



Lauri-Olavi Siitam, 132143

Magistritöö ID 2706

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Energeetikateaduskond

Mäeinstituut

Juhendaja: MSc Tõnu Tomberg

TALLINN 2016

AUTORI DEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli Energeetikateaduskonna Mäeinstituudile tehnikateaduste magistrikraadi taotlemiseks geotehnoloogia erialal. Selle töö alusel ei ole varem kutse- ega teaduskraadi taotletud.

_____ (*kuupäev*)

_____ (*allkiri*)

Lauri-Olavi Siitam

SISUKORD

LÜHENDITE LOETELU	7
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	8
ABSTRACT	9
EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS.....	11
1. NARVA KARJÄÄRI KIRJELDUS.....	12
1.1. Narva karjääri asukoht	12
1.2. Geoloogilised ja hüdrogeoloogilised tingimused	13
1.3. Puhatu turbamaardla.....	14
1.4. Looduskaitsetingimused	14
1.5. Kaevandamisviisi kirjeldus	15
2. ALLMAAKAEVANDAMISE VÕIMALUSED NARVA KARJÄÄRIS	17
2.1. Lae varistamisega lankkaevandamine Narva karjääris	18
2.1.1. Põlevkivikihi raimamine	20
2.1.2. Laekäitlus ja maapinna vajumine	21
2.1.3. Kaevisetransport.....	22
2.2. Lankkaevandamise kogemus Eestis	23
3. KAEVANDUSTE TÄITMINE.....	24
3.1. Täitmise varasemad katsed Eestis	25
3.1.1. Katsed Viru kaevanduses (1985).....	25
3.1.2. Katsed Kiviõli kaevanduses (1989).....	25
3.1.3. Kukuruse kaevanduse täitmiskatsed.....	26
3.2. Põlevkivituhk	27
4. KAEVANDATUD ALA TÄITMISEGA LANKKAEVANDAMISE TEHNOLOOGIA NARVA KARJÄÄRIS.....	28
4.1. Kambainlaavade parameetrid	28
4.2. Lähislae piirava.....	31
4.3. Määrõhk.....	32
4.4. Täitesegu omadused	34
4.5. Täitesegu transport	37
4.5.1. Põlevkivituha transport	37
4.5.2. Aheraine transport	37
4.5.3. Vee transport	38
4.5.4. Täitesegu transport kaeveõntes	38

4.6. Täitesegu vaheseinad	38
4.7. Täitmise ja lankkaevandamise parameetrite määramine	39
4.8. Toestiku valik	42
4.8.1. Toestiku mõõtmised	43
4.9. Kombaini valik	44
5. TÄITMISEGA LANKKAEVANDAMISE KESKKONNAMÕJUD NARVA KARJÄÄRIS	47
6. TÄITMISEGA LANKKAEVANDAMISE MAJANDUSLIKUD TINGIMUSED	49
6.1. Täitmise seotud investeeringute prognoos	49
6.1.1. Põlevkivituha kuivalt väljastamine	49
6.1.2. Põlevkivituha transport	50
6.1.3. Aheraine killustikukompleks	51
6.1.4. Täitesegu valmistamiseks vajalikud seadmed	52
6.2. Täitmise seotud tegevuskulude prognoos	52
6.2.1. Põlevkivituha transpordi hind raudteel	52
6.2.2. Tuha transport torukonveieritega	53
6.2.3. Aheraine transport killustikukompleksi	54
6.2.4. Killustikukompleksi tegevuskulud	54
6.2.5. Täitesegu segamise ja kaeveõõnde transportimise maksumus	55
6.2.6. Täitmise seotud töötajate palgakulu	55
6.2.7. Täitmiseks kasutatavate seadmete amortisatsioon	56
6.2.8. Kokkuvõtte tuha ladestustasult	56
6.3. Täitmise kasutuselevõtmise majanduslikud näitajad	57
7. ARUTELU	60
KOKKUVÕTE	62
KASUTATUD KIRJANDUS	63
LISAD	71

JOONISED

Joonis 1. Mäeeraldiste paiknemine Narva karjääris	12
Joonis 3. Tootsa kihindi läbilõige Narva karjääris (autori koostatud [3] põhjal)	14
Joonis 2. Narva karjääri geoloogiline tüüpläbilõige (autori koostatud [3] põhjal)	14
Joonis 4. Vaalkaevandamine Narva karjääris	16
Joonis 5. Narva karjääri allmaakaevandatav ala ja kaevetranšeed (koostatud töö autori poolt [3] põhjal)	17
Joonis 6. Lankkaevandamisel kasutatav kombainikompleks	20

Joonis 7. Hüdrauliline toestik.....	22
Joonis 8. Põlevkivi tootuskihindi väljamine kombainidega kahes osas.....	23
Joonis 9. Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise skeem.....	30
Joonis 10. Torukonveieri läbilõige.....	37
Joonis 11. Kombainikompleksiga seotud täitesegu vaheseinad.....	39
Joonis 12. Mäerõhu jagunemine lankkaevandamisel.....	42
Joonis 13. Tangentsiaalse paigutusega lõiketera ИТ125 (koostatud autori poolt [88] põhjal)	44
Joonis 14. Kaevandamiskulude jagunemine [92].....	49
Joonis 15. Täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõtuga seotud kogukulu	58

TABELID

Tabel 1. Narva karjääri kaevandamislubade andmed (Maa-ameti maavaravarude koondbilanss seisuga 31.12.2014).....	12
Tabel 2. Kaevandamistehnoloogiate piirangud [14].....	18
Tabel 3. Põlevkivi tootuskihindi kihtide lõiketugevus ja survetugevus [23].....	21
Tabel 4. Kombainiga raimamise energiakulu ja keskmine tükisuurus [25].....	21
Tabel 5. Valumeetodil valmistatud terviku parameetrid.....	26
Tabel 6. Põlevkivituha tekkimine EE kontsernis, t (EE andmetel).....	27
Tabel 7. Kombainlaavade mõõtmed.....	29
Tabel 8. Lähislae parameetrid Narva karjääri allmaakaevandatavas osas.....	31
Tabel 9. Lähislae piirava arvutuse tulemused.....	32
Tabel 10. Katendikivimite poolt põhjustatud mäerõhk.....	33
Tabel 11. Kriitiline piirava Narva karjääri tingimustes.....	33
Tabel 12. Tehisterviku survetugevuse arvutamise lähteandmed ja tulemus.....	34
Tabel 13. Laboratoorsetel töodel määratud katsekehade survetugevused 20° C juures [72]...	36
Tabel 14. Laboratoorsetel töodel määratud katsekehade tardumisajad [72].....	36
Tabel 15. Laboratoorsetel töodel määratud katsekehade survetugevused 5° C juures (Prof. Lembi-Merike Raado suulised andmetel).....	36
Tabel 16. Maksimaalne aastas tekkiva täitesegu kogus.....	37
Tabel 17. Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise parameetrid.....	41
Tabel 18. Tehistervikute rajamise kiirus.....	41
Tabel 19. Täitmise tsüklid laavades.....	42
Tabel 20. Toestiku mõõtmete arvutuse lähteandmed ja tulemus.....	43
Tabel 21. Kombaini vajaliku võimsuse arvutamise lähteandmed ja tulemus.....	45
Tabel 22. Ekspluatatsioonilise tootlikkuse teguri leidmine.....	46
Tabel 23. Kombaini vajalik teoreetiline tootlikkus.....	46
Tabel 24. Kaitstavate alade kategooriate vastavus allmaakaevandamisel [12].....	47
Tabel 25. Põlevkivituha ladestustasu [90] [91].....	48
Tabel 26. Investeeringu maksumus põlevkivituha raudteetransporti BEJ ja EEJ tuhasilode vahel.....	50
Tabel 27. AEJ ja EEJ tuhasilode vahelise torukonveieri maksumus.....	51
Tabel 28. EEJ tuhasilode ja Narva karjääri neljanda tranšee vahelise torukonveieri maksumus.....	51
Tabel 29. Killustikukompleksi rajamise maksumus.....	51
Tabel 30. Tuha raudteetranspordiga seotud tegevuskulud.....	53
Tabel 31. AEJ ja EEJ tuhasilode vahelise konveieri tegevuskulu.....	53

Tabel 32. EEJ tuhasilode ja Narva karjääri vahelise torukonveieri tegevuskulu	54
Tabel 33. Aheraine transportimise tegevuskulud	54
Tabel 34. Killustikukompleksi tegevuskulu	55
Tabel 35. Täitesegu segamise ja kaeveõõnde transportimise tegevuskulu	55
Tabel 36. Täitmisega seotud töötajate palgakulu	55
Tabel 37. Täitmisega seotud investeeringute amortisatsioon.....	56
Tabel 38. Kokkuvõid tuha ladestustasult	56
Tabel 39. Täitmiseks vajalike seadmete maksumus.....	57
Tabel 40. Täitmisega seotud tegevuskulud	58
Tabel 41. Täitmisega seotud kulude katmiseks vajalik põlevkivituha ladestustasu.....	59

LÜHENDITE LOETELU

BEJ – Balti Elektriyaam

EEJ – Eesti Elektriyaam

AEJ – Auvere Elektriyaam

CFB – Keevkihtkatel

PF – Tolmpõletuskatel

EE – Eesti Energia AS

EEK – Eesti Energia Kaevandused AS

ABSTRACT

Due to the southwards inclining formation of the oil shale bed the overburden thickness in the Narva open cast working fronts is approaching the technological limit for surface mining operations. To avoid the increase of costs for mining operations and to maintain the rate of mining then underground mining has to be carried out in the southern part of Narva open cast. Currently there are plans to extract the oil shale reserves in the southern part of Narva open cast using the longwall mining method. One negative aspect of longwall mining is ground subsidence. When extracting the whole thickness of the commercial oil shale bed with longwall mining the ground would subside by 1,5...2,0 m.

One method to prevent ground subsidence with longwall mining is to use backfilling of the mined out area. The use of industrial residue material for backfilling operations has been a standard practice for a long time. In Estonia oil shale ash and the waste rock produced by oil shale mining have shown suitable qualities to be used as backfilling materials. The aim of this Thesis is to come up with a technological solution to use the oil shale ash and waste rock produced in the Eesti Energia concern as backfilling material for longwall mining method with backfilling of the mined out area. The environmental and economic effects of longwall mining with backfilling were also evaluated.

The main results of this Thesis were:

- It is advised that the longwalls used in longwall mining with backfilling should be as wide as possible given the specific technological and geological situation. The longwall width for longwall mining with backfilling in this thesis was 400 m.
- The average thickness of the immediate roof above the oil shale seam in the area to be mined using longwall mining with backfill is 2,03 m.
- On the basis of the laboratory experiments conducted with the oil shale ash and waste rock, the best backfilling mixture consists of 75% oil shale ash (80% circulating fluidized bed ash and 20% pulverized firing ash) and 25% waste rock aggregate. Water is used to transport the backfilling mixture and to set off the chemical reactions in the backfill.
- The main factors limiting the advance of the longwall face in longwall mining with backfilling are the first weighing distance, the amount and the properties of the backfilling materials. It is optimal for the mining operations to take place in 4 longwalls simultaneously, in that case the advance of one longwall face is 11,3 m per week.
- The power of the shearer used for longwall mining with backfilling must be at least 538 kW and productivity of the shearer must be at least 5,03 t/min. The hydraulic supports must be able to work in the mining height of 2,28...2,95 m.
- The ground surface above the area mined by longwall mining with backfilling is classified as stable
- The investments needed for the implementation of backfilling technology are at least 85 million € and the operating costs related to backfilling rise each year.

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

EESSÕNA

Eesti Energia kontsernis tekib põlevkivituhka 5-7 mln tonni aastas ning selle taaskasutusmäär on madal. Narva karjääri lõunaosas kavandatud lankkaevandamisel oleks võimalik kasutada põlevkivituhka täitematerjalina. Antud töös pakub autor välja tehnoloogilisele lahenduse täitmisega lankkaevandamise kasutuselevõtuks Narva Karjääri lõunaosas.

Töö autor soovib lisaks käesoleva töö juhendajale – Tõnu Tombergile, igakülgse abi ja toe eest tänada ka Eesti Energia AS töötajaid Arina Koroljovat, Priit Parktalit, Leo Rummelit, Alo Kelderit, Oleg Nikitinit, Martin Lohki. Lisaks on autor tänulik ka tehnikakandidaat Viktor Unduskile ja tehnikakandidaat Lembi-Merike Raadole heade nõuannete eest.

Töö on seotud Tallinn Tehnikaülikooli mäeinstituudi teemaga „Täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtu võimaluste analüüs, majanduse ja keskkonna nõuetest tehnoloogia rakendamisel,„.

SISSEJUHATUS

Eesti kõige tähtsamaks maavaraks on põlevkivi ning sellega seotud tööstus avaldab olulist mõju kogu riigi majandusele. Põlevkivi kaevandamine toimub Eesti põlevkivimaardlas, Kirde-Eestis ning sellest toodetakse elektrienergiat ning põlevkiviõli. Kaevandamine toimub nii avakaevandamise kui ka allmaakaevandamise meetodil. [1] [2]

Ida-Virumaal asuvas Narva Karjääris toimub põlevkivi avakaevandamine, kuid põlevkivikihi lõunasuunalise kallakuse tõttu suureneb kaevandamise lõunapoole liikumisel katendi paksus. Kaevandamine on jõudnud piirkonda, kus katendi paksuse tõttu otstarbekas üle minna allmaakaevandamisele. Lisaks on allmaakaevandamisel võimalik väljata ka Puhatu turbamaardla all olev põlevkivivaru. Narva Karjääri lõunaosas oleva põlevkivivaru väljamiseks on Eesti Energia Kaevandused (EEK) plaaninud kasutusele võtta lae varistamisega lankkaevandamise tehnoloogia. [2] [3]

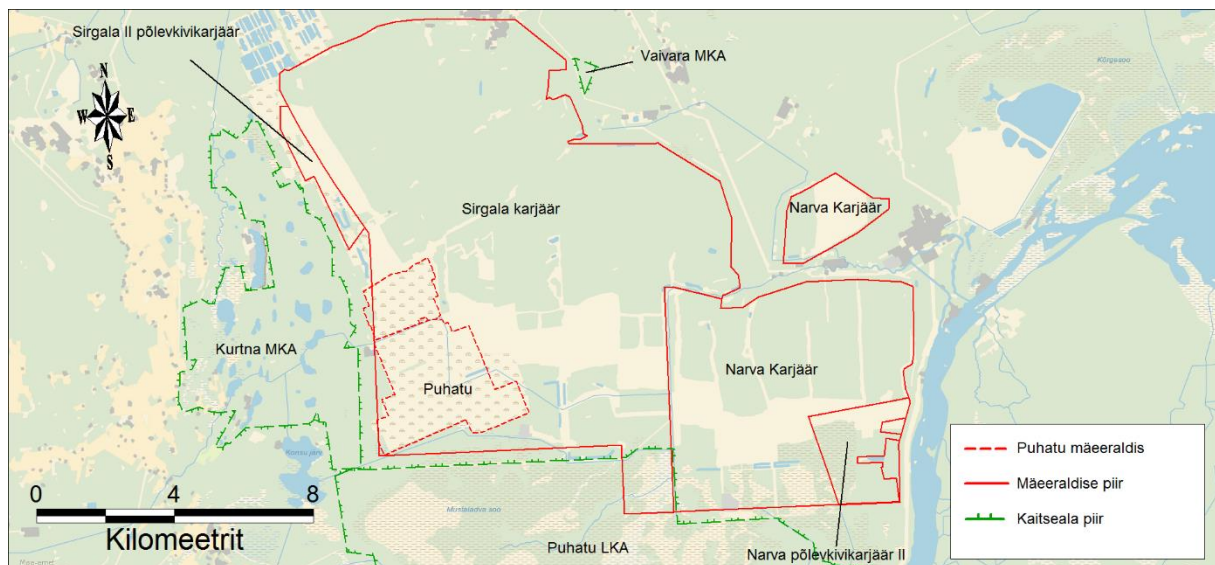
Lae varistamisega kaevandamistehnoloogiaga kaasnevad paratamatult maapinna vajumised. Maapinna vajumiste vältimiseks on võimalik kaevandatud ala täita. Maailmas on laialt levinud jäätmete kasutamine kaevanduste täitmisel ning selles vallas on tehtud pidevalt edusamme alates esmakordsest tehnoloogia rakendamisest 19. sajandi lõpus. Täiteseguga kaeveõõnte täitmine on perspektiivne ka Eesti tingimustes ning täitesegu komponentidena on väärtuslikuks tooraineks elektrijaamades põlevkivi põletamisel tekkiv põlevkivituhk ja põlevkivi kaevandamise kõrvalproduktiks olevast aherainest valmistatud killustik. [4] [5]

Käesoleva magistritöö eesmärk on välja pakkuda tehnoloogiline lahendus, kuidas kasutada Eesti Energia (EE) kontsernis tekkivad põlevkivitööstuse jäätmeid Narva Karjääri lõunaosas kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamisel. Lisaks uuritakse kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise mõju keskkonnale ja esitatakse Narva Karjääris tingimustes kaevandatud ala täitmisega seotud investeeringute prognoos.

1. NARVA KARJÄÄRI KIRJELDUS

1.1. Narva karjääri asukoht

Narva karjäär rajati 1970. aastal ning Maailma suurimaks põlevkivikarjääriks sai see Viivikonna, Sirgala ja esialgse Narva karjääri ühendamisel üheks ettevõtteks (Joonis 1). Karjäär asub Eesti põlevkivimaardla idaosas Ida-Virumaal Toila, Illuka ja Vaivara valla maadel. Narva karjäär koosneb neljast mäeeraldisest, mille kogupindala on 16 330,23 ha (Tabel 1). Karjääri piiriks lääne poolt on Vasavere mattunud org, põhjast piirneb karjäär Mustajõega ning idast Narva jõega. [3] [6] [7]



Joonis 1. Mäeeraldisete paiknemine Narva karjääris [Mäeeraldisete paiknemine Narva karjääris.wor]

Tabel 1. Narva karjääri kaevandamisloade andmed (Maa-ameti maavaravarude koondbilanss seisuga 31.12.2014) [Aktiivne tarbevaru Narva karjääris.xlsx]

Mäeeraldisete nimetus	Maavara kaevandamise loa nr.	Maavara kaevandamise loa kehtivus	Mäeeraldisete pindala (ha)	Maavara kaevandamise maksimaalselt lubatud aastamäära kogus, tuh t	Aktiivne tarbevaru, tuh t
Narva karjäär	KMIN-073	10.08.2019	4255,77	2 200	26 323,40
Narva põlevkivikarjäär II	KMIN-046	15.08.2028	544,11	700	12 155,30
Sirgala karjäär	KMIN-074	03.05.2019	11296,60	3 000	46 787,10
Sirgala II põlevkivikarjäär	KMIN-087	13.04.2031	233,75	500	3 545,80
KOKKU			16 330,23	6 400	88 811,60

1.2. Geoloogilised ja hüdrogeoloogilised tingimused

Narva karjääris moodustavad põlevkivikihi kohal katendi ülemise osa valdavalt 2-5 m paksused kvaternaarisetted, mis koosnevad peamiselt turbast. Karjääri lääneosas võib turba paksus ulatuda 7 meetrini. Kvaternaarisetete all lasub Kesk-Devoni ladestiku Narva lademe setete kompleks, mille paksus on ebaühtlane ning mis on esindatud põhiliselt vahelduvate savi ja dolokivikihtidena. Vahetult tootuskihi peal lasuvad Ülem-Ordoviitsiumi Kukruse lademe lubjakivid ja madala kvaliteediga põlevkivikihid, mille kogupaksus on 4 - 13 m. [3] [6]

Eesti põlevkivimaardla tootuskihind ehk kaevandatav põlevkivi lasub Ülem-Ordoviitsiumi Kukruse lademe alumises osas. Käesoleval ajal on Narva karjääris katendi paksus tootuskihi kohal 23 - 32 m. Põlevkivi tootuskihi keskmiseks paksuseks Narva kaeveväljal on 2,68 m ja Sirgala kaeveväljal 2,82 m ning see koosneb seitsmest põlevkivikihist (kihtide indeksid A, A', B, C, D, E, F₁) ja viiest lubjakivi vahekihist (kihtide indeksid: A'/A, B/A', C/B, D/C, E/D). Põlevkivikihid ja nendega vahelduvad lubjakivikihid erinevad üksteisest paksuse, kihi sisemise ehituse ja koostise poolest. Kihindi maksimaalne paksus on maardla põhjaosas. Lõuna ja lääne suunas kihindi paksus väheneb. Kukersiikihtide paksus on vahemikus 0,05 kuni 0,6 m. Enamik põlevkivikihte sisaldab läätsjaid kerogeenseid lubjakivimugulaid. Lubjakivikihtide paksus on kuni 0,3 m ning orgaanilise aine sisaldus lubjakivikihtides on madal, enamasti alla 5%. [3] [6]

Mäemassi kütteväärtus on keskmiselt 9,64 - 9,67 MJ/kg ja põlevkivil ilma lubjakivi vahekihtideta 12,02 - 12,89 MJ/kg ning on kasutatav nii elektri- kui ka õlitootmiseks rikastatud kui ka rikastamata kujul. [3]

Põlevkivi kaevandamine Narva karjääris toimub Ordoviitsiumi Ida-Viru põlevkivibasseini põhjaveekogumi alal. Narva karjääri piirkonnas eristatakse hüdrogeoloogilises läbilõikes [3]:

- Kvaternaarisetete veekiht
- Narva lademe suhteliselt vettpidavad kivimid
- Keila-Kukruse veekiht
- Uhaku lademe vett nõrgalt läbilaskev savikas lubjakivi (kohati suhteline veepide)
- Lasnamäe-Kunda veekiht

Kõik ülalnimetatud veekihtid ja suhtelised veepidemed on Narva karjääride põlevkivikaevandamise veekõrvalduse mõju all ning võtavad karjääri vee juurdevoolu moodustumisest erineval määral osa. [3]

Pärast mäetööde lõppu hakkab Sirgala ja Narva karjääri karjääriväljadel põhjavee ja pinnaveevoolu liikumine kulgema Narva jõe suunas, mille veetase vete väljavoolupiirkonnas on absoluutkõrgusel 24-25 m. Narva karjääri voolava põhjavee ja sademevee eemaldamiseks on rajatud veekõrvaldamissüsteem, mis koosneb drenaažistrekkidest, kraavidest, settebasseinidest ja pumbajaamadest. [3] [8]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmise ja lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Veekõrvaldussüsteemi peamiseks osaks on dreneažistrekid, mis läbindatakse mäetööde eelsele alale põlevkivikihtidest allpool lasuvasse savikasse lubjakivikihti. Nende eesmärk on põhjavee kogumine ja ärajuhtimine mäetööde piirkonnast. Käesoleval ajal on Narva karjääris töös 15 dreneažistrekki koos pumbajaamadega. Väljapumbatav vesi puhastatakse settebasseinides heljumist ja suunatakse kraavide kaudu Narva jõkke. Aastas pumbatakse välja keskmiselt 60 mln m³ vett. [3]

Kihhi nimetus	Litoloogiline läbilõige	Sirgala kaeveväli			Narva kaeveväli		
		Min. paksus; m	Maks. Paksus; m	Keskmine paksus; m	Min. paksus; m	Maks. Paksus; m	Keskmine paksus; m
H		0,10	0,39	0,27	0,16	0,38	0,26
G/H		0,10	0,34	0,22	0,12	0,30	0,21
G		0,10	0,35	0,21	0,10	0,30	0,20
G/F ₂		0,95	1,43	1,15	0,82	1,28	1,03
F ₂		0,10	0,53	0,22	0,10	0,57	0,20
F ₁		0,20	0,55	0,35	0,16	0,57	0,39
E		0,00	0,77	0,52	0,10	0,66	0,53
E/D		0,00	0,25	0,08	0,08	0,11	0,06
D		0,00	0,23	0,08	0,03	0,12	0,07
D/C		0,00	0,45	0,23	0,11	0,35	0,24
C		0,17	0,85	0,47	0,01	0,62	0,39
C/B		0,04	0,33	0,18	0,03	0,30	0,19
B		0,15	0,93	0,42	0,25	0,51	0,38
B/A ₁		0,05	0,45	0,18	0,10	0,23	0,18
A ₁		0,05	0,43	0,12	0,04	0,16	0,10
A ₁ /A		0,02	0,16	0,05	0,01	0,05	0,03
A		0,05	0,31	0,13	0,05	0,18	0,12
F ₁ _A				2,82			2,68
sh. põlevkivi				2,09			1,98

Joonis 3. Tootsa kihindi läbilõige Narva karjääris (autori koostatud [3] põhjal) [Narva karjääri põlevkivikihtide läbilõige.dwg]

Litoloogiline läbilõige	Kivimite kirjeldus	Geoloogiline indeks	
	Turvas	bQIV	
	Eriteraline liiv	IgQIII/jr	
	Mergel	D2nr	
	Lubjakivi H põlevkivi H/G lubjakivi	O2kk	
	G põlevkivi G/F ₂ lubjakivi F ₂ -E põlevkivi		
	E/D lubjakivi D põlevkivi D/C lubjakivi C põlevkivi		
	C/B lubjakivi B põlevkivi B/A ₁ lubjakivi A ₁ -A põlevkivi		
	Savikas lubjakivi		O2uh

Joonis 2. Narva karjääri geoloogiline tüüpläbilõige (autori koostatud [3] põhjal) [Narva karjääri geoloogiline läbilõige.dwg]

1.3. Puhatu turbamaardla

Narva karjääri Sirgala mäeeraldise edelaosa kattub 1 226 ha suurusel alal üleriigilise tähtsusega Puhatu turbamaardlaga, kus kaevandab AS Tootsi Turvas. Vastavalt ümberhindamistöördele hõlmab Narva karjäär Puhatu turbamaardla vähelagunenud turbavarude plokke kokku 253,50 ha pindalal, kus varu kogus on 90 tuhat t ja hästilagunenud turbavarude plokke 763,91 ha pindalal, kus varu kogus on 3095 tuhat t. Avakaevandamisel pole võimalik Puhatu turbamaardla piiresse jäävat põlevkivi kaevandada, sest puudub võimalus tagada Maapõueseaduses nõutud arvele võetud turbavarude kaevandamisväärsena säilitamine. [3] [9]

1.4. Looduskaitse tingimused

Narva karjääri vahetus läheduses asuvad Kurtna maastikukaitseala, Puhatu looduskaitseala ja Vaivara maastikukaitseala (Joonis 1). Nimetatud kaitsealad kattuvad suures osas Natura 2000 loodusalaadega, seejuures kuulub Puhatu looduskaitseala ka Natura 2000 linnuala nimistusse. [3]

Kurtna maastikukaitseala jääb Narva karjääri läänepiirist enam kui 250 m kaugusele. Kurtna maastikukaitseala kaitse-eesmärk on Kurtna järvederikka mõhnastiku maastikuilme, unikaalsete järveökosüsteemide ja koosluste säilitamine ning sellega seotud puhkeväärtuste kaitse ja tutvustamine. [3]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Puhatu looduskaitseala asub Narva karjäärist vahetult lõunas ning seetõttu tuleb jätta selle põhjapiirile vähemalt 300 m laiune puhvertsoon. Puhatu looduskaitseala on moodustatud Puhatu soostiku ja sealsete kaitsealuste liikide kaitseks. [3]

Vaivara maastikukaitsealal on kaks sihtkaitsevööndit, neist Viivikonna sihtkaitsevööndi läänepiir jääb Narva karjääri aastakümneid tagasi kaevandatud osast 300 m kaugusele. [3]

1.5. Kaevandamisviisi kirjeldus

Narva karjääris kasutatakse põlevkivi väljamiseks vaalkaevandamise meetodit. Karjäär on jagatud 13-ks kaevetranšeeks. Vaalkaevandamisel viiakse paljandustööd läbi kaheastanguliselt veovahendeid kasutatama. Ülemise astangu kvaternaarisetted eemaldatakse massiivi eelnevalt kobestamata, kaljune katend kobestatakse enne eemaldamist lõhketöödega. Paljandustöödel paigutatakse katendikivimid 10 m³ või 15 m³ kopamahuga draglain-ekskavaatoritega väljatöötatud alale sisepuistangusse. Paljandamisel kasutatakse lisaks draglain-ekskavaatoritele ka buldoosereid ja väiksemaid mehaanilisi ekskavaatoreid. Kaevesammu laius on vahemikus 30 - 45 m. Draglain paikneb eelnevalt lõhketöödega kobestatud kaljuste kivimite peal ja teisaldab mõlema alaastangu katendit ühest seisupaigast. Geoloogilise struktuuri ja tehnoloogilise otstarbekuse tõttu teisaldatakse katend kahe astanguga [3] [6] [10]:

- ülemise ammutusega pehmed Kvaternaarisetted
- alumise ammutusega kaljused Ordoviitsiumi ja Devoni kivimid, mis kobestatakse enne teisaldamist puurlõhketöödega.

