

Töö nr 17-01-1316

PROJEKT:
VIRUMAA MAAVARADE VÕIMALIKU KAEVANDAMISE
KESKKONNAMÕJUD PÕHJA-JA PINNAVEELE NING MAASTIKULE
KESKKONNAGEOLOOGILISTE MUDELITEGA ANALÜÜSITUNA
KOOS ALTERNATIIVSETE LEEVENDUSMEETMETEGA

**VIRTUAALSE KAEVANDUSE RUUMILINE JA AJALINE
PLANEERIMINE**

14. juuni 2017

Autorid

Pille Sedman

Peeter Talviste

Juhataja



Peeter Talviste

Tallinn, 2017

AUTORIÕIGUS © OÜ IPT PROJEKTJUHTIMINE

Kõik õigused kaitstud. Töö ja selle ülesehitus on kaitstud Eesti Vabariigi autoriõigusseaduse kohaselt. Seda dokumenti või selle osa ei tohi kopeerida ega paljundada mis tahes viisil ilma OÜ IPT Projektijuhtimine antud kirjaliku loata.

SISUKORD

1 ÜLDOSA	4
1.1 Projekti lühikirjeldus	4
1.2 Töö sisu ja tellija	4
1.3 Uuringus osalenud isikud.....	5
1.4 Kasutatud materjalid.....	5
2 METOODIKA	7
2.1 Mõisted	7
2.2 Ülevaade kaevandamise viisidest ja tehnoloogilistest lahendustest.....	7
2.3 Virtuaalsed kaevandused	8
2.4 Virtuaalse kaevanduse geotehniline analüüs.....	12
2.5 Kaevanduse mõju	15
3 ÜLEVAADE KAEVANDAMISE VIISIDEST	16
3.1 Avakaevandamine (pealmaakevandamine).....	16
3.2 Allmaakevandamine	18
4 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK1.....	21
4.1 Asukoht ja suurus	21
4.2 Mäenduslik iseloomustus.....	22
4.3 Geotehniline mudel	24
4.4 Maa-aluse kaevandamise võimaluste geotehniline analüüs.....	25
4.5 Kasutatavad kaevandamisviisid ja nende mõju.....	35
5 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK2.....	38
5.1 Asukoht ja suurus	38
5.2 Mäenduslik iseloomustus.....	39
5.3 Geotehniline mudel	40
5.4 Maa-aluse kaevandamise võimaluste geotehniline analüüs.....	41
5.5 Kasutatavad kaevandamisviisid ja nende mõju.....	46
6 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK3.....	48
6.1 Asukoht ja suurus	48
6.2 Mäenduslik iseloomustus.....	49
6.3 Geotehniline mudel	50
6.4 Maa-aluse kaevandamise võimaluste geotehniline analüüs.....	52
6.5 Kasutatavad kaevandamisviisid ja nende mõju.....	68
7 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK4.....	70
7.1 Asukoht ja suurus	70
7.2 Mäenduslik iseloomustus.....	70
7.3 Maa-aluse kaevandamise võimalused	72

1 ÜLDOSA

1.1 PROJEKTI LÜHIKIRJELDUS

Projekti “Virumaa maavarade võimaliku kaevandamise keskkonnamõjud põhja- ja pinnaveele ning maastikule keskkonnageoloogiliste mudelitega analüüsituna koos alternatiivsete leevendusmeetmetega” üldeesmärk on koostada teaduslikud Virumaa reaalsele geoloogilisele situatsioonile vastavad keskkonnageoloogilised mudelid, mis hindavad ja demonstreerivad võimaliku kaevandamise keskkonnamõju vastavalt võimaliku kaevandamise ruumilisele ulatusele ja testida leevendus- ja korrastamismeetmete efektiivsust mõjude vähendamiseks.

Projekti piirkond hõlmab nelja näidisala, mille paiknemine on näidatud Joonisel 1.



Joonis 1. Näidisalade paiknemine. (Aluskaart: Maa-amet)

Projekti koduleht on avatud interneti aadressil <http://virumudel.ut.ee/projekt>, kus on toodud põhjalik informatsioon projekti kohta.

1.2 TÖÖ SISU JA TELLIJAJ

Käesoleva töö raames valiti igal näidisalal perspektiivne kaevandusala ehk “virtuaalne kaevandus”. Näidisalade 1-3 puhul loeti kasulikuks kihiks fosforiit, mis oli aluseks virtuaalse kaevanduse planeerimisel. Näidisalal nr 4 on kasulikuks kihiks põlevkivi ning selle kaevanduse puhul lähtuti Eesti Energia AS edastatud teabest.

- Iga virtuaalse kaevanduse kohta esitatakse andmed kaevanduse ja abiala mõõtmete, kaevandavate kihtide mäendusliku iseloomustuse, kaevanduse rajamise ja kaevandustegevuse ajalise mahu, esitatud maavarade keskmise aastatoodangu ja tekkivate jäätmete kohta.

- Antakse ülevaade kaevandamise viiside ja tehnoloogiliste lahenduste kohta
- Hinnatakse kaevanduse võimalikke keskkonnamõjusid ning analüüsitakse võimalikke leevendusmeetmeid

Töö tellija on Tartu Ülikool.

1.3 UURINGUS OSALENUD ISIKUD

Töö koostajad on Peeter Talviste (PhD, Eesti volitatud ehitusinsener, Eesti volitatud mäeinsener) ja Pille Sedman.

1.4 KASUTATUD MATERJALID

1. V. Puura (toim.), Rakvere fosforiidirajooni geoloogia ja maavarad. Eesti Teaduste Akadeemia, 1987 Tallinn
2. Арукюла, Х., Рейер, А., 1982. Статистическая оценка и некоторые корреляционные зависимости физических свойств пород месторождений Тоолсе и Маарду, Труды Таллиннского политехнического института № 533, с 45...58
3. IPT Projektjuhtimine OÜ töö nr. 12-11-1066 (2014). Geotechnical survey for the technology of combine underground mining within the extracting permit area of the Narva open-cast oil shale mine.
4. Р.В. Раудсеп. Отчет о результатах детальной разведки фосфоритов шахтного поля на месторождении Кабала Раквереского фосфоритоносного района Эстонской ССР проведенной в 1985-89 г. Эстонское Производственное Объединение по Геологоразведочным Работам. Кейла, 1989.
5. **Practical Rock Engineering** Evert Hoek (2007 ed.), http://www.rocscience.com/education/hoek_corner (veebr. 2017).
6. E. Reinsalu. Eesti mäendus III. TTÜ, 2016
7. E.Reinsalu, A.Toomik, I. Valgma, Kaevandatud maa. TTÜ Mäeinstituut, 2002. Parandatud täiendatud digiversioon 2015 <https://digi.lib.ttu.ee/i/?2215>
8. T. Rahe, M.Nurme. Põlevkivi kaevandamisest ning ühest võimalikust tulevikutehnoloogiast. Mäendus 2014. TTÜ Mäeinstituut.
9. OÜ Inseneribüroo STEIGER, SA Säästva Eesti Instituut, AS Maves, OÜ Baltic Energy Partners (2012) „Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016–2030” koostamiseks vajalike andmete analüüs.
10. Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016-2030 (Keskkonnaministeerium, 2015)

11. http://www.minesubsidence.com/index_files/files/Intro_Longwall_Mining_and_Subs.pdf (08.03.2017).
12. А. Севастьянова. Научно-технический отчет по теме “Разработать составы, технологию изготовления и закладки бесцементных закладочных смесей и определить их влияние на окружающую среду. Государственный научно-исследовательский и проектный институт силикатного бетона “НИПИ силикатобетон”. Таллинн, 1989.
13. A. Rosentau jt. Lääne-Virumaa strateegilised maavarad. Tartu Ülikool Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, 2010.
14. Kunda maardlas Toolse-Lääne lubjakivikarjääris ja Aru-lõuna lubjakivikarjääri laiendusel kaevandamise keskkonnamõju hindamise auanne., A. Põldvere jt. Eesti Geoloogiakeskus, Tartu 2011.
15. E. Puura. Jõelähtmesse rajatav Tallinna Jäätme käitlusettevõtte. Jõelähtmes paikneva karjääri puistangumaterjali murenemise ja isesüttimise keskkonnamõjude hinnang. IPT Projektijuhtimine OÜ töö nr. 01-01-0038. Tallinn, 2001.
16. E. Pirrus. Karst Eestis. TTÜ Geoloogia Instituut, Tallinn, 2007.
17. E. Varep, V. Maavara. Eesti maastikud. Tallinn „Eesti Raamat“, 1984.
18. Puura, E., Kõue, K., Kuidas prognoosida maavarade kasutamise keemilist mõju põhjaveele juba enne kaevandamist? Kogumik Kaevandamine ja vesi, Eesti Mäeselts, 2011.

2 METOODIKA

2.1 MÕISTED

Käesolevas aruandes on kasutatud mõisteid alljärgnevas tähenduses:

kaevandus, kaevandusala – nii maa-pealne kui ka maa-alune kaevandus;

vahetu lagi – katendi osa, mis tootsa kihi eemaldamisel kukub alla või selle vältimiseks vajab toetust;

põhilagi – esimene massiivne tugev kiht, mis võlvi moodustades annab koormuse edasi tervikutele;

tootus kiht – kaevandamisväärne maavara;

aluskiht – vahetult tootuskihi all paiknev lasund;

aheraine – kaevandamisel saadud tootsast kihindist eraldatud jääk või jääde;

katend – maavara katvad purdsetted ja kivimkehand

ühetelgse survetugevus – maksimaalne surve, mida silindriline proovikeha pikitelje suunas suudab purunemata vastu võtta, vaba külglaienemise tingimustes.

RQD (Rock Quality Designation Index) – määratakse puursüdamikust, iseloomustab üle 10 cm pikkuste tükkide osakaalu kogu puursüdamiku pikkusest protsentides;

katkestus, rike – kivimis olev igasugune struktuur, millel tõmbetugevus puudub või on väga väike;

massiivi tugevus (Rock Mass Strength) – iseloomustab kivimassiivi tugevust, kombineerides ühetelgse survetugevuse ja massiivis esinevad katkestused

GSI (Geological Strength Index) – parameeter, mis antakse kivimite geoloogilise kirjelduse põhjal, arvestab kivimi geoloogilist struktuuri ja massiivis esinevate katkestuspindade iseloomu;

2.2 ÜLEVAADE KAEVANDAMISE VIISIDEST JA TEHNOLOOGILISTEST LAHENDUSTEST

Ülevaade on koostatud kirjanduse põhjal, kasutades Mäeinstituudi poolt koostatud digiteavikuid, põlevkivi arengukava materjale, internetis olevaid artikleid. Antud on geotehniline hinnang kaevandamisviisiga kaasnevatele mõjudele.

2.3 VIRTUAALSED KAEVANDUSED

Tellija poolt oli eelnevalt määratletud neli näidisaala. Näidisaalade 1-3 piires oli virtuaalsete kaevanduste kavandamisel aluseks fosforiit, näidisaalal 4 oli aluseks põlevkivi.

Lähteandmed virtuaalsete kaevanduste kavandamiseks saadi Keskkonnaregistri maardlate nimistu registrikaartidelt ning tellija poolt esitatud materjalidest. Näidisaalale 4 paigutatud virtuaalse kaevanduse osas tugineti AS Eesti Energiast saadud materjalidele.

Virtuaalsete fosforiidikaevanduste suuruse kriteeriumideks võeti kokkuleppel tellijaga:

- kaevandamise kestus: 30 aastat
- aastatoodang: 1 milj. tonni kontsentraati
- P₂O₅ sisaldus kontsentraadis: 31%
- kadu allmaakaevandamisel: 30%

Ülaltoodud kriteeriumide põhjal leiti vajalikud kaevanduse pindalad erineva tootlikkuse juures.

Saadud pindala järgi hakati kaevandusalasid sobitama näidisaaladele võimalikult suure tootlikkusega piirkonda. Seejuures arvestati looduskaitselisi piiranguid ja tellija poolt varem koostatud maastikuüksuste kaarti. Rahuldava asukoha leidmisel täpsustati uuesti kaevanduse pindala vastavalt konkreetsele tootlikkusele kaevanduse piirkonnas.

Kaevanduse abiala suuruseks hinnati umbes 1.5 km² ning abiala paigutati kaevanduse kõrvale väiksema tootlikkusega piirkonda või alale, kus maavara tõenäoliselt puudub.

Kaevandamise käigus tekkiva aheraine maht arvutati lähtuvalt kavandatud aastatoodangust ja P₂O₅ sisaldusest maagis ja kontsentraadis.

2.3.1 Geotehniline mudel

Geotehniliste arvutuste tegemiseks koostati kaevandusalade (VK1, VK2, VK3) kohta geotehnilised mudelid. Mudel koosneb kihtidest, mida iseloomustavad ruumparameetrid (paksus, levik) ning kihtide omadusi väljendavad suurused. Viimaste valiku määrab geotehnilisel analüüsil kasutatav arvutusskeem.

Mudeli kihid moodustati lähtudes läbilõike geoloogilisest ehitusest. Geoloogilised kirjeldused saadi puuraukude lõigete näol tellijalt (Tartu Ülikool). Lihtsuse huvides on kihi tähistamisel kasutatud üldlevinud nimetusi:

- Kiht 1 Kvaternaarisetted
- Kiht 2 Karbonaatkivimid
- Kiht 3 Põlevkivi
- Kiht 4 Lubiliivakivi
- Kiht 5 Savi ja glaukoniitliivakivi
- Kiht 6 Argilliit
- Kiht 7 Fosforiit
- Kiht 8 Liivakivi

Geotehnilised kihid ning kihtidele vastavad stratigraafilised üksused on näidatud *Tabelis 1*.

Tabel 1. Geotehnilised kihid stratigraafiliste üksustega

Geotehniline kiht		Stratigraafiline üksus (tähisted on võetud tellija poolt esitatud andmetest)
1	Kvaternaarisetted	Q
2	Karbonaatkivimid	O _{2rk} -O _{1vl}
3	Põlevkivi	O _{2kk}
4	Lubiliivakivi	O _{1TLP} - O _{1LTM}
5	Savi ja glaukoniitliivakivi	O _{1pkV} , O _{1lt} (O _{1LTJ})
6	Argilliit	O _{1pkT}
7	Fosforiit	O _{1KLS} , O _{1KLM}
8	Liivakivi/aleuroliit	C _{1TS}

Geotehnilised kihid seoti mäenduslike kategooriatega: tootus kiht, aluskiht ja katend, mis omakorda jaotati kvaternaarisetetest koosnevaks pinnaskatendiks ning aluspõhjakiivimitest koosnevaks kivimkatendiks. Viimane jagati vahetuks laeks ja põhilaeks, mille vaheline piir ei ole üheselt määratud.

2.3.1.1 Kihtide parameetrid

Mahukaal

Lasuvate kihtide mahukaal määrab vertikaalkoormuse lasundi igas punktis. Mahukaalud geotehnilistele kihtidele saadi varasematest uurimistöödest [2], [3], [4] ja erialakirjandusest.

Tugevusparameetrid

Peamiselt väljendatakse kivimi tugevust ühetelgse survetugevuse (σ_{UC}) ja pinnase tugevust nihketugevuse (τ) kaudu. Viimane jaotatakse kaheks komponendiks, sisehõordenurgaks (φ) ja niduseseks (c), seost nende vahel näitab valem $\tau = \sigma' \tan \varphi + c$, kus σ' on vertikaalne efektiivpinge.

Nii pinnase kui ka kivimkeha tugevust on proovikehadest võimalik katseliselt määrata.

Pinnase puhul võib eeldada, et proovikeha teimimisel saadud katsetulemused iseloomustavad ka pinnasemassiivi tugevust, kuna nii proovikeha kui ka pinnasemassiiv koosnevad sarnasest teralisest materjalist. Kivimmassiivist võetud monoliitne proovikeha aga kivimmassiivi tugevust tervikuna ei iseloomusta, kuna massiiv ei ole monoliitne tervik, vaid plokkide eraldavad mitmesugused katkestuspinnad. Katkestuse võivad moodustada lõhed, kihipinnad, nihketsoonid jm. Seega tuleb kivimmassiivi tugevuse hindamisel arvestada mitte ainult ploki enda materjali tugevusega (ühetelgse survetugevus), vaid ka katkestuspindade olemasolu ja iseloomuga. Seega on massiivi tugevus alati väiksem kui proovikeha tugevus, vähemalt Eesti tingimustes, kus aluspõhjakiivimid on rohkem või vähem lõhelised. Mingil määral võib nähtusele viidata ka Kabala leiukoha detailuuringu aruandes toodud väga suured erinevused ühetelgse survetugevuse

määrangutes. Fosforiidilasundi ülaosas muutuvad survetugevuse väärtused vahemikus 0.6...65 MPa ehk erinevus on sajakordne. Tõenäoliselt on väiksema tugevusega proovikehas esinenud mikropragu või muu katkestus ning katsel määratud suurus iseloomustab tugevust mööda katkestuspinda.

Väljavõtte nimetatud aruandest on toodud alljärgnevalt *Joonisel 2*.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНДЕКС	ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ	МОЩНОСТЬ ГОРНОСТА В М	бсж МПа	бр МПа	РАСПОЛОЖЕНИЕ ГОРНЫХ ВЫРВЕТОВ	НАИМЕНОВАНИЕ ПОРОДЫ
O ₂ ls		11.0	32 - 121	1.8 - 8.1	ЗАКЛАДочный ШТРЕК	ИЗВЕСТНЯК ПЛОТНЫЙ
O ₂ as		2.7	10 - 120	1.9 - 7.3		ИЗВЕСТНЯК С ВОЛНАМИ
O ₁ кп		7.7	20 - 101	1 - 8.2		ИЗВЕСТНЯК ПЛОТНЫЙ
O ₁ vl		2.3	29 - 121	1.0 - 8.3		ИЗВЕСТНЯК ДОЛОМИТИЗОВАННЫЙ
O ₁ lt		1.0	0.8 - 15	0.15 - 1.3		ПЕСЧАНИК ГЛУХ
O ₁ рк		7.6	0.6 - 65 НЕ УДАЛОСЬ ОПРЕДЕЛИТЬ	0.04 - 8.0 НЕ УДАЛОСЬ ОПРЕДЕЛИТЬ	ВЫЕМОЧНО-ЗАКЛАДочный ГОРНО-ШТРЕК	ДЕТРИТИТ ПЕСЧАНИК КВАРЦЕВЫЙ С ДЕТРИТОМ ДЕТРИТИСТЫЙ ПЕСЧАНИК
E ₇ ts		14.0	44 - 100	0.16 - 3.8	РАВНОВЕСЬ ТРАНСЛОТочный ГОРНО-ШТРЕК	ПЕСЧАНИК, КВАРЦЕВЫЙ, МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ, АЛЕВРОЛИТ С ГАУСНЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ

Рис. 3.4.1. РАЗРЕЗ ФОСФАСТА, ЕГО ПОДШИВКИ И КРОВЛИ С РАСПОЛОЖЕНИЕМ ШАХТНЫХ ВЫРВЕТОВ

Joonis 2. Väljavõtte Kabala leiukoha detailuuringu aruandest [4]

Lõhelisuse arvestamiseks kivimassiivi tugevuse määramisel on välja töötatud mitmeid meetodeid. RMR (Rock Mass Rating) ehk geomehhaaniline klassifikatsioon [Bieniawski, Z.T. 1976. *Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp.*, Cape Town: Balkema] seob ühetelgse survetugevuse, RQD (Rock Quality Designation Index), katkestuspindade omadused (vahekaugus, orienteeritus, iseloom) ja põhjaveetingimused. RMR väärtusele tuginedes on võimalik leida massiivile ka sisehõrdenurk ja nidusus.

Käesolevas töös on kivimassiivi tugevuse hindamisel kasutatud Hoek-Brown'i tugevusmudelit. Detailne mudeli käsitus on toodud Evert Hoek'i poolt koostatud materjalise *Practical Rock Engineering* [8], mis on kättesaadav interneti aadressil: http://www.rocscience.com/education/hoek_corner. Hoek-Brown'i tugevusmudel on kasutatav, kui kivimassiivis on rohkesti lähestikku paiknevaid sarnase pinnaiseloomuga katkestuspindu. Sel juhul võib massiivi lugeda katkestuspindade osas isotroopseks. Kui kavandatav rajatis on võrreldes ühe ploki mõõtmetega suur, siis kivimassiivi saab käsitleda Hoek-Brown materjalina. Hoek-Brown'i tugevust on võimalik siduda Mohr-Coulomb tugevusparameetritega (sisehõordenurk ja nidusus) arvestades lasundis olevaid peapingeid (σ_1 ja σ_3).

Hoek-Brown'i tugevusmudeli parameetriteks on ühetelgne survetugevus (σ_{UC}), elastsusmoodul (E), kivimassiivi geoloogilist struktuuri iseloomustav GSI (Geological Strength Index), kivimtüübi konstant (m_i) ning kahe viimase kaudu arvutatavad m_b , s ja a. Ühetelgse survetugevuse andmed on saadud uurimistöödest [2], [3], [4] ning toodud alljärgnevates tabelites Tabel 3 ja Tabel 4.

Tabel 2. Ühetelgne survetugevus [1] (Toolse)

Materjali kirjeldus [1]		Geotehniline kiht/nr		Proovide arv	Survetugevus, MPa		
					min	max	keskm
Puur-südamik	O ₁ lt	Savi ja glaukoniitliivakivi	5	10	1.02	6.35	3.03
	O ₁ pkV			18	0.1	10.7	3.58
	O ₁ pkT	Argilliit	6	4	17.7	27.8	23.2
Toolse jõe paljand	kvartsliaivakivi	Fosforiit	7	12	0.19	4.43	2.12
	detriitliivakivi			11	0.17	2.84	1.32
	konglomeraat			9	2.5	9.22	5.4

Tabel 3. Ühetelgne survetugevus [4] (Kabala)

Geotehniline kiht		Survetugevus, MPa	Sisehõordenurk °	Allikas	
1	Kvaternaarisetted				
2	Karbonaatkivimid	56		[4]	
3	Põlevkivi	20		[5]	
4	Lubiliivakivi	43		[4]	
5	Savi ja glaukoniitliivakivi	3		[1]	
6	Argilliit	23		[1]	
7	Fosforiit	ülemine	18	[1],[4]	
		keskmine	pude materjal		35...40
		alumine	5		25...32
8	Liivakivi/aleuroliit	30		[4]	

Massiivi geoloogilist struktuuri iseloomustab suurus GSI, mida hinnatakse vastava nomogrammi järgi [5]. IPT Projektijuhtimine OÜ on uurinud lõhede levikut ja iseloomu Narva karjääris põlevkivis ja selle lasumis töö [3] raames, liivakivi lõhelisuse iseloomu on hinnatud Tallinna kesklinnas liivakivisse rajatud ehitussüvendite järgi. Kuna varasemates fosforiidiuuringutes GSI määramiseks vajalikud andmed puuduvad, siis GSI väärtust on hinnatud käesoleva aruande autorite kogemusele tuginedes (IPT Projektijuhtimine OÜ töö nr. 16-11-1308, “Lubja tn 4 ehitusobjekt Tallinnas, kraanade1, 2 ja 3 stabiilsuse kontrollarvutused“. Tallinn, 2017).

Kihtide elastsusmoodul on leitud valemiga [5] :

$$E = MR \cdot \sigma_{ci}$$

MR – modulus ratio; σ_{ci} – ühetelgne survetugevus

Kivimtüübi konstant (m_f) ja parameetrite m_b , s ja a arvutusmetoodika on toodud publikatsioonis [5].

Käeolevas aruandes geotehnilistele kihtidele omistatud tugevust ja mahumuutusi iseloomustavad parameetrid virtuaalsete kaevanduste simulatsioonide tegemiseks on hinnangulised ja tuletatud analoogia põhjal varasematest andmetest. Need ei ole mingil juhul kasutatavad tingimusteta, eriti konkreetse ülesande lahendamisel konkreetsetes asukohtades, seetõttu ei ole neid ka aruandes eraldi välja toodud. Senised fosforiidiuuringud ei ole keskendunud geotehnilistele aspektidele. Kabala detailuuringu aruandes [4] on märgitud, et puurimistel, mille käigus sooviti saada proovikehasid kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste määramiseks, oli puursüdamiku väljatulek fosforiidikihi osas keskmiselt ainult 18%. Selle tõttu tuleb ka saadud katsetulemustesse suhtuda ettevaatusega.

Usaldusväärsete geotehniliste parameetrite saamiseks tuleks fosforiidi uurimisel rakendada puurimistehnoloogiat, mis võimaldab liivakivist-fosforiidist puursüdamikku saada ning puursüdamiku kirjeldamisel dokumenteerida kõik lõhed ja muud katkestused vastavalt üldtunnustatud metoodikale. Need parameetrid tuleb enne tööde (olgu selleks kas kaevanduse projekteerimine või katsekaevandus) kavandamist ja projekteerimist uuringutega määrata.

2.4 VIRTUAALSE KAEVANDUSE GEOTEHNILINE ANALÜÜS

2.4.1 Geotehnilised arvutused lõplike elementide meetodil

Geotehnilised arvutused virtuaalsete kaevanduste, eelkõige kaevandamiseks püsivalt või ajutiselt maa alla rajatud avauste mõju hindamiseks ümbritsevale kivimmassiivile, tehti lõplike elementide meetodil (FEM). Üldjoontes viiakse FEM läbi järgnevalt:

1. Määratakse ülesande mõõtmed, lahendamist vajavate muutujate arvutamiseks vajalikud võrrandid ja nende võrrandite kehtivus- ja määramispiirkonnad;
2. Piirkond jaotatakse väiksemateks osadeks, nn. lõplikeks elementideks, millest moodustub lõplike elementide võre. Iga võre element on seotud teise elemendiga võre sõlmpunkti kaudu. Piirkonna elementideks jaotamise eelised on: keeruka geomeetria täpne kirjeldus, erinevate materjaliomaduste ja lokaalsete efektide arvestamine.
3. Iga võre sõlmpunkt seostatakse vabadusastmete arvuga (mis määrab elemendi edasise käitumise), materjali omadustega (geotehnilistes simulatsioonides kivimi elastsusmoodul,

- surve-, tõmbe- ja nihketugevus) ning asjakohaste diferentsiaal- või algebraliste võrranditega, mis neid omadusi keskkonna ja selle muutustega seovad.
4. Kõikide elementide panused summeeritakse, saades kogu probleemi kirjeldava globaalse võrrandite süsteemi.
 5. Saadud võrrandite süsteem lahendatakse numbriliselt.
 6. Vajalikud füüsikalised suurused arvutatakse iga elemendi jaoks.

