestiku tööle hakkamiseni. Ühtlases massiivis tagab stabiilsuse kaeveõõne kohale raimatud võlv. Esmase toe andmiseks kantakse tunneli ümberkivimitele pritsbetoon. Betoon transporditakse tööpiirkonda betooniveokiga, millelt juhitakse betoon spetsiaalsesse betoonipritsi, mida juhib operaator. Pritsbetooni paigaldamine ning kuivamine toimub kiirelt, hakates täitma toestamise ülesannet. 28 päeva jooksul saavutab pritsitud betoon survetugevuse

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise suur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

üle 60 MPa. Pärast pritsbetooni paigaldamist armeeritakse tunneli põhi ning teostatakse kaeveõõne põhja valu. Kaeveõõne põhja kindlustamine on vajalik järgnevate toetamise protsesside teostamiseks. [6]

Pritsbetooni, hüdroisolatsiooni paigaldamise ja tunneli põhja kindlustamise järel armeeritakse tunneli seinad. Armatuuri läbimõõd, paiknemise tihedus ja kord arvutatakse välja vastavate tugevusnäitajate saavutamiseks. Paralleelselt armeerimistöödega paigaldatakse valatud põrandale ajutised relsid, mille peal hakkab liikuma betoonvoodri valuks vajalik hüdrauliline saalung-vanker. Armeeringu valmides liigub vanker tööalale, kus betoonvooder valatakse. Hüdrauliliste tungraudadega surutakse saalungid paika ning seejärel pumbatakse betoon kaeveõõne ristlõike perimeetrile ning moodustub ühtne monoliit. [6]

7.4 Tuulutusekspluatatsiooni ajal

Tuulutuse eesmärk on viia allmaarajatisse värsket õhku sellises koguses ja sellise survega, et nendes viibivatele inimestele on tagatud ohutud ning võimalikult tervislikud ja mugavad töötingimused. Seda nii allmaarajatisse läbindamise kui kasutamise ajal. [12]

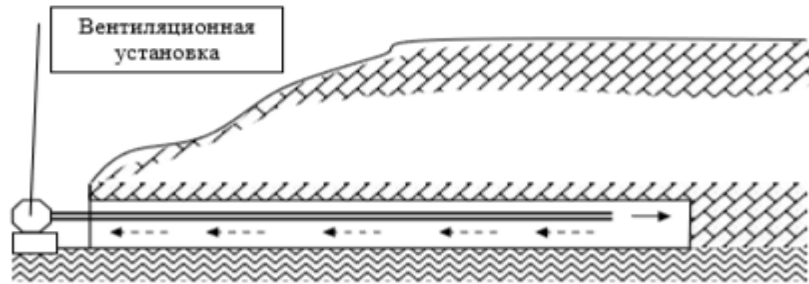
Antud olukorras saab kasutada pikisuunalisi süsteeme, paigaldades ventilaatorit mööda lage. Ventilatsioonisüsteemide juhtimine ja jälgimine on automaatne. Ventilatsiooni ülesanne läbindamise ajal on kahjulike gaaside lahjendamine lubatud kontsentratsioonini. Töötajate sissepääs ees sisse on lubatud pärast süsinikmonoksiidi lahjendamist kuni 0,008 mahuprotsenti kavandatud tuulutuse aja lõpuni. Pärast töötajate lubamist ette on vajalik pidev ventilatsioon vähemalt 60% ulatuses originaalist. Maa-aluse kaevanduse õhk peab sisaldama vähemalt 20% hapnikku ja mitte rohkem kui 0,5% mahust süsinikdioksiidi ja talvel temperatuur mitte madalam kui + 2 ° C ja suvel suveperioodil mitte üle 25 ° C. [12]