Narva karjääris kasutatakse nii põlevkivi osalis-selektiivset kaevandamisviisi kui koosväljamist. Osalis-selektiivse kaevandamisviisi korral väljatakse tootsa põlevkivikihi kihid selektiivselt, kihid kobestatakse enne väljamist buldooserkobestitega. Põlevkivi kobestamine ja kaevandamine toimub kolmeastmeliselt [3]:

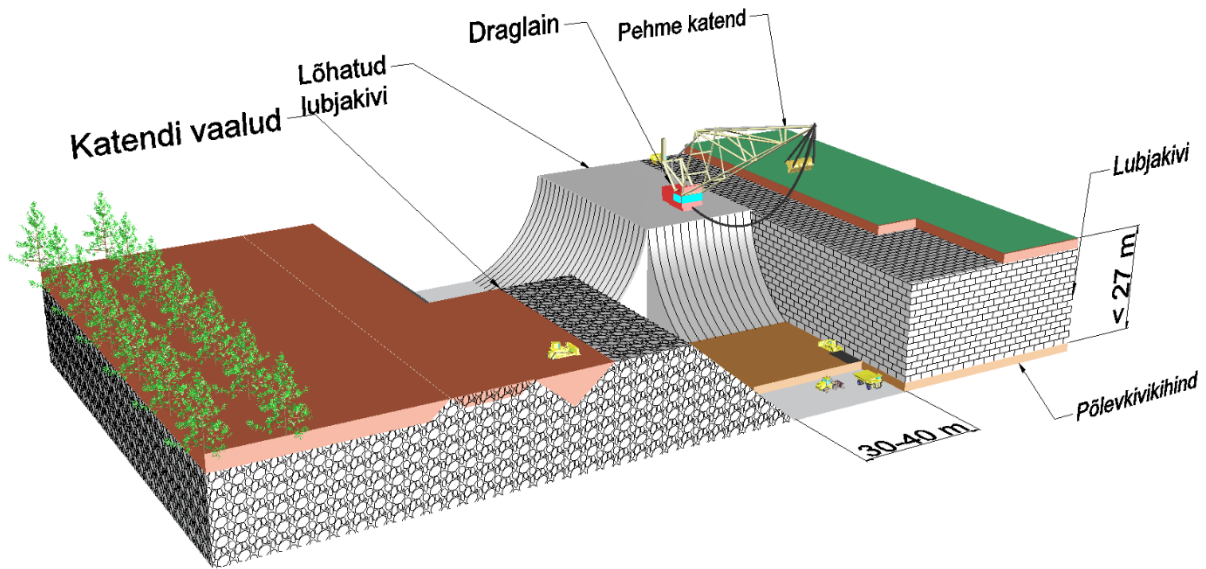
- ülemine aste, kihid E-F;
- vaheaste, kihid D/C ja D;
- alumine aste, kihid A-C.

Lubjakivi vahekiht D/C kobestatakse eraldi ja paigutatakse koristusekskavaatori mitmekordse ümberekskaveerimisega väljatöötatud alasse sisepuistangu jalamile. Koos D/C kihiga läheb kadudesse ka D põlevkivikiht. Koosväljamisel kobestatakse põlevkivi tootuskiht enne väljamist puur-lõhketöödega. [3] [10]

Kobestatud kaevise laadimiseks kasutatakse valdavalt kopplaadureid, vähem kasutatakse pärikopaga ekskavaatoreid. Kaevise veoks mööda karjääritranšeid karjääri põlevkivilattu kasutatakse 55 tonnise kandevõimega BelAZ kallureid. Narva karjääris on kaks põlevkivi laadimis-purustuskompleksi: Sirgala laadimis-purustuskompleks, mis asub Sirgala mäeeraldise põhjaosas ja Narva laadimis-purustuskompleks, mis asub Narva mäeeraldise põhjaosas. Laadimis-purustuskompleksis toimub kaevise purustamine tükisuuruseni 0 - 300 mm ja laadimine raudteevagunitesse. Lisaks raudteetranspordile toimub ka vedu kalluritega Enefit õlitehase ühendlattu. [3]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Narva karjääris toimub avakaevandatud ala korrastamine metsamaaks paralleelselt kaevandamisega. Sisepuistangud tasandatakse ning seejärel viiakse läbi tehnoloogiline ja bioloogiline korrastamine. Lisaks metsamaaks korrastamisele on alale rajatud ka 2830 ha suurune Kaitseväge Sirgala harjutusväljak. [3]



Joonis 4. Vaalkaevandamine Narva karjääris [Vaalkaevandamine Narva karjääris.dwg]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

2. ALLMAAKAEVANDAMISE VÕIMALUSED NARVA KARJÄÄRIS

Narva karjääri 13-ndas tranšees ammandus põlevkivivaru 2015. aasta keskel ning samamoodi on ammandumas varu tranšees nr. 1. Neljandas tranšees lähenevad mäetööd AS Tootsi Turvas poolt kaevandatava Puhatu mäeeraldise piirile ja 2018. aastal peatatakse selles tranšees avakaevandamine. [3]

Lisaks tööde peatamisele tranšeedes 1,4 ja 13 kasvab kaevetööde liikumisel lõuna suunas kõigis kaevetranšeedes katendi paksus põlevkivikihi kohal. Tehnoloogilistel ja majanduslikel põhjustel on olemasoleva paljandusmasinate pargiga (EŠ15/90 ja EŠ10/70) Narva karjääris vaalkaevandamisel kaevandamise piirsügavuseks 27 m. Käesolevaks ajaks on Narva karjääri kaevetranšeed jõudnud piirkonda, kus oleks otstarbekas minna üle allmaakaevandamisele. [3] [11] [12] [13]

Tööde peatamise ja katendi kasvu tagajärjel väheneb põlevkivi kaevandamise maht Narva karjääris 3 mln tonnile aastas. Karjääri tootmisvõimekuse tõstmiseks ja kaevandamise omahinna kasvu vältimiseks on vaja lisaks avakaevandamisele Narva karjääris kasutusele võtta ka allmaakaevandamise tehnoloogia. Allmaakaevandamisel on võimalike kaevandamistehnoloogiate valik piiratud katekivimite püsivusega, mis sõltub Ordoviitsiumi lubjakivikihi paksusest. Tulptervikutega kamberkaevandamisel peab minimaalne kaljuse kivimi paksus põlevkivikihi kohal olema vähemalt 10 m (Tabel 2). See tingimus pole igas Narva karjääri allmaakaevandatavas osas rahuldatud, mistõttu on otstarbekas kasutusele võtta pikaae-kombainiga lankkaevandamine (Lisa 1). Allmaakaevandatava ala pindala Narva karjääris on 2 712 ha (Joonis 5). [3] [11]



Joonis 5. Narva karjääri allmaakaevandatav ala ja kaevetranšeed (koostatud töö autori poolt [3] põhjal) [Narva karjääri allmaakaevandatav ala.wor]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Tabel 2. Kaevandamistehnoloogiate piirangud [14] [Kaevandamistehnoloogiate piirangud.xlsx]

Kaevandamistehnoloogia	Katendi minimaalne paksus, m	Katendi maksimaalne paksus, m	Kaljuse katendi minimaalne paksus, m
Vaalkaevandamine draglainidega EŠ 10/70 ja EŠ 15/90	10	27	-
Vaalkaevandamine draglainidega EŠ 10/70 ja EŠ 15/90 koos ümberkühveldamisega	23	27	-
Vaalkaevandamine draglainidega EŠ 10/70 ja EŠ 15/90 koos ümberkühveldamisega ja/või buldooseritega	25	33	-
Vaalkaevandamine draglainidega EŠ 10/70 ja EŠ 15/90 koos ümberkühveldamisega ja/või buldooseritega + ekskavaator + kallur	25	35	-
Konveiersillaga katendi teisaldamine	30	60	-
Eskavaator + kallur	0	30	-
Kamberkaevandamine puurlõhketööde ja tulptervikutega	10	150	10
Lankkaevandamine kombainiga	-	-	5
Kaevandamine lühieekombainiga	-	-	8

2.1. Lae varistamisega lankkaevandamine Narva karjääris

EEK on Narva karjääris plaaninud 2017. aastal kasutusele võtta lae varistamisega lankkaevandamise tehnoloogia, kus põlevkivi raimamiseks kasutatakse pikaekombaini. Kombainiga lankkaevandamist kasutatakse peamiselt kihtmaardlates ning sellega saab väljata peaaegu kogu maavararessursi. Kaasaegsed kombainikompleksid tagavad kõrge tootlikkuse ja vajavad vaid minimaalses koguses tervikute jätmist paneelstrekkide hoidmiseks. Kombainiga lankkaevandamisel langeksid põlevkivikaod Narva karjääris 5%-ni ja kogu karjääri tootlikkus tõuseks 7 mln tonnini aastas. [3] [11] [15] [16] [17]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Kombainiga lankkaevandamise positiivsed küljed [11] [17] [18]:

- Väheste liikuvate masinate arv võrreldes kamberkaevandamisega tagab tööliste turvalisuse
- Kaevandamistööd on kontsentreeritud
- Kuna pikaekombainiga lankkaevandamine on pidev ja täielikult mehhaniseeritav protsess, siis on selle tootlikkus kõrgem kui kamberkaevandamisel (laavade lage pole vaja ankrutega toetada)
- Tuulutusskeemid on lihtsad
- Maapinna stabiilsus pärast vajumist

Kombainiga lankkaevandamise negatiivsed küljed [18] [15]:

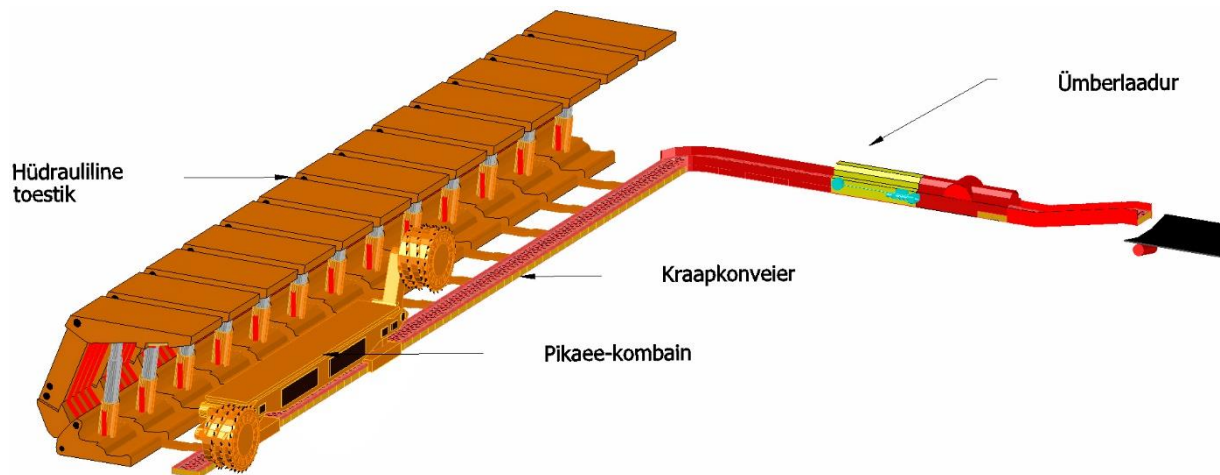
- Suuremad investeeringud kui kamberkaevandamisel
- Laavade rajamise ajal on tootlikkus madal.
- Raskesti varistavate lagede puhul võivad esineda kollapsid
- Maapinna vajumine

Laavade ettevalmistamine kombainiga lankkaevandamiseks saab alata pärast karjääriviisilise kaevandamise lõpetamist Narva karjääri kaevetranšees. Laava piiratakse kahest küljest strekkidega ning ühest otsast lõikelõõriga. Kombainiga kaevandamine toimub lõikelõõrist paneelveostreki suunast. Maailmakogemuse põhjal võib laavade pikkus olla kuni 400 m ja lankide pikkus kuni 3500 m. Kombainiga lankkaevandamisel on kogu tehnika omavahel integreeritud (Lisa 5). [3] [11] [19] [20]

Kombainiga lankkaevandamise kompleksi kuulub [21]:

- Pikaekombain
- Kraapkonveier
- Hüdrauliline toestik
- Ümberlaadur

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes



Joonis 6. Lankkaevandamisel kasutatav kombainikompleks [Lankkaevandamisel kasutatav kombainikompleks.dwg]

2.1.1. Põlevkivikihindi raimamine

Põlevkivikihindi raimamiseks massivist kasutatakse kombainiga lankkaevandamise puhul pikaaekombaini, mille tööorganiks on lõikehammastega varustatud teokujuline lõiketrummel, mis pöörlemisel purustab põlevkivikihindi. Lõiketrumlid paiknevad kombaini mõlemas otsas ja on piiratud vertikaalse liikuvusega. Kombain liigub esi pikkuses külgsuunas edasi-tagasi kraapkonveieri kohal ning laadib purustatud kaevisse kraapkonveierile. Pärast iga riba kaevisse raimamist liiguvad automatiseeritud süsteemide abil hüdrauliline toestik, kraapkonveier ja kombain kaeveesile järele. [3] [16] [19] [20] [22]

Põlevkivi tootuskihindi raimamise efektiivsust on keeruline hinnata, sest see koosneb kihtidest, mis erinevad suurel määral nii füüsiliste kui ka mehaaniliste omaduste poolest. Põlevkivikihindi kihtide vastupanu mehaanilisele murdmisele saab hinnata järgmiste omaduste järgi [23]:

- Konkretsioonide kuju, suuruse ja maht
- Kihtide paksus
- Kihtide vastupanu lõikamisele
- Kihtide haprus
- Kihtide murtavus

Keskmine konkretsioonide paksus põlevkivi tootuskihindi põlevkivikihtides on 3-4 cm ja pikkus kuni 12 cm. Konkretsioonide ja lubjakivi vahekihtide lõiketugevus on 2-2,5 korda kõrgem põlevkivikihtide lõiketugevusest, samas on põlevkivikihindi kihtide abrasiivsus madal (Tabel 3). Kogu põlevkivikihindi tootuskihindi väljamisel on lubjakivi sisaldus kaevises 34-43%. Alo Adamsoni poolt läbiviidud uuringute põhjal jõuti järeldusele, et põlevkivi on kombainiga raimatav, kuid kivisöes töötamiseks mõeldud kombainide kasutamiseks Eesti põlevkivimaardla tingimustes tuleb kombaini lõiketrumlil olevaid lõikehambaid muuta. [23]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Tabel 3. Põlevkivi tootuskihindi kihtide löiketugevus ja survetugevus [23] [Põlevkivi tootuskihindi kihtide löiketugevus ja survetugevus.xlsx]

Kihi indeks	Löiketugevus, N/mm ²	Survetugevus, MPa
F ₁	190	37
E	150	35
E/D	400	75
D	240	32
D/C	1030	84
C	220	28
C/B	440	80
B	180	37
B/A	670	69
A	120	28

Kombaini energiakulu ja põlevkivikihi löikamise parameetrid määratakse kui on teada kombaini vajalik tootlikkus, vajalik põlevkivi kvaliteet/tükisuurus (Tabel 4). Kombainiga põlevkivikihi raimamisel võib peenpõlevkivi (< 25 mm) osakaal väljatud põlevkivis olla 60-70%. Keskmise tükisuuruse suurendamiseks on soovitatud vähendada raimamise energiamahukust. [23] [24] [25]

Tabel 4. Kombainiga raimamise energiakulu ja keskmine tükisuurus [25] [Kombainiga raimamise energiakulu ja keskmine tükisuurus.xlsx]

Kivim	Energia erikulu, MJ/m ³	Keskmine tükisuurus, mm
Paekivi	0,9.....9,0	30.....90
Põlevkivi	0,9.....2,0	20.....80

2.1.2. Laekäitlus ja maapinna vajumine

Kaevandamise käigus lae juhtimisel on vaja optimeerida kolme tingimust [15]:

- Tagada tööliste maksimaalne ohutus
- Võimalikult väiksed mõjud maapinnale
- Võimalikult madalad maavarakaod kaevandamisel

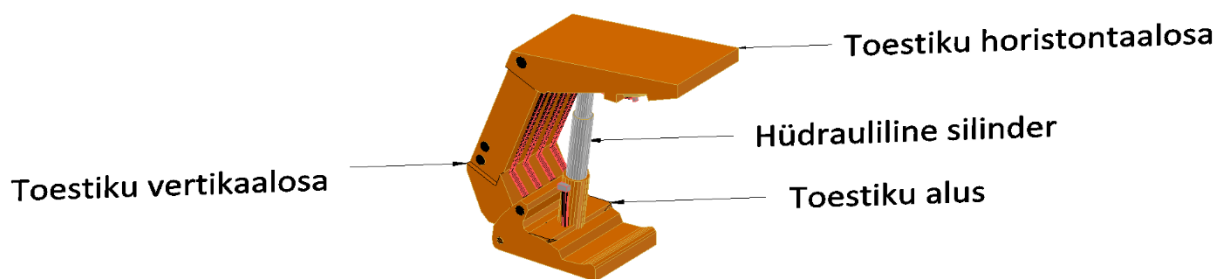
Nendele tingimustele vastamiseks on parim lahend lankkaevandamine koos lankidevaheliste tervikute väljamisega või nende tekkimise vältimisega. [15]

Kombainiga lankkaevandamise kasutatakse lae toestamiseks hüdraulilist toestikku, mille kõik sektsioonid on tungraudadega seotud kombaini all oleva kraapkonveieriga. Toestiku sektsioonid paigutatakse üksteise kõrvale kogu ee pikkuses. Automatiseeritud süsteemis liiguvad esi edasinihke järel toestiku sektsioonide kraapkonveierile järgi. [3] [16]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Hüdraulilise toestiku peamised osad on (Joonis 7) [20]:

- Horisontaalosa – Suure läbimõõduga tugevdatud terasest plaat, mis võtab vastu mäerõhu. Kaitseb nii konveierit, kombaini kui ka töölisi
- Vertikaalosa – Kaitseb varistamisega kaevandamise korral töölisi ja tehnikat kaevandatud alas variseva materjali sattumise eest töötsooni
- Hüdrauliline silinder – vajalik horisontaalosa lähislae vastu surumiseks
- Alus – lühem kui horisontaalosa, mistõttu saab kraapkonveieri paigutada horisontaalosa alla



Joonis 7. Hüdrauliline toestik [Hüdrauliline toestik.dwg]

Lae varistamisega lankaevandamisel toimub põlevkivikihi väljamisel maapinna vajumine 1,5...2 m ning moodustuvad riskülikukujulised varingunõod, mille kuju ühtib laavade kujuga (peamine vajumine toimub laavade keskosas. Maapind stabiliseerub 2 - 3 aasta jooksul pärast lae varistamist. Varingunõod võivad maapinnal põhjustada veerežiimi muutuse, millega reeglina kaasneb liigniiskumine. [3] [14] [19]

2.1.3. Kaevis transport

Kombainiga raimatud kaevis transporditakse eest kombaini all oleva kraapkonveieriga lintkonveierini. Kraapkonveier peab olema tugeva konstruktsiooniga, et see peaks vastu kombaini raskusele ja oleks kaitstud kukkuvat kaevis eest. Konveieri ajamipea asub laava konveierstrekis, saba laava külgstrekis. Kraapkonveieri edasinihitamine toimub hüdraulilise toestiku sektsioonide teisaldamisel tungraudadega. Kraapkonveieril liigub raimatud kaevis laava konveierstrecki ümberlaadurisse, millele on paigaldatud purusti suuremõõduliste tükide purustamiseks. Ümberlaaduri üks külge asub kraapkonveieri all, teine ülestõstetav külge paikneb lintkonveieri kohal ja laadib kaevis lindile. [3] [18]

Kaevis vedu laavast maa peale toimub lintkonveieriga, kus moodustatakse ajutised kaevis laod. Nendest ladudest toimub kaevis vedu tarbijate juurde samade karjäärrikalluritega, mida kasutatakse Narva karjääris vaalkaevandamisel väljatud kaevis veoks. [3]

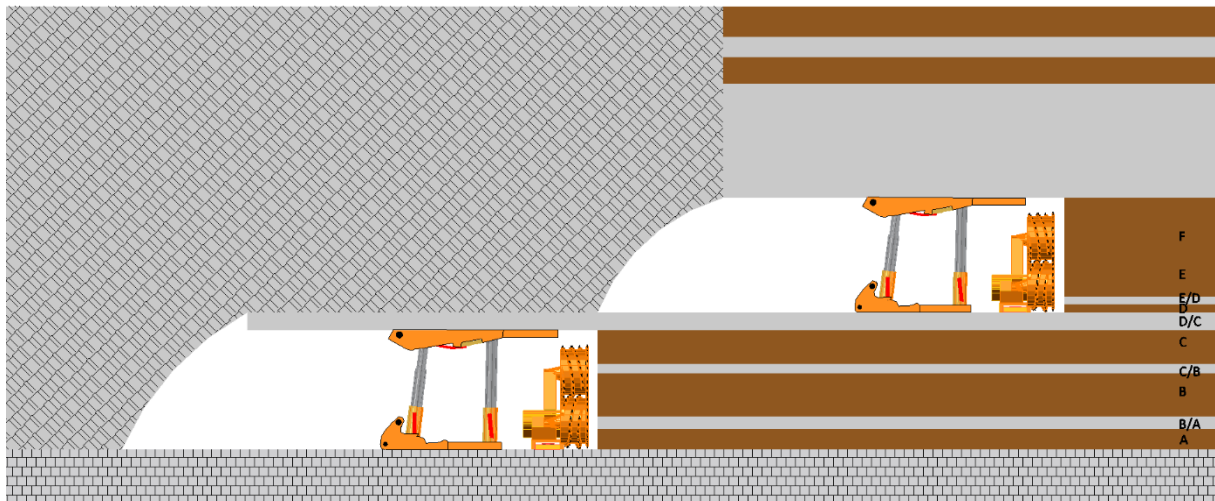
2.2. Lankkaevandamise kogemus Eestis

Kombainiga lankkaevandamise tehnoloogia lae täieliku varistamisega Eesti põlevkivikaevanduste tingimustes töötati välja 1970-ndatel ja seda kasutati kuni 2000. aastani. 1970-ndatel aastatel toimus põlevkivi tootuskihi alumiste kihtide A, B ja C kaevandamine lae täieliku varistamisega algul mehaanilise, hiljem hüdraulilise toestiku „Sputnik“ abil. Kuna põlevkivi tootuskihindist väljati vaid kolm alumist põlevkivikihti, siis olid põlevkivikaod ligi 50%. Vaatamata suurtele kadudele osutus selline lankkaevandamise meetod sobivaks aladel, kus muu kaevandamistehnoloogia kasutamine halbade laetingimuste tõttu oli praktiliselt võimatu. Laavade pikkus lankkaevandamisel oli 150-170 m ja kaevelankide pikkus 600-800 m. Laavade ettevalmistamisel oli konveier- ja külgstreki kõrguseks oli 2,8 m ja alglõõri kõrguseks 1,5 m. Kasutatud kombaini haardelaiuseks oli 0,63 m ning ühe kombainilaava ööpäevaseks toodanguks 1200-1300 tonni põlevkivi. Antud tehnoloogiat iseloomustas kaevurite kõrgem tööviljakus võrreldes kamberkaevandamisega, kuid oli samas kapitalimahukas. Mõnel aastal moodustas kombainiga lankkaevandamisel väljatud põlevkivi kuni 10% allmaatoodangust. Varistatud lae kohal toimus maapinna vajumine 0,8...1,5 m. [10] [26] [27]

1970. aastail katsetati Ahtme kaevanduses uudset lankkaevandamise tehnoloogiat, kus põlevkivikihtid väljati kahes osas (Joonis 8) [27]:

- Esmalt väljati ülemises laavas põlevkivikihid E-F kogupaksusega umbes 1,1 m
- Kindlaksmääratud vahemaa järel väljatakse samas laavas ka põlevkivikihid A-C kogupaksusega 1,5 m. Alumisele laavale oli laeks lubjakivi vahekiht D/C, mida ei väljatud.