FEM sobib nii lineaarsete kui mittelineaarsete efektide uurimiseks. Kui teatud piirkonnas vajatakse suuremat täpsust, siis seal saab konstrueerida tihedama elementide võrgustiku. FEM aitab visualiseerida materjalide pingeid, nende jaotust ja konstruktsiooni vastupidavust. FEM tarkvara võimaldab simulatsiooni juhtida - näiteks pingete muutusele vastavate deformatsioonide simulatsioon, kus muutujaks on erinevad koormused või, nagu käesoleval virtuaalsete kaevanduste juhul, kus parameetriteks on maa alla kaevandamise käigus kujunevad avaused. FEM võimaldab arvestada protsesside ajalist kulgemist või parameetrite lisandumist erinevatel staadiumitel (näiteks kaeveõõnsuse mõõtmete suurenemine, kaeveõõnsuste lisandumine kaevandamise edenemisel või lagede varing ja kaeveõõnsuste täitumine varisenud pudedaks muutunud kivimiga) ja saada tulemus soovitud täpsuse piires. Kokkuvõtteks - FEM abil saab uurida füüsikalisi olukordi enne vastava katse või katsetöö - katsekaevandamise - tegemist. Lisaks võimaldab FEM seletada katsel või katsetöö käigus registreeritud või täheldatud.

FEM analüüsil kasutati programmi „Phase²“ (Rocscience Inc., Kanada), mis on spetsiaalne geotehniliste ülesannete lahendamiseks loodud FEM rakendus. „Phase²“ võimaldab muu hulgas analüüsida ümber maa-aluste kaeveõõnte toimuvaid pingemuutusi ja vastavaid deformatsioone 2D lõikel. Analüüs viiakse läbi mitmes staadiumis, erinevad staadiumid saavad tähistada erineva suurusega kaeveõõsi, kaevete lisandumist, aga ka täitmist või täitumist aja jooksul. Pinnaste ja kivimite tugevusomadused on kirjeldatavad erinevate (elastsete ja osaliselt elastsete) tugevusmudelitega (Hoek-Brown, Mohr-Coulomb, Cam-Clay, Drucker-Prager jne). Deformatsiooniomadused on kirjeldatavad kas elastse-isotroopsena või anisotroopsena. Loodusliku pingeaotuse leidmisel on võimalik arvestada nii erinevat horisontaal- ja verikaalpingete jaotust kui ka suletud, nn. tektoonilisi jääkpingeid aga ka põhjavee taset ja vee voolamist läbi veepidemete jm. pingeaotuse leidmiseks vajalikke tegureid.

Kaevandamise mõju ümbritsevale kivimmassiivile hinnati näidisalade kaupa, näidisalad erinesid geoloogilise ehituse poolest (vt. peatükid 4...7).

2.4.2 Mudeli analüüsi põhimõtted

Kontrolliti erinevate kaevandamisviiside sobivust näidisaladel 1...3. Koostati kivimite lasumistingimuste 2D mudelid iga näidisala kohta (peatükid 4...6). Detailsemalt iseloomustati virtuaalse kaevanduse põranda, lae ja tootsa kihi geomeetriat. Näidisala 3A asukohas on võimalik kaevandada nii põlevkivi kui fosforiiti ja seda on koostatud mudelis arvestatud.

Kivimite geotehniliste omaduste hindamise põhimõtted on kirjeldatud peatükis 2.3.1.1. Põlevkivibasseini kivimite omadused on detailselt kirjeldatud aruandes [3]. Fosforiidi ja seda ümbritsevate kivimite omadused on hinnatud kaudselt, mitte spetsiaalsetele uuringutele tuginedes. Hilisemate arusaamatuste vältimiseks ei ole neid omadusi aruandes tabelitena esitatud. Küll aga on peatükis 2.3.1.1 toodud erinevatest allikatest leitud katsetulemused – survetugevuse ja nihketugevusparameetrite määrangud, mida mudelis kasutatud tugevuse hindamisel kasutati.

Kivimassiivi deformatsioone ja purunemist vaadeldi mudelis 6 staadiumina:

- algne olukord ilma kaeveõõnteta;
- 8 m kõrgune (fosforiidilasundi paksus) ja 10 m laiune kaeveõõs tootvas kihis;
- kaks 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt sama suure tervikuga nende vahel;
- kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt sama suurte tervikutega nende vahel;
- ühe terviku eemaldamine (moodustub 30 m laiune kaeveõõs);
- mõlema terviku eemaldamine (moodustub 50 m laiune kaeveõõs).

Kuuest staadiumist koosnevad arvutused tehti virtuaalsetele kaevandustele 1...3. Kuna virtuaalsed kaevandused asuvad erinevas sügavuses, saab tulemuste põhjal võrrelda ja analüüsida erinevusi, mis tulenevad kaevandamissügavuse muutumisest juhul, kui kaeveõõnsuse mõõtmed ei muutu.

Tootsa kihi paksuseks alal 1 on kuni 5 m. Selleks, et analüüsida tootsa kihi paksuse ja sellega seonduva kaeveõõnte kõrguse mõju deformatsioonidele ja purunemisele, koostati näidisalal 1 mudel ka 5 m paksuse tootsa kihiga.

Sügaval asuva kaevanduse korral on mäerõhk suurem, suuremad on ka prognoositud deformatsioonid ja purunemise ulatus. Et analüüsida erineva suurusega kaeveõõnte rajamist koostati alale 3A täiendavalt mudelid kus kaeveõõned on 8 m kõrged ja 5 m laiad ning 4 m kõrged (kaevandamine poole tootva kihi ulatuses) ja 5 m laiad, samuti varieeriti tervikute mõõtmeid.

Detailselt on mudeleid kirjeldatud aruande peatükkides 4...6.

FEM mudeli väljunditeks on:

- pingeväljad (normaalpinged vertikaal- ja horisontaalsuunas, pea- ja deviaatorpinge ning nihkepinged);
- liikumiste väljad (vertikaal- ja horisontaalsuunas ning vektoriaalse summana);
- deformatsioonide väljad (suhtelise mahumuutusena ja suhtelise nihkedeformatsioonina);
- purunemise väljad (purunenud võreelemendid, purunemise aste %-des, purunemise viis – kas tõmbe- või nihkepingete tagajärjel, purunemisfaktor ehk nihkepinge ja nihketugevuse suhe).

Mudeli väljundi abil saab otsustada, mis hetkel (staadiumis) muutuvad deformatsioonid lineaarsest mittelineaarseks ehk purunemise järgseks, kui suured on lineaarsed deformatsioonid enne purunemist, kus moodustuvad kaeveõõnsuse ümber nihkepingete tõttu purunenud tsoonid ning kuidas areneb vastavalt kaeveõõnsuse laiuse suurenemisega lae purunemine tõmbepingete tagajärjel. Saab hinnata lae toestamiseks jäetud tervikute püsivust ja purunenud kivimassi ulatust (kõrgust) kaeveõõnsuse kohal peale lae varisemist.

Detailselt on kirjeldatud mudeli väljundeid nende põhjal tehtud järeldusi kaevandamisvõimaluste kohta erinevates tingimustes peatükkides 4...6. Tulemused on illustreeritud lõigetel ja esitatud näidisalade kaupa vastavas peatükis.

Analüüsi eesmärgiks on näidata, kuidas mõjutavad kaeveõõnte mõõtmed ja paiknemine kivimassiivis toimuvaid protsesse. Mudelitega illustreeritakse, mis hetkel muutuvad deformatsioonid kaeveõõnte ümber lineaarsest mittelineaarseks ehk purunemise järgseks. Seejuures tuleb arvestada, et lineaarse mudeliga ei saa täpselt iseloomustada mittelineaarset protsessi ehk purunemisjärgseid deformatsioone. Samuti demonstreeritakse seinte ja lae

purunemist nihke- ja tõmbepingete tagajärjel ning purustatud kivimitsooni kõrgust lae kohal peale lae varingut. Tuleb rõhutada, et analüüsi ei tehtud kaevanduse projekteerimiseks ega kaeveõõnte mõõtmete ja kuju optimeerimiseks. Seetõttu ei ole arvestatud tervikute mõõtmete kahanemist seinte purunemise tõttu jm.

2.5 KAEVANDUSE MÕJU

Geotehnilise analüüsi tulemuste järgi hinnati erinevate kaevandamisviiside kasutusvõimalusi. Keskkonnamõju kirjeldati eeskätt geoloogilisest-geotehnilisest aspektist. Mõjusid ja leevendusmeetmeid on käsitletud iga virtuaalsete kaevanduse juures eraldi.

3 ÜLEVAADE KAEVANDAMISE VIISIDEST

Eestis kaevandatud ja kaevandatavad maavarad paiknevad kihtmaardlates.

Kasutusel on kaks peamist kaevandamise moodust – ava- või allmaakaevandamine. Kaevandamismooduse sobivuse määravad mäenduslikud tingimused – eelkõige maardla tüüp, kuid samuti tuleb arvestada tehnilisi, majanduslikke, keskkonnakaitselisi, ja sotsiaalseid mõjureid [6].

3.1 AVAKAEVANDAMINE (PEALMAAKAEVANDAMINE)

Avakaevandamisel toimub kaevandamine maa- või veepinnalt. Maapinnalt kaevandamisel eemaldatakse katend ja paigutatakse puistangusse või ladustatakse hilisemaks taaskasutamiseks. Kaevandatakse nii maismaal kui ka veekogu põhjas paiknevat maavara. Avakaevandamisel maismaale tekkivat kaeveõõnt nimetatakse karjääriks.

Avakaevandamisel:

- on maavara kaod väikesed
- võimalik on selektiivne väljamine, mille käigus eraldatakse kvaliteetsem maavara ning seoses sellega väheneb rikastusjäägi osakaal
- väiksemad kapitaalmahutused kaevandamise alustamiseks
- võimaldab suurt tootlikkust võimsate mäemasinate kasutamisel
- kaevandamisprotsess on lihtsalt kontrollitav ja võimalikud riskid kergesti prognoositavad

Eestis enam kasutatavad avakaevandamise viisid on aukkaevandamine, vaalkaevandamine ja väljakkaevandamine [6].

3.1.1 Aukkaevandamine

Aukkaevandamise puhul paigutatakse katend välispuistangusse. Kaevandamisejärgselt jääb maapinda tühemik, kuna katendimaterjalist ja kaevandamisjääkidest enamasti ei jätku kaevandatud ala täitmiseks. Aukkaevandamine on Eestis kasutusel peamiselt lubjakivi ning liivakruusamaardlates, kus katendi paksus on enamasti väike ning aherainet tekib vähe.

Aukkaevandamise tulemus on järsunõlvalise süvendina reljeefis selgesti märgatav (*Joonis 3*).

3.1.2 Vaalkaevandamine

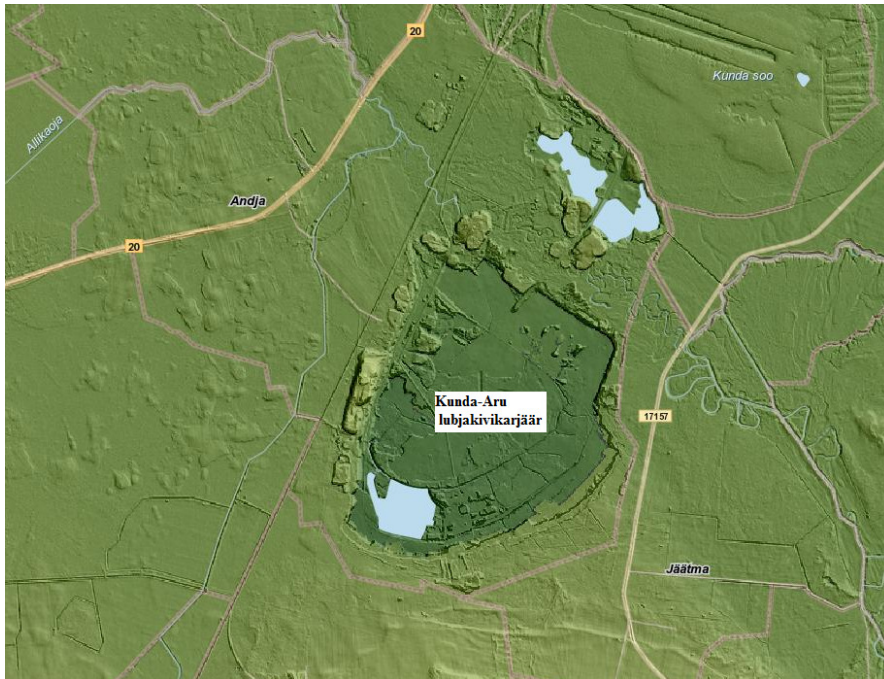
Vaalkaevandamise puhul paigutatakse katend sisepuistangusse vaaludesse, alale, kust maavara on eelnevalt väljatud. Vaalkaevandamist kasutatakse käesoleval ajal põlevkivi kaevandamisel ja seda kasutati ka fosforiidi kaevandamisel Maardus.

Vaalkaevandamise tulemusel moodustuvad puistanguplatood, mida liigestavad sügavad tranšeed. Kui katendi paksus on oluliselt suurem kui väljatava maavara paksus, siis puistangute kohal võib maapind tõusta endisest kõrgemale.

3.1.3 Väljakkaevandamine

Väljakkaevandamine on kaevandamisviis, mille puhul maavara väljatakse kihtidena suurel alal ehk väljakul [7]. Maavara kaevandamise tulemusel tekib kaevanduse asukohta algse reljeefiga võrreldes alang. Seda kaevandamisviisi kasutatakse peamiselt turba kaevandamisel.

Vaal- ja väljakkaevandamise tulemus maastikus on näidatud *Joonisel 4*.



Joonis 3. Kunda-Aru lujakivikarjäär (aukkaevandamine)
Väljavõte Maa-ameti Geoportaali reljeefikaardilt.



Joonis 4. Narva põlevkivikarjäär (põlevkivi vaalkaevandamine ja turba väljakkaevandamine)
Väljavõte Maa-ameti Geoportaali reljeefikaardilt.

3.2 ALLMAAKAEVANDAMINE

Enamlevinud on kaks peamist maa-aluse kaevandamise meetodit: lae varistamisega ja lae toestamisega.

3.2.1 Kaevandamine lae varistamisega

Maavara eemaldamise järgselt toimub lae varisemine, lae hoidmiseks tööprotsessi ajal kasutatakse ajutist toetust. Tüüpiliseks näiteks on pika eega kombainkaevandamine, mida ka Eesti põlevkivikaevandustes on kasutatud.

Kaevandamisviis võimaldab püsivat produktsiooni ja kõrget mehhaniseerimise astet, samuti on lausväljamise korral maavara kaod väiksemad. Paratamatult kaasneb maapinna vajumine ja kaevanduse kohal oleva kivimassiivi purunemine [11], kuid peamised maapinna muutused toimuvad kaevandamise käigus, hilisemalt võib esineda samuti maapinna deformatsioone, kuid need on väikesed. Kaevandamisviisi saab kasutada asukohtades, kus maapinna vajumine ei põhjusta olulist kahju või maapinna vajumise tagajärgi on võimalik elimineerida või leevendada.

Kuna lae varistamisel purunevad lasumis olevas kivimid, siis moodustuvad maapõues väga hästi vett juhtivad tsoonid. Kui lasundis esineb rohkem kui üks veekiht, siis varisemise tulemusel veepidemed hävivad. Isegi kui kivimid alla ei varise, tekitavad massiivis arenevad tõmbepinged arvukalt lõhesid, mistõttu suureneb kivimassiivi veejuhtivus. Infiltratsiooni suurenemise tõttu kasvab vee juurdevool kaevandusse ning mõju piirkonna pinnaveekogudele ja põhjavee režiimile võib olla märkimisväärne. Kaevanduse alale kujunevad väga suure poorsusega ulatuslikud tsoonid, kus kokkupuutepind põhjaveega on oluliselt kasvanud. Selle tulemusel võib intensiivistuda mitmete komponentide väljaleostumine ning suurenda põhjavee mineraalsus.

Kaevandades lae varistamisega võivad mõjud põhjaveele olla märkimisväärsed, seda ka peale kaevandamise lõpetamist.

3.2.2 Kaevandamine lae püsiva toestamisega

Lae toestamiseks jäetakse maavarast tervikud, kasutades lasundi looduslikku tugevust (kamberkaevandamine) või lae toestamiseks täidetakse kaeveõõned peale maavara eemaldamist sobiva täitematerjaliga (täitmiseega kaevandamisviisid).

3.2.2.1 Kamberkaevandamine (kaeveõõs-tervik kaevandamine)

Eestis on see kaevandamisviis kasutusel kõigis töötavates põlevkivikaevandustes [9].

Lae koormus jaguneb kaevandamise käigus jäetavatele tervikutele, mis võivad olla regulaarse või ebaregulaarse kuju ja paigutusega. Tervikut moodustava kivimi tugevus peab olema küllaldane lae koormuse ja lasundis tekkivate pinget vastuvõtuks.

Kamberkaevandamisega kaasnevad paratamatult kaod, sest osa maavara jääb tervikutesse. Põlevkivi allmaakaevandamisel võib olenevalt mäetehnilistest tingimustest kao maht ulatuda kuni 35%-ni kaevandatud põlevkivivarust [10].

Teatud sügavuses kaevandades, kui põhilagi moodustab tervikutele toetuva võlvi, tekivad maapinna deformatsioonid ainult tervikute elastse deformatsiooni arvelt ning eeldatavad vajumised on väikesed. Seejuures peab terviku tugevus olema küllaldane vastu võtmaks kogu põhilae koormuse.

Praktiline kogemus põlevkivi kaevandamisel näitab siiski, et teatud tingimustel võivad tervikud puruneda (tervikute või laekivimite tugevuse ülehindamine, lõhketööde mõju, lokaalselt nõrgemad kivimi tsoonid või muud faktorid) ning juba ühe terviku purunemisel jaotub lae koormus teistele tervikutele. Kui tegemist on lähelisema või nõrgema tsooniga, siis ei pruugi tervikud suurenenud koormuse tingimustes enam püsida ning tervikute purunemine võib toimuda suuremal alal. Selles asukohas toimub kaevanduse kohal maapinna vajumine, mille suuruse määravad peamiselt purunemistsooni ulatus, katvate kivimite paksus ja omadused, kaevandatava kihi paksus.

Nähtuse ärahoidmiseks tuleks tervikuid ja lage moodustavate kivimite tugevusomadusi väga detailselt uurida ning projekteerida tervikud vastavalt antud asukoha tugevusväljale. Siiski ei taga ka see tervikute igavest püsimist, sest maapõue jäävad tühemikud võivad täituda ajapikku veega ning kivimis leiduvate saviosakeste tõttu võib toimuda tervikutesse jäänud kivimi leandumine ja pehmenemine. Seetõttu võib tervikute purunemine aset leida ka palju aastaid peale kaevandamise lõpetamist. Kambritega kaevandatud põlevkivialad, kus kaevandamissügavus on suurem kui 35...40 m, on loetud kvaasistabiilseteks ehk aladeks, kus võib toimuda kambrite hilisemaid varinguid [7].

Tervikute purunemisel ja laekivimite varisemisel tekivad selles asukohas hästi vett juhtivad tsoonid, samuti kui kaevandamisel lae varistamisega. Siiski on nähtus on lokaalne ning piirdub ainult varingu asukohaga. Kamberkaevandamise puhul on vajumised ja mõju põhjaveele eeldatavalt väiksem kui kaevandamisel lae varistamisega.

Põlevkivikaevandamise käigus on kogutud oluline andmestik tervikute reaalse käitumise kohta erinevas sügavuses, kuid fosforiidi kaevandamise kohta suuremas sügavuses sellised andmed puuduvad

3.2.2.2 Täitmisega kaevandamine

Täitmisega kaevandamisviisi puhul kaeveõõned täidetakse kas osaliselt või lausaliselt sobiva materjaliga. Olenevalt olukorrast peavad täitematerjali omadused tagama kaeveõõnte püsivuse kaevandamise ajal ja vähendada või hoidma ära kaevanduse kohal oleva maapinna vajumist. Selleks peab täitematerjali tugevus olema piisav lasuva massiivi koormuse vastuvõtuks ning kokkusurutavus väike. Täitmiseks saab ära kasutada kaevandamise ja rikastamise jääke, samuti elektrihaamades tekkivat põlevkivituhka.

Täitematerjali kasutamine kaeveõõnte täitmisel mõjutab tervikuna kihi veejuhtivust ning sellega seoses piirkonna hüdrogeoloogilisi tingimusi ka kaevandamisjärgselt. Samuti võib täitematerjalist leostuda põhjavette aineid, mis võivad mõjutada põhjavee koostist. Oluline on, et kasutatav täitematerjal oleks keskkonnoahutu.

Eestis on kaevanduste võimalikku täitematerjali uuritud ja katsetatud fosforiidiuuringute raames möödunud sajandi 80-ndatel aastatel [12]. Uuringuid ja katsetusi on tehtud hiljemgi, kuid senised uurimistulemused on näidanud, et täitmistehnoloogiate kasutuselevõtt ei ole praegust

majanduslikku seisu arvestades veel tasuv, samuti esineb tehnoloogilisi raskusi, mis tuleb lahendada [9].

Tingimusel, et kasutatav täitematerjal on keskkonnaohutu, on täitmisega kaevandamise keskkonnamõju võrreldes teiste kaevandamisviisidega kõige väiksem.

4 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK1

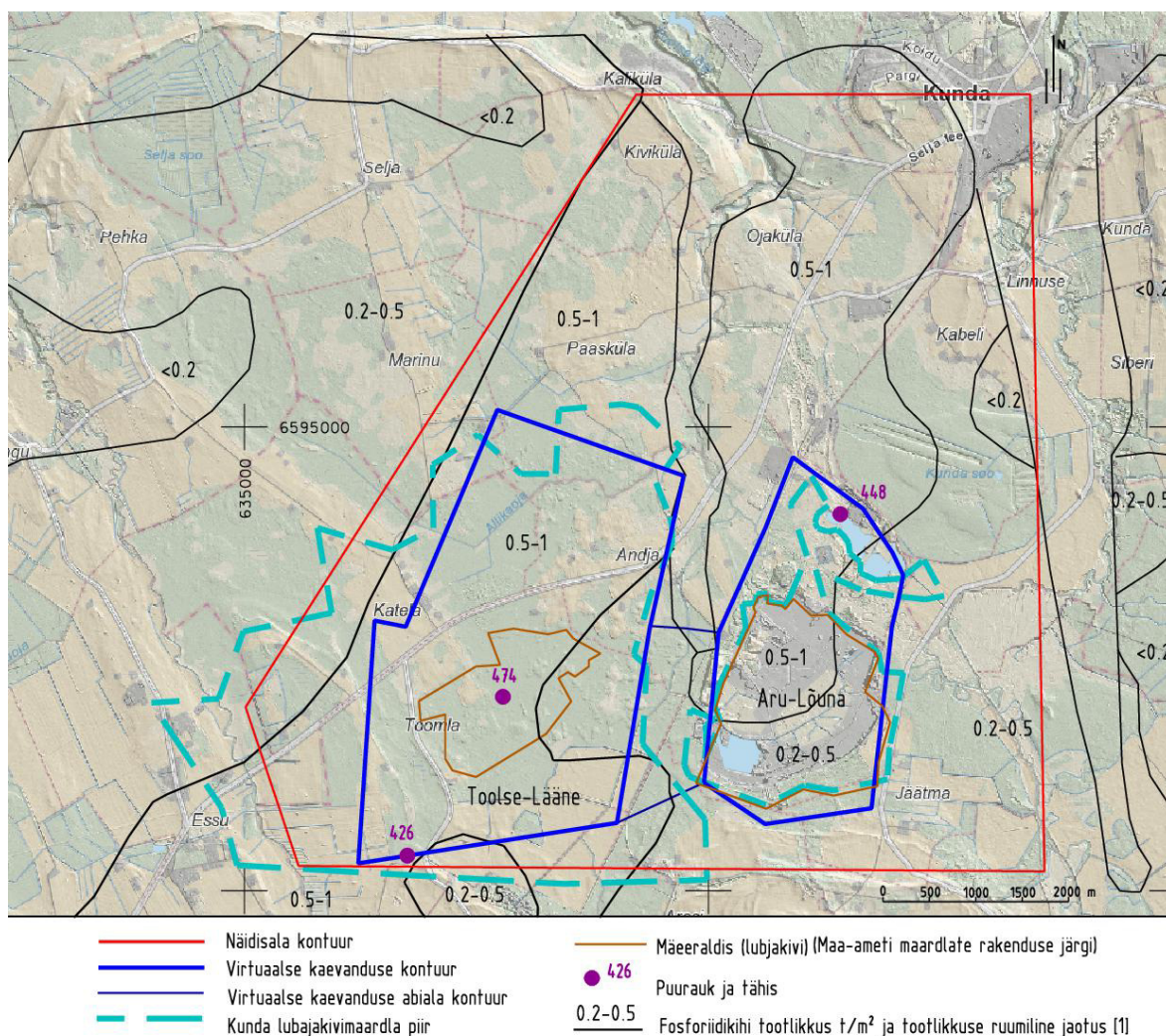
4.1 ASUKOHT JA SUURUS

Virtuaalne kaevandus paigutati näidisala 1 lõunapoolsesse osasse. Lisaks fosforiidi tootlikkusele arvestati kaevanduse asukohta valikul Kunda lubjakivi maardlat, olemasolevate mäeeraldiste paiknemist ning keskkonnakaitselisi ja muid piiranguid.