Lõhketöödega kaasneb oluliste koguste toksiliste gaaside vabanemine. Vastavalt tunnelite ehitamise ohutuseeskirjadele eeldatakse, et 40 liitrit tavapärasest süsinikmonoksiidi tekitatakse, kui maa-aluste ete läbindamiseks kasutatakse 1 kg lõhkeainet. Lõhketööde alguses selgitatakse seda väärtust lõhketööde koostisosade mahtude otsese mõõtmisega. Tuulutussüsteemi peab tulekahju korral olema võimalik seisata ja sulgeda. Tuulutussüsteemi toimimist tuleb pidevalt jälgida ja selle tõrgetest tuleb allmaakaeveõõnes viibivaid isikuid teavitada. [12]

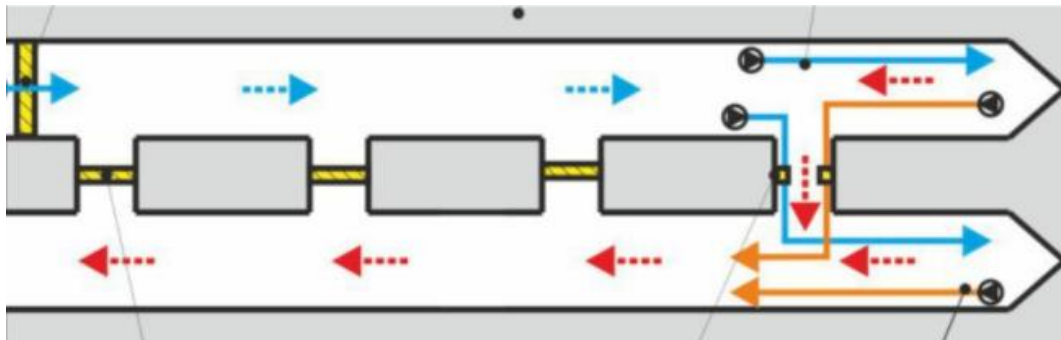
7.5 Tuulutuse protsess ja skeemid

Läbindamise alguses on võimalik töötada ainult kohaliku tuulutuse ventilaatoritega. Kaeveõõne pikenedamisel sügavamale maa alla tuleb kasutusele võtta suuremad ventilaatorid koos tuulutuse toruga, mida pikendatakse vastavalt ees edasi nihkele (Joonis 21). Ettevalmistuskaeveõõsi tuulutatakse kohaliku ventilatsiooniga vastavalt olukorrale. Värske ja rikutud õhu segunemist takistatakse vahetäikudes kasutatavate ja teisaldavate vaheseinade ja tuulutustorudega (Joonis 22). [12]

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

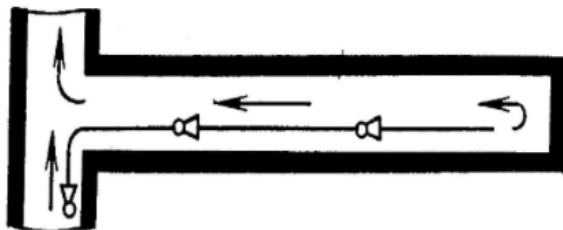


Joonis 21 Tunneli tuulutamise üldine põhimõte [3]



Joonis 22 Põhimõtteline tupik ee tuulutus skeem [12]

Eega edasi liikudes tuleb vahikäigud õhukindlalt sulgeda. Kui tupikkaeveõõnes toimuvad puur- lõhketööd või seal peavad viibima inimesed mingil muul põhjusel, siis tuleb seda tuulutada paigutades kohalikud ventilaatorid suudmest kaugemale värsk õhuga kaeveõõnde (Joonis 23). Tupikkaeveõõne tuulutamiseks ei tohi kasutada üle 70% ventilaatori seadmete asukohta läbivast värskest õhust. [12]



Joonis 23 Põhimõtteline tupikkaeveõõne tuulutus skeem [12]

Pikkade kaeveõõnte tuulutuse iseärasus: kaeveõõne depressioon on suur. Kaeveõõne depressiooni ületamiseks tuleb kasutada ventilaatorite jadaühendust. Selle tunneli jaoks sobib hajutatud ühendus, kus ventilaatorid asuvad reas. [12]