Antud kaevandamistehnoloogia ei andunud häid tulemusi halbade töötingimuste tõttu alumises laavas ning keerulise laekäitluse tõttu. [27]



Joonis 8. Põlevkivi tootuskihi väljamine kombainidega kahes osas [Põlevkivi tootuskihi väljamine kombainidega kahes osas.dwg]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

3. KAEVANDUSTE TÄITMINE

Kaevanduste täitmine on protsess, kus kasutatakse täitematerjaliga täidetakse kaevandamise käigus läbindatud kaeveõõsi ning seeläbi hoitakse ära maapinna vajumine. Täitmata kaevanduste kohal võivad esineda maapinna vajumised isegi kaks sajandit peale kaevanduse sulgemist. [28] [29]

Tehnilistel ja keskkonnakaitselistel põhjustel kasutatakse kaevandustes täitmisega kaevandamistehnoloogiat paljudes riikides nt. Austraalias, Indias, Poolas, Saksamaal, Hiinas, Iirimaal, Kanadas, LAV-is, USA-s ja Türgis. Kaevanduste täitmise võib olla mitu eesmärki [30] [31] [32] [33] [34]:

- Maapinna vajumiste tõenäosus väheneb
- Keskkonnaprobleemide vähendamine
- Maavarakadude vähendamine
- Kokkuhoid keskkonnatasudelt
- Tööpinna ettevalmistamine kaevuritele
- Tuulutuse tõhustamine (lae varistamisel tekivad tuulutuskaod varisenud materjalis)
- Happelise kaevandusvee neutraliseerimine (peamiselt USA)

Täitmisega kaevandamistehnoloogiat kasutati juba 19. sajandil - Poola söekaevanduste täitmisest on olemas andmed 1893-st aastast. Sellest ajast alates on pidevalt tehtud edusamme optimaalse täitesegu koostise, transpordisüsteemi ja tehnoloogia leidmisel. Täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtul tuleb kaevandamisskeemis omavahel integreerida täitmise ja kaevandamise tsüklid, seega täitmise kiirus peab muutuma vastavalt kaevandamise kiirusele ja vastupidi. [5] [35]

Peamiselt kasutatakse maailmas täitematerjalide või täitesegu maa alla transportimiseks kas auto- või torutransporti. Torutranspordi kasutamisel on paljudes kaevandustes transpordi lihtsuse tõttu kasutusele võetud nn. pastakujul täitesegu, mis koosneb täitematerjalist, sideainest ja vähesel määral veest. [36] [37]

Täiteseguga kaeveõõnte täitmine omab perspektiivi ka Eesti põlevkivikaevanduste tingimustes. Täitesegu komponentidena on väärtuslikuks tooraineks elektrijaamades põlevkivi põletamisel tekkiv põlevkivituhk ja põlevkivi kaevandamise kõrvalproduktiks olevast aherainest valmistatud killustik. Elektrijaamade tuhkade kasutamine on maailmas levinud praktika, näiteks Poolas on elektrijaamade lendtuhka kasutatud kaevanduste täitmiseks alates 1980-ndatest aastatest. Põlevkivituha ja aherainekillustiku kasutamine kaevanduste täitmisel võimaldab vähendada tootmisjääkide ladestamise mahtu maapinnal, saavutada kokkuhoid keskkonnatasudelt ja parandada keskkonna olukorda. Täitmisega kaevandamistehnoloogia rakendamisel kuulub altkaevandatud maa klassi „stabiilne“, mis võimaldab selle paremat kasutamist rahvamajanduses. [26] [4]

Täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtmine taandub lõpuks majanduslikule tasuvusele. Seetõttu tuleb täitmise kasutuselevõtuks eelnevalt läbi viia põhjalik majanduslik analüüs, kusjuures hinnata tuleb ka tulusid, mis saadakse keskkonnasõbralikkuse

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

kasvatamisest, maapinna püsivusest, suurenenud ohutusest jne. Kaevandatava maavara madala turuhinna korral ei pruugi kaeveõõnte täitmine ennast alati ära tasuda, sest täitmise kulud võivad maavara kaevandamise omahinnast moodustada kuni 30%. Täitmise hinnast suure osa moodustavad sideainega (tsementeeruv aine) seotud kulutused. Täitmine peab olema võimalikult odav, kuid samas piisavalt efektiivne, et tagada maapinna püsivus. [8] [23]

3.1. Täitmise varasemad katsed Eestis

Eestis täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtmiseks alustati uuringutega 1980-ndatel aastatel. Uuringute eesmärgiks oli maavarakadude vähendamine, tootmisjäätmete- ja jääkide ohutu kasutamine ning maapinna püsivuse tagamine. Uuringutes osalesid Tallinna Tehnikaülikooli mäeinstituut, Eesti Põlevkivi, Škotsinski nim. Mäendusinstituudi Filiaal Kohtla-Järvel ja NIPI Silikaatbetooni instituut. Uuringute praktiliseks väljundiks olid välikatsed [4]:

- Kiviõli kaevanduses –täideti 30000 m³ kaeveõõsi;
- Viru kaevanduses – valmistati 10 m³ mahuga tehistervik;

Uuringute tulemused kinnitasid põlevkivituhast ja teistest täitematerjalidest koosneva täitesegu kasutamise võimalust ja otstarbekust põlevkivi allmaatehnoloogias. Läbiviidud leostuskatsete uuringutes leiti, kahjulike elementide sisaldus leostunud vees ei ületa lubatud piire [4].

3.1.1. Katsed Viru kaevanduses (1985)

Viru kaevanduses valmistati põlevkivituhast, fosforiidi rikastamisjääkidest (flotoliiv) ja veest 10 m³ mahuga tehistervikud. Kokku kasutati tehisterviku valmistamiseks 6120 kg põlevkivituhka, 6120 kg fosforiidi rikastusjääke (flotoliiva) ja 3150 kg vett. 28 päeva möödudes mõõdeti tehisterviku survetugevuseks 1,3 MPa ning 180 päeva möödudes oli tehisterviku survetugevus 14,44 MPa. [38]

Antud tehisterviku rajamise katsest tehti järgmised järeldused [38]:

- Kivistumisel tehistervik paisub tolmpõletuskatlast pärit põlevkivituha omaduste tõttu kuni kaeveõõne laeni (3-5% mahust).
- Tehisterviku kivistumine piirab sellest kahjulike elementide leostumist.
- Põlevkivituha eksotermiliste reaktsioonide tulemusel toimuv tehisterviku kuumenemine kiirendab selle kivistumist.

3.1.2. Katsed Kiviõli kaevanduses (1989)

Kiviõli kaevanduses läbiviidud katsete eesmärgiks oli kaeveõõnte täitmine kokku üle 30 000 m³ suurusel mahul. Kaeveõõned asusid 7-8 m sügavusel ning nende täitmisel stabiliseeriti kvaasistabiilne maa-ala. Maapealsete objektide all oleva maapinna ülevõltoimiseks kasutati kivistuvat täitesegu, mis pidi saavutama survetugevuse 2-3 MPa. Täitematerjalidena kasutati aherainekillustikku, põlevkivituhka ja flotoliiva. [39]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Täitmiseks kasutati erinevaid meetodeid [39]:

- **Mehhaaniline meetod** – Kaeveõõsi täideti täitemasinaga M-200, mille tootlikkus oli 30 m³/h. Antud masinaga oli võimalik täita kuni 4,5 m kõrguseid kaeveõõsi. Täitematerjalina kasutati lubjakivikillustikku fraktsiooniga 25-125 mm. Probleemiks oli tehsterviku ebaühtlane ehitus (suuremad ja väiksemad tükid paigutusid erinevatele kaugustele), mistõttu oli koormusel 1,0-1,5 MPa suhteliseks deformatsiooniks 5-7,5%.
- **Valumeetod** – Maapinnal kasutati tarduva täitesegu valmistamiseks betoonsegistit tootlikkusega 15-35 m³/h. Täitematerjali maa alla transportimiseks kasutati torudes suruõhku. Täitematerjali transporditi kuni 360 m kaugusele. Täitesegus kasutati sideainena põlevkivituhka, täitematerjalina kas flotoliiva või liiva koos killustikuga, plastifikaatorina glaukoniitliivakivi ja vett. Tehstervikud saavutasid 90 päeva järel survetugevuse kuni 9,0 MPa (Tabel 5).

Tabel 5. Valumeetodil valmistatud terviku parameetrid [Valumeetodil moodustatud tehsterviku parameetrid.xlsx]

Parameeter	Tulemus
Vajumine (cm)	12-14
Mahumass (t/m ³)	2,15-2,2
Nihketugevus (Pa)	20-90
Survetugevus 28 päeva järel (MPa)	0,5-2,2
Survetugevus 90 päeva järel (MPa)	3,7-9,0
Elastsusmoodul 28 päeva järel (MPa)	400-700
Elastsusmoodul 90 päeva järel (MPa)	900-3000
Poisson'i tegur	0,15-0,28
Suhteline deformatsioon	<5 %

- **Injektsiooni meetod** – Maapealsete objektide all olevate kaeveõõntes (mahuga 8000 m³) täitmiseks kasutati injektsioonimeetodit. Kõigepealt paigutati täitemasinaga M-200 kaeveõõntesse aherainekillustik ning seejärel lisati torudega killustikule täitesegu, mis koosnes põlevkivituhast, liivast veest. Tehsterviku kandevõime suurenes võrreldes mehaanilise meetodiga tunduvalt ja kokkusurutavus vähenes võrreldes mehaanilise meetodiga 2-3 korda.

3.1.3. Kukuruse kaevanduse täitmiskatsed

Kukuruse kaevandusest kaevandati põlevkivi aastatel 1916-1967 ning strekkide toetamiseks kasutati puittoestikku. 2009. aastal sooviti üle Kukuruse kaevanduse ehitada maanteed, kuid raskete teetöomasinade tõttu toimus strekkide alal varing. Edasiste varingute vältimiseks täideti strekid aherainekillustikust, liivast, põlevkivituhast ja veest koosneva täiteseguga. Täitmiseks puuriti maa pealt strekkidesse 27 puurauku. Maa alla pumbati 1500 m³ täitesegu, mis paigutus maa all koonusekujuliselt (kaldenurgaga 20-30°). Täitekeha survetugevuseks mõõdeti 6,2 MPa. [40]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

3.2. Põlevkivituhk

Eestis asuvad põlevkivi peamised tarbijad Ida-Virumaal, kus seda kasutatakse elektri ja põlevkiviõli tootmiseks. EE kontsernis toimub põlevkivist elektri tootmine Narva Elektriijaamades, mille all kuulub kolm tootmisüksust: Balti Elektriijaam (BEJ), Eesti Elektriijaam (EEJ) ja Auvere Elektriijaam (AEJ). Põlevkiviõli toodetakse kahes Enefit 140 ja ühes Enefit 280 seadmes (number nimes näitab mitu tonni põlevkivi tunnis töödeldakse). [41]

BEJ alustas tööd 1959-ndal aastal ning selle projekteeritud võimsus oli 1430 MW, käesolevaks hetkeks on osa energiaplokkidest demonteeritud ning elektriijaama maksimaalne võimsus on 432 MW. Elektriijaamas töötab üks tolmpõletustehnoloogiaga (PF) energiaplokk ja üks keevkihtkatla (CFB) tehnoloogiat kasutav energiaplokk, kus on võimalik põletada ka biomassi. [42] [43]

EEJ alustas tööd 1969. aastal ning selle projekteeritud võimsus oli 1610 MW, käesolevaks hetkeks on elektriijaama maksimaalne võimsus 1355 MW. Elektriijaamas töötab 7 PF energiaplokki, millest neljale on paigaldatud väävlipuhastusseadmed. Lisaks PF energiaplokkidele on EEJ-s ka üks CFB energiaplokk. [44] [43]

AEJ alustas tööd 2015. aastal ning selle projekteeritud võimsus on 300 MW. Elektriijaamas on üks CFB energiaplokk, kus on võimalik põletada ka biomassi. [44]

Põlevkiviõli tootmist Enefit 140 seadmetes alustati 1980. aastal ning pideva tehnoloogia täiustamine käigus on vahetatud välja ligi 70% algsest tehnikast. Vanematest seadmetest oluliselt keskkonnasõbralikumaks ja efektiivsemaks Enefit 280-s toodeti esimesed tonnid põlevkiviõli 2012. aastal. [45] [46]

Põlevkivist energia tootmise algusest kuni tänaseni on tuhaväljadele ladestatud üle 280 miljoni tonni põlevkivituhka ja tuhamägede pindala katab umbes 20 km² suuruse ala. Põlevkivi põletamisel tekib igal aastal 5-7 miljonit tonni põlevkivituhka, millest taaskasutatakse vaid 3-5%. Põlevkivituha taaskasutamise juures on oluline, et taaskasutamise asukoht oleks soojuselektriijaamade läheduses, muidu poleks tuha transport otstarbekas. Just läheduse tõttu elektriijaamadele oleks üheks parimaks tuha taaskasutamise võimaluseks Ida-Virumaal asuvate kaevanduste täitmine. [47] [48] [49] [50] [51]

Tabel 6. Põlevkivituha tekkimine EE kontsernis, t (EE andmetel) [Põlevkivituha tekkimine EE kontsernis.xlsx]

Tootmisüksus	2 017	2 018	2 019	2 020
Auvere Elektriijaam CFB	950 000	1 100 000	1 100 000	1 100 000
Eesti Elektriijaam PF	1 300 000	1 150 000	750 000	700 000
Eesti Elektriijaam CFB	450 000	500 000	500 000	500 000
Balti Elektriijaam PF	0	0	0	0
Balti Elektriijaam CFB	750 000	600 000	700 000	700 000
Enefit 140	900 000	900 000	900 000	900 000
Enefit 280	850 000	850 000	900 000	950 000
KOKKU	5 200 000	5 100 000	4 850 000	4 850 000
sealhulgas:				
Kokku CFB	2 150 000	2 200 000	2 300 000	2 300 000
Kokku PF	1 300 000	1 150 000	750 000	700 000

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

4. KAEVANDATUD ALA TÄITMISEGA LANKKAEVANDAMISE TEHNOLOOGIA NARVA KARJÄÄRIS

EEK poolt Narva karjääris plaanitava lae varistamisega lankkaevandamise puhul toimub maapinna vajumine. Antud töös pakub töö autor välja tehnoloogilise lahenduse kaevandatud ala täitmiseks põlevkivituhast ja aherainest koosneva täiteseguga. Narva karjääri geoloogiliste puuraukude andmetena on kasutatud Vello Kattai poolt koostatud „Narva karjäärivälja puuraukude digitaalset andmebaasi“. Kokku on antud andmebaasis 497 puuraugu andmed, millest allmaakaevandataval alal paikneb 197 puurauku. [52] [53]

4.1. KOMBAINLAAVADE PARAMEETRID

Kombainlaavade projekteerimisel on otstarbekas need rajada antud piirkonna geoloogiliste ja tehnoloogiliste piirangute juures maksimaalse pikkusega. Laavade ja lankide pikkuste määramisel on vaja arvestada maavaralasuundi kuju, geoloogilisi tingimusi, kaeviselise transporditingimusi, tuulutusskeemi ja energiavajadust. Lisaks eelnevalt mainitule seavad laavade pikkusele piiri ka kraapkonveieri parameetrid, kuid tänapäeval toodetakse järjest võimsamate ajamite ja tugevama ketiga kraapkonveiereid. Kraapkonveieri ajami võimsuseks võib olla kuni 1000 kW ja keti paksuseks 50 mm. Selliste kraapkonveierite abil on võimalik kaevandada ka kuni 400 m pikkustes laavades. [18] [20] [54]

Pika laava eelised [18]:

- Kombain suudab raimata ühe möödumisega rohkem maavara
- Väheneb ajakulu kombaini liikumise suuna ümberpööramisele
- Tehnikat peab ühest laavast teise harvemini ümber paigutama (tehnikat ümberpaigutamiseks laavade vahel kulub kuni 2 nädalat)
- Suureneb kombainide poolt väljatava kaeviselise suhe lankide ettevalmistamisel väljatavasse kaeviselisse.
- Uute lankide ettevalmistamiseks on rohkem aega.

Iga laava piiratakse ettevalmistustööde käigus kahe kaeveõõnega: konveier- ja külgstrekiga ning laava algusesse ja lõppu rajatakse kambrid, kus toimuvad kombainikompleksi monteerimise- ja demonteerimistööd. [3] [16] [18]

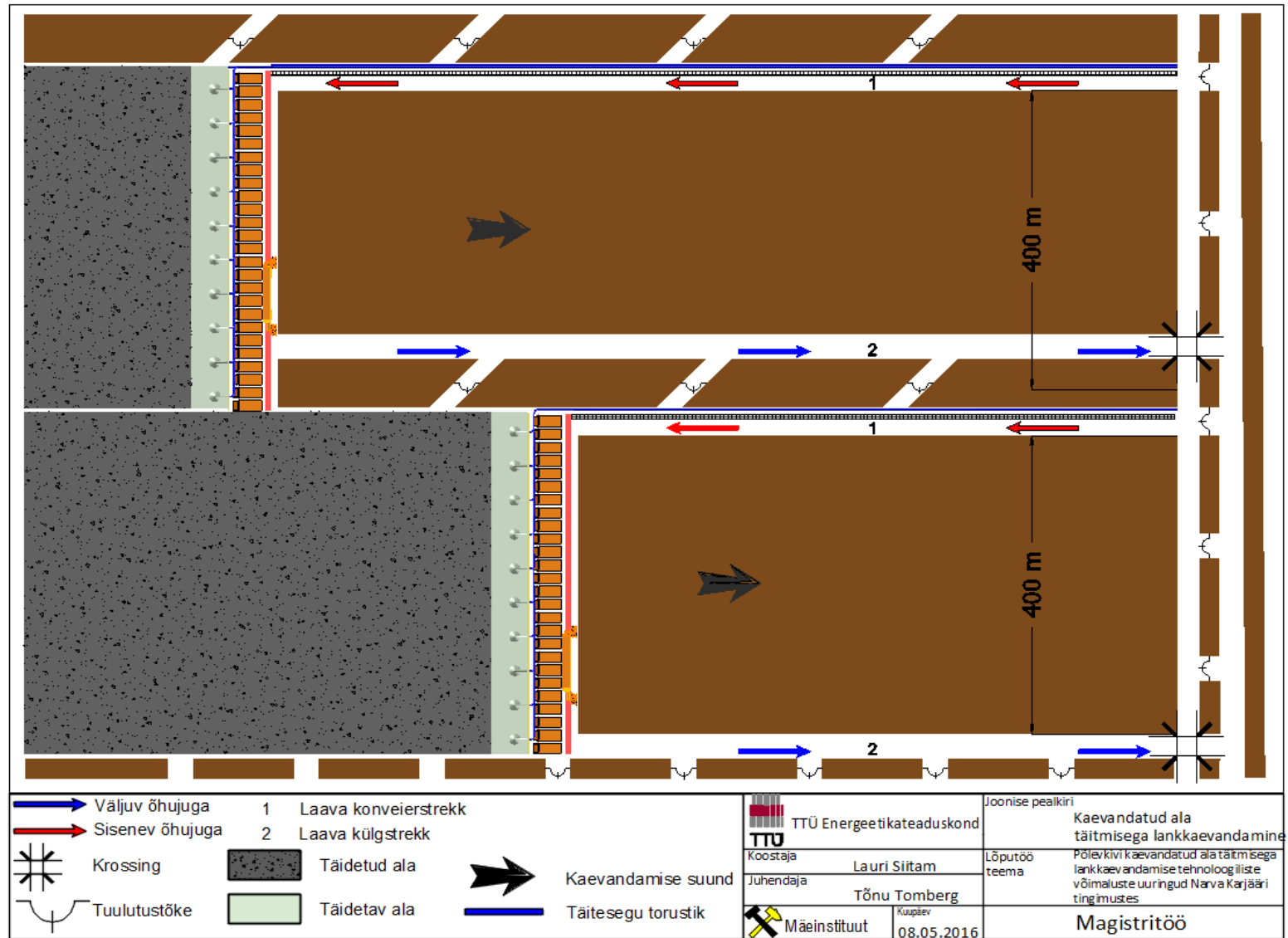
Maapinna vajumise vältimiseks on vajalik kaevandatud ala täita. Kaevandatud ala kohal oleva lae varisemist saab vältida kombainiga lankkaevandamise ja tekkivate tühimike täitmise tehnoloogiate kombineerimisega (Joonis 9). [55]

Täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõtul on otstarbekas laavad rajada maksimaalse võimaliku pikkusega, mis maailmakogemuse põhjal ulatub 400 meetrini. Laavasid piiravad strekid rajatakse laiusega 5,5 m ja allmaakaevandatava osa eraldatakse mäeeraldise piiridest ja avakaevandatud osast vähemalt 40 m laiuste tervikutega (Lisa 6). Põlevkivikihind avatakse stollidega 4-ndas, 8-ndas ja 11-ndas tranšees (peale kaevandamise lõppu antud tranšeedes). Kokku on Narva karjääri allmaakaevandatava osa täitmisega lankkaevandamisel jagatud 26-ks laavaks (Tabel 7).

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Tabel 7. Kombineeritud mõõtmed [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Laava nimetus	Pikkus, m	Pindala, m ²	Laius, m
1.1	3 051	1 220 663	400
1.2	2 854	1 141 946	400
1.3	2 633	1 019 766	387
1.4	2 508	940 424	375
1.5	2 312	900 493	389
2.1	2 568	961 865	375
2.2	2 567	1 027 036	400
2.3	2 567	1 026 818	400
2.4	2 566	1 026 993	400
2.5	2 566	1 016 120	396
3.1	2 402	612 937	255
3.2	2 409	684 136	284
3.3	2 443	977 319	400
3.4	2 495	997 934	400
3.5	2 546	1 018 515	400
4.1	4 516	1 809 225	401
4.2	4 454	1 287 100	289
4.3	4 454	1 244 067	279
5.1	997	399 387	401
5.2	997	398 465	400
5.3	998	344 165	345
6.1	2 736	932 490	341
6.2	1 182	425 689	360
7.1	1 104	376 412	341
7.2	2 284	913 623	400
7.3	2 291	855 234	373
KOKKU	64 500	23 558 822	



Joonis 9. Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise skeem [Lankkaevandamise skeemid.dwg]

4.2. Lähislae piirava

Lähislagi on katendi osa, mis lasub otse kaevandatava maavarakihi kohal. Lähislaeks Eesti põlevkivimaardlas loetakse kihte F₂-st kuni H-ni. Narva karjääris on allmaakaevandataval alal olevates puuraukudes keskmiseks lähislae paksuseks 2,03 m. Lähislae kaalutud keskmiseks mahukaaluks on 21176 N/m³ (Tabel 8). Lähislae kaalutud keskmise mahukaalu leidmisel eeldati, et lähislaes olevate põlevkivikihtide mahukaal vastab savika põlevkivi mahukaalule ja lähislaes olevate lubjakivikihtide mahukaal savika paekivi mahukaalule. [1] [25] [52] [53] [56]

Tabel 8. Lähislae parameetrid Narva karjääri allmaakaevandatavas osas [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

	Lähislae kihtide keskmised paksused, m	Kihi mahukaal N/m ³	Kaalutud keskmine mahukaal, N/m ³
H põlevkivi	0,27	17357	2308
G/H lubjakivi	0,21	23143	2394
G põlevkivi	0,21	17357	1795
F/G lubjakivi	1,13	23143	12882
F2 põlevkivi	0,21	17357	1795
Kokku	2,03		21176

Peterburi Markšeideriinstituudi andmete kohaselt toimub 2...3,5 m sügavune lähislae varisemine kui lähislae deformatsioonid ulatuvad suuruseni $f_{\max} = 67$ mm. Lähislaes toimub 8-10 cm sügavune varing kui deformatsioon $= 0,4 f_{\max}$ [56].