Karjäärina on kaevanduse pindala 17.5 km² ning see koosneb kahest eraldiseisvast alast, suurusega vastavalt 11.5 km² ja 6 km². Abiala ligikaudse pindalaga 1.5 km² on mahutatud kahe kaevandusala vahele. Virtuaalse kaevanduse asukoht on näidatud *Joonisel 5*, samas on toodud ka Kunda lubakivimaardla ja mäeeraldiste piirid.

6.4 km² kaevanduse alast moodustavad olemasolevad mäeeraldised koos teenindusmaaga. Aru-Lõuna karjäärist põhjas paiknevad alad on sihtotstarbe järgi mäetööstusmaa (~1.5 km²), kus paikneb aastakümneid tagasi tegevuse lõpetanud Aru-Põhja karjäär, kuhu käesolevaks ajaks on tekkinud veekogu [14].

Ülejäänud piirkond kujutab endast metsa- ja põllumaid, mille vahel paiknevad majapidamised.



Joonis 5. Virtuaalse kaevanduse VK1 paiknemine. (Aluskaart: Maa-ameti, Kunda lubjakivimaardla ja mäeeraldiste asukohad on antud Maa-ameti maardlate rakenduse järgi).

4.2 MÄENDUSLIK ISELOOMUSTUS

Virtuaalne kaevandus VK 1 paikneb lubjakiviplatool, kus kvaternaarisetete all avanevad Ülem- ja Kesk-Ordoviitsiumi karbonaatsed kivimid. Maapinna reljeef on suhteliselt tasane ning maapinna absoluutkõrgused jäävad vahemikku 50...60 m. Erandi moodustab Aru-Lõuna lubjakivikarjäär, kus kaevandamise tõttu ulatub karjääri põhi absoluutkõrguseni 35 m.

Pudeda katendi moodustavad kvaternaarisetted, mille paksus jääb mõne meetri piiresse.

Kivimkatendi moodustavad karbonaatkivimid, savi ja glaukoniitliivakivi ning argilliid. Karbonaatkivimite paksus jääb enamasti vahemikku 15...35 m ning savi, glaukoniitliivakivi ning argilliidi paksus kokku on umbes 5 m.

Kivimkatendis esinevad karbonaatkivimid moodustavad Kunda tsemendi- ja ehituslubjakivi maardla, mille leviala kattub suures osas virtuaalse kaevandusega. Kasulikuks kihiks on tsemendilubjakivi puhul Kesk-Ordoviitsiumi Uhaku ja Lasnamäe (sobib ka ehituslubjakiviks) lademete lubjakivid, ehituslubjakivi puhul moodustavad kasuliku kihi Kesk-Ordoviitsiumi Lasnamäe, Aseri ja Kunda lademete lubjakivid [13]. Kaevandamisload tsemendi- ja ehituslubjakivi kaevandamiseks Aru-Lõuna ja Toolse-Lääne lubjakivikarjääris on välja antud AS Kunda Nordic Tsement (KMIN-050, kehtivusega 08.08.2004 - 06.11.2018 ja KMIN -124 kehtivusega 04.02.2015 - 04.02.2045). Varu keskmine paksus Toolse-Lääne lubjakivikarjääris on 16 m, varu Aru-Lõuna karjääris ammendatakse lähima 10 aasta jooksul [14]. Mäeeraldiste asukohad on näidatud ülaltoodud *Joonisel 5*.

Katendi kogupaksus on 20...40 m, olles suurim kaevanduse lõunapiiril. Aru-Lõuna lubjakivikarjääris, kus toimub kaevandamine, on katendi paksus alla 20 m.

Tootsaks kihiks on fosforiidilasund, mille moodustavad Alam-Ordoviitsiumi ning Ülem-Kambriumi ladestiku Pakerordi lademe Kallavere kihistu karbikonglomeraat ja liivakivi [13]. Tootsa kihi paksus varu plokkide keskmisena on 1.6...3.4 m ning P₂O₅ sisaldus 9...11%. Plokkide paiknemine, tootsa kihi keskmine paksus ja P₂O₅ keskmine sisaldus plokis on näidatud *Joonisel 6*.

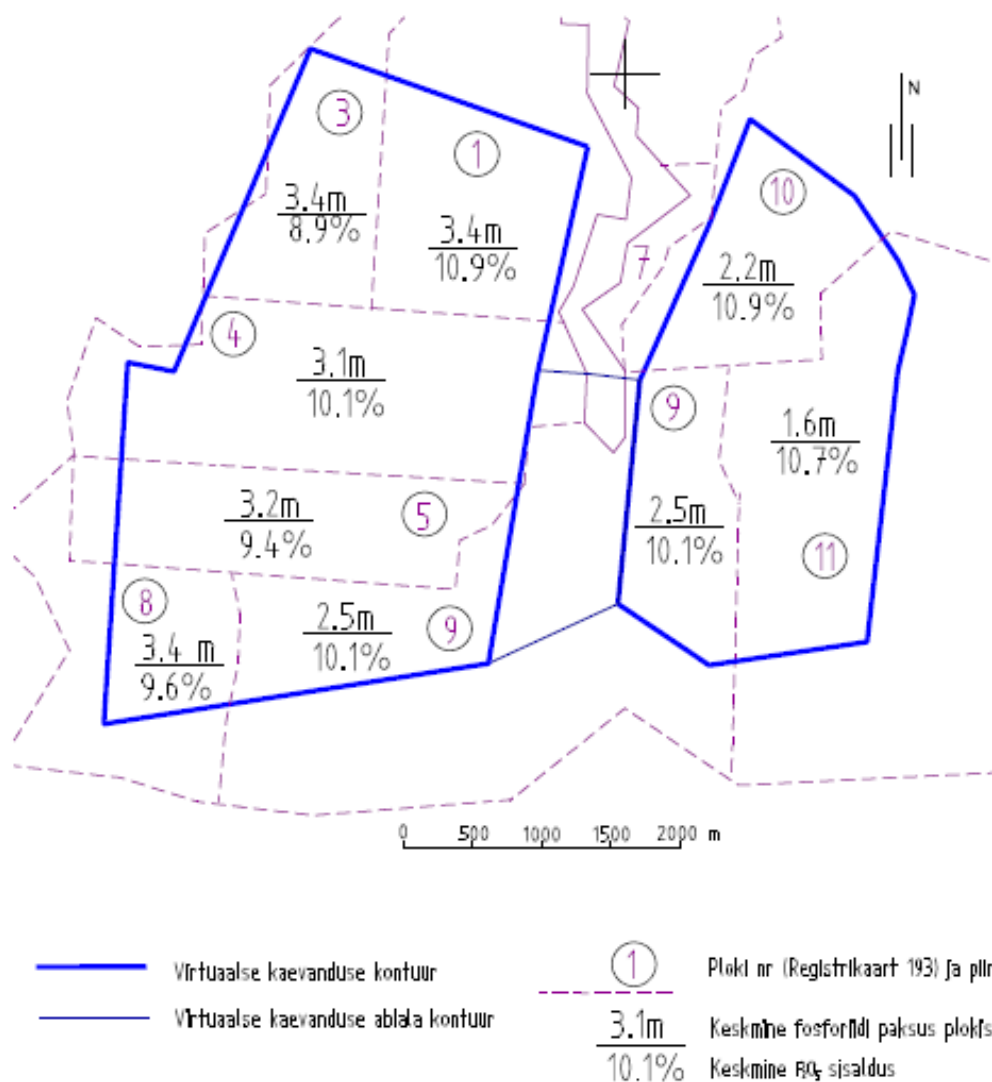
Tootsa kihi pealispind lasub absoluutkõrgustel 16...29 m, kihi pind langeb lõunasse, aluspõhja üldise kallakuse suunas.

1 milj. tonni kontsentradi tootmiseks aastas on tarvis väljata umbes 3.2 milj. t fosforiidimaaki.

Aherainet tekib 1 tonni kontsentradi kohta 2.15 tonni. Puistena on mahuühikutes aastane aheraine kogus umbes 1.3 milj. m³ ning kogu kaevandamisperioodi jooksul tekib aherainet 40 milj. m³. Arvutuses võeti puiste mahumassiks 1.6 t/m³.

Aluskihiks ehk lamamiks on Tiskre kihistu liivakivi või aleuroliit.

Katendi paksus kuni 40 m võimaldab fosforiiti kaevandada lahtises kaevanduses ehk karjääris, samuti on võimalik allmaakaevandamine. Allmaakaevandamise analüüs on toodud peatükis 4.4.



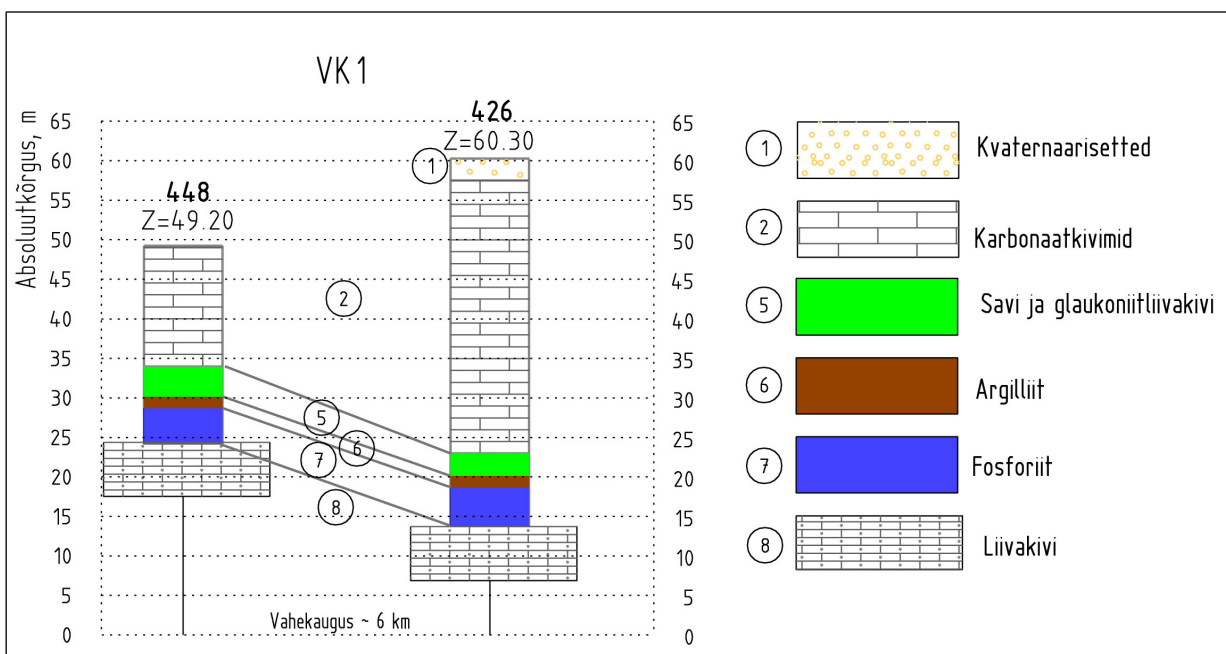
Joonis 6. Tootsa kihi paksus ja P₂O₅ sisaldus (Keskkonnaregistri maardlate nimistu registrikaardi Nr 193 järgi).

4.3 GEOTEHNILINE MUDEL

Kaevandusala geotehniline mudel koosneb kuuest kihist. Kihtide paksused, pealispinna lasumissügavused ja mäenduslikud kategooriad puuraugu 474 näitel on toodud Tabelis 4 ning illustreeritud läbilõige puuraukude 448 ja 426 järgi Joonisel 7.

Tabel 4. VK1 geotehnilised kihid

Kategooria		Geotehniline kiht ja nr		Paksus, m (PA 474)	Lasumis-sügavus, m
Pude katend		Kvaternaarisetted	1	1.2	29.8
Kivimkatend	Põhilagi	Karbonaatkivimid	2	23.6	
	Vahetu lagi	Savi ja glaukoniitliivakivi	5	3.2	
		Argilliit	6	1.8	
Tootus kiht		Fosforiit	7	4.3	34.1
Aluskiht		Liivakivi/aleuroliit	8		



Joonis 7. Läbilõige virtuaalsest kaevandusest VK1.

4.4 MAA-ALUSE KAEVANDAMISE VÕIMALUSTE GEOTEHNILINE ANALÜÜS

Alljärgnevad FEM mudelid ja arvutused ei ole tehtud eesmärgiga projekteerida maa-alust kaevandust. See tähendab, et ei olegi üritatud kaeveõõnte mõõtmeid ja kuju optimeerida, ei ole arvestatud tervikute mõõtmete kahanemist seinte purunemise tõttu jne. Arvutuste eesmärgiks oli demonstreerida erineva suurusega kaeveõõnte rajamisega kaasnevat ja näidata tendentse, mis kaasnevad kaeveõõnte mõõtmete ja sügavuse muutumisega. Mudelitega illustreeritakse, mis hetkel muutuvad deformatsioonid kaeveõõnte ümber lineaarsest mittelineaarseks ehk purunemise järgseks. Tuleb siiski möönda, et lineaarse mudeliga ei saa täpselt iseloomustada mittelineaarset protsessi ehk purunemisjärgseid deformatsioone. Samuti demonstreeritakse seinte ja lae purunemist nihke- ja tõmbepingete tagajärjel ning purustatud kivimitsooni kõrgust lae kohal peale lae varingut.

4.4.1 5 m kõrgused kaeveõõned 37 m sügavusel

Reaalselt on tootsa kihi paksuseks VK1 alal kuni 5 m (ptk 4.2). FEM mudeliga on analüüsitud järgmised olukorrad:

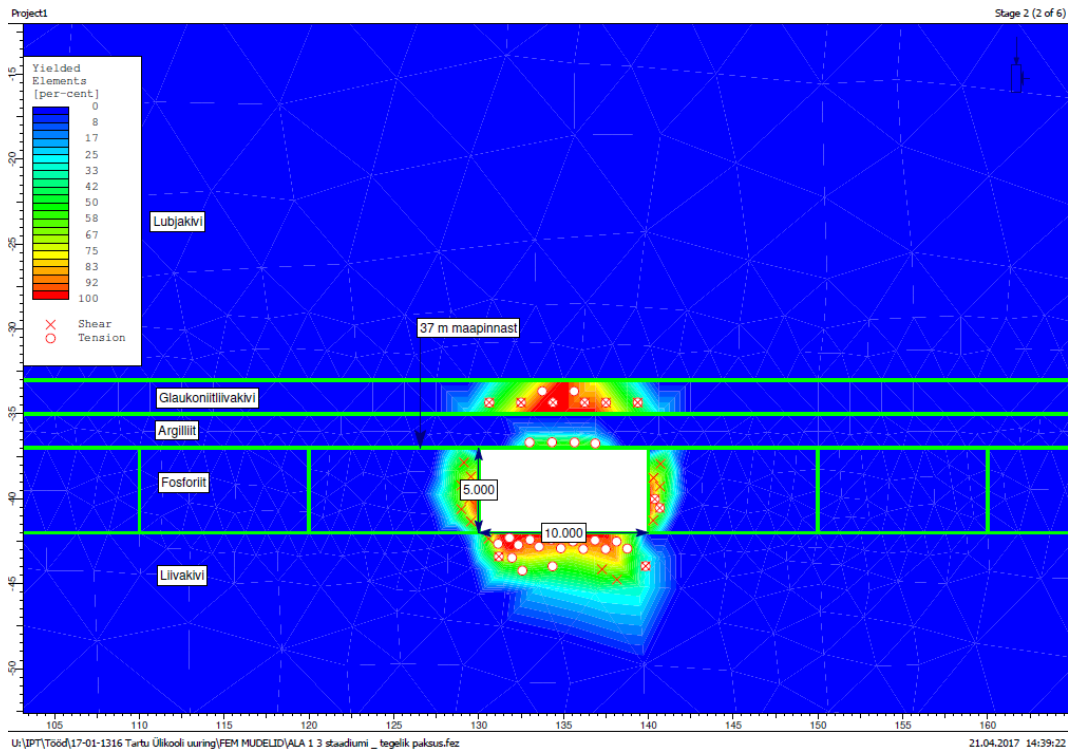
- lõpmatu pikkusega 5 m kõrge ja 10 m lai kaeveõõs, vastab tinglikult transpordi tarbeks rajatud käigule või laava-kaevandamise alustamiseks rajatud käigule ;
- 2 lõpmatu pikkusega 5 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikuga nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (1/3 tervikuid) aga ka olukorda kus kaevandusvälja läbib 2 paralleelset käiku;
- 3 lõpmatu pikkusega 5 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikutega nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (2/5 tervikuid);
- lõpmata pikkusega 5 m kõrge ja 30 m lai kaeveõõs, mis vastab tinglikult laavakaevandamise algfaasile ning modelleerib lae varingu mõju kõrguses ning mõju laavakõrval olevate käikude stabiilsusele;
- lõpmata pikkusega 5 m kõrge ja 50 m lai kaeveõõs.

FEM mudelite väljund on esitatud *Joonistel 8.1...8.8*.

Tõenäoliselt saab ca 40 m sügavusele kaevanduse projekteerida. Mõistlik on kaeveõõnte kuju projekteerida pingeaotust arvestav, võlvi kujulise laega. Sellisel juhul on võimalik ära hoida seinte purunemine viimaste keskosas ja optimeerida kaevandatava tootsa kihi väljutamise osakaalu. Samuti on selge, et suurest mäerõhust põhjustatuna tuleb kamberkaevandamisel arvestada suuremõõtmeliste tervikutega või kaevandatud kambrite või käikude tagasitäitmisega enne naaberbloki (terviku) välja kaevamist. Sellise kaevandatava ja täitmist vajavate kambrite lahendus (kaeveõõnte mõõtmed, täitmise-kaevandamise etapid ja järjekord jne) on kaevanduse projekteerimisel lahendatav optimeerimisülesanne.

Laavakaevandamise korral saab rajada pikad kaeveõõnsused laavakaevandamise ettevalmistamiseks. Kuni 10 m laiused laed on stabiilsed ja vajavad vaid pindmist toetamist ankrutega argilliidis. 30 m laiuse kaeveõõnsuse lagi variseb ja 50 m laiuse kaeveõõnsuse lae sisse varisemisel ulatub purustatud kivimi tsoon maapinnale. Sellisel juhul moodustub maapinnale vajumislehter, mille sügavuse määrab kaeveõõnsusesse varisenud kivimi tihenemine lasuva purustatud kivimassi raskuse all.

Igasugune detailsem arvutus vajab informatsiooni kivikihtide tugevusest konkreetsetes asukohas.



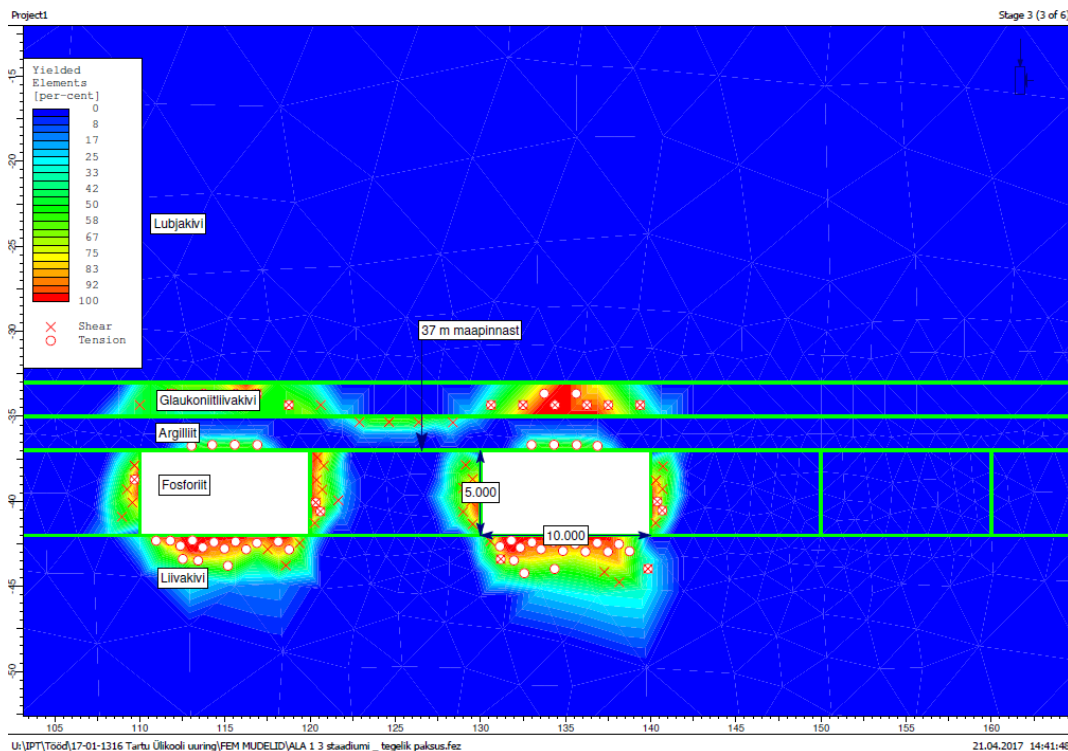
U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\ALA 1.3 staadiumi _ tegelik paksus.fem

21.04.2017 14:39:22

Joonis 8.1 Virtuaalne kaevandus VK1

5 m kõrgune ja 10 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 1 m laiuselt (keskosas), lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lage toetab tugevam argilliidi kiht glaukonitliivakivi all.



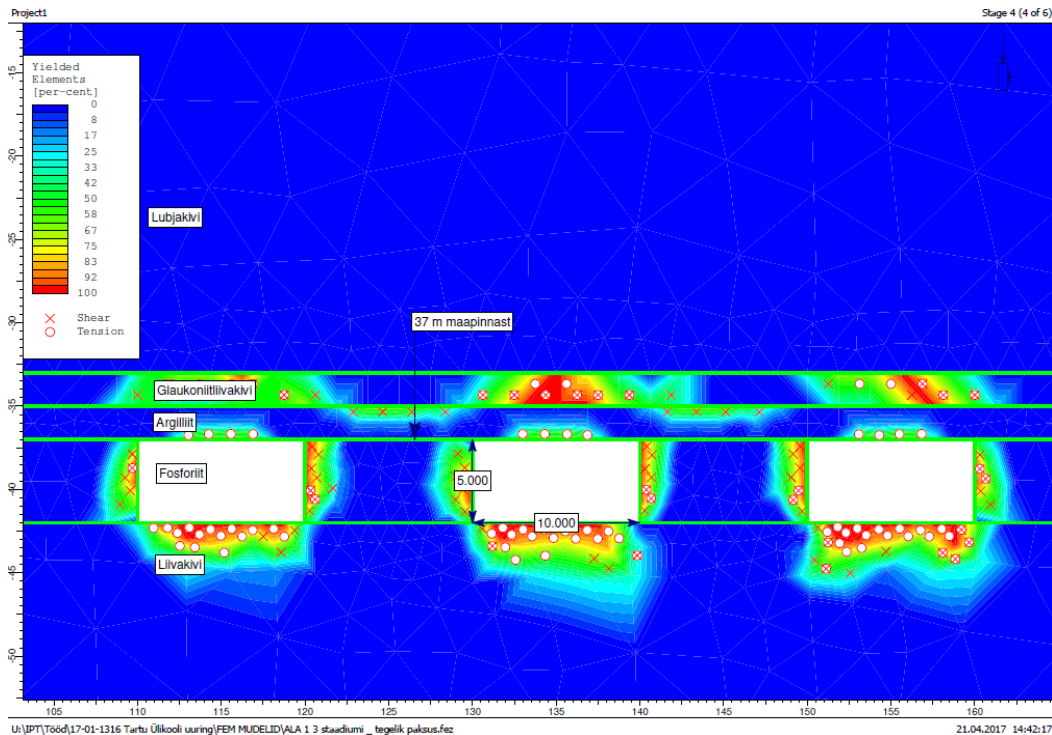
U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\ALA 1.3 staadiumi _ tegelik paksus.fem

21.04.2017 14:41:48

Joonis 8.2 Virtuaalne kaevandus VK1.