Ohutus ja keskkonnakaitse

1. Allmaakaeveõõnes viibivate isikute üle peab pidada arvestust. Arvestuse pidamise süsteem peab tagama, et igal aja hetkel oleks võimalik tuvastada kõik allmaakaeveõõnes viibivad isikud. [19]
2. Tunneli läbindamisel peab olema vee kõrvaldus süsteem. Veerohketes kivimites töötades peavad olema rakendatud täiendavad abinõud ootamatu ohtlikult suure veekoguse paiskumisel kaeveõõnde, et vältida õnnetusjuhtumeid. [19]
3. Lõhkematerjale tuleb käidelda Lõhkematerjaliseadusega kehtestatud korras. [19]
4. Seadmeid ja masinaid tuleb kasutada vastavalt nende kasutusjuhendist tulenevatele nõuetele. [19]
5. Inimeste vedu tunnelis ja teenindusalal võib toimuda selleks kohandatud veokiga vastutava spetsialisti poolt määratud marsruudil. [19]
6. Erinevat tüüpi veokite kasutamisel laadimistöodel tuleb ohutuse tagamiseks määrata nende töötsoonid ning vajadusel paigaldada ohumärgid. [19]
7. Tunneli läbindamisel ja kaeveõõne rajamisel on üksi töötamine keelatud. [19]
8. 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». [19]
9. Läbindamisel peab olema korraldatud õhuproovide võtmine kaeveõõntes, õhu analüüsimine ja määratud kaevanduse tuulutuse eest vastutav isik. [19]
10. Õhujugasid võib kaeveõõntes 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. [19]
11. Tuulutussüsteemi peab tulekahju korral olema võimalik seisata ja sulgeda. Tuulutussüsteemi toimimist tuleb pidevalt jälgida ja selle tõrgetest tuleb allmaakaeveõõnes viibivaid isikuid teavitada. [19]
12. Allmaakaeveõõntes töötavad isikud peavad teadma väljapääsuteede asukohti ja evakuatsiooni korraldust. [19]
13. Kaeveõõned peavad olema tähistatud märkide ja viitadega selliselt, et need aitaksid leida töötajatel vajalikku väljapääsuteed maapinnale. Võimaluse korral kasutatakse helenduvaid märke või viitasid. [19]
14. Kaeveõõnte seisukorda tuleb alati kontrollida pärast lõhketöid. [19]
15. Tulekahju ennetamiseks ja võimaliku tulekahju kustutamiseks või tulekahju kontrollimiseks peab kaevanduses olema rakendatud kaevanduse eripäralt vastavad tuleohutusmeetmed. [19]
16. Kaeveõõne toetusmaterjalid peavad olema mittepõlevast materjalist. [19]
17. 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. [19]
18. Isesüttimise ohuga jäätmete ladustamine peab toimuma mitte üle 20 m paksuste horisontaalsete kihtidena. Puistangu pealispinna kalle peab tagama sademevee äravoolu. [19]

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Kokkuvõte

Tallinn-Helsingi tunnel oleks valmides kiireim viis liikuda Eesti ja Soome pealinnade vahel. Tunneli kogu pikkus on 103 km. Eesti osa kuni kristalse aluskorrani ca 17,8 km. Eestist saab tunnel alguse Viimsi poolsaarelt Muuga sadama kandist. Trassi kalle on 1%, et tagada kiiresti liikuvate rongide ohutus. Tunneli maksimaalne sügavus on 180 m merepinnast. Maksimaalne mäerõhk tunneli sügavamas punktis on kuni 5,9 MPa. Kokku rajatakse kaks raudteetunnelit ja üks hooldustunnel, ristläbipääsud iga 250 m ja rõhu vähendamiseks lõõrid iga 200 m järel.

Mäendustingimused on Eesti poolses kaldosas keerulised survepõhjavee ja suure mäerõhu tõttu. Kristalse aluskorrani jõudmiseks tuleb läbida kihelistest settekiivimitest, kus igas kihis läbindamine on erinev seoses kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste muutlikkusest. Läbindamis tehnoloogiaks valiti puur-lõhketööd, millega alustatakse läbindamist paralleelselt kolmes ees korraga. Tunneli konfiguratsioonide valikul arvestati läbindamise tehnoloogiat ja mäerõhku, mis on vaja kaeveõone kujuga kõige optimaalsemalt ümber juhtida. Tunnelis toimub läbindamine tsükliliselt.