Põhi- ja lähislae käitumise põhilised näitajad Eesti põlevkivimaardlas määrati 1960-ndate aastate alguses Peterburi Markšeideriinstituudi poolt ja need leidsid kinnitust pikaajalisel seirel. Uuringute tulemusena leiti [3]:

- Lähislagi variseb F₂ kihist kuni 3,5 m kõrgusele, kui toestamata ava jääb vahemikku 17-22 m;
- Põhilagi variseb kuni 11,6 m kõrgusele põlevkivi tootuskihi laest, kui toestamata ava jääb vahemikku 24-36 m;
- Põhilagi variseb kuni maapinnani kui toestamata ava jääb vahemikku 32-50 m;

Narva karjääris kaevandamise tingimuste geotehniline modelleerimine näitas, et põhilae esimene varingu samm võib jääda vahemikku 28 - 37 m ja järgnevad varingusammud 6 - 9 m. [3]

Leningradi maardlas 45 m sügavusel läbiviidud varistamisega lankkaevandamise katsed 1,9 m paksuse väljamiskõrguse ja 14 m karbonaatsete kivimite katendiga näitasid, et esimene lähislae varing toimub 15 m pikkuse ning põhilae varing 35 m pikkuse toestamata ala korral. [57]

Tammiku kaevanduses 1982. aastal läbiviidud katsed kaevandamissügavusel 31-33 m, väljamiskõrgusel 2,6-2,8 m ja karbonaatsete kivimite paksusel 25-28 m näitasid, et esimene lähislae varing toimub 15-26 m pikkuse ning põhilae varing 27-33 m pikkuse toestamata ala korral. [58]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Lähislae piirava arvutatakse laekihtide paksuse ja tõmbetugevuse alusel. Lähislae piirava arvutamise valem [16] [59] [60] [61]:

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot h_t \cdot \sigma_t}{\gamma_t}}, \text{ kus} \quad (\text{Valem 1})$$

L – Lähislae piirava, m

h_t – Lähislae kihtide summaarne paksus, m

σ_t – Lähislae kihtide kaalutud keskmine tõmbetugevus, MPa

γ_t - Lähislae kihtide kaalutud keskmine mahukaal, N/m³

Valemil 1 põhinevad lähislae varisemissammu teoreetilised mudelid [60]. Antud valem on mõeldud kasutamiseks ühtlase lähislae koostisega tingimustes, kuid Narva karjääri allmaakaevandataval alal on lähislae paksus küllaltki muutuv (Lisa 2). Valemi rakendamiseks Narva karjääri tingimustes on valemis vaja kasutada varutegurit, milleks antud töös on võetud 2,0. Lähislae piiravaks Narva karjääri allmaakaevandataval alal on arvutuste tulemusena leitud 15,0 m (Tabel 9). Lähislae piiravast pikemate toestamata alade korral toimub lähislae varisemine.

Tabel 9. Lähislae piirava arvutuse tulemused [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Nimetus	Tähis	Väärtus
Tala mahukaal, N/m ³	γ_t	21176 N/m ³
Tala paksus, m	h_t	2,03 m
Tõmbetugevus, MPa	σ_t	4,7 MPa
Varutegur	n	2,0
Lähislae piirava varutegurit arvestamata	L	30,0 m
Lähislae piirava arvestades varutegurit	L_0	15,0 m

4.3. Mäerõhk

Katendikivimite poolt avaldatava mäerõhu saab leida valemiga [62] [63]:

$$\sigma_{max} = \gamma H, \text{ kus} \quad (\text{Valem 2})$$

γ - Katendikivimite mahukaal, MN/m³

H - Katendikivimite paksus

Eesti põlevkivimaardla tingimustes on katendikivimite mahukaal 0,025 MN/m³. Narva karjääri allmaakaevandatava ala piires rajatud puuraukudes on katendikivimite maksimaalne paksus kuni 37,8 m ja minimaalne paksus 12,7 m. Keskmine katendikivimite paksus on 24,8 m (Lisa 3). Katendikivimite poolt tehistervikule avaldatav maksimaalne mäerõhk on 0,945 MPa (Tabel 10). [52] [53] [64]

Tabel 10. Katendikivimite poolt põhjustatud mäerõhk [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Nimetus	Tähis	Väärtus
Maksimaalne katendi paksus, m	H_{max}	37,8
Minimaalne katendi paksus, m	H_{min}	12,7
Katendikivimite mahukaal, MN/m ³	γ	0,025
Maksimaalne mäerõhk tehistervikutele, MPa	σ_{max}	0,945
Minimaalne mäerõhk tehistervikutele, MPa	σ_{min}	0,317

Igale rajatavale tehistervikule avalduv mäerõhk on mõjutatud ka kriitilisest laius. Kriitiline laius on maksimaalne kaeveõõne laius, kus lagi deformeerub varisemata, või seal asuvate tervikute olemasolul langeb nendele kogu kattekivimite raskus. Kriitiline piirava on avaldatav järgmise valemiga [65]:

$$L \geq 1,2H + 10, \text{ kus} \quad (\text{Valem 3})$$

L – Kriitiline piirava, m

H – Katendikivimite paksus, m

Minimaalseks kriitiliseks laiuseks Narva Karjääri tingimustes on 25,2 m (Tabel 11). Kriitilise laiuse arvutuse tulemusena selgub, et 400 m laiuste laavade puhul langeb kogu katendikivimite poolt põhjustatud mäerõhk tehistervikutele.

Tabel 11. Kriitiline piirava Narva karjääri tingimustes [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Nimetus	Tähis	Väärtus
Maksimaalne katendi paksus, m	H_{max}	37,8
Minimaalne katendi paksus, m	H_{min}	12,7
Maksimaalne kriitiline piirava, m	L_{min}	55,4
Minimaalne kriitiline piirava, m	L_{max}	25,2

Tehnikakandidaat Viktor Undusk on linttervikust tehisterviku vajaliku survetugevuse arvutamiseks välja töötanud järgneva valemi:

$$R_t = \frac{n \cdot k_3 \cdot \gamma \cdot H \cdot (A+B)}{k_1 \cdot (B-q) - k_2 \cdot h}, \quad (\text{Valem 4})$$

Tehistervikute rajamisel täidetakse ka laavade külj- ja konveierstrekk, mistõttu on täitetava ala pikkuseks 411 m. Korruga rajatava tehisterviku laiuseks on 5,65 m. Narva karjääri allmaakaevandatava osa tingimustes on antud Valemi 6 põhjal tehisterviku nõutud survetugevus 1,32 MPa (Tabel 12).

Tabel 12. Tehisterviku survetugevuse arvutamise lähteandmed ja tulemus [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Tähis	Nimetus	Väärtus
n	Tehisterviku varutegur	2,0
k_3	Lõõride nõrgestavat mõju arvestav tegur*	1
b	Lõõride keskmine laius, m	0,0
γ	Katte kivimite keskmine mahukaal, N/m ³	0,025
H	Katendi paksus, m	37,8
A	Tehistervikute vahelise põikikambrite laius, m	0,0
B	Tehisterviku laius, m	5,65
k_1	Koefitsient 1**	2,18
q	Lõhketöödest põhjustatud tehisterviku purunenud tsooni laius, m	0,0
k_k	tehistervikute kujutegur; linttervikute (ka taandatud linttervikute) puhul***	0,48
h	Tehistervikute kõrgus, m	2,7
l	Tehistervikute pikkus, m	411
k_2	Koefitsient 2****	1,56
R_t	Tehisterviku vajalik survetugevus, MPa	1,32

$$*k_3 = (b + l) / (l - q)$$

$$**k_1 = 1,44 * k_k^{-0,56}$$

$$***k_k = h / (B - q)$$

$$****k_2 = 0,46 * k_k^{-1,65}$$

4.4. Täitesegu omadused

Kaevanduste täitmisel täidetakse kaeveõõned täiteseguga. Täitesegu, millel on väike poorsus, minimaalne veesisaldus ja omab piisavalt aktiivset sideainet, on kindla sideaine sisalduse juures kõige suurema survetugevusega. Oluline on, et täitesegus kasutatav vesi ei jääks püsima täitematerjali sisse, sest tahked osakesed ja sideained leostuvad vee tõttu täitematerjalist välja [5] [66]:

Sideainet sisaldava täitesegust valmistatava tehisterviku survetugevus sõltub [5]:

- Täitematerjali tüübist ja tükisuurusest
- Sideaine sisaldusest ja tüübist
- Vee kogusest täitesegus

Suurima tehisterviku survetugevuse saavutamiseks on otstarbekas valida võimalikult suure tihedusega täitesegu, mida saab veel võimalik pumbata. Mitmed laborikatsed on näidanud, et täitesegu survetugevus on otseselt sõltuv sideaine sisaldusest täitesegus. Täitesegu tardumine toimub kui tekivad sidemed täitesegu osakeste vahel terade kokkupuutepunktides. [36] [67]

Täitmiseks kasutatavate segude koostise puhul on tähelepanu hakatud tähelepanu pöörama energeetikatööstuse ja kaevandamistööstuse jääkidele. Põlevkivi kaevandamisel tekib aherainet väljatatud kaemisest kuni 40% ning sellest valmistatud killustikku saab kasutada täitematerjalina.

Lisaks aherainekillustikule on võimalik täitesegudes kasutada ka elektri jaamades tekkivat põlevkivituhka, mis sarnaneb omaduste poolest tsemendile. CFB-s ja PF-s põletatud põlevkivi tuhk erineb oma keemiliselt koostiselt peamiselt katelde erinevate põletamistemperatuuride tõttu. Põletamistemperatuuride erinevuse tõttu tekib erineva koostisega ja morfoloogiaga põlevkivituhk. [2]

Pikalt on kaevanduste täitmiseks kasutatud mehaanilisi ja hüdraulilisi lahendusi. Kaasaegsed täitmetehnoloogiad võimaldavad aga kasutada vähese veega täitmist - nn. pastakujul täitesegu, mis vähendab kaeveõntesse paigutatud transporditorude kulumist. [2] [68]

Pastakujul täitesegu tootmiseks on kõigepealt vajalik aheraine purustamine ja aherainekillustiku valmistamine. Seejärel segatakse omavahel aherainekillustik, põlevkivituhk ja vesi – nendest moodustub täitesegu. Peale täitesegu valmistamist transporditakse täitesegu torudes kaeveõntesse. [37]

Narva karjääris puudub aherainest killustiku valmistamise kompleks, seega on vaja see täitesegu valmistamiseks rajada. Killustikku on võimalik valmistada Narva karjääris selektiivsel kaevandamisel C/D vahekihist pärit aheraine purustamisel. Juhul kui selektiivsel kaevandamisel tekkiva aheraine kogusest ei piisa aherainekillustiku valmistamiseks, siis on võimalik teisaldada aherainet vaalkaevandamisel rajatavatest sisepuistangute põhjast.

Killustikukompleks on otstarbekas paigutada stollide juurde, kus toimub põlevkivi tootuskihi avamine. Kõigepealt avatakse põlevkivi tootuskiht neljandas tranšees. Killustikukompleksi lähedusse on vaja paigutada ka täitesegu segamise seadmed ning põlevkivituha silod. Täitesegus kasutatav vesi saadakse lähimast Narva karjääri veeärastussüsteemi osaks olevast pumbajaamast. Täitesegu segamisel on tähtis täitematerjalide täpne annustamine, mille tarbeks on loodud keerukad arvutisüsteemid. [69]

2008. aastal viidi Tallinna Tehnikaülikooli ehitustootluse instituudis läbi kaevanduste täitmise võimalike täitesegude koostise määramise laboratoorsed katsetööd, kus EE kontsernis tekkivatest tuhkadest kasutati CFB ja PF põlevkivituhka. Samal aastal viidi Tartu Ülikooli tehnoloogia instituudis läbi samadest tuhkadest valmistatud katsekehade leostuva vee uuringud. Peamised järeldused antud uuringutest [70] [71]:

- 1) Suurima survetugevusega täitesegu sisaldab 20% PF ja 80% CFB põlevkivituhka (Tabel 13);
- 2) + 5 °C juures kivistunud katsekehade survetugevused jäävad väiksemaks kui + 20 °C juures kivistunud katsekehade survetugevustest. PF tuhk alandab madalate temperatuuride juures tugevusnäitajaid enam kui CFB tuhk;
- 3) CFB tuhal on suurem veevajadus kui PF tuhal;
- 4) PF tuhaga valmistatud katsekehade paisumine on suurem kui CFB tuhaga valmistatud katsekehadel.
- 5) PF tuha baasil valmistatud täitesegud tarduvad kiiremini, sest nendes on rohkem CaO_{vaba} (Tabel 14)
- 6) CFB tuha osakaalu suurenemisega täitesegus kasvab katsekehade veekindlus.
- 7) CFB tuhka sideainena kasutades on katsekehast leostuva CaO_{vaba} sisaldus tunduvalt väiksem kui PF tuhade puhul.

Tabel 13. Laboratoorsetel töödeldud määratud katsekehade survetugevused 20° C juures [71] [Täitesegu omadused.xlsx]

Katsekeha koostis, %		Tuha koostis		Vesi/tuhk tegur	Survetugevus, MPa Vanus, päeva			
Tuhk	Aherainekillustik	CFB	PF		28 p.	56 p.	91 p.	182 p.
75	25	20%	80%	0,33	1,9	3,6	3,4	1,7
50	50			0,43	2,8	4,6	6,0	7,6
75	25	50%	50%	0,36	3,8	6,6	7,9	9,6
50	50			0,46	4,8	7,4	8,5	10,8
75	25	80%	20%	0,47	7,4	10,1	12,7	14,6
50	50			0,59	5,6	8,4	9,4	10,6
75	25	100%	0%	0,50	7,9	8,8	10,4	11,0
50	50			0,64	5,2	6,9	7,3	8,1
75	25	0%	100%	0,31	2,2	2,7	4,4	5,0
50	50			0,40	2,4	3,9	5,0	4,8

Tabel 14. Laboratoorsetel töödeldud määratud katsekehade tardumisajad [71] [Täitesegu omadused.xlsx]

Tuhasegu nimetus	Koostis, %		Veevajadus, (vesi/tuhk)	Tardumisajad, min (h)	
	Tuhk	Täitematerjal, peen		Algus	Lõpp
100% PF	100	0	0,27	155 (2,6)	245 (4,1)
100% CFB	100	0	0,60	285 (4,8)	540 (9,0)
80% PF+20% CFB	100	0	0,32	240 (4,0)	440 (7,3)
50% PF +50% CFB	100	0	0,41	280 (4,7)	500 (8,3)
20% PF+80% CFB	100	0	0,47	280 (4,7)	485 (8,1)
50% PF +50% CFB	75	25	0,47	235 (3,9)	470 (7,8)
50% PF +50% CFB	50	50	0,60	150 (2,5)	300 (5,0)

Tabel 15. Laboratoorsetel töödeldud määratud katsekehade survetugevused 5° C juures (Prof. Lembi-Merike Raado suulised andmetel) [Täitesegu omadused.xlsx]

Tuhasegu koostis	Betooni koostis, %		Survetugevused (MPa)		
	Tuhk	Aheraine	7 p.	28 p.	56 p.
100% CFB	50	50	1,5	1,5	1,7
100% PF	50	50	0,4	1,9	5,5

2009. läbiviidud laboratoorsete katsete tulemusi arvestades pakub töö autor välja, Narva karjääris täitmise ja lankkaevandamisel tuleb kasutada täitesegu, mille tahke fraktsioon koosneb 75% põlevkivituhast (20% PF ja 80% CFB põlevkivituhk) ja 25%

aheraine killustikust. Vett lisatakse täitesegule 47% tuha massist. Antud koostisega täitesegu on aastas maksimaalselt võimalik valmistada 4,93 mln t (Tabel 16). Täitesegu kogust piiravaks komponendiks on tekkiva CFB tuha kogus (Tabel 6).

Tabel 16. Maksimaalne aastas tekkiva täitesegu kogus [Täitesegu omadused.xlsx]

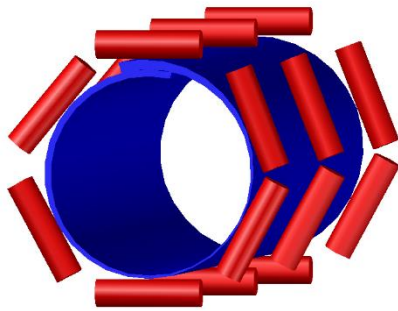
CFB põlevkivituhk	2200000 t
PF põlevkivituhk	550000 t
Aheraine killustik	916667 t
Vesi	1265000 t
Kokku	4931667 t

4.5. Täitesegu transport

Täitesegu valmistamiseks on vaja stולי suudme juures asuva täitesegu valmistamise seadme juurde transportida kõik täitesegus kasutatavad materjalid: aheraine killustik, põlevkivituhk ja vesi. Stולי suudme juurde tuleb rajada täitematerjalide vahelaod, milles on vähemalt 2 päeva jooksul valmistatava täitesegu kogus materjali.

4.5.1. Põlevkivituha transport

Põlevkivituha transportimiseks pakub töö autor välja variandi, kus põlevkivituhk transportitakse neljanda tranšee stולי juures asuva täitesegu valmistamise seadme juurde EEJ tuhasilodest torukonveieriga (Joonis 10). Torukonveieri eeliseks on põlevkivituha täielik isoleerimine ümbritsevast keskkonnast. Torukonveieri pikkuseks EEJ ja Narva karjääri neljanda tranšee juurde rajatava täitesegu valmistamise seadme vahel on 15,3 km (Lisa 4). Analoogset lahendust põlevkivituha transportimiseks kasutab Viru Keemia Grupp [72] [73].



Joonis 10. Torukonveieri läbilõige [Torukonveieri läbilõige.dwg]

Logistiliselt on lihtsam kogu põlevkivituhk täitesegu valmistamise seadme juurde transportida ühest kohast, mistõttu on vajalik kõigepealt kogu tekkiv põlevkivituhk EEJ tuhasilodesse transportida. Põlevkivituha transportimiseks AEJ ja EEJ tuhasilode vahel rajatakse torukonveier pikkusega 1,4 km. Põlevkivituha transportimiseks BEJ-st EEJ tuhasilodesse kasutatakse raudteetransporti, vahemaaks mööda raudteed on 46 km.

4.5.2. Aheraine transport

Aheraine transportitakse aheraine killustiku valmistamise kompleksi vaalkaevandamisel selektiivset väljamisega põlevkivi väljavatest kaevetranšeedest samade karjäärikalluritega,

mida kasutatakse põlevkivi transportimiseks. Vajadusel transporditakse lisaks selektiivsel väljamisel tekkivale aherainele killustikukompleksi aherainet ka sisepuistangute alaosast.

4.5.3. Vee transport

Täitesegu valmistamiseks vajalik vesi transporditakse täitesegu valmistamise seadmesse lähimast Narva karjääri veeärastussüsteemi osaks olevast pumbajaamast. Lähim pumbajaam asub neljanda tranšee juurde rajatavast täitesegu valmistamise seadmest umbes 600 m kaugusel.

4.5.4. Täitesegu transport kaeveõontes

Täitesegu transpordiks kaevandatud alasse paigutatakse laavade konveierstrekkiidesse täitesegu torusüsteem. Täitesegu transportimise distants autori poolt väljapakutud strekkide skeemi korral oleks kuni 6 km. Maailmakogemuse põhjal kasutatakse täitesegu transportimiseks torudes pumpasid, mille tootlikkus on kuni 280 m³/h ja surve pumba juures 10-13 MPa. Survekaoks pastakujul täitesegu transportimisel peab arvestama vähemalt 2 kPa/m. Pumpade poolt tekitatav surve täitesegu transportimiseks 6 km kaugusele peab Narva karjääris täitmise ja lankkaevandamise tingimustes olema seega vähemalt 12 MPa. [74]

Pastakujul täitesegude transportimiseks kasutatavate torude diameeter peab olema vähemalt 3 korda suurem täitesegu tahke fraktsiooni osakeste suurimast diameetrist. Tavaliselt jääb torude diameeter alla 150 mm. Täitesegus oleva materjali teravate servadest põhjustatud kulutava mõju vähendamiseks on soovitatud kasutada vooderdatud torusid ning vältida järske pöördekohti. [74] [75] [76] [35]

Täitesegu pumpamise efektiivsus sõltub täitesegu koostisest ja viskoossusest. Efektiivseks täitesegu transportimiseks on vaja leida torudes tekkiv survegradient erinevate torude diameetrite, voolamise kiiruste ja läbilaskevõimete korral. Täitmisel peab täitesegu liikumise kiirus torudes jääma vahemikku 1...4 m/s, väiksemate kiiruste puhul võivad tahked osakesed torude seintele settida ning suuremate kiiruste korral kulutab täitesegu liialt torude sisemust. Autori poolt väljapakutud laavade paiknemise skeemil on maksimaalseks täitmise teepikkuseks 6 km. Arvestades, et täitesegu tardumine algab 280 minutit pärast valmistamist, siis on täitesegu torudes tardumise vältimiseks minimaalseks täitesegu liikumise kiiruseks vajalik 0,36 m/s (Tabel 14). Peale täitmisprotsessi lõpetamist on vaja torusüsteem kas suruõhuga või veega puhastada. [74] [76] [77]

4.6. Täitesegu vaheseinad

Täitesegu voolavuse tõttu on vajalik kasutada vaheseinu, et vältida täitesegu liikumist tööalasse. Kaevandatud ala täitmise kiirusel tuleb leida optimum – kiirus peab olema piisavalt madal, et tekkivad survepinged ei kahjustaks vaheseinu, kuid piisavalt suur, et täitmine oleks majandulikult kasulik. Täitesegus sideaine koguse suurendamisega võib kasutada kõrgemaid täitesegu transpordikiirusi, millega vähenevad ka töötähtsuste ajad. [69]

Täitesegu paigutamisel kaeveõõnde toimub täitesegu konsolideerumine, mille tulemusena tekib liigne pooriveerõhk täitesegu sees. Poorivee rõhk suurendab vaheseinadele avaldatavat survet. Surve vähendamiseks kasutatakse täitesegu tahkete osakeste paigalhoidmiseks geotekstiili. Geotekstiili eesmärk on tahkete osakeste kinnihoidmine, samal ajal peab vesi täitesegust läbi geotekstiili võimalikult kiiresti välja voolama. Täitesegus toimuvate keemiliste reaktsioonide

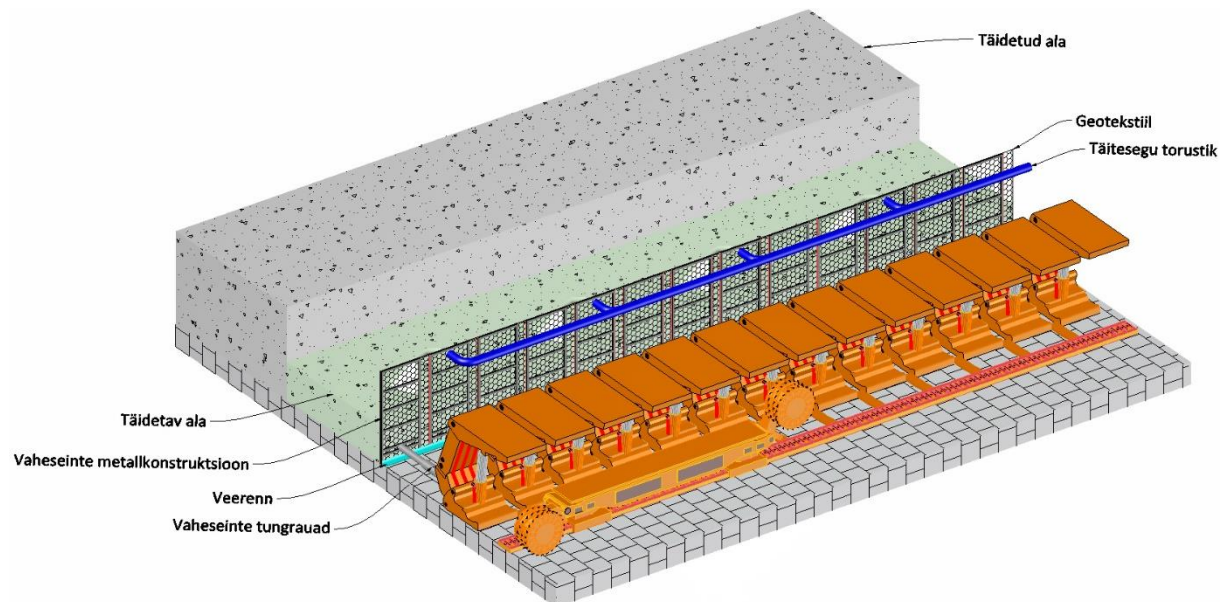
Põlevkivi kaevandatud ala täitmise ja lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

käigus kasutamata jääva vee väljavoolamisel saavutab täitesegu maksimaalse survetugevuse. Mida jämedamatest osakestest koosneb täitesegu, seda vähem tahkeid osakesi läheb kaduma läbi geotekstiili. [35] [78] [79] [80]

Peamiseks probleemiks geotekstiilide puhul on [81]:

- Tahkete osakestega ummistumine
- Peenete osakeste läbiimbumine
- Liiga nõrk geotekstiili materjali tugevus

Töö autor pakub välja, et kaevandatud ala täitmise ja lankkaevandamisel tuleb kasutada vaheseintena metallkonstruktsiooni, mis on hüdrauliliste silindritega paigutatud iga toestiku toe taha. Metallkonstruktsiooni külge on kinnitatud geotekstiil. Eerinna edasiliikumisel tõmbab toestik vaheseinu endale järele. Vaheseinte geotekstiili ülaosas on täitesegu torustiku jaoks ava, mille kaudu toimub täitesegu pumpamine vaheseinte taha. Vaheseinade allosas on veerenn, mis tagab täitesegust väljuva vee möödajuhtimise tööde alalt (Joonis 11).