Kaks 5 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

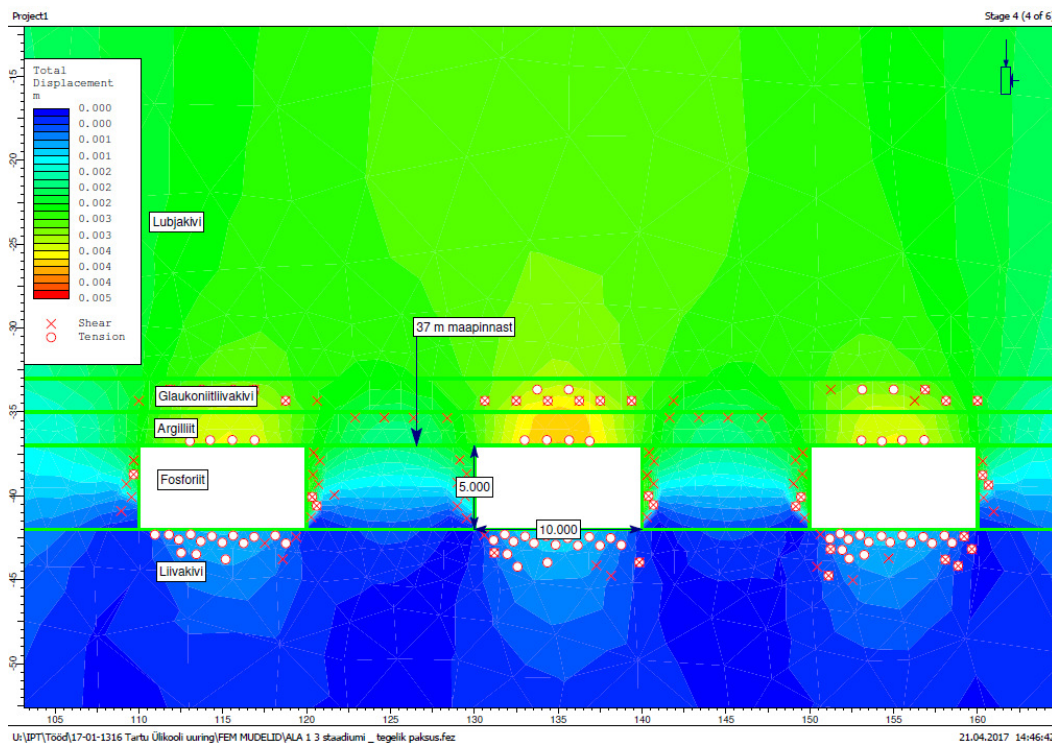
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 1 m laiuselt (keskosas), lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lage toetab tugevam argilliidi kiht glaukonitliivakivi all. Toestav tervik on stabiilne vähemalt 7 m tüseduses.



Joonis 8.3 Virtuaalne kaevandus VK1.

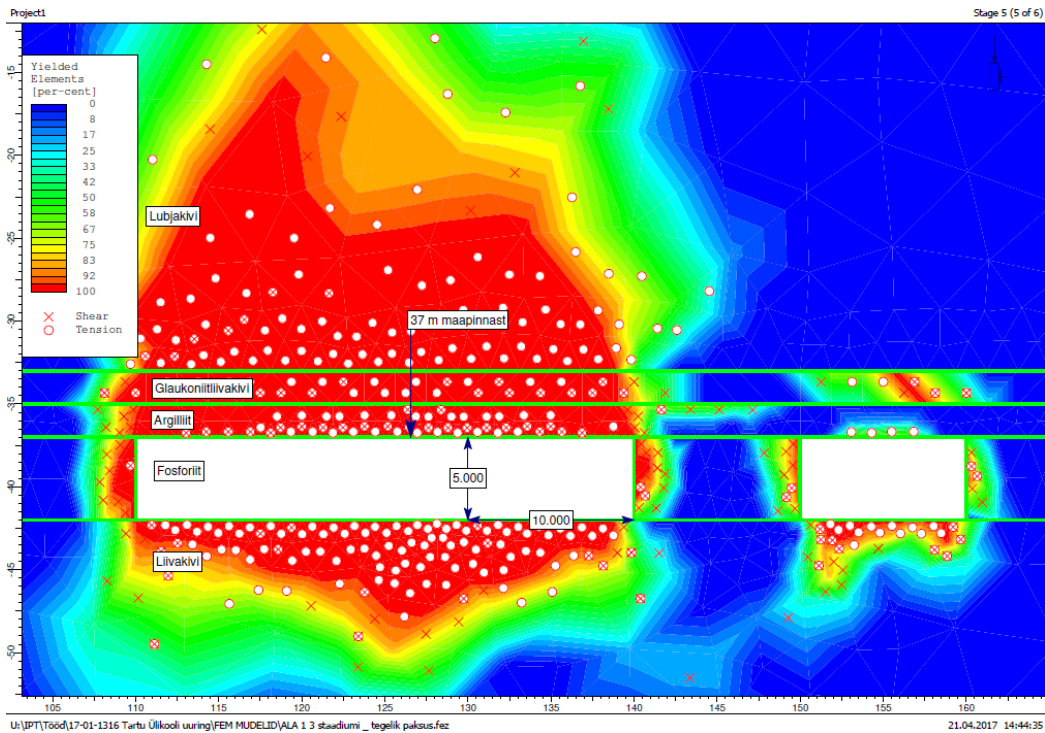
Kolm 5 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõnt 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 1 m laiusest (keskosas), lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lage toetab tugevam argilliidi kiht glaukonitiivakivi all. Toestav tervik on stabiilne vähemalt 7 m tõesuses.



Joonis 8.4 Virtuaalne kaevandus VK1

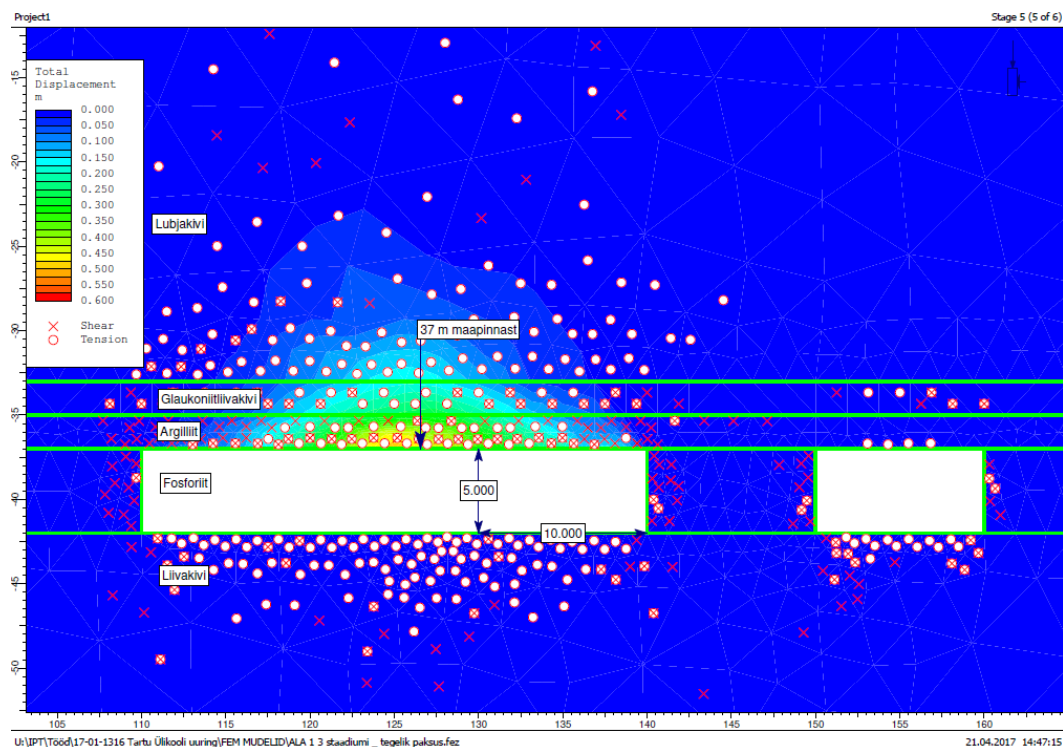
Kolm 5 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõnt 37 m sügavusel (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites) Deformatsioonid on väikesed, alla 5 mm ning on suurimad lae kohal. Põranda moodustab osaliselt purustatud nõrga tsementeeritusega liivakivi, seintest on alla kukkunud purunenud tsooni liivakivi, tervikud hoiavad lage varisemast.



Joonis 8.5 Virtuaalne kaevandus VK1

5 m kõrgune ja 30 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

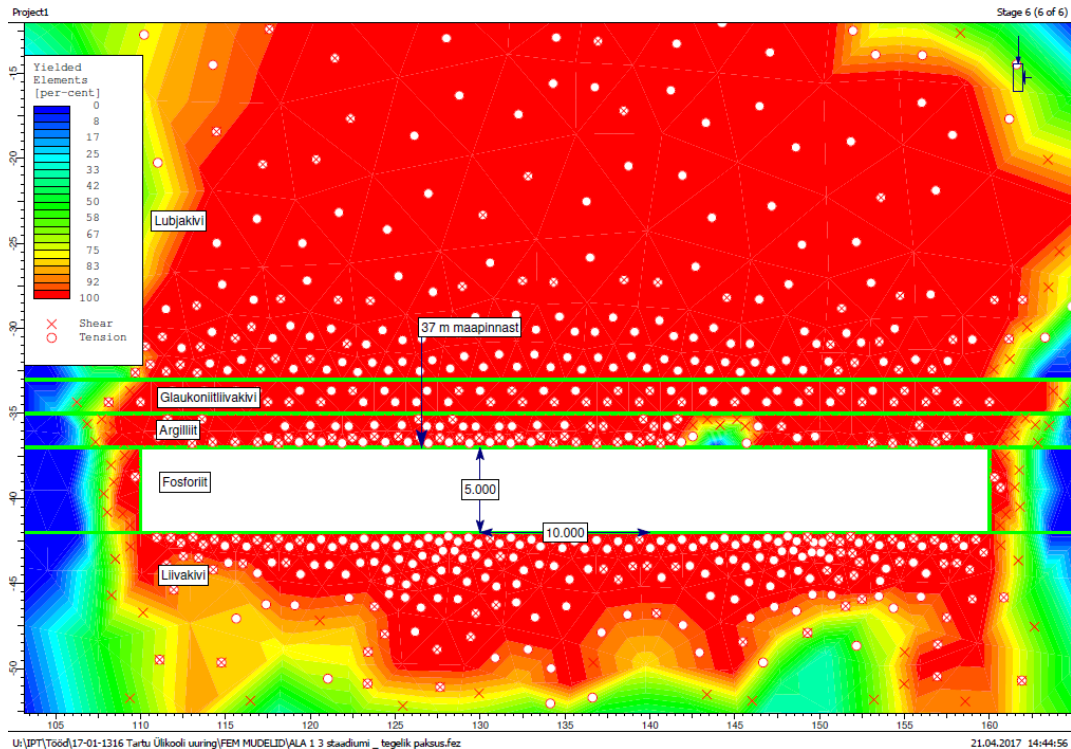
Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 2 m laiselt (keskosas). Samas on kõrval asuv 5 x 10 m kaeveõõs ja selle kõrval olev tervik purunemata.



Joonis 8.6 Virtuaalne kaevandus VK1

5 m kõrgune ja 30 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Deformatsioonid on laia avause kohal kuni 46 cm ehk selgelt mittelineaarsed ja põhjustatud lae purunemisest. Lagi kukub sisse. Kivim on purunenud tõmbepingete tõttu suures kõrguses lae kohal. Lae purunemine ei põhjusta seintele oluliselt suuremaid purustusi, laia kaeveõõne kõrval olevale kaeveõõnele lae purunemine praktiliselt mõju ei avalda, samuti on püsiv kaeveõõnte vaheline tervik.



U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\VALA 1.3 staadiumi_tegelik_paksus.fem

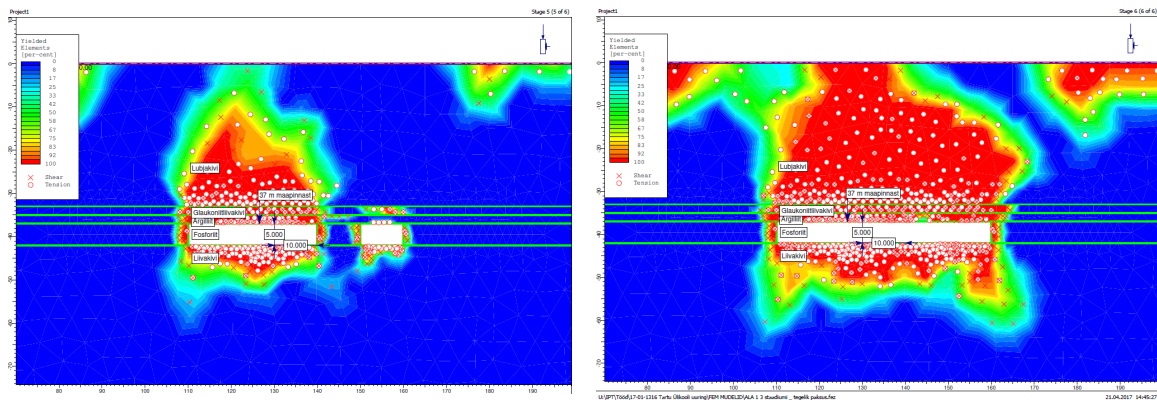
21.04.2017 14:44:56

Joonis 8.7 Virtuaalne kaevandus VK1

5 m kõrgune ja 50 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 2...3 m laiuselt.

Alljärgneval Joonisel 8.8 on näidatud tervikmudelid 30 m ja 50 m laiuse kaeveõõnega.



Joonis 8.8 Virtuaalne kaevandus VK1

30 m laiune ja 50 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lae purunemisel tekkinud purunenud kivimi tsoon ulatub 50 m kaeveõõne laiuse korral maapinnale.

4.4.2 8 m kõrgused kaeveõõned 37 m sügavusel

8 m kõrgused kaeveõõned virtuaalse kaevanduse VK1 alal modelleeriti eesmärgiga võrrelda üldiselt maa-aluse kaevandamise sügavuse ja kaeveõõnte mõõtmete muutumise mõju kaeveõõsi ümbritseva massiivi stabiilsusele. FEM mudeliga on analüüsitud järgmised olukorrad:

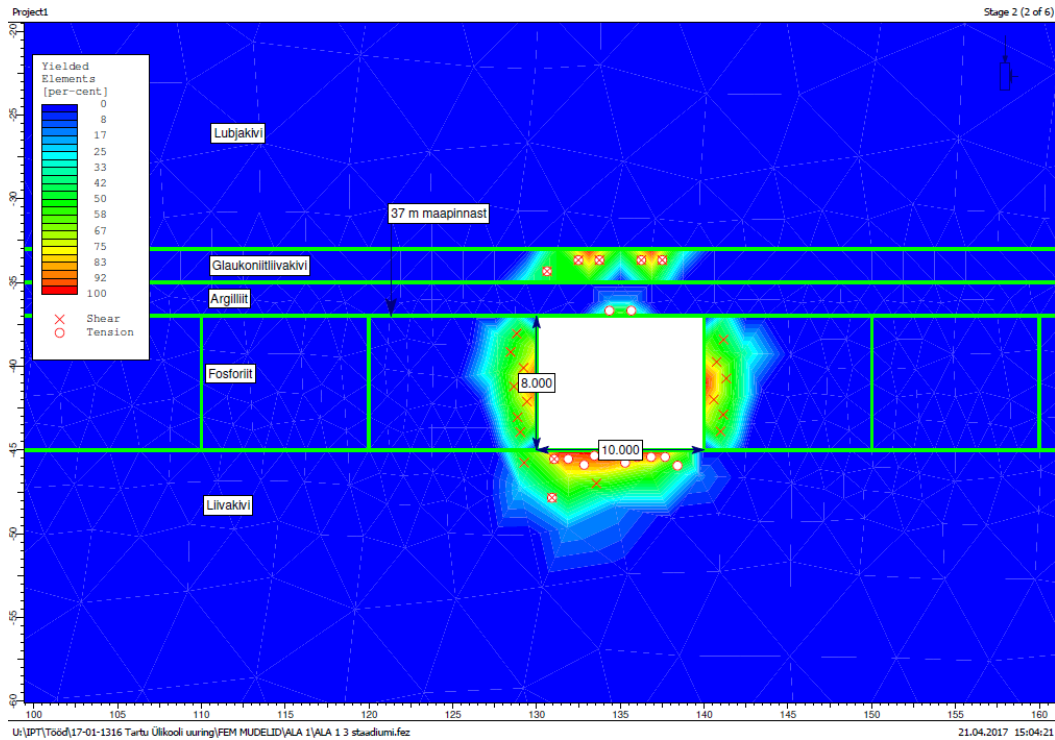
- lõpmatu pikkusega 8 m kõrge ja 10 m lai kaeveõõs, vastab tinglikult transpordi tarbeks rajatud käigule või laava-kaevandamise alustamiseks rajatud käigule;
- 2 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikuga nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (1/3 tervikuid) aga ka olukorda kus kaevandusvälja läbib 2 paralleelset käiku;
- 3 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikutega nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (2/5 tervikuid);
- lõpmata pikkusega 8 m kõrge ja 30 m lai kaeveõõs, mis vastab tinglikult laavakaevandamise algfaasile ning modelleerib lae varingu mõju kõrguses ning mõju laavakõrval olevate käikude stabiilsusele;
- lõpmata pikkusega 8 m kõrge ja 50 m lai kaeveõõs.

FEM mudelite väljund on esitatud *Joonistel 9.1...9.8*.

8 m kõrguste kaeveõõnte korral purunevad tervikute seinad oluliselt suuremas ulatuses. Võrreldes 5 m kõrguste kaeveõõntega suureneb purustatud tsooni ulatus seina keskosas 1 meetrilt 2,5 m meetrini. Nii jääb kõrvuti asuvate kaeveõõnte vaheline tervik keskosas oluliselt kitsamaks – ca 7 meetrit 5 m kõrguse kaeveõõne korral ja ca 4-5 m 8 m kaeveõõne korral. Ka deformatsioonide suurus seinte keskosas on oluliselt suurem, ulatudes 14 mm-ni. On selge, et kõrgema kaeveõõne korral on seinte püsivuse tagamine keerulisem, endiselt saab küll arvestada võlviga, kuid ilmselt tuleb algne kaeveõõs tervikute püsivuse tagamiseks planeerida kitsamana.

Lae purunemisele ja lae kohale moodustuvale purunenud tsoonile kaeveõõne kõrguse suurendamine 5 meetrilt 8 meetrini mõju ei avalda. Kuni 10 m laiused laed on stabiilsed ja vajavad vaid pindmist toetamist ankrutega argilliidis. 30 m laiuse kaeveõõne lagi variseb ja 50 m laiuse kaeveõõnsuse lae sisse varisemisel ulatub purustatud kivimi tsoon maapinnale. Sellisel juhul moodustub maapinnale vajumislehter, mille sügavuse määrab kaeveõõnsusesse varisenud kivimi tihenemine lasuva purustatud kivimassi raskuse all. Kuna varisenud kivimassiga täitub suurem tühimik, siis on 8 m kõrguse kaeveõõne kohal oodatavad maapinna vajumised suuremad kui 5 m kõrguse kaeveõõne korral.

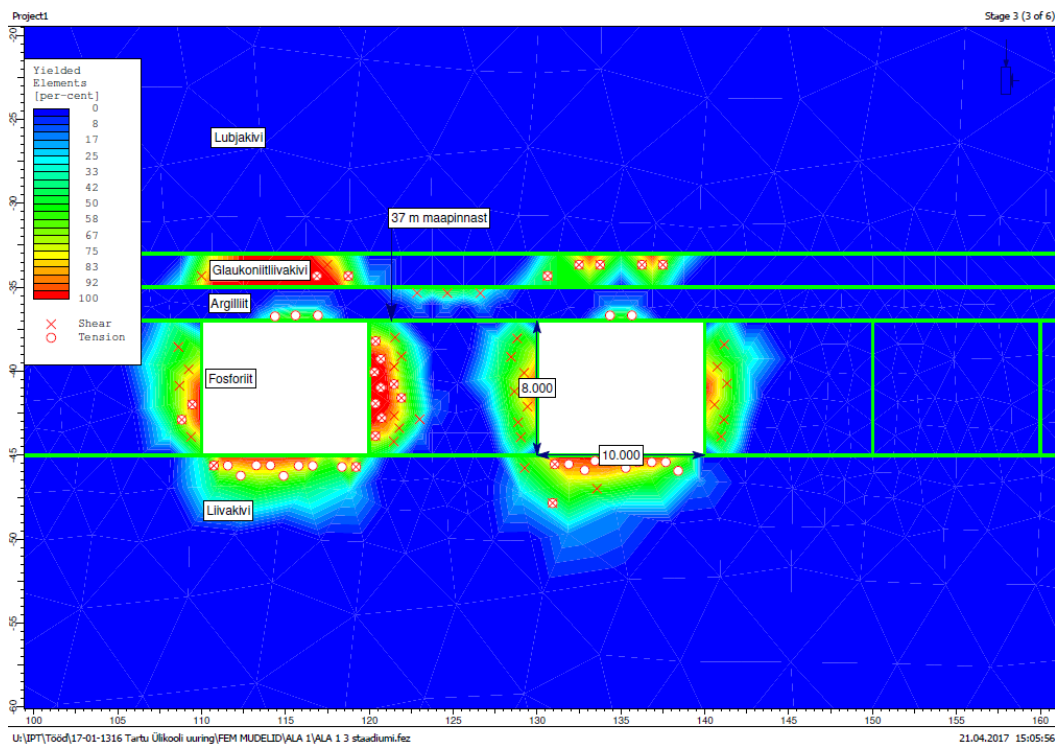
Igasugune detailsem arvutus vajab informatsiooni kivikihtide tugevusest konkreetsetes asukohas.



Joonis 9.1 Virtuaalne kaevandus VK1

8 m kõrgune ja 10 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

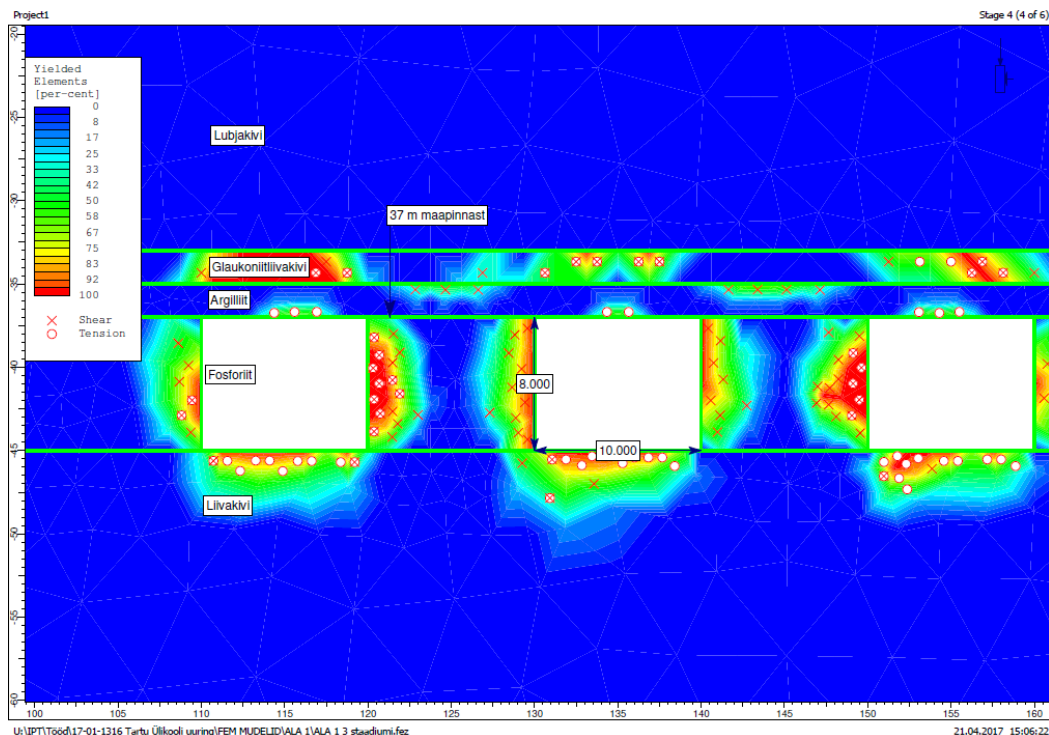
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni ca 2,5 m laiuselt (keskosas), lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lage toetab tugevam argilliidi kiht glaukonitilivakivi all.



Joonis 9.2 Virtuaalne kaevandus VK1

Kaks 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

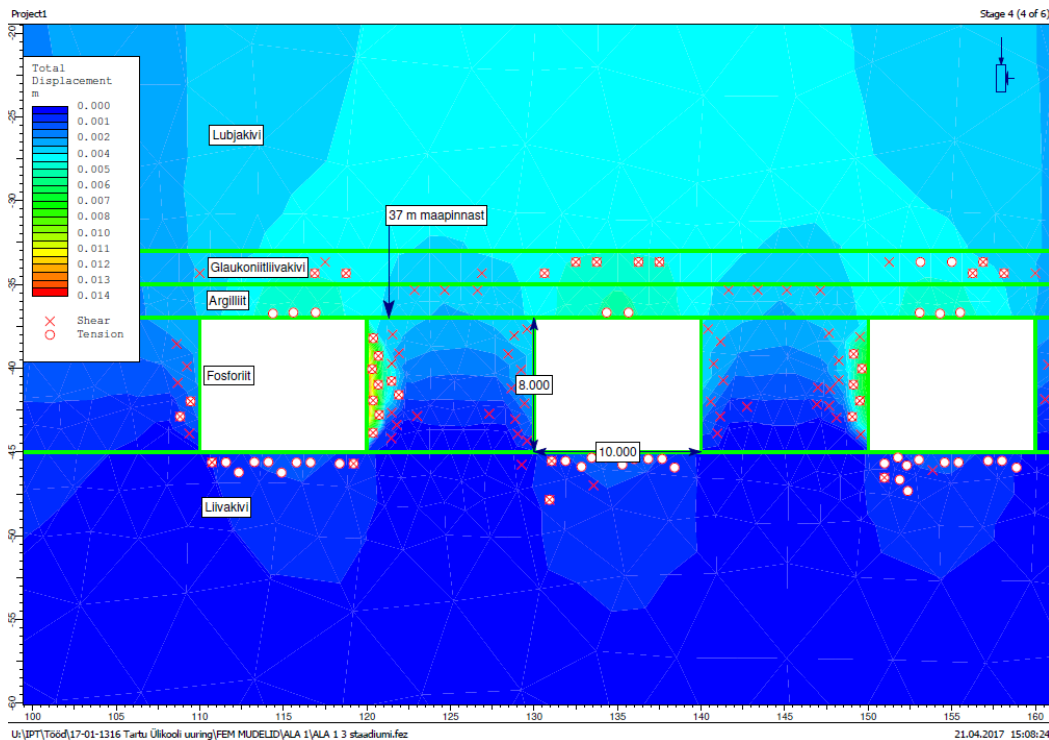
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 2,5 m laiuselt (keskosas), lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lage toetab tugevam argilliidi kiht glaukonitilivakivi all. Toetav tervik on stabiilne vähemalt 5 m tüseduses.