Antud töös töötati välja parameetrid puur-lõhketöödega läbindamiseks sinisavis ja graniidis. Sinisavis ee edasinihke samm raudteetunnelis on 2,5 m ja kasutatakse püstkiil algmurret. Graniidis kasutatakse prisma algmurret ja ee edasinihke samm on 3,4 m. Peale lõhketöid tuleb kaeveõõs tuulutada ning toestada.

Kasutatud kirjandus

1. Helsinki-Tallinna. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 10. mai 2018. a.] <http://www.finestlink.fi/et/>
2. K. Suuroja, T. All, K. Kaljuläte, M. Kõiv, E. Morgen, K. Ploom. Baaskaardi Tallinna (6334) ja Rohuneeme (7312) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine. Eesti geoloogiakeskus, Tallinn 2013
3. Kristel Veersalu kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tõnu Tomberg, TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
4. Vertikaalkaevetööde läbindamine, Allmaakaevandamise konspekt. Tomberg, T. 2015.
5. Building the rail tunnels. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 13. mai 2018. a.] <http://www.crossrail.co.uk/construction/tunnelling/railway-tunnels/>
6. Mihkel Aasranna kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tõnu Tomberg, TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
7. Roman Malõševa kursusetöö õppeaine „Allmaakaevandamine ja projekt“, juhendaja Tõnu Tomberg, TTÜ Geoloogia instituut, Tallinn 2017.
8. K. Alvi. Acoustic-seismic survey along the proposed railway tunnel route options, between Helsinki and Tallinn. 19.8.-1.11.2016. Soome geoloogiline uurimiskeskus, 2017.
9. T. Tomberg, K. Veersalu. Mäenduslikud enamlevinud lõhketööd. Loengukonspekt. TTÜ Mäeosakond, Tallinn 2017
10. J. O. Bickel, T. R. Kuesel, E. H. King. Tunnel engineering handbook. Kluwer academic publishers. 1996
11. Sweco Porjekt AS, Vealeidja OÜ, Finantsakadeemia OÜ, Helsinki-Tallinna püsiühenduse tasuvuse eeluuring lõpparuanne, 2015.
12. T. Tomberg. Allmaarajatiste tuulutus. TTÜ Mäeinstituut. 2015
13. O. Ikävalko, I. Vähäaho, S. Suuroja. Soil and bedrock conditions to be expected in Tallinn-Helsinki tunnel construction. Norra 2013.

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

14. V. Karise, M. Metsur, R. Perens, L. Savitskaja, I. Tamm. Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse. s.l. : Eesti Põhjaveekomisjon, Maves AS, 2004.
15. K. Suuroja, K. Ploom, T. Mardim, T. Vahtra, T. All, A. Veski, M. Kõiv, M. Otsmaa. Eesti geoloogilise baaskaardi Kohtla-Järve (6444) leht. Seletuskiri. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus, 2008.
16. A. Raukas, A. Teedumäe. Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn 1997.
17. D. Brox. Technical considerations for TBM tunneling for mining projects. Canada 2013.
18. King, M., Fire and water, the Crossrail experience. Crossrail. [Võrgumaterjal]
[Tsiteeritud: 28. mai 2018. a.] <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/fire-water-crossrail-experience/>
19. Kaevandamise ja kaeveõõne teisese kasutamise ohutusnõuded. Riigikogu. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 27. mai 2018. a.]
<https://www.riigiteataja.ee/akt/106032018011>

Tallinn-Helsingi tunneli läbindamise puur- lõhketööde parameetrite väljatöötamine sinisavis ja graniidis. Kristo Martin Vinni

Lisa 1

Lõhketööde arvutamise metoodika:

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

n^* - algmurde 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} – algmurde lõhkeaukude pikkus, m

Puurtööde erimaht, m/m³: $pt = \frac{PT}{V}$