Joonis 11. Kombineeritud täitesegu vaheseinad [Kombineeritud täitesegu vaheseinad.dwg]

4.7. Täitmise ja lankkaevandamise parameetrite määramine

Tootmisnädala pikkuseks Narva karjääris on eeldatud 5 päeva ning kaevandatud ala täitmine toimub kogu nädala jooksul. Narva karjääris kaevandatud ala täitmise ja lankkaevandamisel seavad laavade edasinihkekiirusele piirangud:

- **Täitesegus kasutatavate materjalide kogus** – Laboratoorsete katsetööde käigus on selgunud, et optimaalse täitesegu tahke fraktsioon koosneb 75% ulatuses põlevkivituhast (80% CFB tuhk ja 20% PF tuhk). Antud koostisega täitesegu on võimalik aastas valmistada maksimaalselt 4,93 mln t (Tabel 16).
- **Lähislae piirava** – Laavade edasinihe ei tohi olla pikem lähislae piiravast enne kui kaevandatud alasse rajatud tehstervik on võimeline katendist põhjustatud mäerõhku vastu võtma. Katendist põhjustatud mäerõhu vastuvõtmiseks peab tehsterviku

survetugevus olema vähemalt 1,32 MPa (Tabel 12). **Töös on eeldatud, et tehistervik saavutab vajaliku survetugevuse 7 päevaga.** Lähislae piiravaks Narva karjääri allmaakaevandatava ala piires on 15,0 m, kuid seda laiust mõõdetakse alates eerinna. Eerinna ja täidetava ala vahele jääb toestik, mille pikkuseks on antud töös arvestatud 3,5 m. Seetõttu on 7 päeva jooksul laava maksimaalne edasinihe 11,5 m.

- **Täitesegu survetugevuse arenemise kiirus** – Laava edasiliikumise kiirus sõltub ajast, millal tehistervik on tardunud ja võimeline katendi poolt avaldatava määrdõhu vastu võtma. Oluline ka piisava survetugevuse saavutamine, et tehistervik suudaks iseseisvalt (ilma vaheseinadeta) püsida. Kaevandamise kiirust on võimalik suurendada kui lisada täitesegusse aineid, mis kiirendaksid täitesegu tardumise kiirust.

Täitmisega lankkaevandamisel on vaja leida optimaalne laavade arv, mille korral kasutatakse ära võimalikult suur kogus aastast tekkivaid täitematerjale, kuid samas täitematerjalide kogus ei tohi hakata piirama laavade edasinihkekiirust. Narva karjääri tingimustes on optimaalne lankkaevandamisel põlevkivi kaevandada korraga neljas laavas, ühe laava edasinihe nädalas on sel juhul 11,3 m (Tabel 17). Korraga neljas laavas kaevandamisel on võimalik ära kasutada 100% aastast tekkivatest täitematerjalidest ning täitematerjalide piiratuse tõttu väheneb ühe laava edasinihe nädalas vaid 0,2 m.

Laavade summaarseks pikkuseks autori poolt väljapakutud kaevandamisskeemi puhul on 64,5 km (Tabel 7). Paralleelselt neljas laavas täitmisega lankkaevandamisel on võimalik Narva karjääri allmaakaevandatavas osas olev põlevkivivaru väljata 27,4 aastaga.

Kaevandatud ala täitmine toimub laavades samaaegselt kaevisel väljamisega ja tootmisnädala jooksul kaevandatud ala täidetakse kahes osas. Korraga rajatava tehisterviku laius on 5,65 m ning ühe tehisterviku rajamiseks vajaliku täitesegu kogus transporditakse vaheseinte taha 16 tunniga. Täitmine toimub korraga vaid ühes laavas. Kaevandatud ala täitmise kiirus on 392 m³/h (Tabel 18).

Tehistervik peab saavutama 60 tunniga piisava survetugevuse, et iseseisvalt püsti püsida. Pärast 60 tunni möödumist tehisterviku rajamisest toimub vaheseinte ning täitesegu torustiku ümberpaigutamine, mille kestus on 8 tundi. Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamisel on töötüklid ajastatud nii, et kaevisel väljamisel esineks võimalikult vähe tööseisakuid. Kaevandamine laavades peatatakse vaid täitesegu vaheseinade ja torustiku ümberpaigutamise ajaks. Töötüklite planeerimisel on otstarbekas nädalas kahest seadmete ümberpaigutamise protsessist üks jätta nädalavahetusele, mil toimub seadmete hooldus (Tabel 19).

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Tabel 17. Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise parameetrid [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Laavade arv	1	2	3	4	5
Täitesegu parameetrid					
Tuha osakaal täitesegu tiheduses, t/ m ³	1,05				
Killustiku osakaal täitesegu tiheduses, t/ m ³	0,35				
Vee osakaal täitesegu tiheduses, t/ m ³	0,49				
Täitesegu tihedus, t/ m ³	1,89				
Kasutatava täitesegu maht aastas, m ³	664 130	1 328 259	1 992 389	2 609 347	2 609 347
Kasutatava täitesegu kogus aastas, t	1 253 877	2 507 753	3 761 630	4 931 667	4 931 667
millest:					
CFB tuha kogus (80% põlevkivituhast), t	556 275	1 112 550	1 668 825	2 200 000	2 200 000
PF tuha kogus (20% põlevkivituhast), t	139 069	278 137	417 206	550 000	550 000
Killustiku kogus, t	231 781	463 562	695 344	916 667	916 667
Vee kogus, t	326 752	653 504	980 255	1 265 000	1 265 000
Laavade parameetrid					
Laava pikkus, m	400				
Täidetava ala pikkus, m	411				
Kõrgus, m	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Laavade summaarne edasinihe, m/aastas	598	1 197	1 795	2 351	2 351
Ühe laava edasinihe nädalas	11,5	11,5	11,5	11,3	9,0
Laavade summaarne edasiliikumine, m/nädalas	11,5	23,0	34,5	45,2	45,2
Tootmise parameetrid					
Väljatava kaevisemaht aastas, m ³	646 355	1 292 710	1 939 065	2 539 510	2 539 510
Kaevisemaht, t/m ³ [82]	1,83				
Väljatava kaevisemaht aastas, t	1 184 122	2 368 244	3 552 366	4 652 383	4 652 383
Tootmispäevade arv nädalas	5				
Nädalate arv aastas	52				
Tööpäevade arv aastas	260				
Täitmisega seotud seisutundide arv aastas	832				
Laava tootmistundide arv aastas	5408				
Raimatav summaarne kaevisemaht, m ³ /h	120	239	359	470	470
Laavas raimatav kaevisemaht, m ³ /h	120	120	120	117	94
Raimamise sügavus, m	0,63				
Kombaini nõutav liikumise kiirus, m/min	1,17	1,17	1,17	1,15	0,92
Kombaini nõutav tootlikkus (t/min)	3,65	3,65	3,65	3,58	2,87

Tabel 18. Tehistervikute rajamise kiirus [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

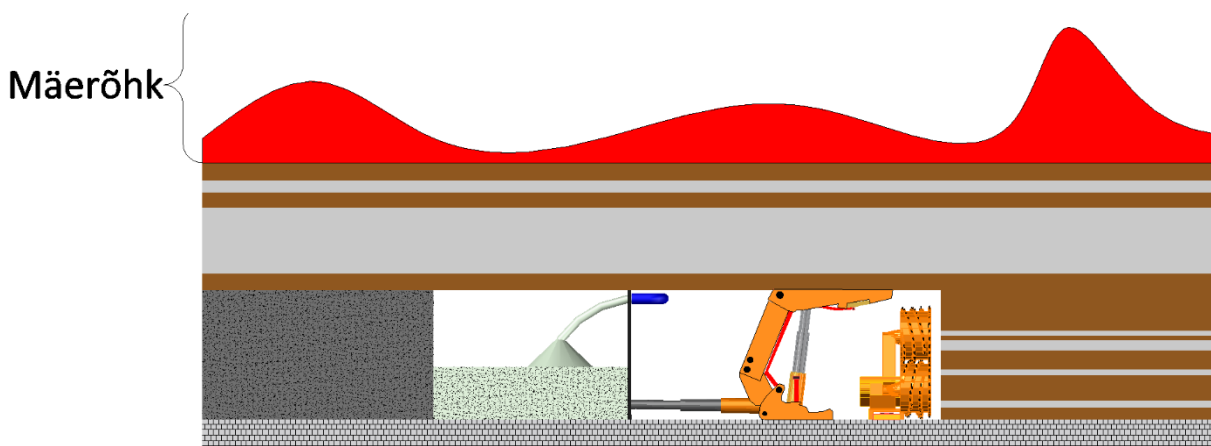
Laavade arv	4
Kasutatava täitesegu maht aastas, m ³	2 609 347
Nädalas täidetav maht, m ³	50 180
Kombaini taha jääv tühimik täidetakse	2 osas
Korruga moodustatava tehisterviku laius, m	5,65
Vaheseinade ja torustiku ümberpaigutamine, h	8
Täitmise aeg, h	16
Ühe tsükli tardumise aeg, h	60
Täitmise kiirus m³/h	392

Tabel 19. Täitmise tsüklid laavades [Täitmise ja lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Protsess	Laava	Esmaspäev	Teisipäev	Kolmapäev	Neljapäev	Reede	Laupäev	Pühapäev
Tootmine	1	■	■	■	■	■	■	■
Täitmine				■	■		■	■
Tardumine		■	■	■	■	■	■	■
Ümberpaigutus			■				■	
Tootmine	2	■	■	■	■	■	■	■
Täitmine				■	■			■
Tardumine		■	■	■	■	■	■	■
Ümberpaigutus				■			■	
Tootmine	3	■	■	■	■	■	■	■
Täitmine		■			■	■		■
Tardumine		■	■	■	■	■	■	■
Ümberpaigutus				■	■			■
Tootmine	4	■	■	■	■	■	■	■
Täitmine		■	■			■	■	
Tardumine		■	■	■	■	■	■	■
Ümberpaigutus		■				■		

4.8. Toestiku valik

Surve toestikule tekib lae ja põhja konvergentsi tõttu kaevandatud alas. Maksimaalne on surve toestikule kaevandatud ala poolses osas, kaevveesi läheduses on surve toestikule minimaalne (Joonis 12). Mida pikem on laekivimite varisemissamm, seda suurem koormus kandub toestikule ning lae varisemisel toimub pingete vähenemine. Toestiku valimisel on oluline välja selgitada, kui suurt mäerõhku avaldab lähislagi kaevandamise käigus toestikule – vaja on teada lähislae kaalu, mida toestik peab üleval hoidma. Kaevandatud ala täitmisel suudab lagi hoida dünaamilist tasakaalu samal ajal kui laava liigub edasi, sest peamine lae poolt avaldatav surve langeb laava ees olevale põlevkivile ja laava taga olevale täitematerjalile. [16] [17] [18] [83]



Joonis 12. Mäerõhu jagunemine lankkaevandamisel [Mäerõhu jagunemine lankkaevandamisel.dwg]

Peamised tingimused, millele toestik peab vastama [17]:

- Piisav tugevus, et takistada lähislage varisemast toestiku kohal
- Piisavalt lai, et ühtlaselt jagada toestiku poolt avaldatavat survet laele ja põhjale
- Takistab lähislaest materjali sattumist tööde alasse

Toestik tagab lankkaevandamisel masinate ja inimeste ohutu ala töötamiseks 3-5 m laiusel alal. Tugede ülesseadmisel kaevanduses määratakse algseks tugede poolt laele avaldatavaks surveks umbes 70% maksimaalsest võimalikust tugede vastusurve. Tugedele avalduva surve mõõtmiseks on nende külge paigutatud andurid. [16] [20] [83] [84].

4.8.1. Toestiku mõõtmed

Põlevkivi tootuskihi väljamiseks on vaja kasutada toestikku, mis arvestab väljatava kihindi paksuse muutumist. Narva karjääri allmaakaevandatava alal on põlevkivi tootuskihi keskmiseks paksuseks 2,70 m ja kihindi paksuse standardhälbeks (σ) 0,16 m. Eeldades, et põlevkivi tootuskihi paksused alluvad normaaljaotusele, siis jääb 95% tõenäosusega väljatava kihindi paksus vahemikku $2,70 \pm 2\sigma$ ehk väljatava kihindi paksus on 2,38...3,02 m. [52] [53] [85]

Antud töös on eerinna ja toestiku vaheliseks kauguseks arvestatud 1,5 m ning toestiku vajumisvaruks 0,05 m. Eesti põlevkivimaardlas on raskete varisevate lagede läbivajumistegur 0,015. [86]

Toestiku mõõtmete arvutamiseks kasutatakse järgmiseid valemeid:

Valem maksimaalse toestiku kõrguse leidmiseks [86]:

$$H_{\max} = m_{\max} - \alpha m_{\max} l \quad (\text{Valem 5})$$

Valem minimaalse toestiku kõrguse leidmiseks [86]:

$$H_{\min} = m_{\min} - \alpha m_{\min} l - a_{tv} \quad (\text{Valem 6})$$

Valemite 5 ja 6 põhjal on vaja täitmisega lankkaevandamisel kasutada toestikku, mille suurim töökõrgus on vähemalt 2,95 m ja madalaim töökõrgus 2,28 m (Tabel 20).

Tabel 20. Toestiku mõõtmete arvutuse lähteandmed ja tulemus [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

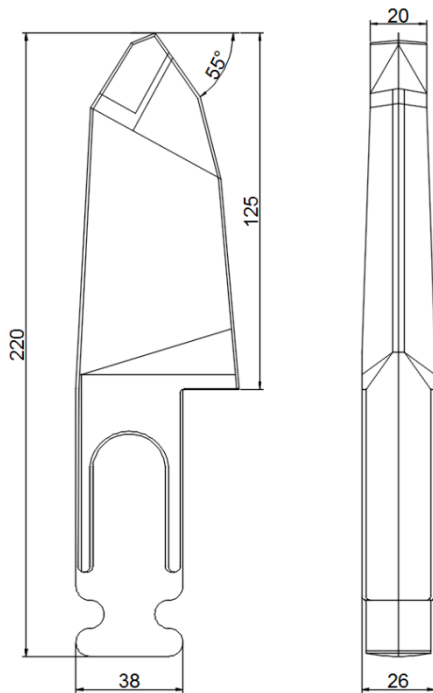
Nimetus	Tähis	Väärtus
Kihindi maksimaalne paksus, m	m_{\max}	3,02
Kihindi minimaalne paksus, m	m_{\min}	2,38
Kauguseerinnast toestikuni, m	l	1,5
Lae läbivajumistegur	α	0,015
Toestiku vajumisvaru, m	a_{tv}	0,05
Toestiku vajalik maksimaalne kõrgus, m	H_{\max}	2,95
Toestiku vajalik minimaalne kõrgus, m	H_{\min}	2,28

4.9. Kombaini valik

Lankkaevandamisel on kombaini õigete parameetrite valik väga oluline, sest see on kõige lihtsam viis kogu laava tootlikkust optimeerida. Automatiseeritud süsteemid suudavad lõiketrumlite kõrgusi ja raimamise kiirust on muuta kindlatel aegadel ja kohtades. Tänapäeval kasutatakse kahe lõiketrumliga kombaine, kus eesmine trummel raimab väljatava kihi ülemise osa ja tagumine trummel alumise osa. [18] [21]

Maailma erinevates kombainiga lankkaevandamise tehnoloogiat kasutavates kaevandustes on kombaini haardelaiuseks tavaliselt 76-107 cm. Alo Adamson on Eesti põlevkivimaardla tingimustes 1970-ndatel aastatel läbiviidud katsete põhjal soovitanud kasutada kombaini haardelaiusena 0,63 m ja lõiketrummelil tangentsiaalse kujuga lõiketerasid (Joonis 13), millel on järgnevad eelised [16] [20] [87]:

- Lõiketerad murravad raimates põlevkivikihinit, mistõttu on kombaini suletistega massiivis lihtsam kasutada.
- Murdmisel suureneb tükikivi osakaal kaevises võrreldes lõikamisega.



Joonis 13. Tangentsiaalse paigutusega lõiketera HT125 (koostatud autori poolt [88] põhjal) [Tangentsiaalse paigutusega lõiketera HT125.dwg]

Lankkaevandamisel on kombaini töös otstarbekas kasutada süstikskeemi, kus kombain raimab kaevist igal eel läbimisel. Narva karjääris korruga neljas laavas täitmisega lankkaevandamisel on kombaini vajalikuks liikumiskiiruseks mööda kaeveesi 1,15 m/min ja eksploatatsiooniliseks tootlikkuseks 3,58 t/min (Tabel 17).

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Vajaliku liikumiskiiruse tagava kombaini minimaalne võimsus on võimalik arvutada valemiga [22]:

$$P = v_r * 60H_w m r \gamma \quad (\text{Valem 7})$$

Põlevkivi tootuskiiruse lausväljamisel on kombainiga raimamise energia erikuluks kihindis oleva lubjakivi raimamise energia erikulu, milleks on 2,5 MJ/m³. Kombaini haardelaius on 0,63 m ning kaevise mahumass 1,83 t/m³. Neljas laavas täitmisega laavakaevandamisel on peab kombaini võimsus olema vähemalt 538 kW (Tabel 21). [25] [82] [87]

Tabel 21. Kombaini vajaliku võimsuse arvutamise lähteandmed ja tulemus [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Nimetus	Tähis	Väärtus
Kombaini vajalik edasinihkekiirus, m/min	v_r	1,15
Kivimi raimamise energia erikulu, MJ/m ³	H_w	2,5
Väljatava kihi paksus, m	m	2,7
Kombaini haardelaius, m	r	0,63
Kaevise mahumass, t/m ³	γ	1,83
Kombaini vajalik võimsus, kW	P	538

Kombaini võimalikku tootlikkust vähendavad ajakaod otsaoperatsioonidele, manööverdamisele, löikehammaste vahetamisele ja tööde organiseerimisele. Ajakadude arvestamiseks kombaini tootlikkuses kasutatakse eksploatatsioonilise tootlikkuse tegurit, mis on leitav valemiga [22]:

$$k_{eks} = \frac{1}{\frac{1}{k_v} + \frac{t_{man} + t_{ots} + t_{tera} + t_{org}}{l_{vah}} \times v_r} \quad (\text{Valem 8})$$

Ekspluatatsioonilise tootlikkuse tegur määratakse iga vahetuse kohta. Käesolevas töös on vahetuse pikkuseks 8 tundi (480 min). Erinevate kombaini tootlikkust vähendavate operatsioonide pikkused jäävad vahemikku 15...30 min/vahetuses. Eksploatatsioonilise tootlikkuse teguriks Narva karjääris täitmisega laavakaevandamise tingimustes on 0,71 (Tabel 22). [22]

Kombaini teoreetiline tootlikkus leitakse eksploatatsiooniline tootlikkuse ja eksploatatsioonilise tootlikkuse teguri abil [22]:

$$Q_{teor} = \frac{Q_{eks}}{k_{eks}} \quad (\text{Valem 9})$$

Neljas laavas täitmisega lankkaevandamisel peab iga kombaini teoreetiline tootlikkus olema vähemalt 5,03 t/min (Tabel 23).

Tabel 22. Ekspluatatsioonilise tootlikkuse teguri leidmine [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Nimetus	Tähis	Väärtus
Kombaini töövalmidustegur	k_v	0,85
Kombaini manöövriteks kuluv aeg vahetuses, min	t_{man}	20
Laava otsaoperatsioonideks kuluv aeg vahetuses, min	t_{ots}	30
Lõikehammaste vahetuseks kuluv aeg vahetuses, min	t_{tera}	15
Organisatsiooniliste seisakute kestus vahetuses, min	t_{org}	30
Vahetuse pikkus, min	l_{vah}	480
Kombaini vajalik edasinihkekiirus, m/min	v_r	1,15
Ekspluatatsioonilise tootlikkuse tegur	k_{eks}	0,71

Tabel 23. Kombaini vajalik teoreetiline tootlikkus [Täitmisega lankkaevandamise arvutused.xlsx]

Nimetus	Tähis	Väärtus
Kombaini ekspluatatsiooniline tootlikkus, t/min	Q_{teor}	3,58
Ekspluatatsioonilise tootlikkuse tegur	k_{eks}	0,71
Kombaini teoreetiline tootlikkus	Q_{eks}	5,03 t/min

5. TÄITMISEGA LANKKAEVANDAMISE KESKKONNAMÕJUD NARVA KARJÄÄRIS

Peamisteks allmaakaevandamisega seotud keskkonnamõjudeks loetakse [12]:

- Katendikivimite osaline purunemine
- Lõhede tekkimine katendikivimites
- Veerežiimi muutus
- Maapinna vajumine

Täitmisega kaevandamistehnoloogia üheks eeliseks teiste kaevandamistehnoloogiate ees on stabiilse maapinna tagamine. Varistamisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutamisel vajub maapind tunduvalt ja kuulub altkaevandatud alade klassifikatsiooni „langetatud maa“. Suure põlevkivi tootuskihi paksusega piirkonnas võib maapinna vajumine olla 1,5...2,0 m, täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõtul maapind aga ei vaju. Vajumiste ärahoidmiseks on vaja vältida tühimike jätmist täitesegu ja täidetavate kaeveõõnte lähislae vahele. [26] [88]

Varasemalt on kaitstavatel aladel kaevandamise võimalused jagatud kategooriateks (Tabel 24). Kaitstavate alade piirkonnas on lubatud lankkaevandamine lubatud vaid nendel aladel, mis vastavad IV kategooria tingimustele. Narva karjääris on kaevandamine keelatud Sirgala mäeeraldise piiridesse jääval Puhatu looduskaitsealal, mis on antud klassifikatsioonis kui I kategooria kaitstav ala. Puhatu looduskaitsealal on kindel keeld maavara kaevandamiseks, isegi maapinna püsivuse tagamisel kamberkaevandamisega. [12]

Tabel 24. Kaitstavate alade kategooriate vastavus allmaakaevandamisel [12] [Täitmisega lankkaevandamise keskkonnamõjud.xlsx]

Kategooria	Tingimused
I	Kehtib kategooriline keeld maavara kaevandamiseks; põlevkivivaru kustutatakse registrist
II	Kaevandamine on võimalik kokkuleppel haldajaga või teiste pädevate isikutega, ja/või nende poolt seatud tingimustel; varu kaevandamisväärsuse kategooriat (aktiivne, passiivne) ei muudeta
III	Kaevandamine on lubatud kooskõlastamisega kui ei kahjustata kaitstavat ala või üksikobjekti
IV	Kaevandamine on lubatud kooskõlastuseta, kuna objekt ei oma enam kaitsealust väärtust.