Joonis 9.3 Virtuaalne kaevandus VK1

Kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

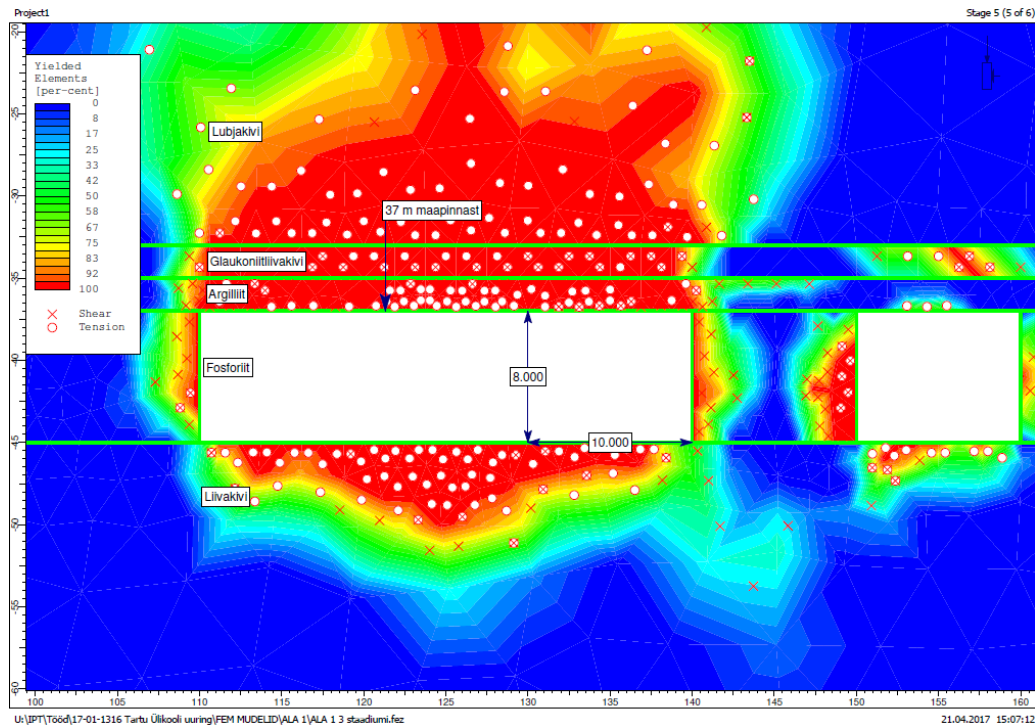
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 2,5 m laiuselt (keskosas), lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lage toetab tugevam argilliidi kiht glaukonitiivakivi all. Toestav tervik on stabiilne vähemalt 4-5 m tüseduses.



Joonis 9.4 Virtuaalne kaevandus VK1

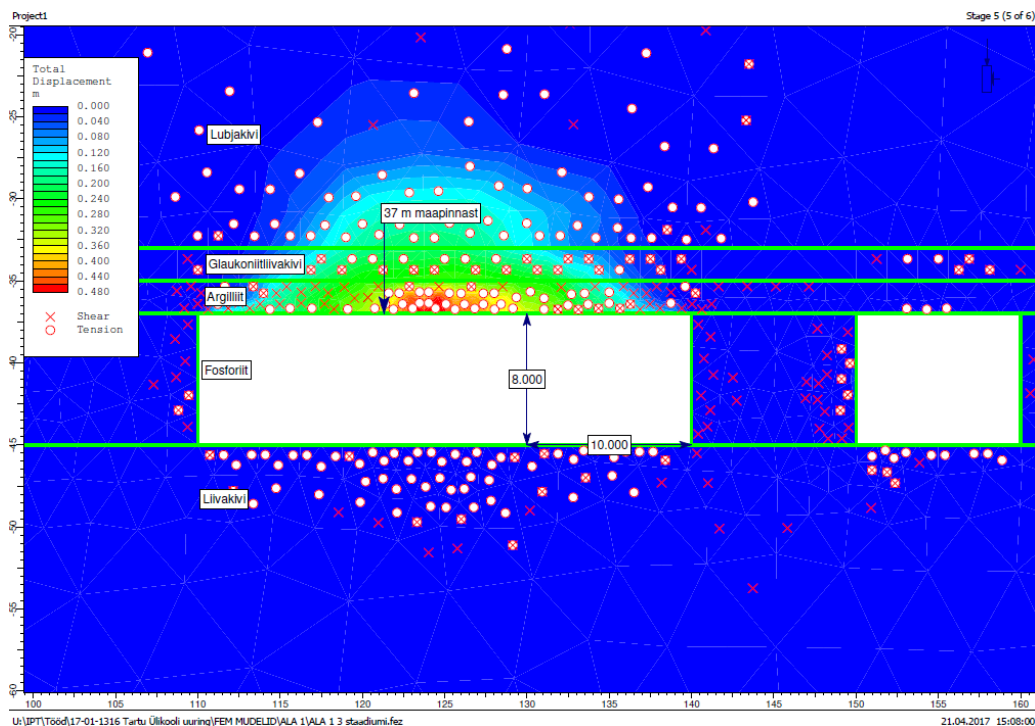
Kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 37 m sügavusel (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Deformatsioonid on alla 15 mm ning on suurimad seinte keskosas. Põranda moodustab osaliselt purustatud nõrga tsementeeritusega liivakivi, seintest on alla kukkunud purunenud tsooni liivakivi, tervikud hoiavad lage varisemast.



Joonis 9.5 Virtuaalne kaevandus VK1

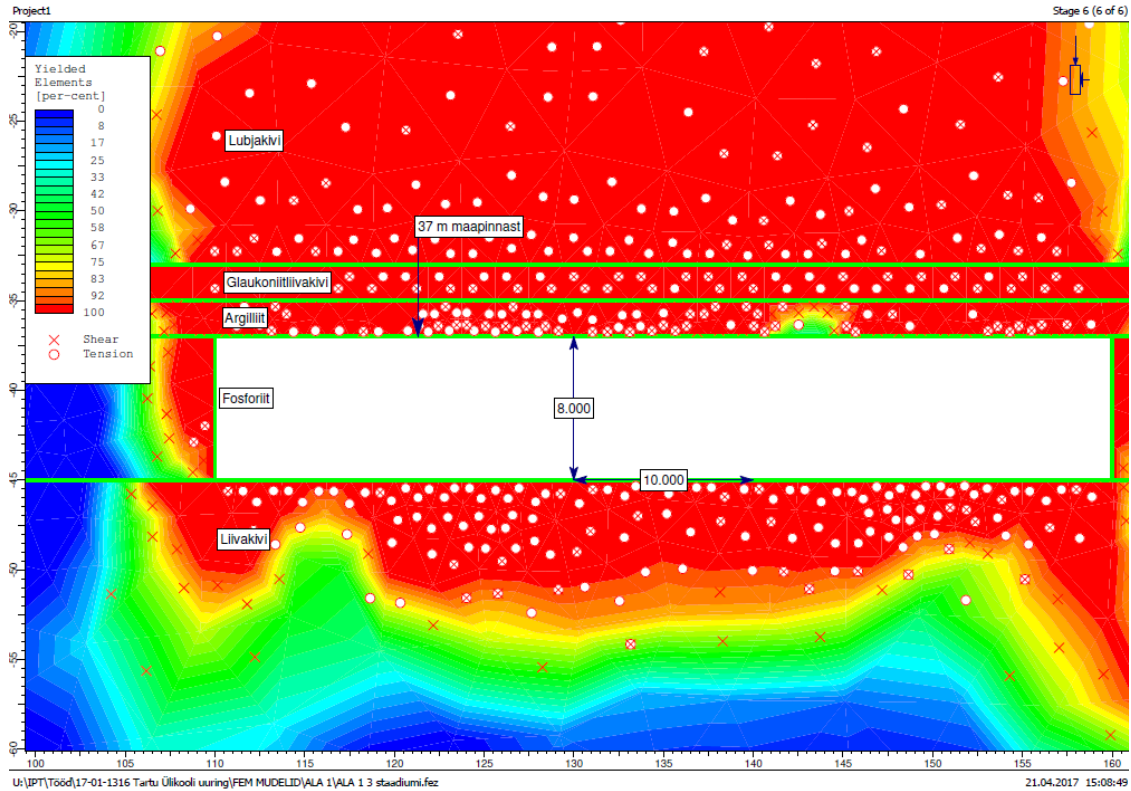
8 m kõrgune ja 30 m laiune kaevandus 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti). Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinal on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 2,5 m laiuselt (keskosas). Kõrval asuv 5 x 10 m kaevandus ja selle kõrval olev tervik on veel purunemata, kuid purunemata tsoon moodustab seina keskosas vaid kuni 3 m.



Joonis 9.6 Virtuaalne kaevandus VK1

8 m kõrgune ja 30 m laiune kaevandus 37 m sügavusel (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

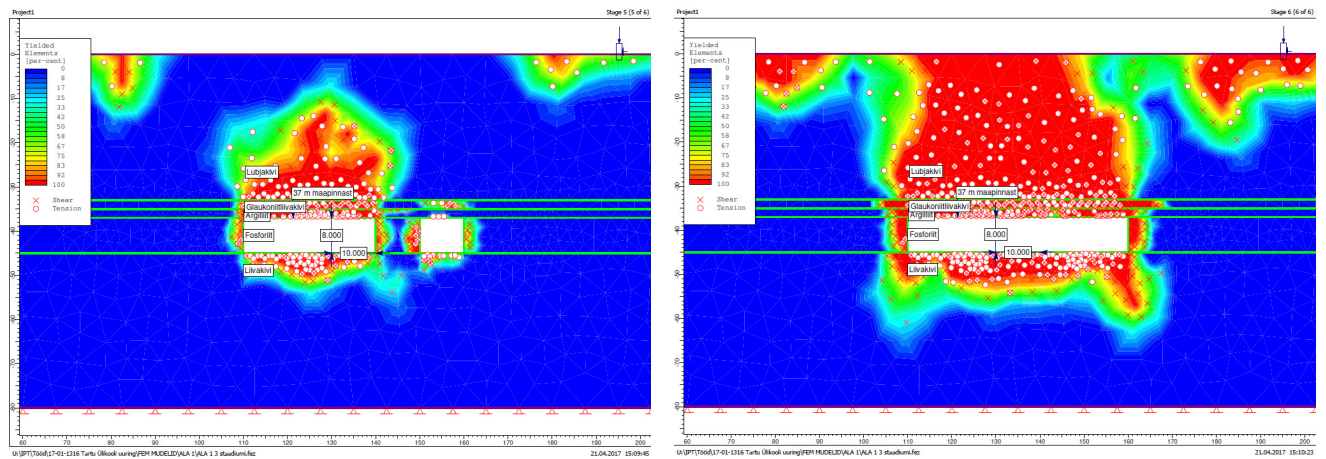
Deformatsioonid on laia avause kohal kuni 48 cm ehk selgelt mittelineaarsed ja põhjustatud lae purunemisest. Lagi kukub sisse. Kivim on purunenud tõmbepingete tõttu suures kõrguses lae kohal. Lae purunemine ei põhjusta seintele oluliselt suuremaid purustusi, kuid laia kaevanduse kõrval oleva kaevanduse seina purunenud tsoon laieneb pea 1 m võrra, säilitades terviklikkuse vaid ca 3 m laiuselt.



Joonis 9.7 Virtuaalne kaevandus VK1

5 m kõrgune ja 50 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni 5-6 m laiuselt.



Joonis 9.8 Virtuaalne kaevandus VK1

30 m laiune ja 50 m laiune kaeveõõs 37 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lae purunemisega kaasnev purunenud kivimi tsoon ulatub 50 m laiuse korral maapinnale.

4.5 KASUTATAVAD KAEVANDAMISVIISID JA NENDE MÕJU

4.5.1 Pealmaakaevandamine

1. Karjääriviisiliselt saab fosforiidikihti kaevandada märkimisväärsete kadudeta.
2. Katendis oleva ehitus- ja tsemendilubjakivi saab kaevandada sama protsessi osana, kuid tuleb arvestada, et ehitus- ja tsemendilubjakivi kasutusvajadus võib erineda fosforiidikaevandamise rütmist. Vajadusel tuleb katend ladestada viisil, et lubjakivivaru oleks hiljem võimalik kasutusele võtta.
3. Katendis oleval argilliidil ja glaukoniitliivakivil käesoleval ajal kasutus puudub. Siiski võiks need puistangusse paigutada plaanipäraselt, mis võimaldaks vajadusel nende hilisemat kasutuselevõttu. Argilliidi puhul tuleb puistangusse paigutamisel rakendada erimeetmeid, et takistada õhu juurdepääsu ning vältida raskemetallide ja sulfaatide vabanemist. Põhialused argilliidi keskkonnaohutuks matmiseks töötas välja E.Puura juba 2001.a. seoses prügila rajamisega Maardu ammendatud fosforiidikarjääri [15]. Selles töös on antud ka põhjalik ülevaade argilliidi isesüttimisest ja puistangus toimuvatest geokeemilistest protsessidest.
4. Fosforiidikontsentraadi tootmisel tekkiva aheraine (puistena aastas 1.3 milj. m³, kogu kaevandamisperioodi jooksul umbes 40 milj. m³) saab ladestada ammendatud karjäärialale, tingimusel, et sellest ei leostu põhjavee kahjulikke ühendeid.
5. Karjääri rajamisel hävinevad loodusmaastikud ja põllumaad, elanikud tuleb ümber asustada ning suured alad jäävad tavakasutusest välja. Maakasutust võimaldab osaliselt säilitada kombineeritud kaevandamine, mille puhul olemasolevate lubjakivikarjääride piires toimub fosforiidi kaevandamine maa pealt ning muus osas allmaakaevandamisega.
6. Ulatuslikule alale sügava (> 40 m) karjääri rajamine eeldab põhjaveetaseme alandamist karjääri põhjani. Karjääri alalt kaob Ordoviitsiumi lubjakividega seotud põhjaveekiht ning alandatakse O-C põhjaveekihi survetase. Kaasneva alanduslehtri ulatus võib olla väga suur ning samamoodi mõju veevarustusele. Mõju põhjaveele ei ole võimalik ära hoida, alanduslehtri ulatust on võimalik vähendada pumbates kaevandusvee maapõue tagasi, kuid see suurendab omakorda kaevandusest väljapumbatava vee kogust. Veealanduse lõpetamisel hakkab põhjaveetaseme aja jooksul taastuma. Taastuva põhjaveetaseme kõrgust on võimalik äravoolutingimusi kujundades reguleerida. Tuleb arvestada, et puistangus kujuneva põhjavee koostis võib erineda looduslikust taustast ning mõjutada seeläbi ka puistanguveega ühenduses olevate veekihtide keemilist koostist.
7. Avakaevandamise käigus rikutud maastikule saab ulatuslikul alal kujundada täiesti uue mitmekülgse maastiku, kus kunstlikult rajatud veekogudega saab luua võimalikult looduslähedase äravoolurežiimi, mis edaspidiselt toimiks ilma inimese vahelesegamiseta.

4.5.2 Allmaakaevandamine

1. Allmaakaevandamisele lae varistamisega puruneb mäemassiiv langatuse kohal maapinnani, millega kaasneb maapinna vajumine. Maapind vajub kaeveõont täitva alla

kukkunud materjali tihenemise arvelt ning vajumine on seda suurem, mida kõrgem on kaeveõõs ning mida kohevam on alla kukkunud materjal.

2. Kaevandamisel lae püsitoestusega on võimalik vajumine viia minimaalseks. Tervikutega toestamisel (kamberkaevandamine) tuleb arvestada maavara kaoga, mis on seda suurem, mida nõrgem on tervikuid moodustav kivim. Tehtud arvutuste järgi võib lae toestamiseks vajalike tervikute osa ületada 50%, mistõttu kasvab vastavalt ka kaevanduse pindala (eeldatav pindala avakaevandamisel on 17.5 km²). Siiski ei ole kamberkaevandamisel võimalik maapinna vajumist täielikult välistada, sest teatud tingimustel (tervikute või laekivimite tugevuse ülehindamine, lõhketööde mõju või muud faktorid) võivad tervikud puruneda. Üksikute tervikute purunemisel suureneb koormus teistele tervikutele ning need ei pruugi suurenenud koormusele vastu pidada ning tekib nn doominoefekt. Selles asukohas toimub kaevanduse kohal maapinna vajumine.
3. Kaevandamisel kaeveõõnte täitmisega saab vältida maapinna vajumist. Sellisel juhul toestatakse kaevanduse opereerimiseks vajalikud käigud. Väljaveo ja tuulutuskäigud võib rajada ka tugevamasse liivakivisse fosforiidikihtide all, ning ilmselt vajavad ka need toestamist. Kaevandamine ise toimub kitsaste (kuni 10 m laiuste) käikudena, mis rajatakse püsikäikude vahele 90° nurga all, sarnaselt laavakaevandamisele. Erinevuseks on, et kaevandamise käigud rajatakse üksteisest piisavalt kaugele, et vältida tervikute ja lae purunemist ja need käigud täidetakse koheselt. Alles peale täitematerjali tardumist saab kaevandada täidetud kaevandamiskäikude vahel, seda sarnaselt eelpool kirjeldatule – kitsa käiguna ja tagasitäitega. Selliselt võib, sõltuvalt esialgse terviku vajalikule suurusele, kaevandamine toimuda mitme tsüklina. Täitmisega kaevandamisel on täiteaineks võimalik kasutada aherainet, mida tekib aastas 1.3 milj. m³ ning kogu kaevandamisperioodi jooksul 40 milj. m³.
4. Katendis olev argilliidi ja glaukoniitliivakivi säilitamine kaevandamisväärsena peale fosforiidi väljamist on teoreetiliselt võimalik kui kaeveõõned täidetakse. Kaevandamisel lae varistamisega tuleb argilliit ja glaukoniitliivakivi väljata samaaegselt fosforiidiga, sest hiljem ei ole see enam võimalik. Kamberkaevandamisel moodustab argilliit oma suurema tugevuse tõttu püsiva lae. Selle väljamisel tuleb väljata ka pudedam glaukoniitliivakivi, mis suurendab kaeveõõnte kõrgust ja vähendab tervikute püsivust. Kambrite laes olev argilliit hakkab aja jooksul õhu käes porsuma, samuti pole teada argilliidi pikaajaline püsivus kaeveõõnte täitumisel veega. Seetõttu on ka fosforiidi kamberkaevandamise korral argilliidi hilisemad kaevandamisvõimalused küsitavad.
5. Ka allmaakaevandamine avaldab olulist mõju põhjaveele. Kaevandamiseks tuleb alandada O-C liivakivides oleva põhjaveekihi survetase, mis tekitab survelanguse ulatuslikul alal. Lae varistamise puhul purunevad ka lasumis olevad kivimid ning moodustavad väga hästi vett juhtivad tsoonid. Paratamatult suureneb senini veepidemena toimunud savikamate kihtide veejuhtivus, mis tingib suurema vee juurdevoolu kaevandusse ning veetaseme alanemise lubjakivis. Kaevandamisel lae toestamisega lubjakivides olevat põhjavett otseselt ei pumbata, samuti säilivad lasumis olevad veepidemed. Kuid O-C veekihi survetaseme alandamisel tekivad suured vertikaalsuunalised gradiendid ning võib eeldada läbivoolu kasvu ning veetaseme alanemist ka lubjakividega seotud veekihi. Seega tekivad ka maa-aluse kaevandamise tulemusel täiesti uued hüdrogeoloogilised tingimused, mis võivad oluliselt mõjutada piirkonna veevarustust. Mõju lasumis olevale lubjakividega seotud veekihile on lae toestamisega kaevandamisel eeldatavalt väiksem.

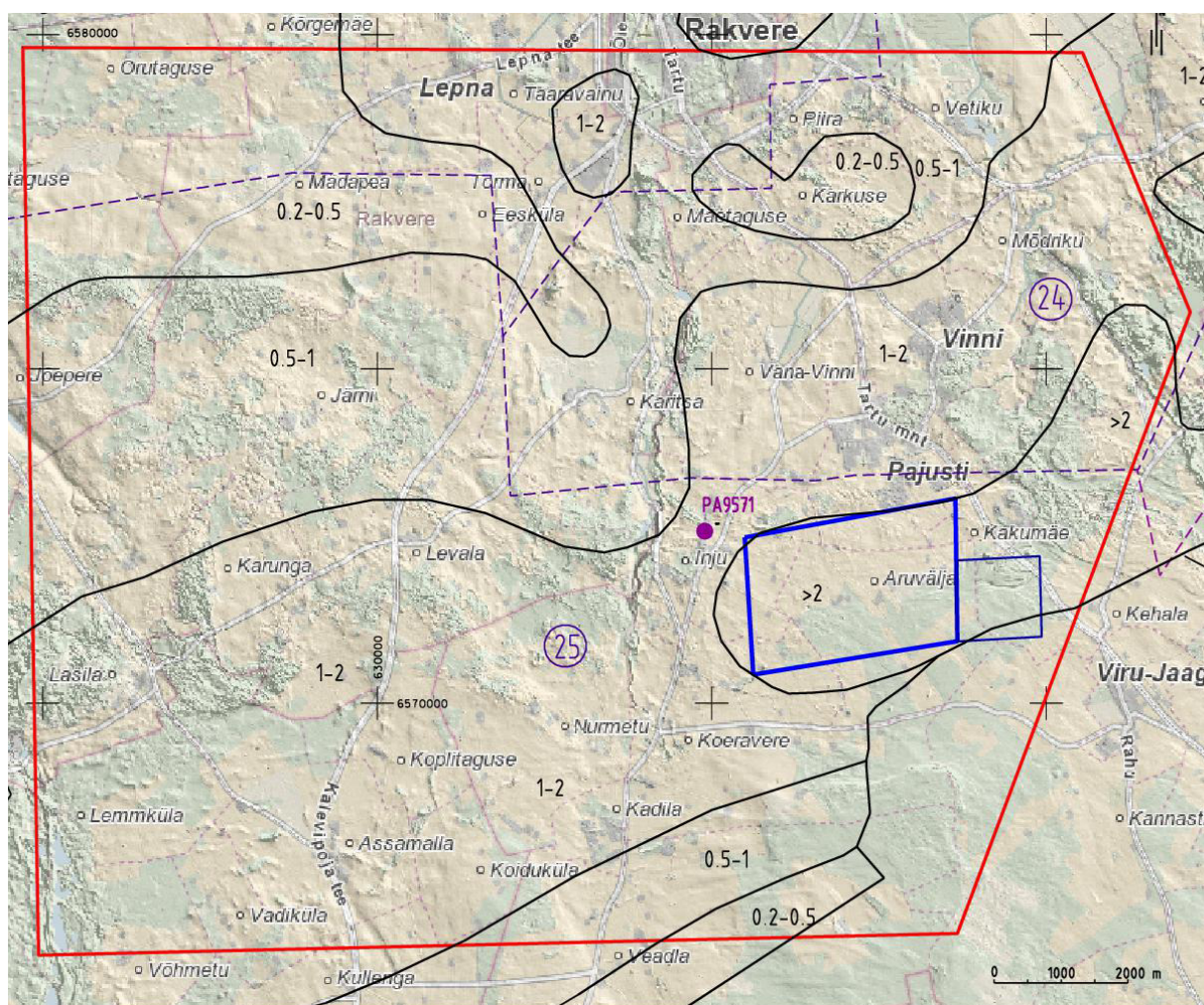
6. Kaevanduse kuivendamisel suureneb hapniku juurdepääs vahetus laes paiknevasse graptoliitargilliiti, mis põhjustab argilliidis oleva püriidi oksüdeerumist. Argilliidil puudub sisemine karbonaatne puhverdusvõime. Sellest tingituna käivitub selles sisalduva püriidi oksüdeerumisel keemiliste reaktsioonide jada, mille puhul moodustuv happeline vesi hakkab argilliidist välja leostama raskmetalle [18].
7. Mõju põhjavee koostisele avaldub maa-aluse kaevandamise puhul peamiselt kaevandamise järgsel ajal, kui kaeveõõned hakkavad veega täituma ning suureneb leostumine põhjavette. Täitematerjali kasutamisel võib muutuda täidetud kihi veejuhtivus ning leostuda põhjavette aineid, mis võivad mõjutada põhjavee koostist ning piirkonna hüdrogeoloogilisi tingimusi. Samuti võib kaeveõõnte veega täitumine põhjustada tervikute nõrgenemist.

5 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK2

5.1 ASUKOHT JA SUURUS

Virtuaalne kaevandus paigutati näidisala 2 lõunaosas, kus fosforiidi tootlikkus vastava kaardi [1] järgi on >2 t/m². Lisaks fosforiidi tootlikkusele arvestati kaevanduse asukohta valikul keskkonnakaitselisi ja muid piiranguid.

Kaevanduse pindala on 6.5 km², abiala ligikaudse pindalaga 1.5 km² paikneb kaevandusest idas, piirkonnas, kus fosforiit tellija poolt koostatud rajoneerimise kaardi järgi tõenäoliselt puudub. Virtuaalse kaevanduse asukoht on näidatud *Joonisel 10*. Kaevanduse põhjapoolses osas paiknevad põllumajandusmaad, lõunapoolses osas metsamaad.



- Näidisala kontuur
- Virtuaalse kaevanduse kontuur
- Virtuaalse kaevanduse abiala kontuur
- PA9571 Puurauk ja tähis
- 0.2-0.5 Fosforiidikihi tootlikkuse t/m² ja tootlikkuse ruumiline jaotus [1]
- 25 Ploki nr ja piir (Maardla registrikaart 192)

Joonis 10. Virtuaalse kaevanduse VK2 paiknemine. (Aluskaart: Maa-amet)

5.2 MÄENDUSLIK ISELOOMUSTUS

Virtuaalne kaevandus VK 2 paikneb Pandivere kõrgustiku lael. Pinnamood on üsana tasane ning maapinna absoluutkõrgused jäävad vahemikku 105...117 m. Õhukese pinnakattega kõrgustiku võlv on klassikaline karstipiirkond, kus peaaegu kogu sademevesi neeldub paelausundi lõhedesse, moodustamata pindmisi äravoolusänge püsivama ojade-jõgede võrgu näol [16].

Pudeda katendi moodustavad kvaternaarisetted, mille paksus on enamasti kuni 6 m.

Kivimkatendi moodustavad karbonaatkivimid ning glaukoniitliivakivi. Katendis esineb ka põlevkivi, mis käesoleval ajal ei ole maavarana perspektiivne. Karbonaatkivimite paksus jääb vahemikku 120...135 m. Glaukoniitliivakivi paksus on umbes 2 m.

Katendi kogupaksus on 130-145 m.

Tootsaks kihiks on fosforiidilasund, mille moodustavad Alam-Ordoviitsiumi ladestiku Pakerordi lademe Kallavere kihistu fosforiit-liivakivi ning kvartslivakivi fosfaatse detriidiga [13]. Tootsa kihi paksus puurangu 9571 ja tellijalt saadud geoloogilise lõike järgi on 7 m ja rohkem, P₂O₅ sisaldus 9...15%, tootlikkus >2 t/m².

Tootsa kihi pealispind lasub absoluutkõrgustel -30...-20 m, kihi pind langeb lõunasse, aluspõhja üldise kallakuse suunas. Tootsa kihi väljatav kogus on kokku umbes 64 milj. t ehk 2.1 t/aastas. Väljatav kogumaht on umbes 32 milj. m³.

Aherainet tekib 1 tonni kontsentradi kohta umbes 1.2 tonni. Mahuühikutes puistena on aastane aheraine kogus 0.7 milj. m³ ning kogu kaevandamisperioodi jooksul tekib aherainet 22 milj m³. Arvutuses võeti puiste mahumassiks 1.6 t/m³.

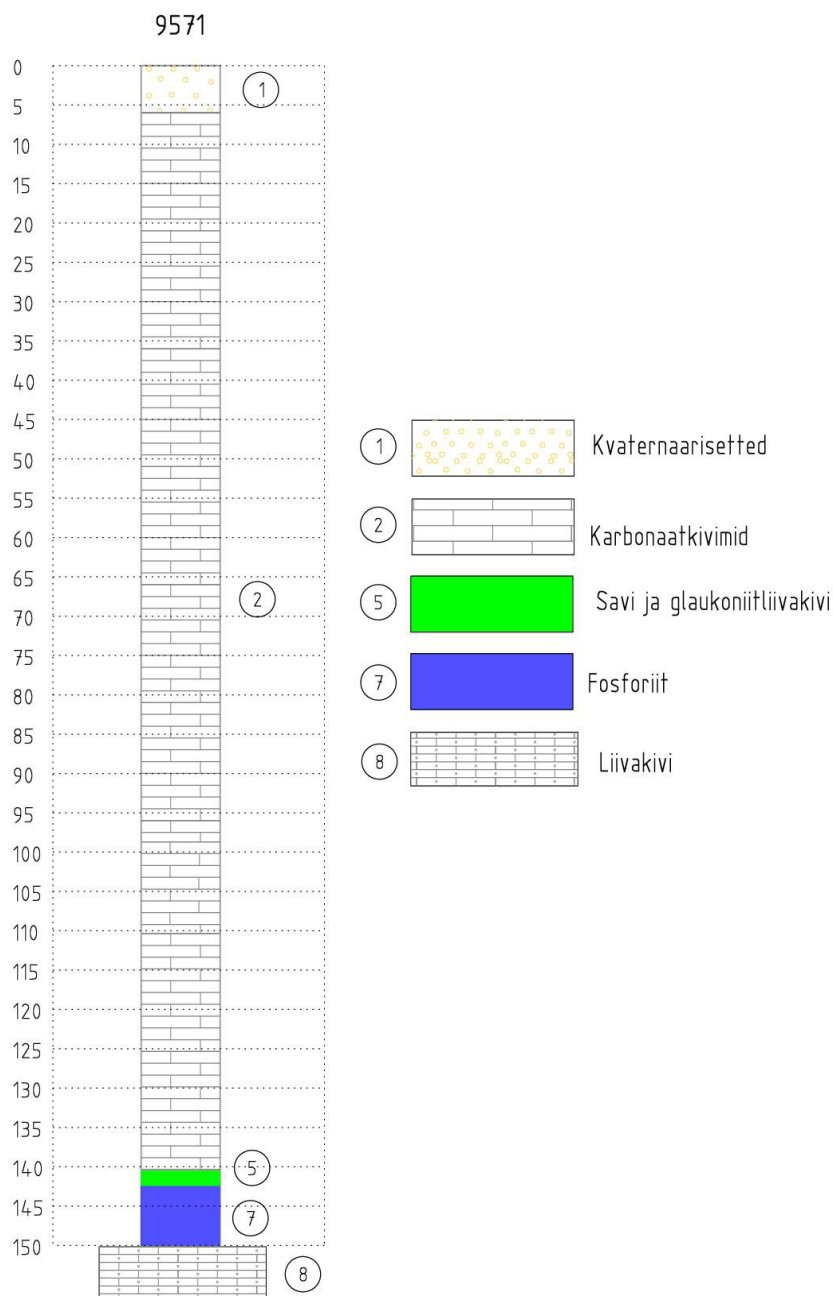
Aluskihiks ehk lamamiks on Tiskre kihistu liivakivi või aleuroliit.

Katendi paksus kaevanduse VK2 alal ületab 100 m, seega on ainuke kaevandamismoodus allmaakaevandamine. Allmaakaevandamise võimalusi on analüüsitud peatükis 5.4.

5.3 GEOTEHNILINE MUDEL

Virtuaalne kaevandus VK 2 paikneb Pandivere kõrgustiku lael. Pinnamood on üsna tasane ning maapinna absoluutkõrgused jäävad vahemikku 105...117 m. Õhukese pinnakattega kõrgustiku võlv on klassikaline karstipiirkond, kus peaaegu kogu sademevesi neeldub päelausundi lõhedesse, moodustamata pindmisi äravoolusänge püsivama ojade-jõgedevõrgu näol [16].

Kaevandusala geotehniline mudel koosneb viiest kihist. Kihtide paksused, pealispinna lasumissügavused ja mäenduslikud kategooriad puuraugu 9571 näitel on toodud *Tabelis 5*, läbilõige *Joonisel 11*.



Joonis 11. Läbilõige puuraugu 9571 asukohas. (skaalal sügavus meetrites)

Tabel 5. VK2 geotehnilised kihid

Kategooria		Geotehniline kiht ja nr		Paksus, m (PA 9571)	Lasumis-sügavus, m
Pinnaskatend		Kvaternaarisetted	1	6.0	142.4
Kivimkatend	Põhilagi	Karbonaatkivimid	2	134.5	
	Vahetuliagi	Glaukoniitliivakivi	5	1.9	
Tootus kiht		Fosforiit	7	7.5	149.9
Aluskiht		Liivakivi/aleuoliit	8		

5.4 MAA-ALUSE KAEVANDAMISE VÕIMALUSTE GEOTEHNILINE ANALÜÜS

Alljärgnevad FEM mudelid ja arvutused ei ole tehtud eesmärgiga projekteerida maa-alust kaevandust. See tähendab, et ei olegi üritatud kaeveõonte mõõtmeid ja kuju optimeerida, ei ole arvestatud tervikute mõõtmete kahanemist seinte purunemise tõttu jne. Arvutuste eesmärgiks oli demonstreerida erineva suurusega kaeveõonte rajamisega kaasnevat ja näidata tendentse, mis kaasnevad kaeveõonte mõõtmete ja sügavuse muutumisega. Mudelitega illustreeritakse, mis hetkel muutuvad deformatsioonid kaeveõonte ümber lineaarsest mittelineaarseks ehk purunemise järgseks. Siinjuures on selge, et lineaarse mudeliga ei saa täpselt iseloomustada mittelineaarset protsessi ehk purunemisjärgseid deformatsioone. Samuti demonstreeritakse seinte ja lae purunemist nihke- ja tõmbepingete tagajärjel ning purustatud kivimitsooni kõrgust lae kohal peale lae varingut.

5.4.1 8 m kõrgused kaeved 137 sügavuses

Reaalselt on tootliku kihi paksuseks VK2 alal kuni 8 m (ptk 5.2). FEM mudeliga on analüüsitud järgmised olukorrad:

- lõpmatu pikkusega 8 m kõrge ja 10 m lai kaeveõõs, vastab tinglikult transpordi tarbeks rajatud käigule või laava-kaevandamise alustamiseks rajatud käigule;
- 2 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikuga nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (1/3 tervikuid) aga ka olukorda kus kaevandusvälja läbib 2 paralleelset käiku;
- 3 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikutega nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (2/5 tervikuid);
- lõpmata pikkusega 8 m kõrge ja 30 m lai kaeveõõs, mis vastab tinglikult laavakaevandamise algfaasile ning modelleerib lae varingu mõju kõrguses ning mõju laavakõrval olevate käikude stabiilsusele;

- lõpmata pikkusega 8 m kõrge ja 50 m lai kaeveõõs.

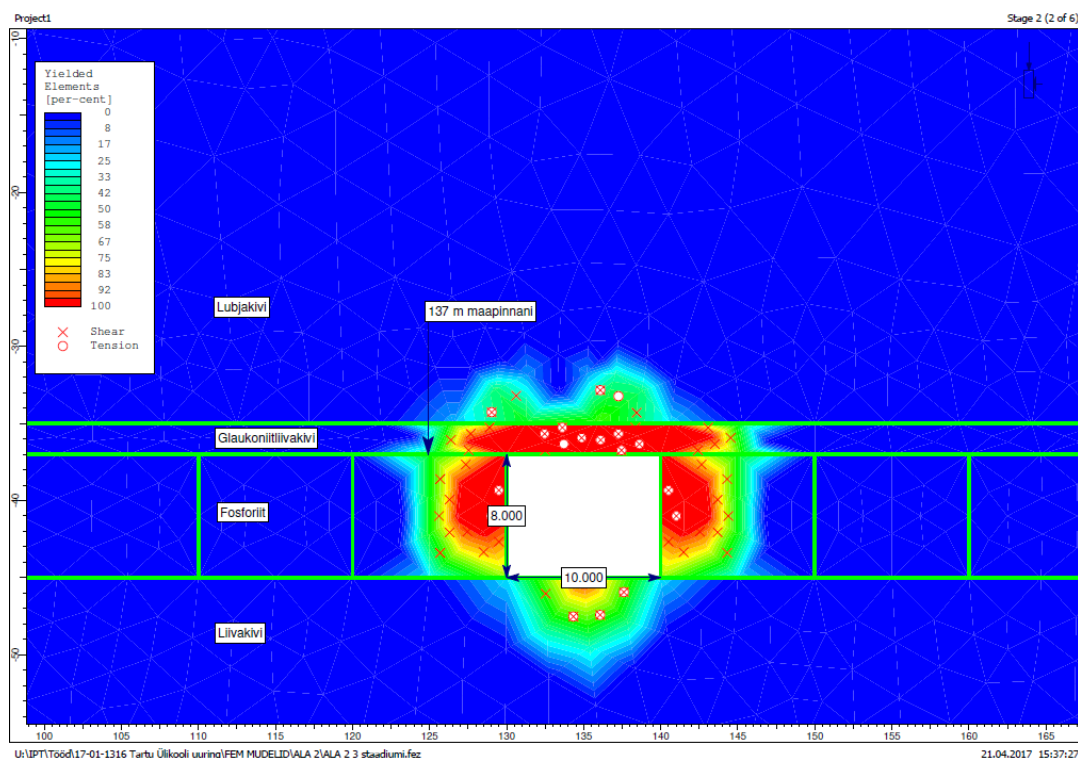
FEM mudelite väljund on esitatud Joonistel 12.1...12.8.

Tõenäoliselt ei saa kogu tootvat kihti läbivat 8 m kõrgust kaeveõõnt ca 140 m sügavusele projekteerida. Seinad purunevad kuni 7 m laiuses tsoonis kaeveõõne kõrval, puruneb ka lagi, kuna toetavat argilliidi kihti VK2 alal ei ole. Kahe kõrvuti asetseva kaeveõõne korral on näha, et puruneb kogu 10 m laiune tervik. Deformatsioonide suurus kaeveõõne ümber on >10 cm nii laes kui seintel, mis on selge viide purunemisjärgsetele deformatsioonidele.

Juhul kui siiski õnnestub toetamisega ja kaeveõõne kuju optimeerides rajada pikad kaeveõõnsused laavakaevandamise ette valmistamiseks, siis 30 m laiuse laava korral ulatub purustatud kivimi tsoon 25...30 m kaevanduse laest kõrgemale ja 50 m laiuse laava korral 45...50 m kaevanduse laest kõrgemale. 100 m laiema laava korral võib purunenud kivimi tsoon ulatuda maapinnale.

VK1 alal tehtud FEM simulatsiooni kohaselt on kaeveõõnte seinade purunemise ulatus väiksem madalama kaeveõõne korral. Kaeveõõnte mõõtmete (laius, kõrgus) muutmise mõju lae ja seinte purunemisele on modelleeritud detailsemalt VK3 alal (ptk 6.3). Seal kirjeldatud seaduspärasused kehtivad ka VK2 alale.

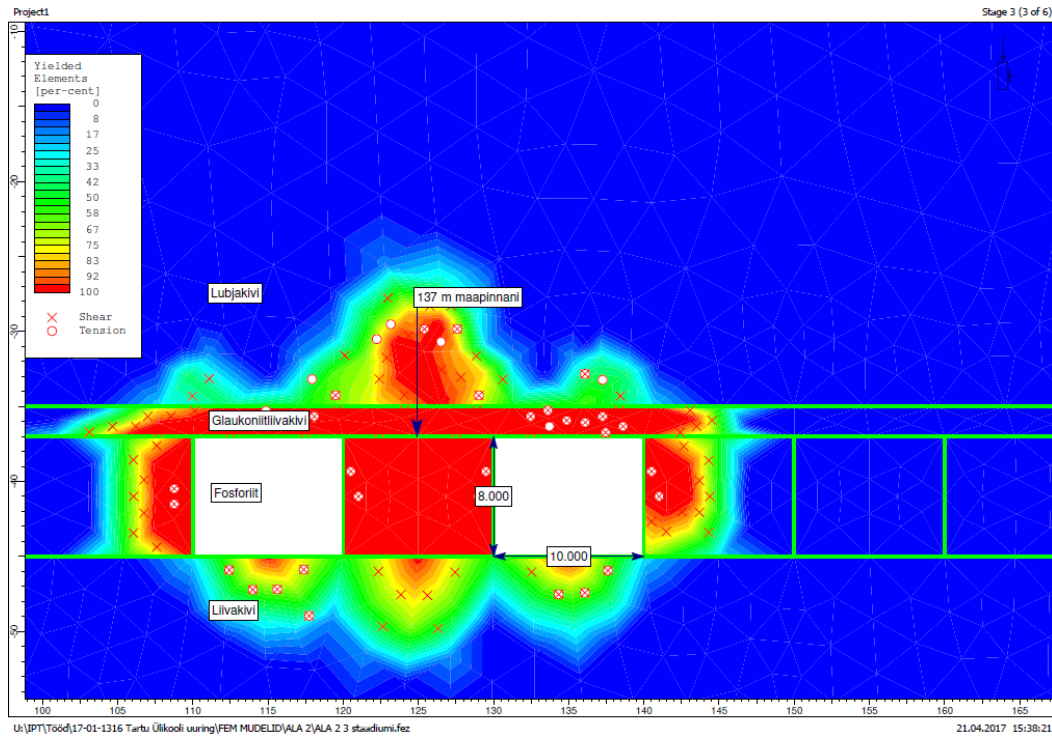
Igasugune detailsem arvutus vajab informatsiooni kivikihtide tugevusest konkreetses asukohas.



Joonis 12.1 Virtuaalne kaevandus VK2

8 m kõrgune ja 10 m laiune kaeveõõs 137 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

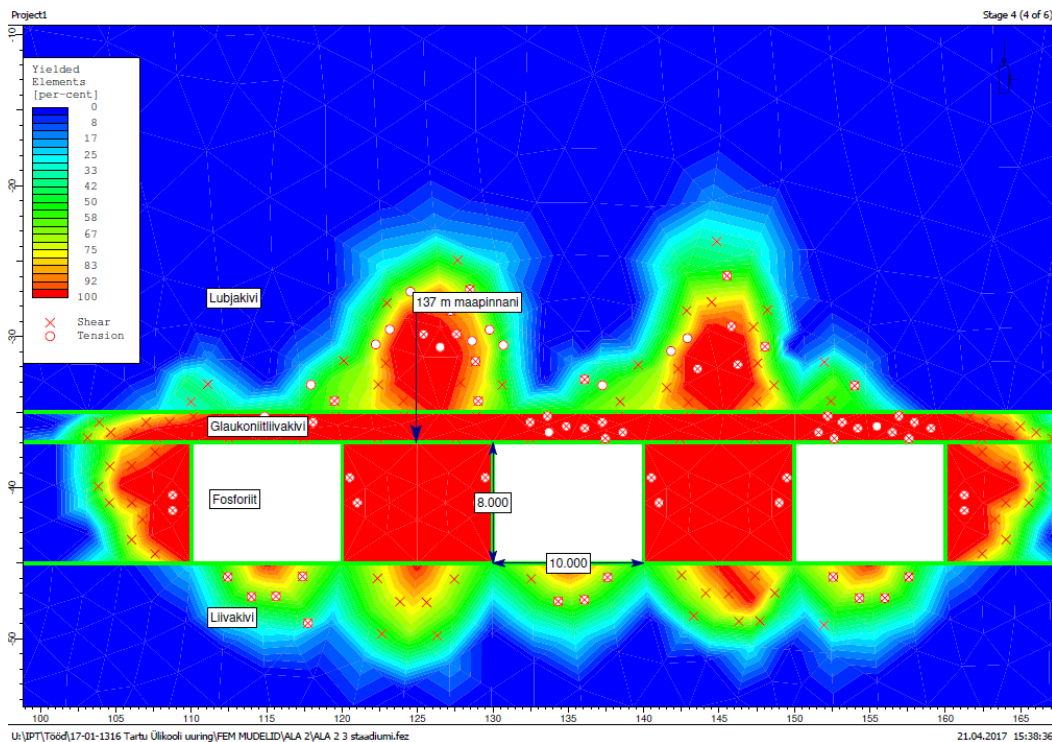
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni ca 7 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbe pingete poolt. Lagi on alla kukkunud.



Joonis 12.2 Virtuaalne kaevandus VK2

Kaks 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 137 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti)..

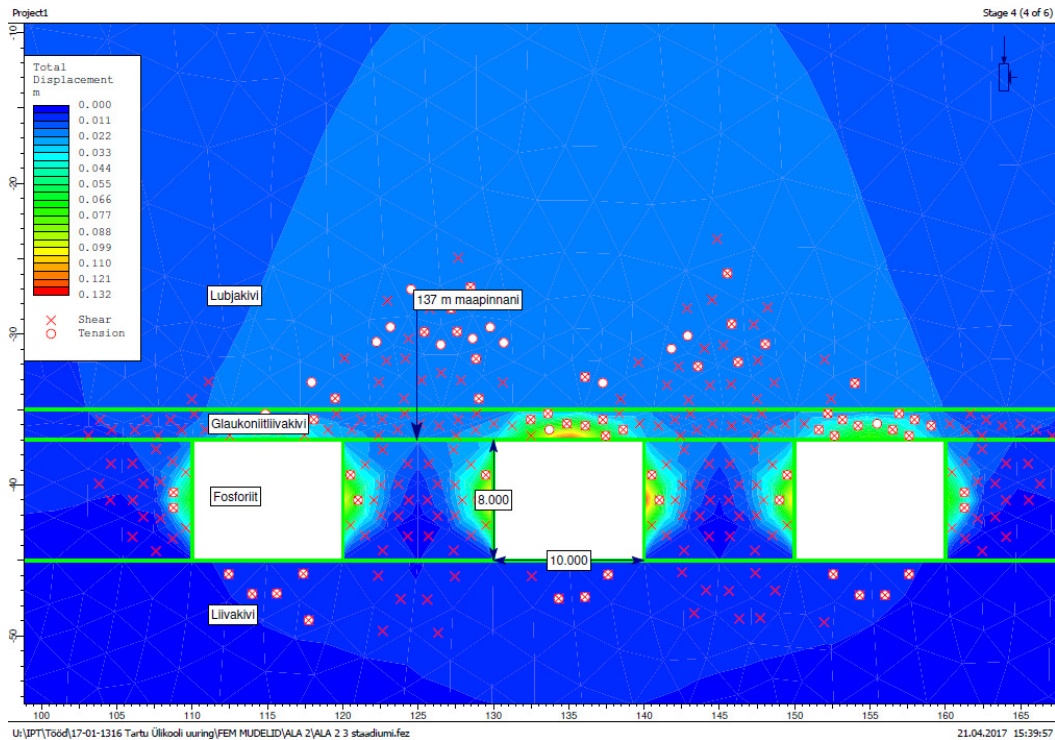
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 7 m laiuselt lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lagi on alla kukkunud. Toestav tervik on täies ulatuses purustatud.



Joonis 12.3 Virtuaalne kaevandus VK2

Kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 137 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

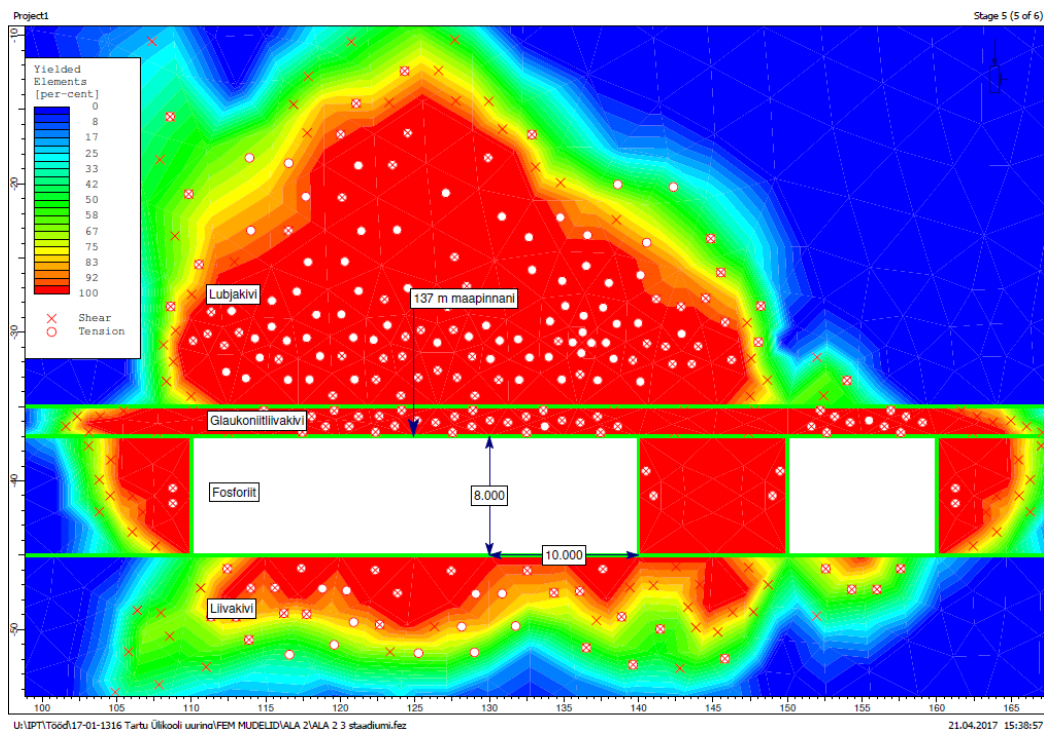
Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 8 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. Toestavad tervikud on purustatud täies ulatuses.



Joonis 12.4 Virtuaalne kaevandus VK2

Kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõnt 137 m sügavusel (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

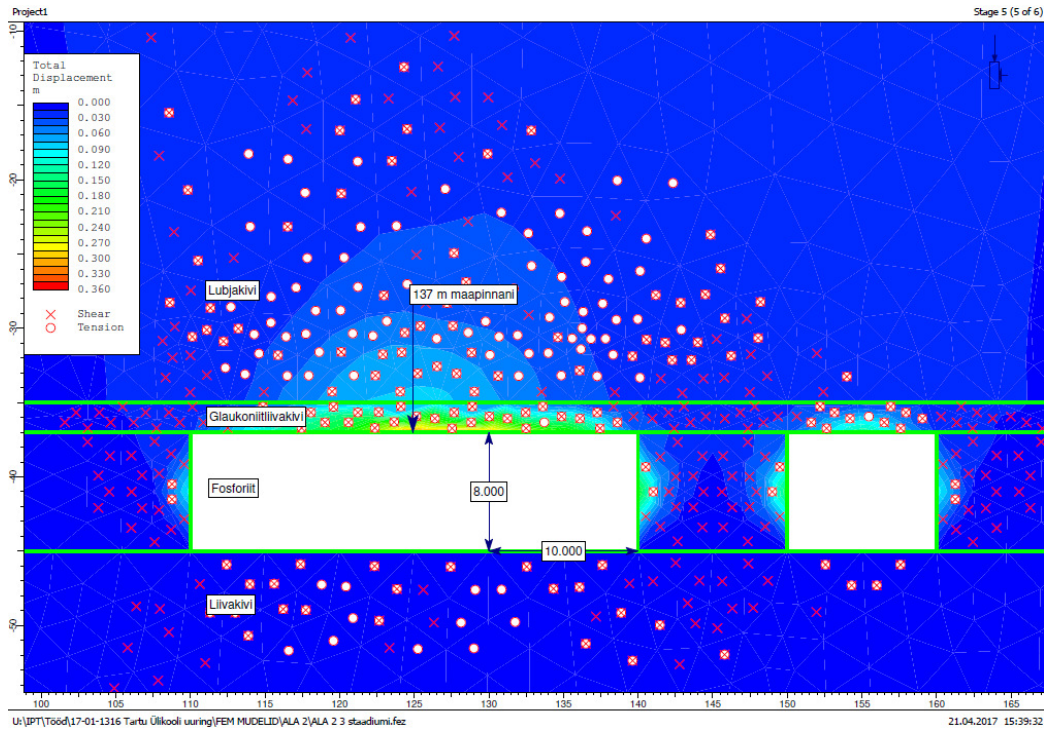
Deformatsioonid on kuni 13 cm ning on suurimad seinte ja lae keskosas. Deformatsioonide suurus vastab purunemisele. Põranda moodustab osaliselt purustatud nõrga tsementeeritusega liivakivi, tervikud on kogu mahus purunenud.