Täitmisel kasutatav täitesegu peab olema keskkonnale ohutu. Ohutuse tagamiseks on vaja veenduda, kaeveõõntes täitesegu tardumise ajal ei leostuks rajatavast tehistervikust sellise kvaliteediga vett, mis põhjustab karjäärist väljapumbatava vee piirnõrme ületamist. Suurimat tähelepanu tuleb pöörata väljapumbatava vee pH võimalikule kasvamisele täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtmisel. Täitmisega seotud keskkonnamõjude väljaselgitamiseks on vaja kaevandustingimustes läbi viia suuremahuline täitmise pilootkatse ning keskkonnamõju hindamine. [70]

Seni täitesegudega läbiviidud katsed on näidanud, et autori poolt väljapakutud täitesegu, mis koosneb 20% PF ja 80% CFB tuhast on keskkonnale üks ohutumaid variante, seda just CFB

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

suure sisalduse tõttu. CFB tuha veevajadus on PF tuhast kõrgem, mistõttu väheneb CFB tuhal põhinevatest täitesegudest väljaleostuva vee kogus. [70] [71]

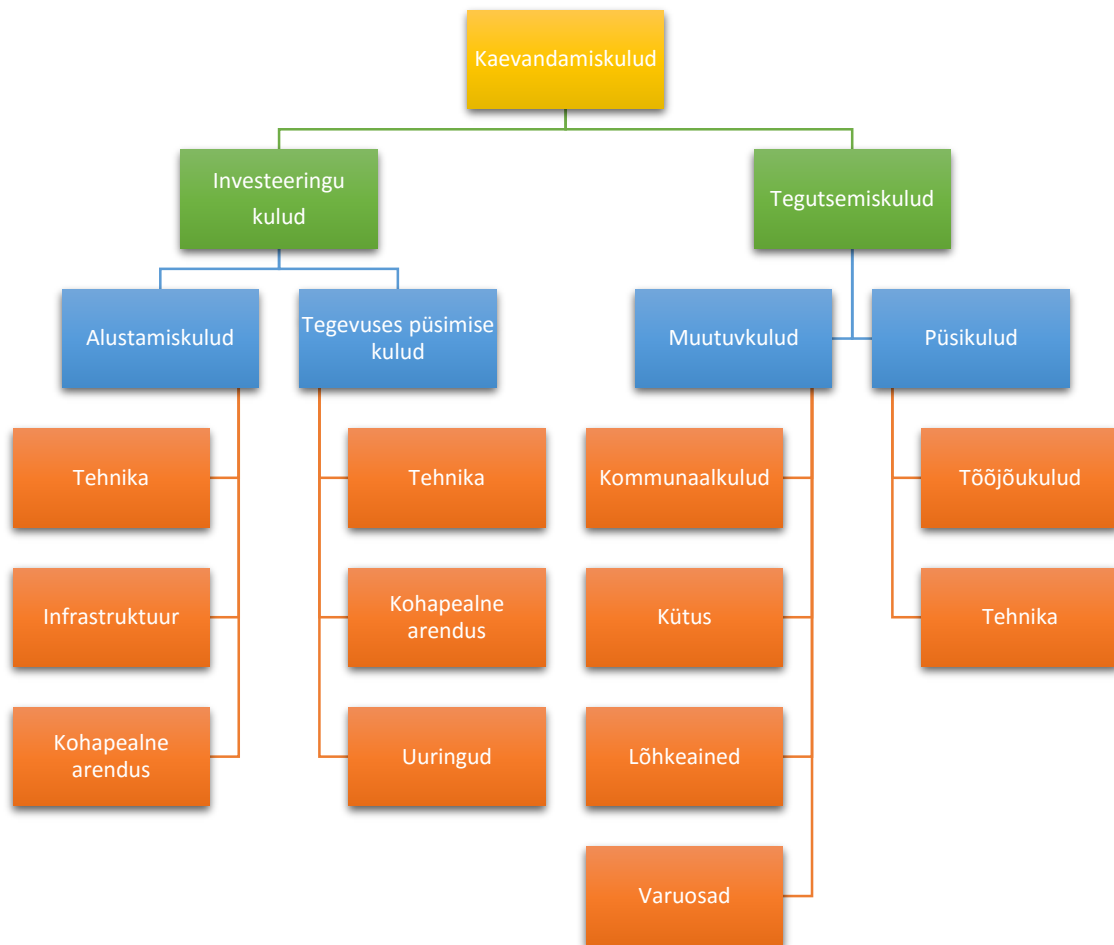
Põlevkivituha kasutamisel kaeveõõnte täitmisel on töö autori arvates võimalik lisaks keskkonnasõbralikule käitumisele saavutada kokkuvõid ka keskkonnatasudelt. Alates 2015. aastast on põlevkivituha ladestustasu 2,98 € (Tabel 25). [89]

Tabel 25. Põlevkivituha ladestustasu [90] [91] [Täitmisega lankkaevandamise keskkonnamõjud.xlsx]

	2011	2012	2013	2014	2015
Põlevkivituha tekkis, mln t	7,1	6,9	8,1	7,9	6,3
Põlevkivituha taaskasutati, mln t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Põlevkivituha ladestati, mln t	7,0	6,8	8,0	7,8	6,2
Põlevkivituha ladestustasu, €/t	1,44	1,72	2,07	2,48	2,98
Makstud ladestustasu, mln €	10,1	11,7	16,6	19,3	18,5

6. TÄITMISEGA LANKKAEVANDAMISE MAJANDUSLIKUD TINGIMUSED

Kaevandamisettevõtte kulud jagunevad investeeringukuludeks ja tegevuskuludeks. Investeeringukulud jagunevad omakorda kaevanduse rajamise (infrastruktuur, tehnika, keskkonnalubade saamine, projekteerimine) ning kaevanduse tööshoidmise (tehnika väljavahetamine, infrastruktuuri juurdeehitamine) kuludeks. Tegevuskulud jagunevad muutuv- ja püsikuludeks. Muutuvkulud sõltuvad väljatava maavara kogusest (kütus), püsikulud on sõltumatud väljatava maavara kogusest (tööliste palgakulu). Antud peatükis tuuakse välja täitmise ja kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtmisega seotud investeeringute maksumus ning seadmete tegevuskulud Narva karjääris täitmise ja lankkaevandamisel. [91]



Joonis 14. Kaevandamiskulude jagunemine [92]

6.1. Täitmisega seotud investeeringute prognoos

Täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtmisest tingitud investeeringud on peamiselt seotud täitesegu valmistamiseks ning kaeveõõnde transportimiseks vajalike seadmete soetamisega.

6.1.1. Põlevkivituha kuivalt väljastamine

Põlevkivituha on praegusel hetkel Narva Elektriijaamade tootmisüksustest võimalik suurtes kogustes kuivalt väljastada vaid Eesti Elektriijaama PF elektrifiltri ja tsüklontuhka ning Auvere

Elektrijaamas CFB tuhka. Narva karjääris täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõtul tuleb kuiva põlevkivituha väljastamisvõimet suurendada. BEJ-s tuleb rekonstrueerida põlevkivituha kuivalt ärastamise süsteem ja tuhasilod. EEJ-s on vaja ümber ehitada tuhaärastussüsteem ning sellega ühendada ka CFB energiablokk. Samuti on vaja kuivalt ärastada EEJ-s PF tuhka. Kokku on tuha kuivalt ärastamise investeeringu maksumus EE andmetel 18 mln €.

6.1.2. Põlevkivituha transport

Põlevkivituha transportimise logistilise skeemi lihtsustamiseks oleks see kõigepealt vaja ühte kohta kokku transportida. Kõige sobivam koht selleks on EEJ tuhasilod. BEJ-s tekkiva CFB tuha transportimiseks on EEJ tuhasilodesse on otstarbekas kasutada raudteetransporti.

Raudteetranspordiks vajalike tsisternvagunite hind on EE andmetel 80 000 € ning need mahutavad igaüks 60 t põlevkivituha. BEJ tekkiva tuha kogus aastas on 600 000 t ehk 2 308 t/ööpäevas. Ööpäevas jõuab veerem teha ühe tsükli. Sellise koguse põlevkivituha transportimiseks on vaja 39 tsisternvagunit. Lisaks tuleb osta reservi ka 20% vajalikest tsisternvagunite kogusest ehk 8 tsisternvagunit. Kokku on seega vaja põlevkivituha veoks vaja soetada 47 tsisternvagunit. Lisaks tsisternvagunitele on vaja soetada ka tuhatsisternide vedamiseks vedur, mille maksumus on 5 mln €. Kokku on BEJ-st EEJ tuhasilodesse põlevkivituha transpordiga seonduvate investeeringute maht 8,76 mln € (Tabel 26)

Tabel 26. Investeeringu maksumus põlevkivituha raudteetransporti BEJ ja EEJ tuhasilode vahel [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Transporditava tuha kogus, t/aastas	600 000
Tööpäevi aastas	260
Transporditava tuha kogus, t/päevas	2308
Töösükli arv päevas	1
Tsükli veetav tuha kogus	2308
Tuhatsisterni mahutavus, t	60
Tuhaveoks vajalik tuhatsisternide arv	39
Reservis olevate tuhatsisternide arv	8
Kokku tuhatsisternide arv	47
Ühe tuhatsisterni maksumus	80 000 €
Investeering tuhatsisternidesse	3 760 000 €
Vajalike vedurite arv	1
Veduri maksumus	5 000 000 €
Investeering vedurisse	5 000 000 €
Kokku investeering raudteetransporti	8 760 000 €

Põlevkivituha transpordiks AEJ-st EEJ tuhasilodesse ja EEJ tuhasilodest Narva karjääri neljandasse tranšeesse pakub töö autor välja variandi kasutada torukonveierit.

Rajatakse kaks torukonveierit:

- Esimene torukonveier rajatakse AEJ ja EEJ tuhasilode vahele
- Teine torukonveier rajatakse EEJ tuhasilode ja Narva karjääri neljandas tranšees oleva täitesegu valmistamise seadme vahele

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

AEJ ja EEJ tuhasilode vahele rajatava torukonveieri pikkuseks on 1,4 km ning EEJ ja Narva karjääri neljanda tranšee vahele rajatava torukonveieri pikkuseks 15,3 km (Lisa 4).

Torukonveieriga seotud investeeringute maksumuse leiab järgmise valemiga [92]:

$$Y_C = 81292,281 \times X^{0,309} \times l, \text{ kus} \quad (\text{Valem 10})$$

X on konveieri tootlikkus, t/päevas

l – konveieri pikkus, km

AEJ ja EEJ tuhasilode vahelise torukonveieri maksumus on 1,5 mln € (Tabel 27). EEJ tuhasilode ja Narva karjääri neljandas oleva täitesegu valmistamise seadme vahele rajatava torukonveieri maksumus on 21,8 mln € (Tabel 28).

Tabel 27. AEJ ja EEJ tuhasilode vahelise torukonveieri maksumus [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Transporditava tuha kogus aastas, t	1 100 000
Tööpäevi aastas	260
Konveieri tootlikkus, t/h	4 231
Konveieri pikkus, km	1,4
Investeering konveieri rajamiseks	1 502 246 €

Tabel 28. EEJ tuhasilode ja Narva karjääri neljanda tranšee vahelise torukonveieri maksumus [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Transporditava tuha kogus aastas, t	2 750 000
Tööpäevi aastas	260
Konveieri tootlikkus, t/h	10 577
Konveieri pikkus, km	15,3
Investeering konveieri rajamiseks	21 790 529 €

6.1.3. Aheraine killustikukompleks

Täitesegus aheraine kasutamiseks on vaja see purustada tükisuuruseni <16 mm, mistõttu on täitesegu valmistamise seadme lähedusse vaja rajada killustikukompleks. Kuna kaeveõonte täitmisel kasutatavale killustikule ei ole kõrgeid kvaliteedinõudeid, siis kasutatakse killustiku valmistamiseks lõugpurustit. Killustikukompleksi maksumuse arvutamiseks on võimalik kasutada järgmist valemit [92]:

$$Y_C = 2392,492 \times X^{0,775}, \text{ kus} \quad (\text{Valem 11})$$

X on killustikukompleksi tootlikkus, t/päevas

Rajatava killustikukompleksi maksumus on 1,34 mln € (Tabel 29)

Tabel 29. Killustikukompleksi rajamise maksumus [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Killustiku kogus aastas, t	916 667
Tööpäevi aastas	260
Killustikukompleksi tootlikkus, t/päevas	3 526
Investeering killustikukompleksi rajamiseks	1 342 641 €

6.1.4. Täitesegu valmistamiseks vajalikud seadmed

Täitesegu torustikuna kasutatakse ettevõtte PE Pipe Systems poolt pakutavaid 180 mm diameeter läbimõõduga polüetüleenist torusid SDR26, mille maksumus on 53 €/m. Arvestades, et maksimaalne täitesegu transpordikaugus kaeveõõntes on kuni 6000 m, siis kokku läheb 4 laavas samaaegselt lankkaevandamisel tarvis 24 000 m torustikku. [93]

Täitesegu torustiku maksumus kokku: $53 \text{ €/m} \times 24\,000 \text{ m} = 953\,262 \text{ €}$.

Kamberkaevandamisel kasutatavate täitesegu vaheseinade maksumus on 15 000 €. Selliste vaheseinte pindala on küll suurem kui antud töö autori poolt välja pakutud lahendus, kuid lisanduva tungraua tõttu vaheseina ja toestiku vahel on vaheseina maksumus töös võetud võrdseks kamberkaevandamisel kasutatavate vaheseintega. Kaevandatud ala täitmine toimub korraga 4 laavas, kus igas laavas koosneb toestik 200 üksikust hüdraulilisest toest. Kokku on kõikide laavade peale kasutusel seega 800 hüdraulilist tuge, millele lisaks tuleb soetada veel 20% reservis olevaid hüdraulilisi tugesid – kokku tuge arv on 960. Vaheseinad paigutatakse iga toestiku elemendi taha, seega on kokku vaja soetada 960 vaheseina. [94]

Kokku vaheseinte maksumus – $15\,000 \text{ €} \times 960 = 14\,400\,000 \text{ €}$

Täitesegu segamise seadme tootlikkus on $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ning kaevandatud ala täitmisel on täitmise kiiruseks $392 \text{ m}^3/\text{h}$ (Tabel 18). Täitesegu valmistamiseks vajalik mahus on täitesegu segamise seadmeid vaja rajada vähemalt 2 tükki. Lisaks tuleks rajada üks täitesegu segamise seade ka eriolukordade tarvis. Ühe täitesegu segisti hind on 3 500 000 €. [94]

Kokku täitesegu segamise seadmete maksumus – $3\,500\,000 \text{ €} \times 3 = 10\,500\,000 \text{ €}$.

Põlevkivituha ladustamiseks täitesegu segamise seadme läheduses on vaja rajada põlevkivituha silod. Silode mahutavus peab olema piisav 48 h jooksul transporditava põlevkivituha ladustamiseks. Valitud tuhasilode maht on 2500 m^3 ning nende maksumus 220 000 €. EE andmetel on CFB tuha keskmine tihedus $0,6 \text{ t/m}^3$, seega tuhasilosid on vaja rajada 13 tükki. [94]

Kokku tuhasilode maksumus – $220\,000 \text{ €} \times 13 \text{ tk} = 2\,860\,000 \text{ €}$.

Arvestades täitesegu transpordil torustiku keskmiseks survekaoks 2 kPa/m, siis on täitesegu transportimiseks 6000 m kaugusele vaja kasutada pumpasid, mis tekitavad surve vähemalt 12 MPa. Selliste pumpade tootlikkus on $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ja maksumus 1 300 000 €. Sellise pumba peab paigutama iga täitesegu valmistamise seadme juurde, seega on kokku vaja 3 pumpa. [94] [95]

Kokku pumpade maksumus – $1\,300\,000 \text{ €} \times 3 \text{ tk} = 3\,900\,000 \text{ €}$.

6.2. Täitmisega seotud tegevuskulude prognoos

Täitmisega seotud tegevuskulude leidmisel on eeldatud, et iga-aastane inflatsioon on 2% ja palgakasv 5%.

6.2.1. Põlevkivituha transpordi hind raudteel

Põlevkivituha transpordihinnaks raudteel on 0,1 €/tkm. Distantiks EEJ ja BEJ vahel mööda raudteed 92 km (edasi-tagasi teekond). Aastas transporditavaks tuhakoguseks on 600 000 t. Raudteel tuha transportimise tegevuskulud 2018. aastal on 5,52 mln € [92]

Tabel 30. Tuha raudteetranspordiga seotud tegevuskulud [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Aasta	2018	2019	2020	2021	2022
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Transpordi hind raudteel, €/tkm	0,102	0,102	0,104	0,106	0,108
Distsants BEJ-EEJ, km	92	92	92	92	92
Tuha kogus, t	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000
Tuha transpordi maksumus	5 520 000 €	5 630 400 €	5 743 008 €	5 857 868 €	5 975 026 €

6.2.2. Tuha transport torukonveieritega

Torukonveierite tegevuskulude leidmiseks saab kasutada järgmisi valemeid [92]:

$$\text{Tööjõukulu } Y_{töö} = 7,429 \times X^{0,464} \times (0,815 + 0,190 \times l), \text{ kus} \quad (\text{Valem 12})$$

X on konveieri tootlikkus, t/päevas

l on konveieri pikkus, km

$$\text{Elektrikulu } Y_{el} = 0,068 \times X^{0,933} \times [(0,208 + 0,0794) \times l], \text{ kus} \quad (\text{Valem 13})$$

X on konveieri tootlikkus, t/päevas

l on konveieri pikkus, km

$$\text{Hoolduskulu } Y_{hool} = 2,226 \times X^{0,358} \times l, \text{ kus} \quad (\text{Valem 14})$$

X on konveieri tootlikkus, t/päevas

l on konveieri pikkus, km

AEJ ja EEJ tuhasilode vahelise torukonveieri pikkuseks on 1,4 km ning tootlikkus 4 231 t/päevas. Antud torukonveieri tegevuskulud 2018. aastal on 129 tuh € (Tabel 31).

EEJ tuhasilode ja Narva karjääri neljanda tranšee vahelise torukonveieri pikkuseks on 15,3 km ning tootlikkuseks 10 577 t/päevas. Antud torukonveieri tegevuskulud 2018. aastal on 1,09 mln € (Tabel 32).

Tabel 31. AEJ ja EEJ tuhasilode vahelise konveieri tegevuskulu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	2018	2019	2020	2021	2022
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Tootlikkus, t/päevas	4 231	4 231	4 231	4 231	4 231
Konveieri pikkus, km	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Kulu tööjõule, päevas	387 €	394 €	402 €	410 €	419 €
Kulu elektrile, päevas	48 €	49 €	50 €	51 €	52 €
Kulud varuosadele, päevas	62 €	63 €	64 €	66 €	67 €
Konveieri tegevuskulu, päevas	497 €	506 €	517 €	527 €	537 €
Konveieri tegevuskulu, aastas	129 102 €	131 684 €	134 318 €	137 004 €	139 744 €

Tabel 32. EEJ tuhasilode ja Narva karjääri vahelise torukonveieri tegevuskulu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	2018	2019	2020	2021	2022
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Tootlikkus, t/päevas	10 577	10 577	10 577	10 577	10 577
Konveieri pikkus, km	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
Kulu tööjõule, päevas	2 037 €	2 078 €	2 119 €	2 162 €	2 205 €
Kulu elektrile, päevas	1 230 €	1 255 €	1 280 €	1 306 €	1 332 €
Kulud varuosadele, päevas	940 €	958 €	978 €	997 €	1 017 €
Konveieri tegevuskulu, päevas	4 207 €	4 291 €	4 377 €	4 464 €	4 554 €
Konveieri tegevuskulu, aastas	1 093 798 €	1 115 674 €	1 137 988 €	1 160 748 €	1 183 963 €

6.2.3. Aheraine transport killustikukompleksi

Aherainest killustiku valmistamiseks on vaja põlevkivi selektiivsel väljamisel tekkinud aheraine viia vaalkaevandamist rakendatavast kaevetranšeedest killustikukompleksi. Aheraine transpordi distantsiks on arvutustes võetud 10 km. Aastas transporditakse killustikukompleksi aherainet 916 667 t (Tabel 16). Aheraine transportimise maksumuse leiab valemiga [92]:

$$Y_{trans} = 0,180 \times l^{0,909} \times X, \text{ kus} \quad (\text{Valem 15})$$

X on transporditava aheraine kogus, t/aastas

l on aheraine transportimise distants, km

Aheraine transpordiga seotud tegevuskulud 2018. aastal on 1,34 mln € (Tabel 33).

Tabel 33. Aheraine transportimise tegevuskulud [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	2018	2019	2020	2021	2022
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Transportimise distants, km	10	10	10	10	10
Aheraine transport, t/aastas	916 667	916 667	916 667	916 667	916 667
Kulu aheraine transpordile, aastas	1 338 086 €	1 364 847 €	1 392 144 €	1 419 987 €	1 448 387 €

6.2.4 Killustikukompleksi tegevuskulud

Killustikukompleksi tegevuskulu leidmiseks saab kasutada järgmisi valemeid [92]:

$$\text{Tööjõukulu } Y_{töö} = 180,2 \times X^{0,279}, \text{ kus} \quad (\text{Valem 16})$$

X on killustikukompleksi tootlikus t/päevas

$$\text{Elektrikulu } Y_{el} = 0,315 \times X^{0,840}, \text{ kus} \quad (\text{Valem 17})$$

X on killustikukompleksi tootlikus t/päevas

$$\text{Hoolduskulu } Y_{hoold} = 1,093 \times X^{0,775}, \text{ kus} \quad (\text{Valem 18})$$

X on killustikukompleksi tootlikus t/päevas

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Täitesegu segamise seadme juurde rajatud killustikukompleksi tootlikkus on 3526 t/päevas. Killustikukompleksi tegevuskulu 2018. aastal on 712 tuh € (Tabel 34).

Tabel 34. Killustikukompleksi tegevuskulu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	2018	2019	2020	2021	2022
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Tootlikkus, t/päevas	3 526	3 526	3 526	3 526	3 526
Tööjõukulu, päevas	1 828 €	1 865 €	1 902 €	1 940 €	1 979 €
Elektrikulu, päevas	301 €	307 €	313 €	319 €	325 €
Varuosad, päevas	613 €	626 €	638 €	651 €	664 €
Kokku tegevuskulu, päevas	2 742 €	2 797 €	2 853 €	2 910 €	2 968 €
Kokku tegevuskulu, aastas	712 925 €	727 184 €	741 727 €	756 562 €	771 693 €

6.2.5. Täitesegu segamise ja kaeveõõnde transportimise maksumus

EE andmetel on täitesegu segamise ja kaeveõõnde transportimise maksumus 1,0 €/m³. Täitmisega lankkaevandamisel transporditakse maa alla 2 609 347 m³ täitesegu, seega täitesegu segamise ja transportimise maksumus on 2018. aastal 2,6 mln € (Tabel 35).

Tabel 35. Täitesegu segamise ja kaeveõõnde transportimise tegevuskulu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	2018	2019	2020	2021	2022
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Täitesegu kogus, m ³ /aastas	2 609 347	2 609 347	2 609 347	2 609 347	2 609 347
Täitesegu valmistamise maksumus, €/m ³	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08
Täitesegu valmistamise maksumus, aastas	2 609 347 €	2 661 534 €	2 714 765 €	2 769 060 €	2 824 441 €

6.2.6. Täitmisega seotud töötajate palgakulu

Täitmisega seotud töötajaid asub tööle 10 tükki vahetuses. Töö toimub kolmes vahetuses, seega kokku on täitmisega seotud töötajaid 30 tükki. Iga töötaja palgakulaks ettevõttele 2018. aastal on 1890 €/kuus (töötaja brutopalk 1400 €). Töötajate palgakulu ettevõttele 2018. aastal on 680 tuh € (Tabel 36).

Tabel 36. Täitmisega seotud töötajate palgakulu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	2018	2019	2020	2021	2022
Palgakasv	5%	5%	5%	5%	5%
Töötajate arv	30	30	30	30	30
Keskmine palgakulu ettevõtjale, kuus	1 890 €	1 985 €	2 084 €	2 188 €	2 297 €
Töötajate palgakulu ettevõtjale, aastas	680 400 €	714 420 €	750 141 €	787 648 €	827 030 €

6.2.7. Täitmiseks kasutatavate seadmete amortisatsioon

Täitmiseks kasutatavatele seadmetele on ette nähtud amortisatsiooniperiood, mille vältel seadmete väärtus lineaarselt kahaneb (Tabel 37). Amortisatsiooniperioodile on riigi poolt esitatud piirmäärad. Antud juhul on täitmiseks kasutatavate seadmete kulum aastast 5 894 761 €. [96]

Tabel 37. Täitmisega seotud investeeringute amortisatsioon [Täitmise ja lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Nimetus	Amortisatsiooniperiood (aastat)	Kulum (aastas)
Põlevkivituha kuivalt väljastamine	30	600 000 €
Torukonveier EEJ-Narva Karjäär	20	1 089 526 €
Torukonveier AEJ - EEJ	20	75 112 €
Vedur	10	500 000 €
Tuhavagunid	10	376 000 €
Aheraine purusti	10	134 264 €
Täitesegu torustik	10	127 102 €
Vaheseinad	10	1 440 000 €
Täitesegu segisti (280 m ³ /h)	10	1 050 000 €
Täitesegu silod (2500 m ³)	20	143 000 €
Pumbad (280 m ³ /h)	10	390 000 €
Kokku		5 925 004 €

6.2.8. Kokkuvõtte tuha ladestustasult

Põlevkivituha transportimisel jäätmehooldusse tuleb tasuda riigile ladestustasu, milleks alates 2015. aastast on 2,98€/t. [89]

Põlevkivituha kasutamisel täitematerjalina kaeveõõnte täitmiseks on töö autori arvates tõenäoline, et ladestustasu selle tegevuse eest maksuma ei pea. Eeldusel, et kaeveõõnte täitmiseks kasutatakse iga aasta 2 775 000 t põlevkivituha on kokkuvõtte ladestustasult 2018. aastal 8,19 mln € (Tabel 38).

Tabel 38. Kokkuvõtte tuha ladestustasult [Täitmise ja lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

	2018	2019	2020	2021	2022
Tuha ladestustasu	2,98 €	2,98 €	2,98 €	2,98 €	2,98 €
Täitmiseks kasutatav tuha kogus, t	2 775 000	2 775 000	2 775 000	2 775 000	2 775 000
Kokkuvõtte tuha ladestamiselt	8 195 000 €	8 195 000 €	8 195 000 €	8 195 000 €	8 195 000 €

6.3 Täitmise kasutuselevõtmise majanduslikud näitajad

Võrreldes lae varistamisega lankkaevandamisega on kaevandatud ala täitmise tehnoloogia kasutuselevõtmine seotud lisanduvate investeeringute ja väljatava põlevkivi omahinna kasvuga. Kaevandatud ala täitmistehnoloogia kasutuselevõtuks vajalike investeeringute maht Narva karjääris lankkaevandamise tingimustes on 85 mln € (Tabel 39).