Joonis 12.5 Virtuaalne kaevandus VK2

8 m kõrgune ja 30 m laiune kaeveõõs 137 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 10 m laiusest. Samuti on purunenud kõrval asuv 5 x 10 m kaeveõõs ja selle lagi.



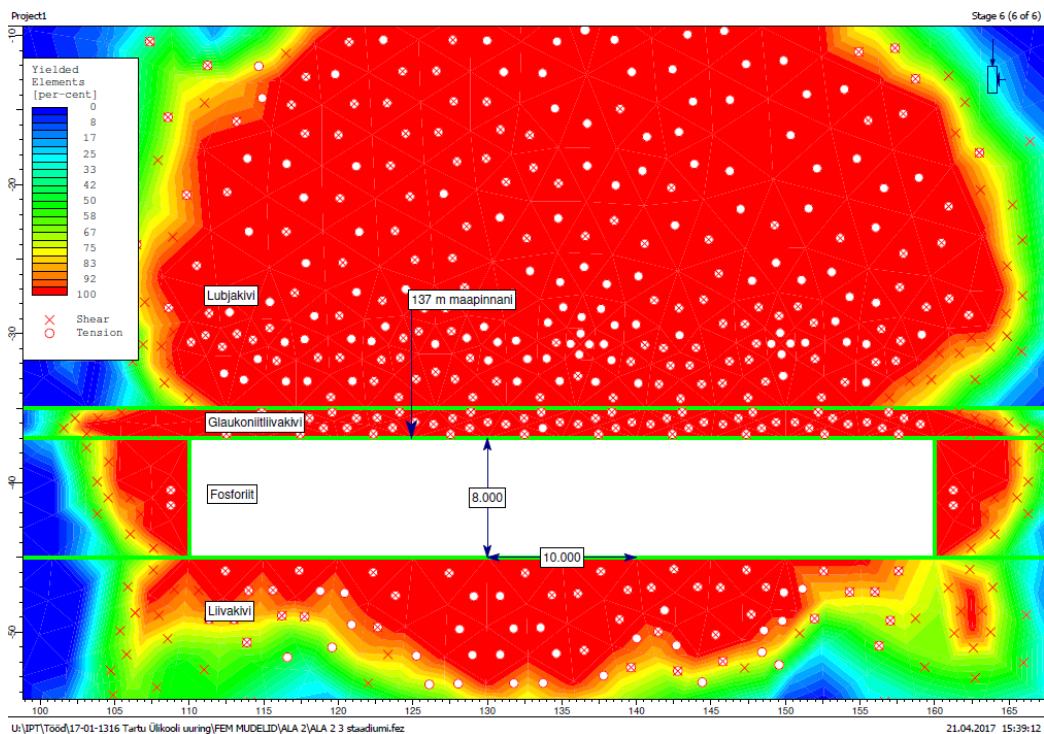
U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\ALA 2\ALA 2 3 staadiumi.fem

21.04.2017 15:39:32

Joonis 12.6 Virtuaalne kaevandus VK2

8 m kõrgune ja 30 m laiune kaeveõõs 137 m sügavusel (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Deformatsioonid on laia avause kohal kuni 36 cm ehk selgelt mittelineaarsed ja põhjustatud lae purunemisest. Lagi kukub sisse. Kivim on purunenud tõmbepingete tõttu suures kõrguses lae kohal. Purunenud on ka kõrval asuv kaeveõõs ja tervik.



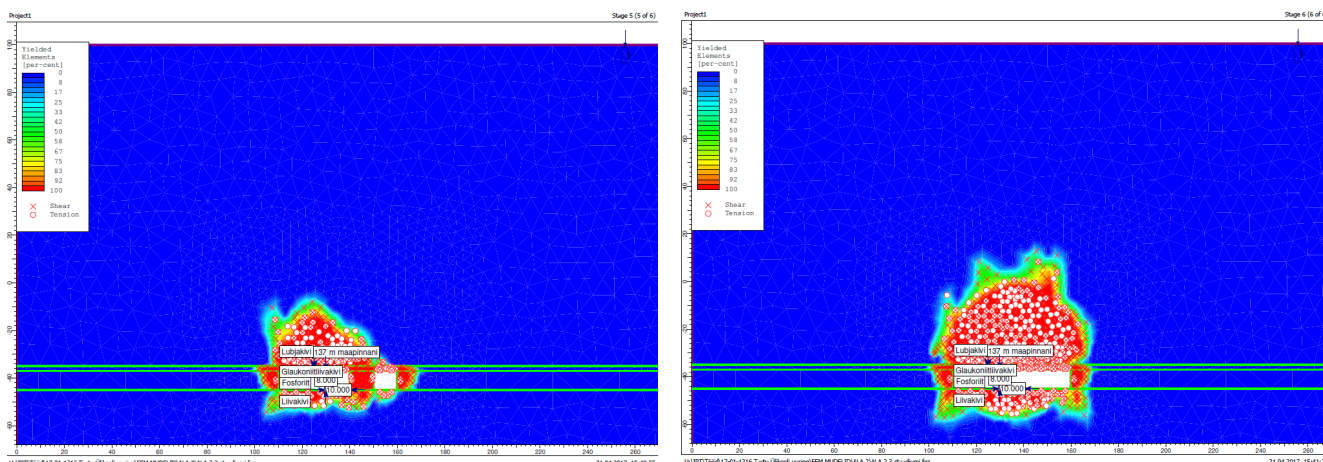
U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\ALA 2\ALA 2 3 staadiumi.fem

21.04.2017 15:39:12

Joonis 12.7 Virtuaalne kaevandus VK2

5 m kõrgune ja 50 m laiune kaeveõõs 137 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni 10 m laiselt.



Joonis 12.8 Virtuaalne kaevandus VK2

30 m laiune ja 50 m laiune kaeveõõs 137 m sügavusel (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Lae purunemisega kaasnev purunenud kivimi tsoon ulatub 30 m laiuse korral 25-30 m kõrgusele ja 50 m laiuse korral 45-50 m kõrgusele kaeveõõne kohal.

5.5 KASUTATAVAD KAEVANDAMISVIISID JA NENDE MÕJU

Allmaakaevandamisel tuleb valida kaevandamisviis, mis tagab maapinna pikaajalise stabiilsuse. Lae toetamiseks jäetakse tervikud, lagi varistatakse või täidetakse kaeveõõned langatuste vältimiseks.

Kamberkaevandamisel jääb osa maavara väljamata tervikute jätmise tõttu. Virtuaalse kaevanduse pindala leiti tingliku tervikute mahu 30% juures. Arvutatud sügavuses (137 m) lae toetamiseks vajalike tervikute maht ulatub 80-90%-ni fosforiidi mahust, mistõttu kasvab vastavalt kaevanduse pindala maa-aluses osas.

Lisaks tuleb arvestada, et selles sügavuses eeldab igasuguse kaeveõõne rajamine fosforiidilasundisse toetamist, puruneva kivimimassiivi ulatus kaeveõõne ümber on suur. Fosforiiti sisaldav kiht on VK2 alal eeldatavalt keskmiselt 8 m paksune. 8 m kõrguse kaeveõõne korral puruneb kivim kaeveõõnte ümbruses 140 m sügavusel kuni 3 korda kaugemale võrreldes sügavusega ca 40 m (vastavalt ca 2,5 m ja ca 7 m kaeveõõne seinast). Nii kõrge kaeveõõne rajamine ilma lisa toetuseta on praktiliselt võimatu. Tuleb vähendada kaeveõõne kõrgust väljates ainult fosforiidilasundi tootlikuma osa või kasutada toestust.

Arvestades tervikute suurt mahtu ja nende toetamisvajadust ei ole kamberkaevandamine virtuaalses kaevanduses VK2 otstarbekas.

Kaevandamisel lae varistamisega puruneb mäemassiiv langatuse kohal. Arvutustulemusi ekstrapoleerides saab eeldada, et alates ca 100 m laiusest laavast võib purustatud tsoon ulatuda maapinnani. Ka maapind ise vajub, seda peamiselt vahetat kaeveõõnt täitva alla kukkunud koheva materjali tihenemise arvel. Kui laava laius jääb alla 100 m, siis eeldatavalt moodustub laava kohale võlv ning maapinnani langatuse mõju ei ulatu.

Seega alla 100 m laiuste laavade puhul on ehk võimalik kaevandada ilma märkimisväärsete maapinna vajumisteta. Siiski on sellel kaevandamisviisil oluline mõju põhjaveele, kuna toimub

ulatuslik katendi purunemine ning veekihte eraldavad veepidemed hävivad. Samuti tuleb tekkivale aherainele, mida moodustub puistena umbes 22 milj. m³, leida ladestuskoht või kasutus.

Kaevandamisel kaeveõõnte täitmisega toetatakse kaevanduse opereerimiseks vajalikud käigud. Väljaveo ja tuulutuskäigud võib rajada ka tugevemasse liivakivisse fosforiidikihtide all, ning ilmselt vajavad ka need toetamist. Kaevandamine ise saaks toimuda kitsaste (kuni 5? m laiuste) käikudena, mis rajatakse püsikäikude vahele 90° nurga all, sarnaselt laavakaevandamisele. Erinevuseks on, et kaevandamise käigud tuleb rajada üksteisest küllaldaselt kaugemale, et vältida tervikute ja lae purunemist ning täita koheselt. Alles peale täitematerjali tardumist saab kaevandada täidetud kaevandamiskäikude vahel, seda sarnaselt eelpool kirjeldatule – kitsa käiguna ja tagasitäitega. Selliselt võib, sõltuvalt esialgse terviku vajalikule suurusele, kaevandamine toimuda mitme tsükliga. Ilmselt tuleb kaevandada korrustena – kaeveõõne mõõtmete mõju tervikute, lagede ja seinte püsivusele on analüüsitud detailsemalt VK3 juures. Korrustena kaevandamisel tuleks alustata alumisest korrusest.

Täitmisega kaevandamisel on täiteaineks võimalik kasutada aherainet, mida puistena tekib aastas umbes 0.7 milj. m³ ning kogu kaevandamisperioodi jooksul umbes 22 milj m³. Tootsa kihi maht on umbes 32 milj. m³, seega saab aherainega täita suurema osa kaeveõõntest ning puuduv täitematerjal tuleb kusagilt juurde tuua (näiteks põlevkivituhk). Seejuures tuleb tagada, et täitematerjalist ei leostuks põhjavette ebasoovitavaid aineid.

Sõltumata kaevandamisviisist tuleb alandada O-C liivakivides oleva põhjaveekihi survetase, mis tekitab surveelanguse ulatuslikul alal. Mõju ülemisele lubjakividega seotud veekihile sõltub konkreetsest kaevandamisviisist ja veepidemete omadustest, kuid arvestades tekkivat suurt vertikaalsuunalist gradienti, võib survetaseme langus igal juhul oluliselt mõjutada ka lasuvaid veekihte.

Virtuaalse kaevanduse VK2 puhul on olemasolevate andmete põhjal kaevanduse stabiilsuse osas soovitatav kaevandamisviis täitmisega kaevandamine.

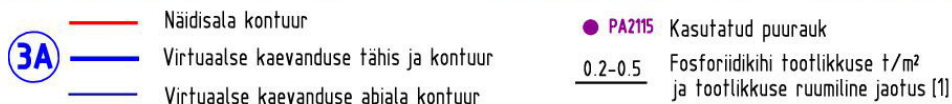
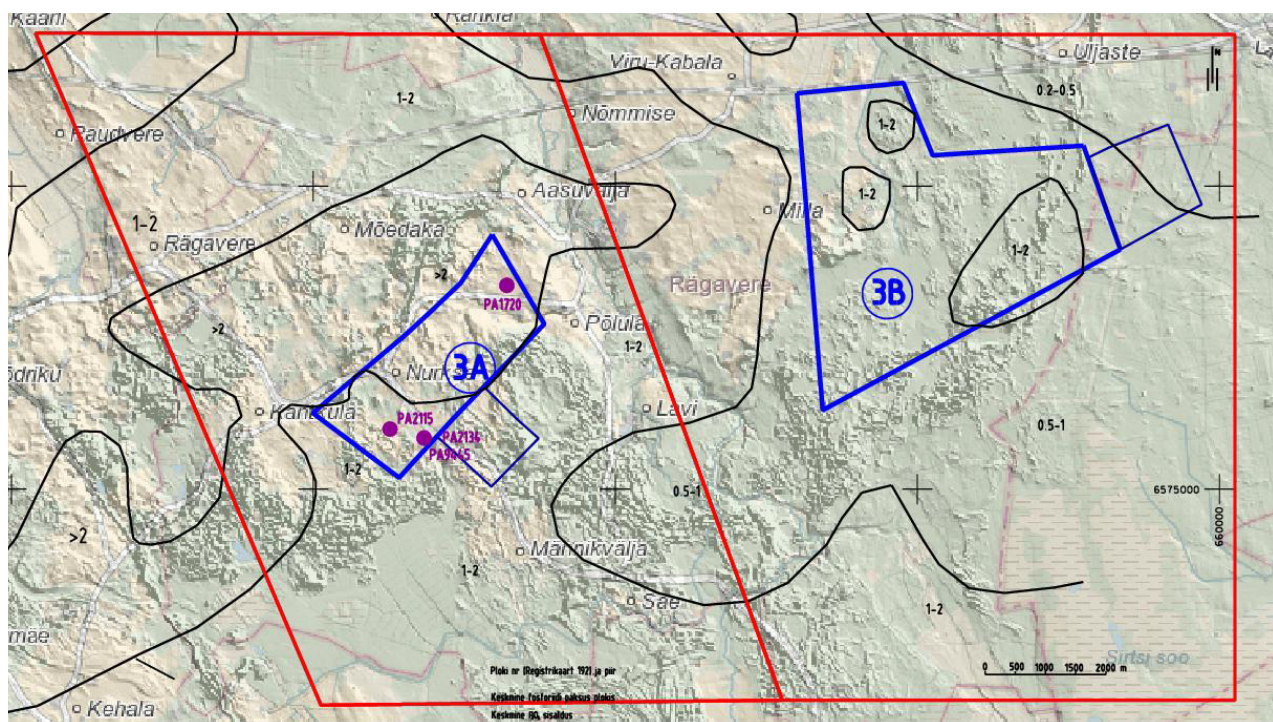
6 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK3

6.1 ASUKOHT JA SUURUS

Kolmas nädisala koosneb kahest osast, 3A asub Pandivere kõrgustiku kirdenõlval ning 3B jääb Kirde-Eesti lavamaale. Mõlemale alale paigutati virtuaalsed kaevandused. Kaevandus 3A jääb nädisala keskossa, ning 3B vastava nädisala põhjapoolsesse ossa. Kaevanduse asukoha valikul lähtuti fosforiidi tootlikkusest, arvestati ka keskkonnakaitselisi ja muid piiranguid.

Kaevanduse VK3A pindala on umbes 7 km², abiala suurusega umbes 1.5 km² paikneb kaevandusest kagus. Kaevanduse VK3B pindala on 17 km², abiala suurusega umbes 1.5 km² paikneb kaevandusest idas. Virtuaalsete kaevanduste asukohad on näidatud *Joonisel 13*.

Kaevanduse VK3A asukohas valdavad põllumaad ja kaevanduse VK3B asukohas metsamaad.



Joonis 13. Virtuaalsete kaevanduste VK3A ja VK3B paiknemine. (Aluskaart: Maa-amet)

6.2 MÄENDUSLIK ISELOOMUSTUS

Virtuaalse kaevanduse VK3A piirkonnas jäävad maapinna absoluutkõrgused vahemikku 80...90 m, VK3B piirkonnas valdavalt 70 m, kuid kaevanduse idaosas Uljaste oosisüsteemi ja mõhnade piirkonnas kuni 85 m.

Pudeda katendi moodustavad kvaternaarisetted, mille paksus on enamasti 5...6 m, liustiku vooluvetest tekkinud pinnavormide piirkonnas suurem.

Kivimkatendi moodustavad karbonaatkivimid ning glaukoniitliivakivi ja savi. Katendis on kaasneva maavarna põlevkivi. VK3A alale jäävad Kabala uuringuvälja passiivse tarbevaru plokid (*Joonis 14*), kus põlevkivi paikneb maapinnast 35...65 m sügavusel, kihi paksus on umbes 1.6...1.7 m. VK3B alale jäävad Sonda uuringuvälja passiivse ja aktiivse tarbevaru plokid (*Joonis 14*), kus põlevkivi paikneb maapinnast 25-40 m sügavusel, põlevkivi paksus on umbes 1.8 m.

Põlevkivi lamamis olevate karbonaatkivimite paksus on umbes 30 m, lubiliivakivide, savi ja glaukoniitliivakivi paksus on umbes 1.5 m.

Fosforiidi katendi kogupaksus on kaevandusalal VK3A 70...100 m ja kaevandusalal VK3B 50...90 m.

Tootsaks kihiks on fosforiidilasund, mille moodustavad Alam-Ordoviitsiumi ladestiku Pakerordi lademe Kallavere kihistu fosforiit-liivakivi ning kvartslivakivi fosfaatse detriidiga [13]. Tootsa keskmine paksus on kaevandusalal VK3A maardla registrikaardi 192 järgi umbes 7.5 m ning P₂O₅ sisaldus 13...17%. VK3B alal on fosforiidi paksus 3...5 m ning P₂O₅ sisaldus 9...15%, kohati 6...9% [1].

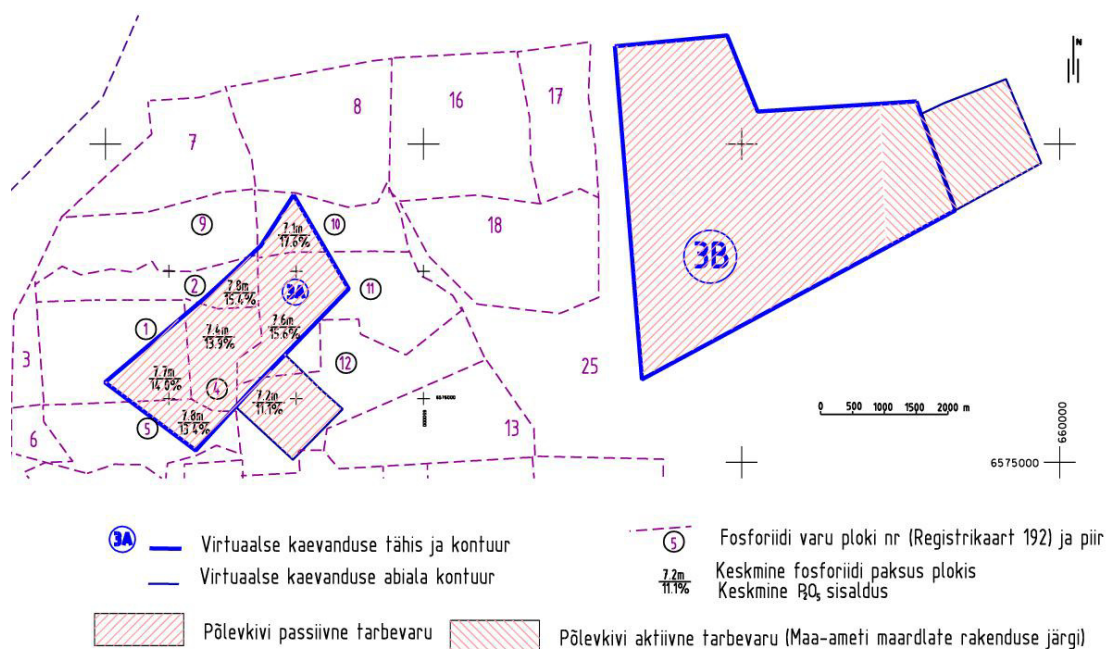
Tootsa kihi pealispind lasub kaevandusalal VK3A absoluutkõrgustel -5...-15 m ning kaevandusalal VK3B 10...-10 m, kihi pind langeb lõunasse, aluspõhja üldise kallakuse suunas.

Aherainet tekib kaevandusalal VK3A 1 tonni kontsentradi kohta umbes 1.1 tonni, 30 aasta jooksul umbes 33 milj. tonni. Mahuühikutes on aastane aheraine kogus puistena umbes 0.7 milj. m³ ning kogu kaevandamisperioodi jooksul tekib aherainet umbes 21 milj m³. Arvutuses võeti puiste mahumassiks 1.6 t/m³. Tootsa kihi väljatav maht on aastas umbes 1.1 milj. m³, kokku 30 aasta jooksul umbes 32 milj. m³.

VK3B kaevandusala kohta puuduvad detailsemad andmed, arvutus tehti tingliku fosforiidi paksuse 4 m ja P₂O₅ sisalduse 10% juures. Aherainet tekib kaevandusalal VK3B 1 tonni kontsentradi kohta umbes 2.1 tonni. Puistena kogu kaevandamisperioodi jooksul umbes 40 milj. m³.

Aluskihiks ehk lamamiks on Tiskre kihistu liivakivi või aleuroliit.

Katendi paksuse järgi on kaevanduse VK3A alal fosforiidi kui ka põlevkivi kaevandamismooduseks allmaakaevandamine. Kaevanduse VK3B alal on põlevkivi katendi paksus 25...40 m, mis võimaldab põlevkivi osaliselt maapealset kaevandamist. Fosforiidi lasumissügavus võimaldab ainult maa-alust kaevandamist. Allmaakaevandamise võimalusi on analüüsitud peatükis 6.4.



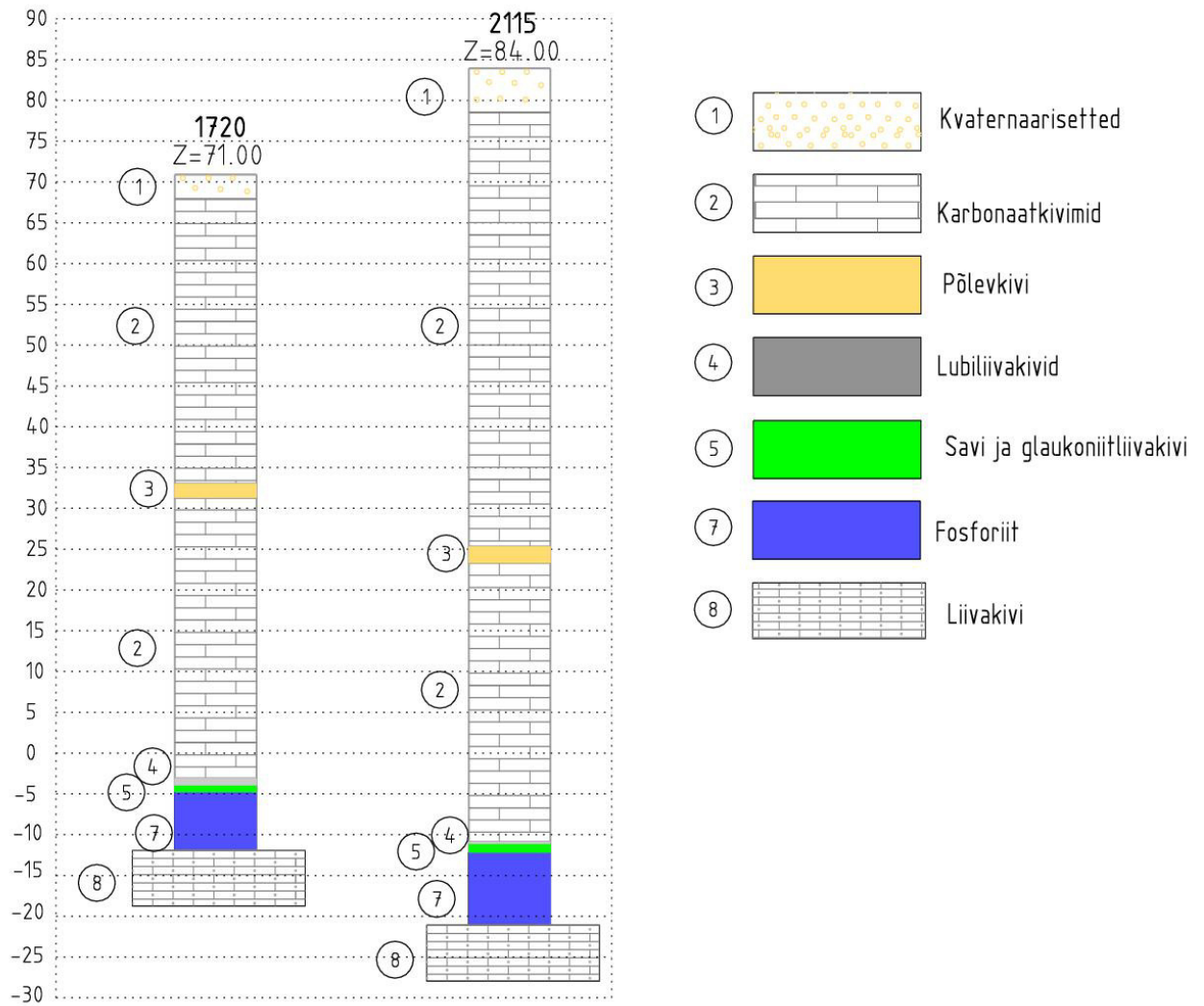
Joonis 14. VK3 mäenduslik iseloomustus

6.3 GEOTEHNILINE MUDEL

Geotehniline mudel on koostatud virtuaalse kaevanduse VK3A kohta. Mudel koosneb seitsmest kihist. Kihtide paksused, pealispinna lasumissügavused ja mäenduslikud kategooriad puuraukude (PA 2134/9445) näitel on toodud Tabelis 6, läbilõige puuraukude 1720 ja 2115 põhjal Joonisel 15, puuraukude asukohad on näidatud Joonisel 13.