Kaeveõõnte täitmiseks soetatud seadmete kasutamise kaasnevad lisakulud võrreldes lae varistamisega lankkaevandamisega. Narva karjääris on kaeveõõnte täitmisega seotud tegevuskulud 2018. aastal 9,8 mln € (Tabel 40). Säät põlevkivituha ladestustasult on väiksem kui kulud täitesegu valmistamiseks, seetõttu kasvab ka täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtmisega seotud kulu (esimesel aastal toimub täitmisega seotud seadmete paigaldamine ning täitmist ei toimu) (Joonis 15).

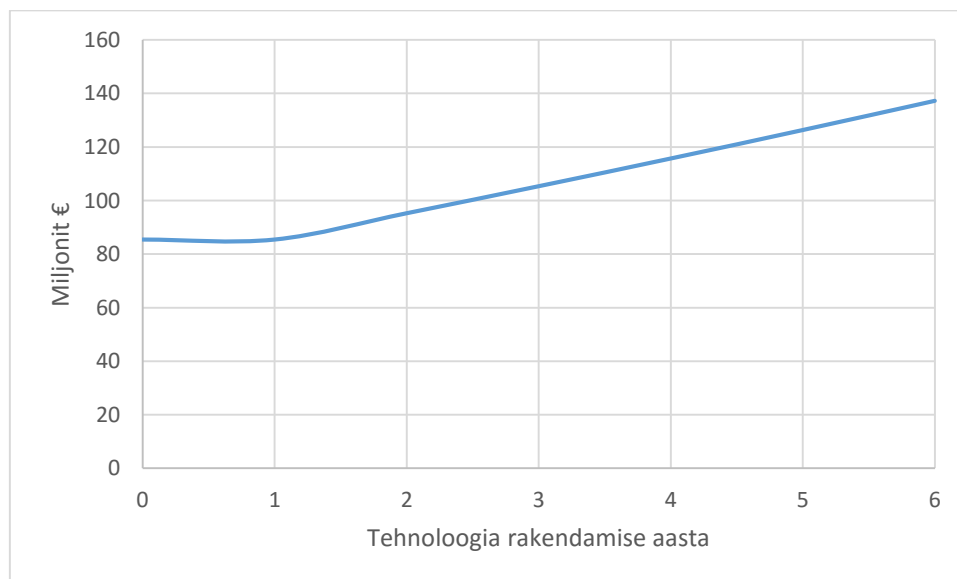
Tabel 39. Täitmiseks vajalike seadmete maksumus [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Investeeringud	Ühiku hind	Ühikut	Kokku
Põlevkivituha kuivalt väljastamine			
Kokku			18 000 000 €
Põlevkivituha transport			
Torukonveier EEJ-Narva Karjäär	1 424 218 €	15,3	21 790 529 €
Torukonveier Auvere Elektriijaam - EEJ	1 073 033 €	1,4	1 502 246 €
Vedur	5 000 000 €	1	5 000 000 €
Tuhavagunid	80 000 €	47	3 760 000 €
Kokku			32 052 775 €
Täitmisega seotud investeeringud			
Aheraine purusti	1 342 641 €	1	1 342 641 €
Täitesegu torustik	53 €	24000	1 271 016 €
Vaheseinad	15 000 €	960	14 400 000 €
Täitesegu segisti (280 m ³ /h)	3 500 000 €	3	10 500 000 €
Täitesegu silod (2500 m ³)	220 000 €	13	2 860 000 €
Pumbad (280 m ³ /h)	1 300 000 €	3	3 900 000 €
Kokku			32 931 016 €
Projekteerimine ja tööde organiseerimine			
Projekteerimiskulu		0,03	2 489 514 €
Kokku			2 489 514 €
Kokku investeeringud			85 473 304 €

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Tabel 40. Täitmisega seotud tegevuskulud [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

	2018	2019	2020	2021	2022
Kasvumäärad					
Inflatsioon	2%	2%	2%	2%	2%
Tööjõukulude kasv	5%	5%	5%	5%	5%
Tuha transpordikulu BEJ-EEJ tuhasilod	5 520 000 €	5 630 400 €	5 743 008 €	5 857 868 €	5 975 026 €
Tuha transport torukonveieritel	1 222 901 €	1 247 359 €	1 272 306 €	1 297 752 €	1 323 707 €
Aheraine transport	1 338 086 €	1 364 847 €	1 392 144 €	1 419 987 €	1 448 387 €
Aherainekillustiku valmistamine	712 925 €	727 184 €	741 727 €	756 562 €	771 693 €
Täitesegu segamise ja transpordi kulud	2 609 347 €	2 661 534 €	2 714 765 €	2 769 060 €	2 824 441 €
Töötajate palgakulu	680 400 €	714 420 €	750 141 €	787 648 €	827 030 €
Iga-aastane amortisatsioon	5 925 004 €	5 925 004 €	5 925 004 €	5 925 004 €	5 925 004 €
Kokku tegevuskulud täitesegu valmistamiseks	18 008 663 €	18 270 748 €	18 539 096 €	18 813 882 €	19 095 289 €
Kokkuhoid põlevkivituha ladestustasult	8 195 000 €	8 195 000 €	8 195 000 €	8 195 000 €	8 195 000 €
Täitesegu valmistamise maksumus	9 813 663 €	10 075 748 €	10 344 096 €	10 618 882 €	10 900 289 €
Täitesegu valmistamise omahind, €/m³	3,76 €	3,86 €	3,96 €	4,07 €	4,18 €



Joonis 15. Täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõttuga seotud kogukulu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes

Põlevkivituha ladestustasu kasvamisel väheneb täitesegu valmistamise omahind. Täitesegu valmistamisega seotud kulud on 2018. aastal võrdsed põlevkivituha ladestustasust saadava kokkuhoiuga kui põlevkivituha ladestustasu oleks 6,49 €/t (Tabel 41).

Tabel 41. Täitmisega seotud kulude katmiseks vajalik põlevkivituha ladestustasu [Täitmisega lankkaevandamise majandusarvutused.xlsx]

Kokku tegevuskulud täitesegu valmistamiseks	18 008 663 €	18 270 748 €	18 539 096 €	18 813 882 €	19 095 289 €
Täitmiseks kasutatav tuha kogus, t	2 775 000	2 775 000	2 775 000	2 775 000	2 775 000
Vajalik põlevkivituha ladestustasu, €/t	6,49	6,58	6,68	6,78	6,88

7. ARUTELU

Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamine on Eesti tingimustes varem katsetamata ning seetõttu on vaja enne antud kaevandamistehnoloogia kasutuselevõttu kindlasti läbi viia pilootkatse kaevanduse tingimustes, kus uuritakse:

- Täitesegu transportimise efektiivsust
- Transporditorude puhastamist pärast täitmist
- Täitesegu tardumise kiirust
- Tehisterviku survetugevuse arenemist
- Tehisterviku paisumist
- Täitesegu vaheseinade (sh. geotekstiili) omadusi

Antud töös väljapakutud täitesegus kasutatavast tuhast on 80% CFB tuhk, mille veevajadus on suurem kui PF tuhal. Torudes transportimiseks peab täitesegu sisaldama kindla osa vett, mis võib olla kõrgem kui täitesegus kasutatava põlevkivituha veevajadus. Suurema veevajadusega põlevkivituhk kasutab veega keemilistes reaktsioonides ära rohkem vett, mistõttu satub kaevandatud ala täitmisel töösooni väiksem veekogus. Alternatiivseks variandiks täitesegu transportimisel kaeveõõntes tuleb uurida tigukonveieri kasutamise võimalust, kus põlevkivituha ja aherainekillustiku segule lisatakse vesi alles vahetult enne täidetavasse alasse liikumist.

Antud töös väljapakutud tehnoloogilise lahenduse kohaselt oleks lankkaevandamine kõige otstarbekam organiseerida korraga neljas laavas. Rohkemate kombainide kasutamisel hakkab kombainide edasinihkekiirust piirama tekkivate täitematerjalide, täpsemalt tekkiva CFB tuha kogus. Täitematerjalide koguse suurendamiseks tuleks läbi viia laboratoorsed katsed Enefit õlitehastes tekkivate tuhkade lisamiseks täitesegusse. Laavade ettenihkekiiruse suurendamiseks on lisaks Enefit tuhkade kasutuselevõtule võimalik täitesegus kasutada ka lisaaineid, mis kiirendavad täitesegu tardumist. Mõned näited sellistest lisanditest: CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ [97]

Lähislae paksus Narva karjääri allmaakaevandatava ala piires väheneb ida suunas, mistõttu väheneb ka lähislae piirava (Lisa 2). Õhukese lähislae paksusega piirkonnas võib osutada vajalikuks lisaks põlevkivi tootuskihindile väljata ka vahetus laes olevad kihid F_2 , F_2/F_3 ja F_3 . Sellist kihindi väljamise kõrgust kasutatakse Estonia Kaevanduses madala püsivusega lagede piirkonnas. Täpsema vajaduse paksema kihindi väljamiseks Narva karjääris lankkaevandamisel selgitavad katsetööd kaevanduses [98].

Narva karjääris on Sirgala mäeeraldise kaguosas hinnatud Puhatu looduskaitseala jääv põlevkivivaru passiivseks. Arvestades, et kaevandatud ala täitmisega ei toimu maapinna vajumist ning keskkonnamõjude hindamisel tõestatakse täitmisega kaevandamistehnoloogia keskkonnaohutus, peaks käesoleva töö autori arvates alustama arutelu täitmisega kaevandamistehnoloogia võimaliku kasutamisevõimaluste teemal looduskaitseliste piirangute tõttu passiivseks hinnatud varude kaevandamise osas.

Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise kaevandamisviisi kasutuselevõttuga kaasnevad investeeringud vajalike seadmete hankimiseks, mis töö autori prognoosi kohaselt on 85 mln €. Samuti kasvavad iga aastaga täitesegu valmistamisega seotud tegevuskulud. Tegevuskulude kasvu taga on põlevkivituha ladestustasu püsimine 2,98 €/t tasemel alates 2015. aasta 1.

jaanuarist. Täitmise majanduslik tasuvus paraneb põlevkivituha ladestustasu tõusmisel. Narva karjääri tingimustes aheraine ladestustasu muutumine täitmise majanduslikku tasuvust ei mõjuta, sest Narva karjääris tekkivat aherainet ei ladestada vaid paigutatakse sisepuistangutesse ning selle eest ladestustasu ei maksta. Kamberkaevandamisel on kaevandatud ala täitmisega kaevandamistehnoloogia majanduslikku tasuvust lihtsam saavutada kui lankkaevandamise puhul, sest kamberkaevandamisel vähenevad täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutuselevõtul maavarakaod ning pikeneb kaevanduse eluiga. Kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamisel peab täitmisega seotud põlevkivi omahinna kasv olema väiksem kui maapinna püsivusest saadav väärtus [89].

KOKKUVÕTE

Antud töös pakutakse välja tehnoloogiline lahendus Narva karjääri lõunaosas kaevandatud ala täieliku täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõtmiseks. Lisaks uuriti ka täitmisega lankkaevandamise võimalikku keskkonnamõju ning esitati täitmisega lankkaevandamise tehnoloogia kasutuselevõtuga seotud investeeringute ja tegevuskulude prognoos. Peamised järeldused:

- Täieliku täitmisega lankkaevandamisel on otstarbekas rajada ala geoloogiliste ja tehnoloogiliste piirangute juures võimalikult pikad laavad. Antud töös on laavade pikkuseks kuni 400 m.
- Narva karjääri allmaakaevandatavas osas on lähislae paksuseks põlevkivi tootuskihindi kohal keskmiselt 2,03 m. Lähislae piiravaks on arvutuste tulemusel 15,0 m.
- Kaevandatud alasse rajatakse tehistervikud kahes osas. Tehistervikud peavad 7 päeva jooksul saavutama survetugevuse vähemalt 1,32 MPa.
- Praeguse parima teadmise kohaselt koosneb sobivaim täitesegu 75% põlevkivituhast (80% CFB ja 20% PF tuhk) ning 25% aherainekillustikust. Täitesegu transportimiseks ja tardumiseks lisatakse sellele vett.
- Laavade edasinihkekiirust vähendab lähislae piirava ja täitesegu omadused ning kogus. Töö autor leidis, et optimaalne on lankkaevandamine organiseerida korraga 4 laavas. Ühe laava edasinihe on sel juhul 11,3 m nädalas ning laavade summaarne edasinihe 45,2 m nädalas.
- Lankkaevandamisel kasutatavas kombainikompleksis peab kombaini võimsus olema vähemalt 538 kW ning teoreetiline tootlikkus 5,03 t/min. Hüdraulilise toestiku valikul peab arvestama, et see peab töötama kõrgusvahemikus 2,28...2,95 m.
- Kaevandatud ala täitmisega kaevandamistehnoloogia kasutamisel saab maapinna klassifitseerida kui stabiilsena.
- Töö autori poolt koostatud prognoosi kohaselt on Narva karjääris kaevandatud ala täitmisega seotud investeeringud 85 mln € ning täitmisega seotud tegevuskulud kasvavad iga aasta.

Töö autori seisukoht on, et kaevandatud ala täitmine EE kontsernis tekkivate tootmisjääkidega on tulevikus perspektiivne, kuid majanduslikku tasuvust on kamberkaevandamisel kadude vähendamise tõttu lihtsam saavutada kui lankkaevandamisel.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Pastarus, J.-R. (1998). Analysis of the roof and pillar design in Estonia's oil shale mines. *Oil Shale*, 15(2), 147 - 156.
- [2] Pastarus, J.-R., Šommet, J., Valgma, I., Väizene, V., Karu, V. (2013). Paste fills technology in condition of Estonian oil shale mine. *Environment. Technology. Resources* (11). Rēzeknes Augstskola.
- [3] Metsur, M., Kaljuste, M., Tamm, I., Toomik, A., Kukk, R. (2015). Eesti Energia Kaevandused AS kaevandamislubade KMIN-073, KMIN-046 KMIN-074 ja KMIN-087 muutmisega kaasneva keskkonnamõju hindamise (KMH) aruanne. AS MAVES, OÜ Inseneribüroo STEIGER. Tallinn.
- [4] Pastarus, J.-R., Adamson, A., Nikitin, O., Lohk, M. (2010). Tagasitäitmisega kaevandamistehnoloogia kontseptsioon. Maapõue kasutamise arengud, 29-32. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
- [5] Palarski, J. (1994). Design of backfill as support in Polish Coal Mines. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 218-226.
- [6] Kattai, V., Saarde, T., Savitski, L. (2000). Eesti Põlevkivi - geoloogia, ressursid, kaevandamistingimused, Tallinn: Akadeemia Trükk, 226 lk.
- [7] Mäeinstituudi teemaleht: Karjäärid. Narva põlevkivikarjäär. [WWW]. <http://karjaarid.blogspot.com/2012/12/kopp-nool-maas-narva-karjaar.html> (22.05.2016).
- [8] Tamm, I., Pello, A. (2015). Narva karjääri 13-nda tranšee mäetööde lõpetamise projekti hüdrogeoloogiline prognoos. AS Maves, Tallinn.
- [9] EV valitsus. (2005). Maapõueseadus. [WWW]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/107072015023?leiaKehtiv> (22.05.2016).
- [10] Reinsalu, E. (2011). Eesti Mäendus, Tallinn: TTÜ kirjastus, 186 lk.
- [11] Adamson, A., Reinsalu, E., Valgma, I., Sõstra, Ü., Lind, H., Tammeoja, T., Tohver, T., Karu, V., Västrik, A. (2005). Põlevkivi kaevandamise tehnoloogilise struktuuri optimeerimine. Tallinn.
- [12] Adamson, A., Reinsalu, E., Valgma, I., Erg, K., Lind, H., Uibopuu, L. (2003). Eesti põlevkivimaardla tehnoloogiline, majanduslik ja keskkonnakaitse rajoneerimine. Tallinn.
- [13] Valgma, I. (1998). An evaluation of technological overburden thickness limit of oil shale open casts by using draglines. *Oil Shale*, 15(2), 134 - 146.

- [14] Adamson, A., Reinsalu, E., Valgma, I., Sõstra, Ü., Lind, H., Tammeoja, T., Tohver, T., Karu, V., Västriku, A. (2005). Eesti põlevkiviressursi kasutamissuundade riikliku strateegia aastani 2020 alusuuringud. Tallinn.
- [15] Adamson, A., Toomik, A., Mihhaltšenkov A., Gabets, V. (2000). Maa seisundi juhtimine kombainkaevandamisel. Põlevkivi talutav kaevandamine : konverentsi ettekannete teesid ja artiklid: 26. mai 2000. (Toim.) Reinsalu, E.. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli mäeinstituut.
- [16] Lehmann, C., Konietzky, H. (2015). Geomechanical issues in longwall mining – an introduction. TU Bergakademie Freiberg, Geotechnical Institute, 2015.
- [17] Barczak, T. (1992). Examination of Design and Operation Practices for Longwall Shields. Bureau of Mines Information Circular.
- [18] Energy Information Administration. (1995). Longwall mining.
- [19] Mine Subsidence Engineering Consultants. (2007). Introduction to Longwall Mining and Subsidence.
- [20] Mining Operations and Subsidence. [WWW]. http://www.blm.gov/style/medialib/blm/co/programs/land_use_planning/rmp/red_cliff_mine/documents/draft_eis/volume_ii.Par.6276.File.dat/Appendix_C_Mining_Operations_and_Subsidence.pdf (22.05.2016).
- [21] Mitchell, G. W. Longwall Mining, Monograph 26 - Australasian Coal Mining Practice [WWW]. http://www.undergroundcoal.com.au/pdf/longwall_mitchell.pdf (22.05.2016).
- [22] Бурчаков, А. С., Гринько, Н. К., Черняк, И. Л. (1982). Процессы подземных горных работ, Москва: Недра, 423 lk.
- [23] Pozin, V.; Adamson, A.; Andreyev, V. (1998). Breakage of oil shale by cutting. Oil Shale, 15(2), 185 - 205.
- [24] Рейнсалу, Э., Петерсон, М. С., Барабанер, Н. И. (1982). Управление качеством в сланцевой промышленности, Москва.
- [25] Reinsalu, E. (2008). Mäemajandus. Parandatud ja kommenteeritud elektrooniline teavik. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, 156 lk.
- [26] Väizene, V., Pastarus, J.-R., Valgma, I. (2014). Ida-Virumaa põlevkivi kaevandamisalade ruumilise planeeringu hinnang. Tallinn.

- [27] Lauringson, V., Reier, A. (1981). Eesti NSV maapõuevarad ja nende kaevandamine, Tallinn Perioodika, 94 lk.
- [28] Helinski, M. (2007). Mechanics of Mine Backfill. The University of Western Australia, Doktoritöö.
- [29] Zhang, J., Zhang, Q, Huang, Y., Liu, J., Zhou, N., Zan, D. (2011). Strata movement controlling effect of waste and fly ash backfillings in fully mechanized coal mining with backfilling face. Mining Science and Technology, 21, 721–726.
- [30] Puura, E. (2009). AS Viru Keemia Grupi tootmisprotsessis tekkivate tahkete jäätmete tagasiladestamise võimalikkuse analüüs.
- [31] Skousen, J., Siemkiewicz, P., Jang, J.E. (2012). Use of coal combustion by-products in mine reclamation: review of case studies in the USA. Geosystem Engineering, 15(1), 71–83.
- [32] Muraka, I.P., Erickson, J. (2006). CCB Use in Mine Filling Applications: A Review of the Literature and Case Studies. Combustion Byproducts Recycling Consortium Ashlines, 7(2).
- [33] Palarski, J., Zajac, A. Ash and slag handling. Silesian University of Technology.
- [34] Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science, 36, 327–363.
- [35] Bloss, M.L. (2014). An operational perspective of mine backfill," Mine Fill 2014.
- [36] Grice, T. (2014). Mine backfill – a cost centre or an optimisation opportunity? 11th International Symposium on Mining with Backfill.
- [37] Senapati, P.K., Mishra, B.K. (2012). Design considerations for hydraulic backfilling with coal combustion products (CCPs) at high solids concentrations. Powder Technology, 229, 119–125.
- [38] Разработка твердеющей закладки с применением зол ТЭЦ. (1986). Tallinn.
- [39] Горное дело-Труды Таллиннского технического университета. (1989). Tallinn, TTÜ.
- [40] Valgma, I, Kolats, M., karu, V. (2010). Streki toestamine põlevkiviaherainebetooniga. Västriku, A., Niitlaan, E., Reinsalu, E., Vesiloo, P., Pastarus, J-R., Köpp, V., Soosalu, H., Viilup, H. (Toim.). Maapõue kasutamise arengud, 33 - 38. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.

- [41] Eesti Energia AS. Põlevkivienergeetika. [WWW]. <https://www.energia.ee/et/polevkivienergeetika-avaleht> (22.05.2016).
- [42] Eesti Energia AS. Balti Elektriijaam. [WWW]. <https://www.energia.ee/et/juubel/balti-elektriijaam-55> (22.05.2016).
- [43] Eesti Energia AS. Põlevkivist elektri tootmine. [WWW]. <https://www.energia.ee/et/polevkivist-elektri-tootmine> (22.05.2016).
- [44] Eesti Energia AS. Eesti Elektriijaam. [WWW]. <https://www.energia.ee/et/juubel/eesti-elektriijaam-45> (22.05.2016).
- [45] Eesti Energia AS. Enefit 140 õlitehas. [WWW]. <https://www.enefit.com/et/enefit140-oil-plant> (22.05.2016).
- [46] Eesti Energia AS. Enefit 280 õlitehas. [WWW]. <https://www.enefit.com/et/enefit280-building> (22.05.2016).
- [47] Pihu, T., Arro, H., Prikk, A., Rootamm, R., Konist, A., Kirsimäe, K., Liira, M., Mõtlep, R. (2012). Oil shale CFBC ash cementation properties in ash fields. *Fuel*, 93, 172–180.
- [48] Blinova, I., Bityukova, L., Kasemets, K., Ivask, A., Käkinen, A., Kurvet, I., Bondarenko, O., Kanarbik, L., Sihtmäe, M., Aruoja, V., Schvede, H., Kahru, A. (2012). Environmental hazard of oil shale combustion fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 229-230, 192-200.
- [49] Kuusik, R., Meriste, T., Pototski, A. (2012). Põlevkivituha kasutamise laiendamiseks on käivitunud mitu uut projekti. *Keskkonnatehnika*, 3, 8.
- [50] Müller, G., Truu, M. (2011). Põlevkivituhaga stabiliseerimine teedehituses- hästi unustatud vana või midagi uut? *Ettekanne Asfaldipäevalt 30.11.2011*.
- [51] Valgma, I., Kolats, M., Anepaio, A., Väizene, V., Saarnak, M., Pastarus, J.-R. (2013). Backfilling technologies for Estonian oil shale mines. *Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry*, 374 - 378. Milos island, Greece: Heliotopos.
- [52] Kattai, V. (2000). Narva karjäärivälja puuraukude digitaalne andmebaas. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, EGF 6809.
- [53] Kattai, V. (2001). Narva karjäärivälja puuraukude digitaalne andmebaas (II ja III etapp),“ Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, EGF 6999.

- [54] Flook, S. D., Leeming, J. J. (2008). Recent developments in longwall mining entry development and room and pillar systems. *Mineral Resources Management; The Journal of Polish Academy of Sciences*, 24, 11-23.
- [55] Keskkonnaministeerium. (2014). Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016-2030 (eelnõu seisuga oktoober 2014), Tallinn.
- [56] Nikitin, O., Sabanov, S. (2005). Immediate roof stability analysis for new room-and-pillar mining technology in "Estonia" mine. *Proceedings of the 5th International Conference "Environment Technology Resources": 5th International Conference "Environment Technology Resources" Rezekne Augstskolas Izdevnieciba, Rezekne, Latvia, June 16-18, 2005. (Toim.) Noviks, G. Lāti, Rezekne: RA Izdevnieciba 262 - 269.*
- [57] Дьяченко, З. К., Адамсон, А. П., Самлан, Ю. К. (1982). Определение целесообразности выемки пласта сланца длинными забоями с обрушением кровли очистными комбайнами при мощности толщи карбонатных пород в кровле менее 25 м в условиях Ленинградского месторождения, Арх.№:0503/0504, 184 lk.
- [58] Трунов, А. С., Киртянов, В. Г. (1983). Изготовление и испытание экспериментального образца четырехстоечной крепи (на базе гидрофицированной крепи Спутник), Арх.№:0570/1, 104.
- [59] Reinsalu, E. (2014). Fosforiidi kaevandamise tehnika Ida-Kabala näitel. Fosforiidi spetsialistide seminar, Tallinn.
- [60] H. Manteghi, K. Shahriar and R. Torabi, Numerical modelling for estimation of first weighting distance in longwall coal mining - A case study, 12th Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012, 60-68.
- [61] Singh, G. S. P. (2015). Conventional approaches for assessment of caving behaviour and support requirement with regard to strata control experiences in longwall workings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7 (3), 291-297.
- [62] Singh, G. S. P., Singh, U. K. (2009). A numerical modeling approach for assessment of progressive caving of strata and performance of hydraulic powered support in longwall workings. *Computers and Geotechnics*, 36 (7), 1142–1156.
- [63] Reinsalu, E. (2016). Eesti Mäendus III, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut, 485 lk.

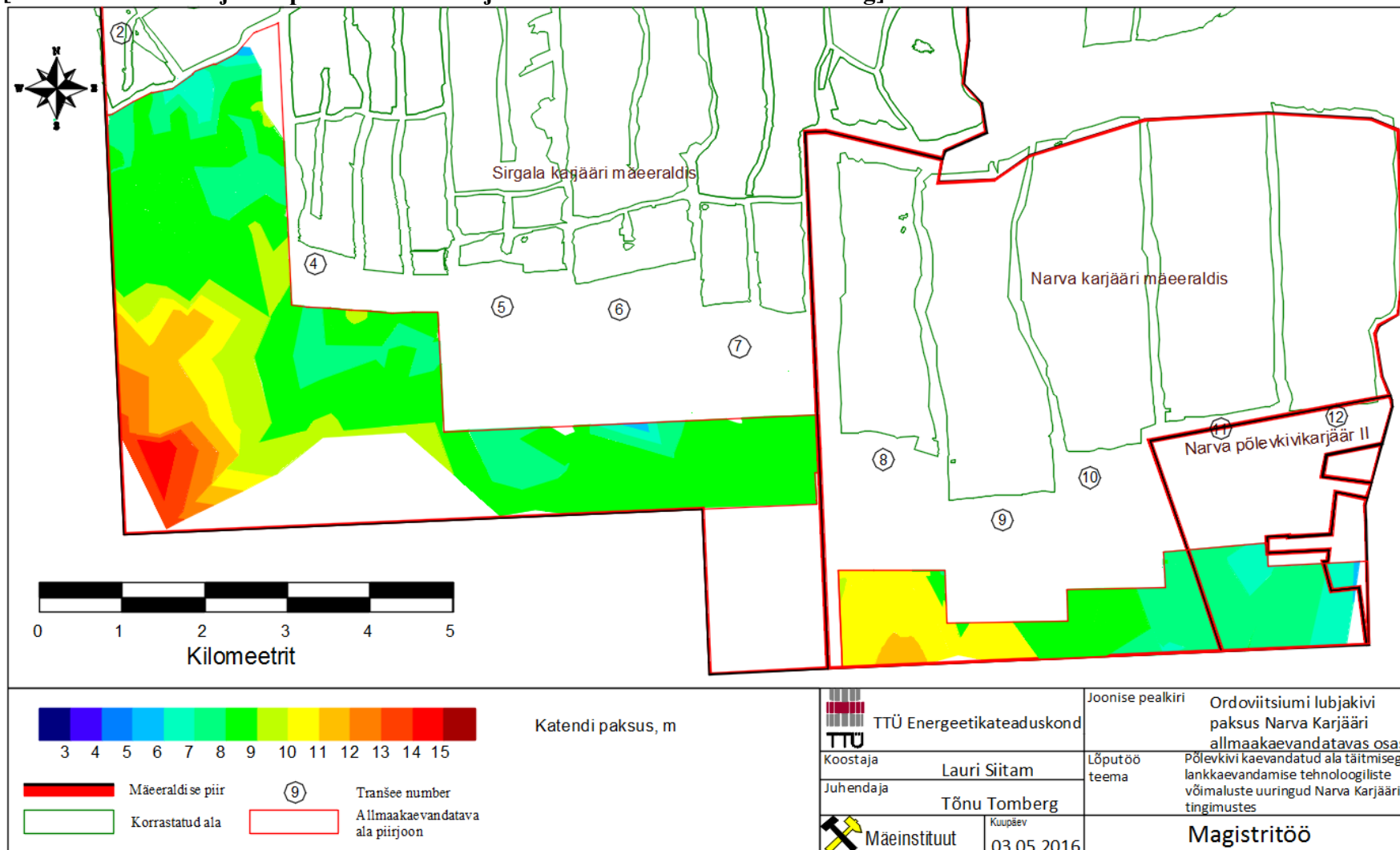
- [64] Pastarus, J.-R., Nikitin, O. (2001). Mining block stability estimation in Estonian oil shale mines. Proc. of the International Symposium on Geotechnical Issues of Underground Space Use for Environmentally Protected World. Dnipropetrovsk, Ukraine, 26-29 June 2001, 121-125.
- [65] Pastarus, J.-R., Sabanov, S. (2005). A method for securing working mining block stability in Estonian oil shale mines. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, 11(1), 59 - 68.
- [66] Sivakugan, N., Rankine, R.M., Rankine, K.J., Rankine, K.S. (2006). Geotechnical considerations in mine backfilling in Australia. Journal of Cleaner Production, 14, 1168-1175.
- [67] Benzaazoua, M., Belem, T. (2004). An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines. Proceedings of the 5th Int. Symp. on Ground support in Mining and Underground Construction. 637-650.
- [68] Benzaazoua, M., Belem, T. (2004). An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines. Proceedings of the 5th Int. Symp. on Ground support in Mining and Underground Construction. 637-650.
- [69] Piotrowski, Z., Pomukala, R., Kanafek, J. (2009). The utilization of energy waste in Polish underground coal mines. World of Coal Ash (WOCA) Conference - May 4-7.
- [70] Puura, E., Mõtsep, R., Kriiska, K. (2009). Põlevkivi kaevandamis- ja töötlemisjääkide kasutamine tagasitäiteks kaevandatud aladel: keskkonnamõjude hindamine.
- [71] Raado, L.-M., Rosenberg, M., Nurm, V., Hain, T., Hmelnitski, J., Tšibanova, M., Saia, L., Karu, E. (2008). Põlevkivi kaevandamis- ja töötlemisjääkide kasutamine tagasitäiteks kaevandatud aladel.
- [72] Põhjarannik, VKG pakkis tuha torusse. [WWW]. <http://pr.pohjarannik.ee/?p=15840> (22.05.2016).
- [73] Shipp, S. Advances in conveyor technology.[WWW]. https://www.beumergroup.com/uploads/tx_bbbrochures/WP_Advances_in_Conveyor_Technology.pdf (22.05.2016)
- [74] Paterson, A. J. C. (2012). Pipeline transport of high density slurries: a historical review of past mistakes, lessons learned and current technologies. Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. 121 (1), 37-45.
- [75] Ju, F., Zhang, J., Zhang, Q. (2012). Vertical transportation system of solid material for backfilling coal mining technology. International Journal of Mining Science and Technology, 22, 41–45.

- [76] Cooke, R. (2001). Design procedure for hydraulic backfill distribution systems,“ The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 96-102.
- [77] Chang, Q., Chen, J., Zhou, H., Bai, J. (2014). Implementation of Paste Backfill Mining Technology in Chinese Coal Mines. The Scientific World Journal, 1-8.
- [78] Li, L. (2013). A new concept of backfill design—Application of wick drains in backfilled stopes,“ International Journal of Mining Science and Technology, 23 (5), 763-770.
- [79] Fourie, A.B., Copeland, A.M., Barrett, A.J. (1994). Optimization of the as-placed properties of hydraulic backfill. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 199-209.
- [80] Darling, P. (2011). SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy and Exploration inc., 1840 lk.
- [81] Dickson, M. G., Strydom, C. S. (1990). Geotextiles for backfilling on deep level mines,“ Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related products, Hague, 849-853.
- [82] Undusk, V., Petrov, R. (1998). Buldooser-kobestite abil teostatava A-kihi väljamise efektiivsuse uurimine Sirgala ja Narva Karjääris. AS Eesti Põlevkivi, Jõhvi, 1998.
- [83] Shabanimashcool, M., Lanru, L., Li, C. C. (2014). Discontinuous Modelling of Stratum Cave-in in a Longwall Coal Mine in the Arctic area. Geotechnical and Geological Engineering, 32 (5), 1239-1252.
- [84] Trueman, R., Lyman, G., Cocker, A. (2009). Longwall roof control through a fundamental understanding of shield–strata interaction. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46 (2), 371-380.
- [85] Altman, D. G., Bland, J. M. Standard deviations and standard errors. [WWW]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1255808/> (22.05.2015).
- [86] Сапицкий, К. Ф., Дорохов, Д. В., Зборщик, М. П., Андрушко, В. Ф. (1981). Задачник по подземной разработке угольных месторождений, Недра, 311 lk.
- [87] Позин, Е. З., Адамсон, А., Андреев, В. А. (1984). Разрушение сланцев инструментами выемочных машин. Академия Наук СССР, 143 lk.
- [88] Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I. (2002). Kaevandatud maa. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 146 lk.

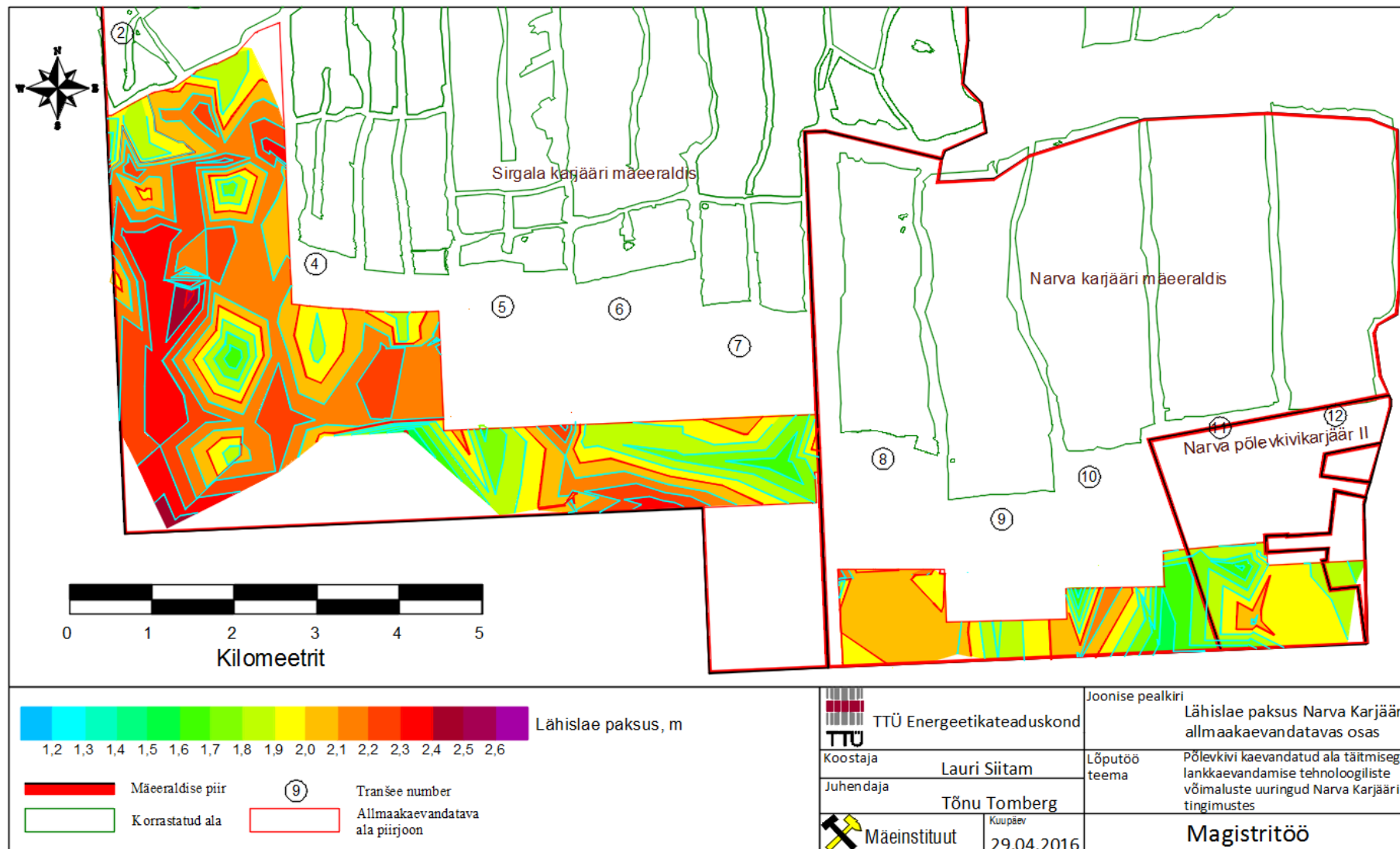
- [89] EV valitsus. (2006). Keskkonnatasude seadus. [WWW]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/117122015043?leiaKehtiv> (22.05.2016).
- [90] Eesti Energia AS. (2016). Eesti Energia aastaaruanne 2015.
- [91] Mohutsiwa, M., Musingwini, C. (2015). Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115, 789-797.
- [92] Bureau of Mines. (1987). Bureau of Mines Cost Estimating System Handbook.
- [93] GPS PE Pipe systems. Product/price guide. [WWW]. <http://www.gpsuk.com/uploads/docs/1635.pdf> (22.05.2016).
- [94] Sulp, K. (2015). Kaevandamisel tekkiva aheraine kasutamine täitmisel, Tallinn.
- [95] A.Stimmer, "Täitesegud ja kaevandamise tehnoloogia Estonia kaevanduse tingimustes," Tallinn, 2013.
- [96] EV valitsus. (2004). Riigi raamatupidamise üldeeskiri. [WWW]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/122122015033?leiaKehtiv> (22.05.2016).
- [97] Myrdal, R. (2007). Accelerating admixtures for concrete. SINTEF Building and Infrastructure.
- [98] Nikitin, O., Pastarus, J.-R., Sabanov, S. (2006). Roof bolting analysis at "Estonia" oil shale mine. Mine planning and equipment selection 2006: 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Torino, Italy, 20-22 September 2006.

LISAD

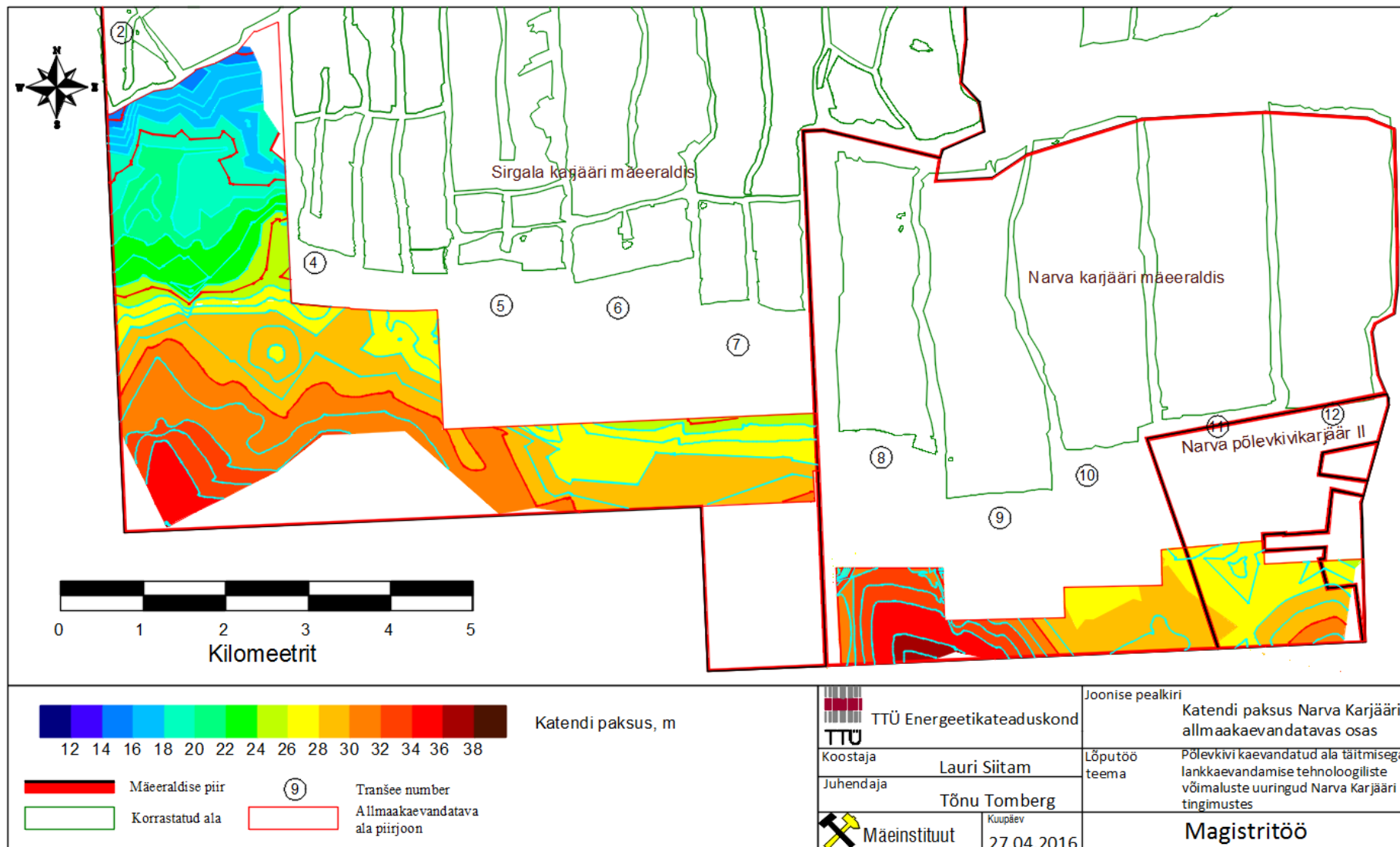
**Lisa 1. Ordoviitsiumi lubajakivi paksus Narva karjääri allmaakaevandataval alal (koostatud autori poolt [52] ja [53] põhjal)
[Ordoviitsiumi lubajakivi paksus Narva karjääri allmaakaevandataval alal.dwg]**



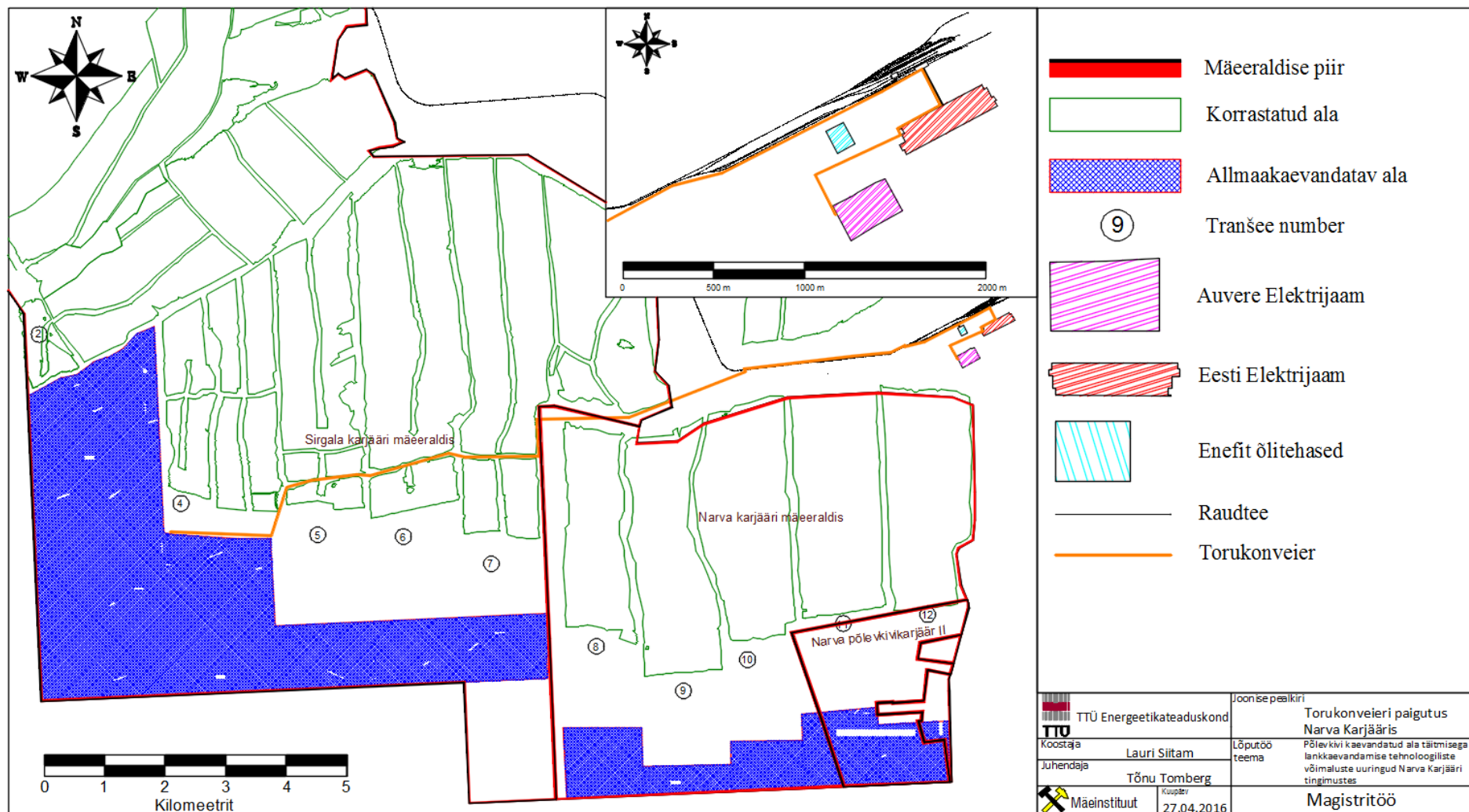
**Lisa 2. Lähislae paksuse muutumine Narva karjääri allmaakaevandatava ala piires (koostatud autori poolt [52] ja [53] põhjal)
[Lähislae paksuse muutumine Narva karjääri allmaakaevandatava ala piires.dwg]**



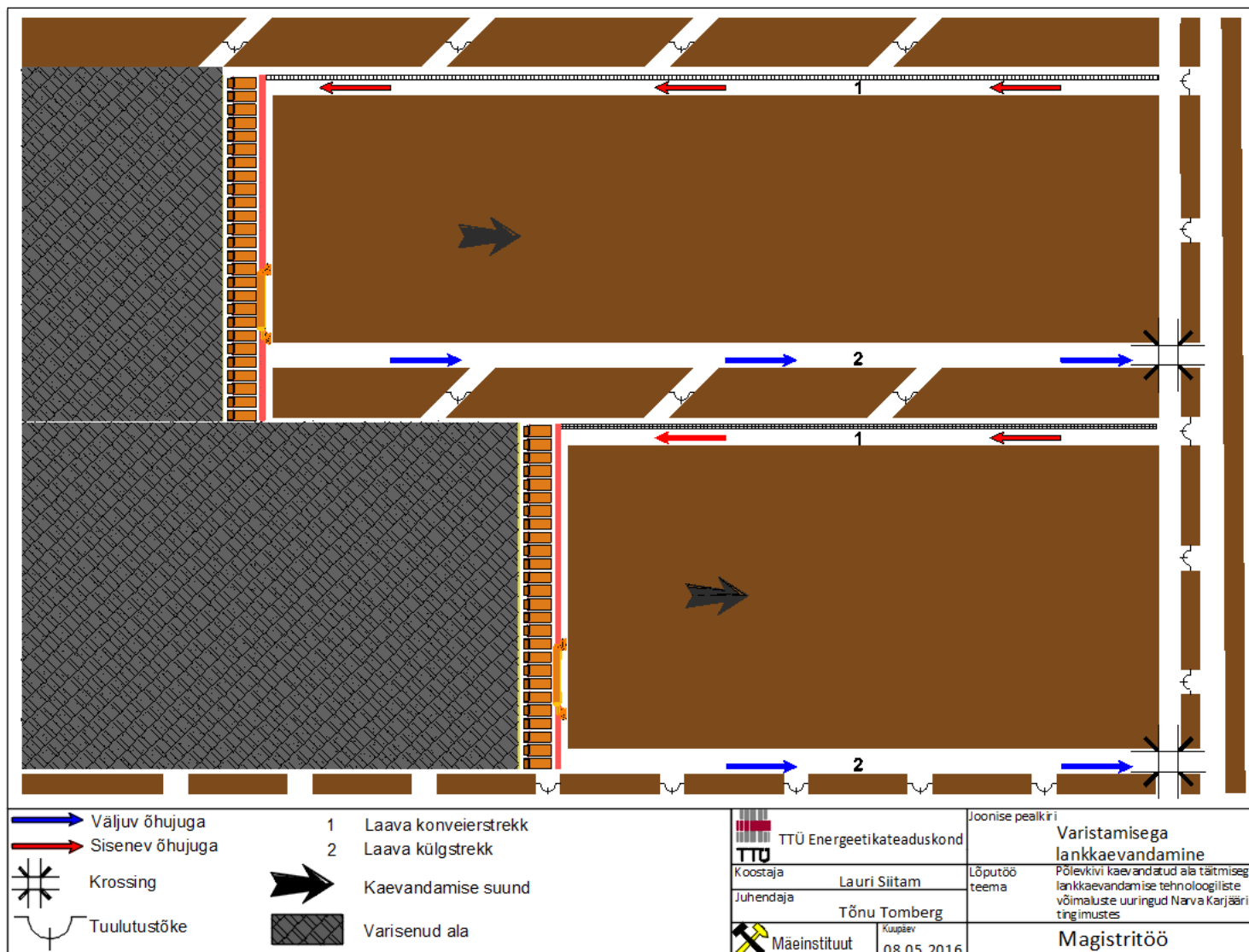
Lisa 3. Katendikivimite paksus Narva karjääri allmaakaevandatavas osas (koostatud autori poolt [52] ja [53] põhjal) [Katendikivimite paksus Narva karjääri allmaakaevandatavas osas.dwg]



Lisa 4. Torukonveieri paigutus Narva karjääris [Torukonveieri paigutus Narva karjääris.dwg]



Lisa 5. Lae varistamisega lankkaevandamise skeem [Lankkaevandamise skeemid.dwg]



Lisa 6. Strekkide paigutus Narva karjääris täitmise ja lankkaevandamisel [Strekkide paigutus Narva karjääris täitmise ja lankkaevandamisel.dwg]