Tabel 6. VK3A geotehnilised kihid

Kategooria		Geotehniline kiht ja nr		Paksus, m (PA 2134/9445)	Lasumis- sügavus, m
Pude katend		Kvaternaarisetted	1	7.8	61.9
Kivimkatend	Põhilagi	Karbonaatkivimid	2	54.1	
	Vahetu lagi				
	Tootus kiht	Põlevkivi	3	2.4	64.3
	Põhilagi	Karbonaatkivimid	2	32.8	98.6
Vahetu lagi	Lubliivakivi	4	0.7		
	Savi ja glaukonitliivakivi	5	0.8		
Tootus kiht		Fosforiit	7	9.3	107.9
Aluskiht		Liivakivi/aleuoliit	8		



Joonis 15. VK3A Läbilõige puuraukude 1720 ja 2115 asukohas

6.4 MAA-ALUSE KAEVANDAMISE VÕIMALUSTE GEOTEHNILINE ANALÜÜS

Geotehiline analüüs on tehtud virtuaalse kaevanduse VK3A kohta, tulemusi saab kasutada ka virtuaalse kaevanduse VK3B puhul. Koostatud FEM mudelid ja arvutused ei ole tehtud eesmärgiga projekteerida maa-alust kaevandust. See tähendab, et ei olegi üritatud kaeveõnte mõõtmeid ja kuju optimeerida, ei ole arvestatud tervikute mõõtmete kahanemist seinte purunemise tõttu jne. Arvutuste eesmärgiks oli demonstreerida erineva suurusega kaeveõnte rajamisega kaasnevat ja näidata tendentse, mis kaasnevad kaeveõnte mõõtmete ja sügavuse muutumisega. Mudelitega illustreeritakse, mis hetkel muutuvad deformatsioonid kaeveõnte ümber lineaarsest mittelineaarseks ehk purunemise järgseks. Siinjuures on selge, et lineaarse mudeliga ei saa täpselt iseloomustada mittelineaarset protsessi ehk purunemisjärgseid deformatsioone. Samuti demonstreeritakse seinte ja lae purunemist nihke- ja tõmbepingete tagajärjel ning purustatud kivimitsooni kõrgust lae kohal peale lae varingut.

6.4.1 8 m kõrgused ja 10 m laiused kaeveõõned 97 m sügavuses

Reaalselt on tootliku kihi paksuseks VK3A alal kuni 8 m (ptk 6.2). FEM mudeliga on analüüsitud järgmised olukorrad:

- lõpmatu pikkusega 8 m kõrge ja 10 m lai kaeveõõs, vastab tinglikult transpordi tarbeks rajatud käigule või laava-kaevandamise alustamiseks rajatud käigule;
- 2 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikuga nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (1/3 tervikuid) aga ka olukorda kus kaevandusvälja läbib 2 paralleelset käiku;
- 3 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikutega nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (2/5 tervikuid);
- lõpmata pikkusega 8 m kõrge ja 30 m lai kaeveõõs, mis vastab tinglikult laavakaevandamise algfaasile ning modelleerib lae varingu mõju kõrguses ning mõju laavakõrval olevate käikude stabiilsusele;
- lõpmata pikkusega 8 m kõrge ja 50 m lai kaeveõõs.

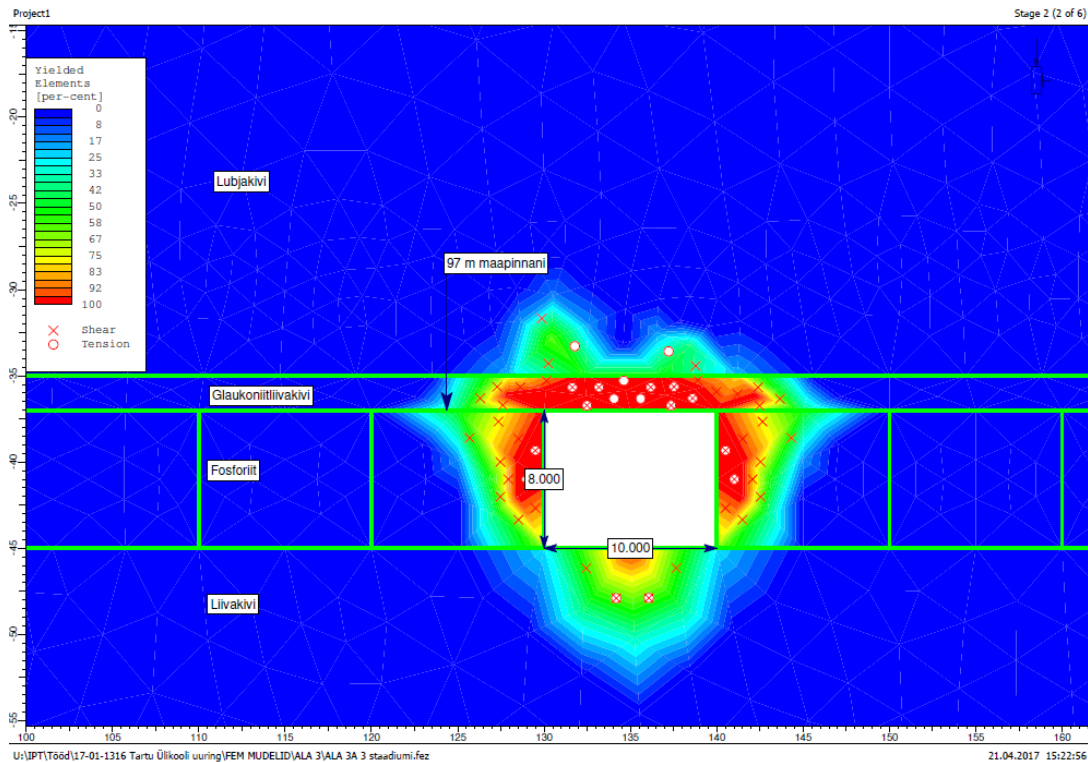
FEM mudelite väljund on esitatud *Joonistel 16.1... 16.8.*

Tõenäoliselt ei saa kogu tootvat kihti läbivat 8 m kõrgust kaeveõõnt ca 100 m sügavusele projekteerida. Seinad purunevad kuni 4-5 m laiuses tsoonis kaeveõõne kõrval, puruneb ka lagi, kuna toetavat argilliidi kihti VK3A alal ei ole. Kahe kõrvuti asetseva kaeveõõne korral on näha, et puruneb kogu 10 m laiune tervik. Deformatsioonide suurus kaeveõõne ümber on kuni 10 cm nii laes kui seintel, mis on selge viide purunemisjärgsetele deformatsioonidele.

Juhul kui siiski õnnestub toetamisega ja kaeveõõne kuju optimeerides rajada pikad kaeveõõnsused laavakaevandamise ette valmistamiseks, siis 30 m laiuse laava korral ulatub purustatud kivimi tsoon 20...25 m kaevanduse laest kõrgemale ja 50 m laiuse laava korral 40...50 m kaevanduse laest kõrgemale põlevkivi kihti ja selle laekihtidesse. 80 m laiema laava korral võib purunenud kivimi tsoon ulatuda maapinnale.

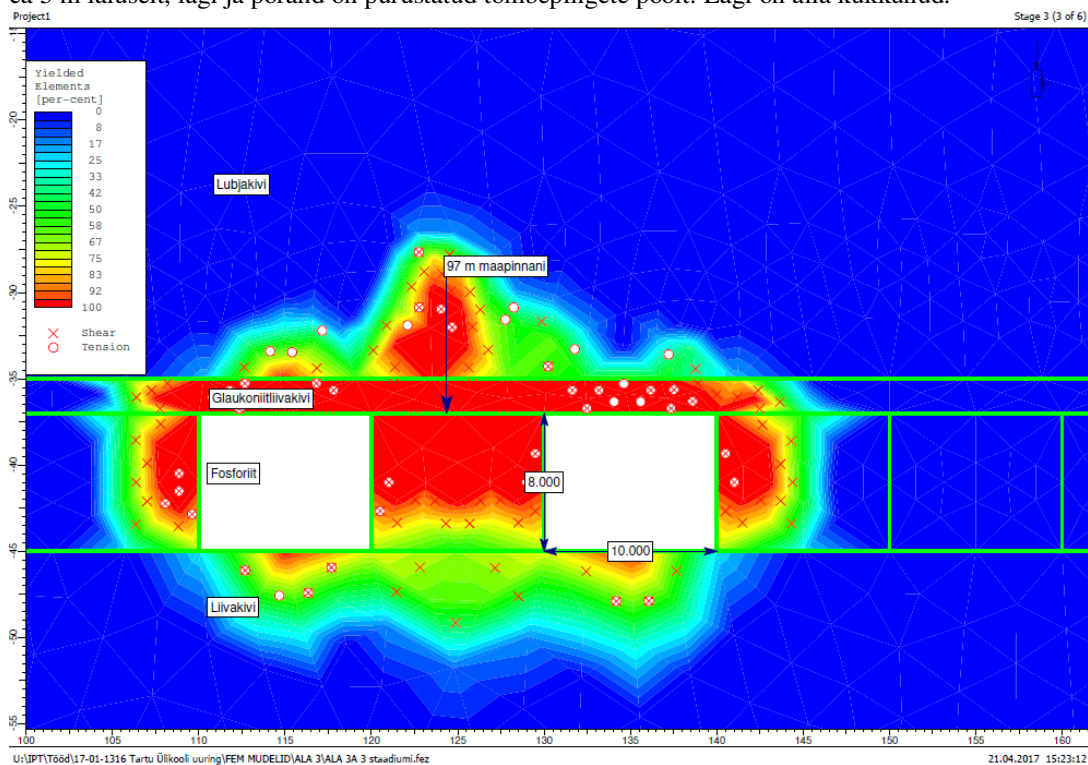
VK1 alal tehtud FEM simulatsiooni kohaselt on kaeveõõnte seinade purunemise ulatus väiksem madalama kaeveõõne korral. Kaeveõõnte mõõtmete (laius, kõrgus) muutmise mõju lae ja seinte purunemisele on modelleeritud detailsemalt allpool (ptk 6.3.2 ja 6.3.3). Neis peatükkides kirjeldatud seaduspärasused kehtivad ka VK2 alale.

Igasugune detailsem arvutus vajab informatsiooni kivikihtide tugevusest konkreetses asukohas.



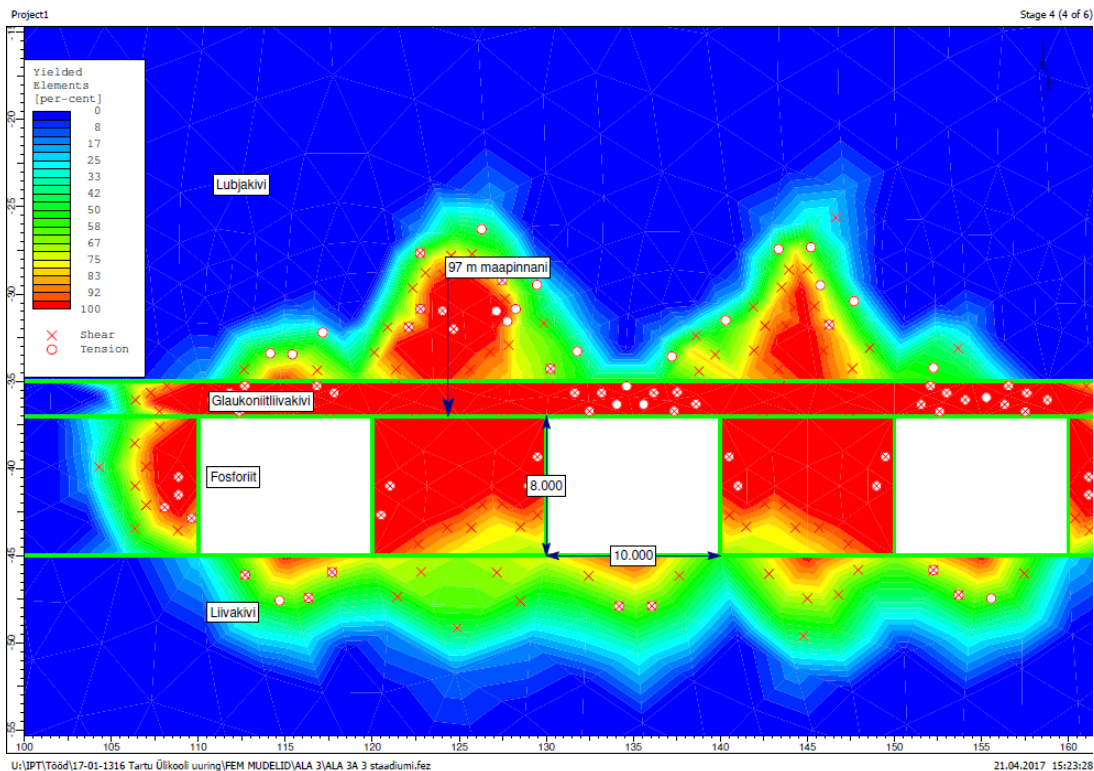
Joonis 16.1 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

8 m kõrgune ja 10 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni ca 5 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lagi on alla kukkunud.



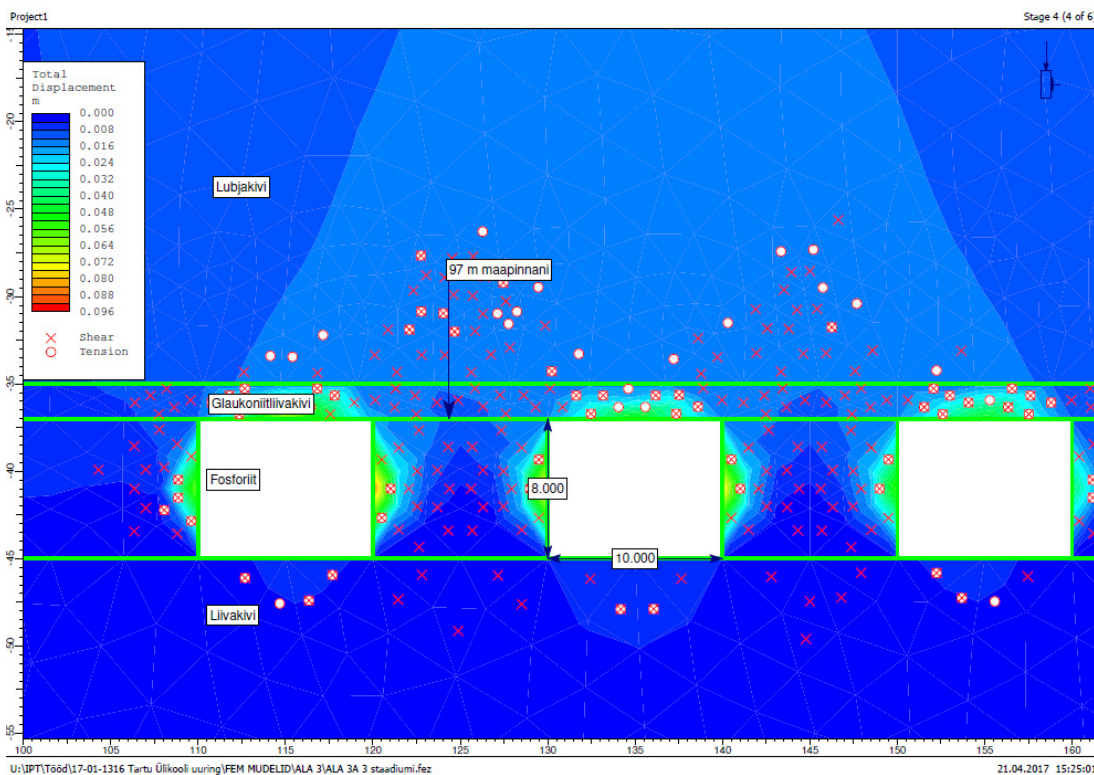
Joonis 16.2 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kaks 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiuselt lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lagi on alla kukkunud. Toestav tervik on täies ulatuses purustatud.



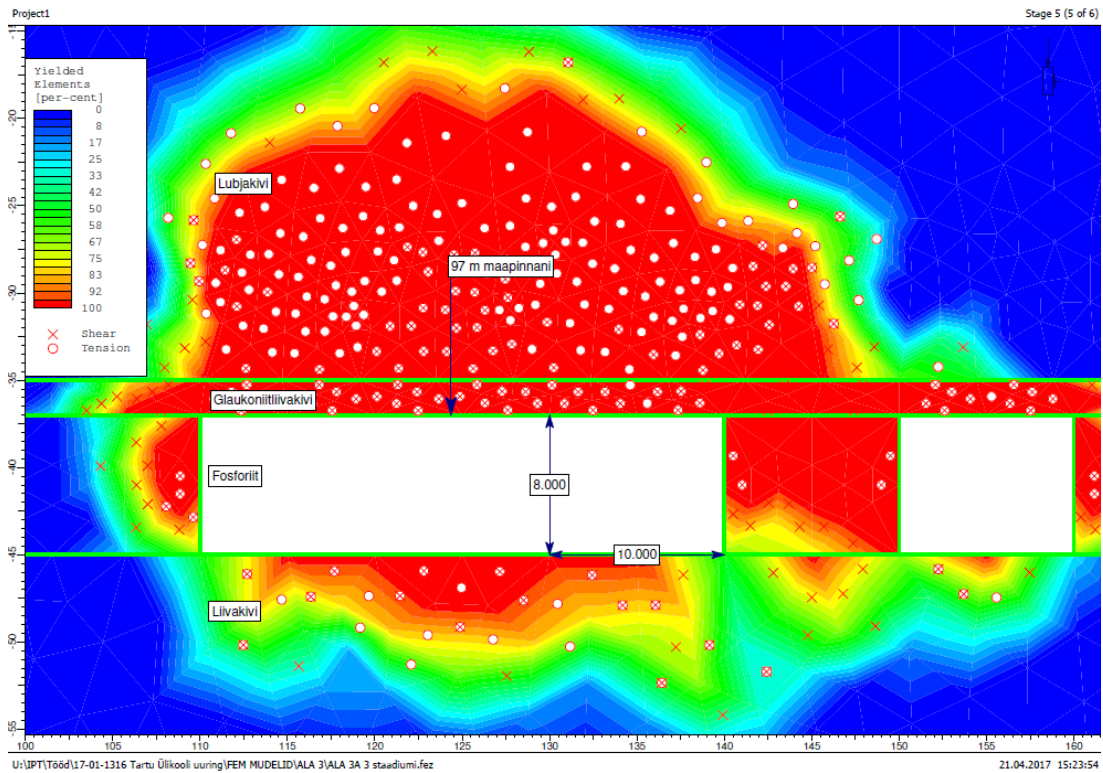
Joonis 16.3 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on ala varisenud. Toestavad tervikud on purustatud täies ulatuses.



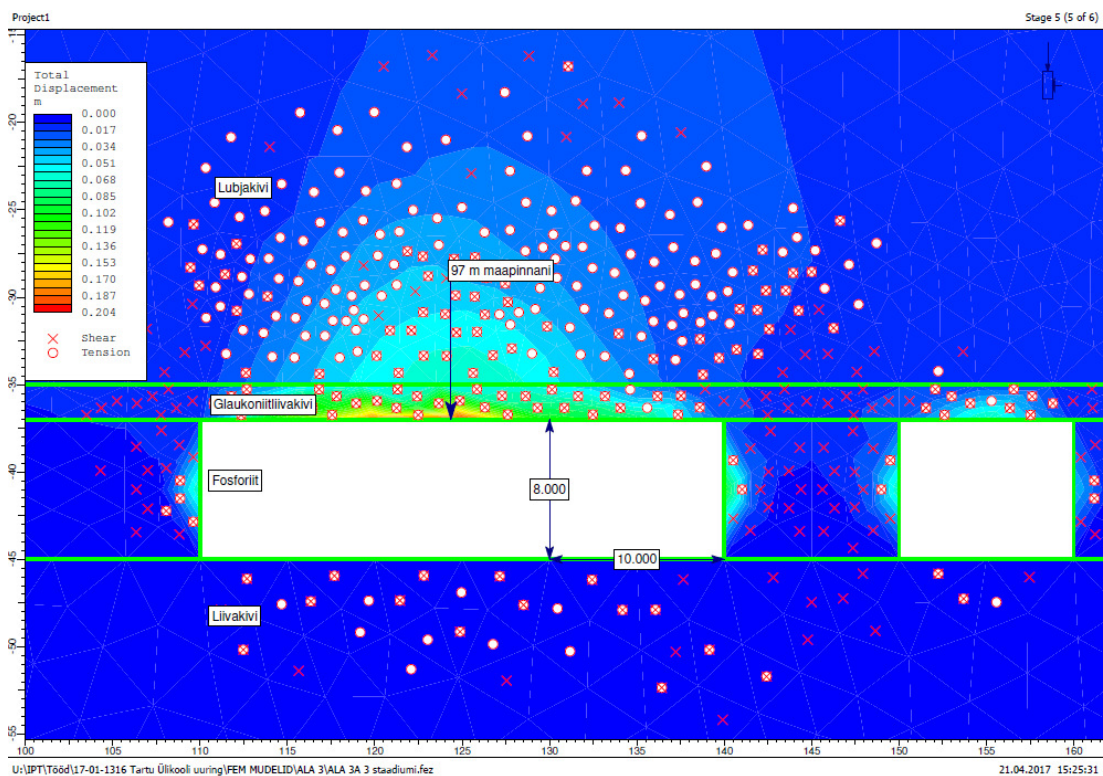
Joonis 16.4 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kolm 8 m kõrgust ja 10 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Deformatsioonid on kuni 10 cm ning on suurimad seinte ja lae keskosas. Deformatsioonide suurus vastab purunemisele. Põranda moodustab osaliselt purustatud nõrga tsementeeritusega liivakivi, tervikud on kogu mahus purunenud.



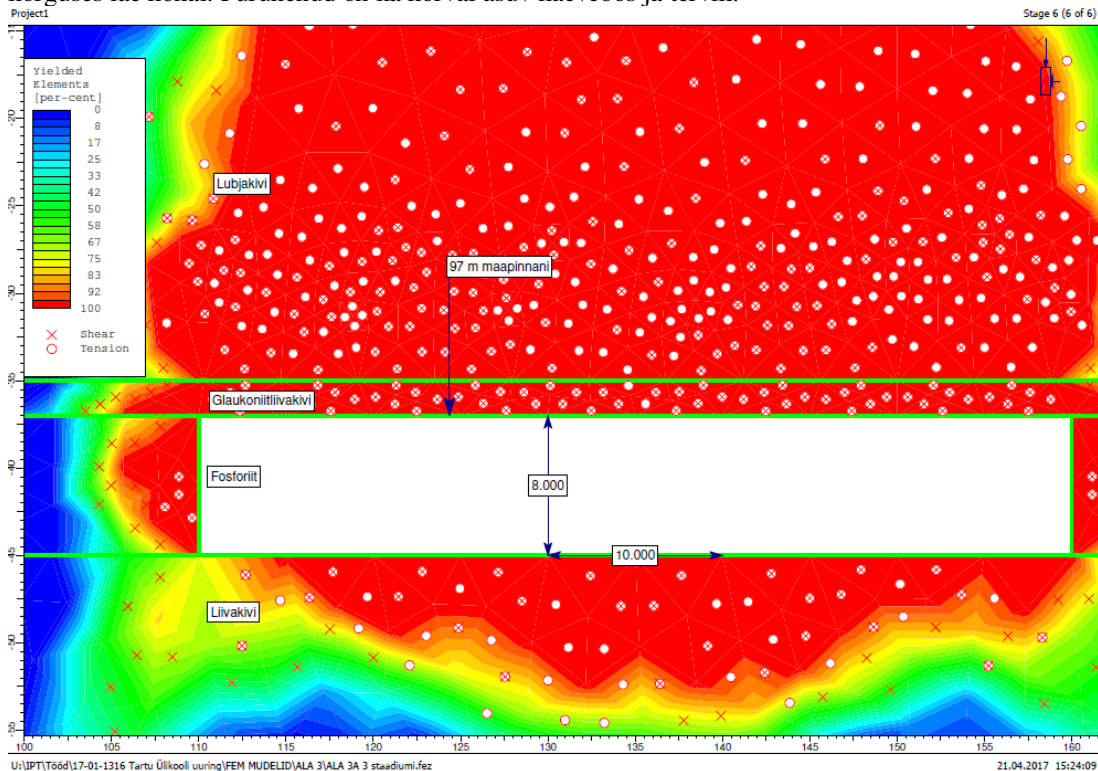
Joonis 16.5 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

8 m kõrgune ja 30 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 6 m laiuselt. Samuti on purunenud kõrval asuv 5 x 10 m kaeveõõs ja selle lagi.



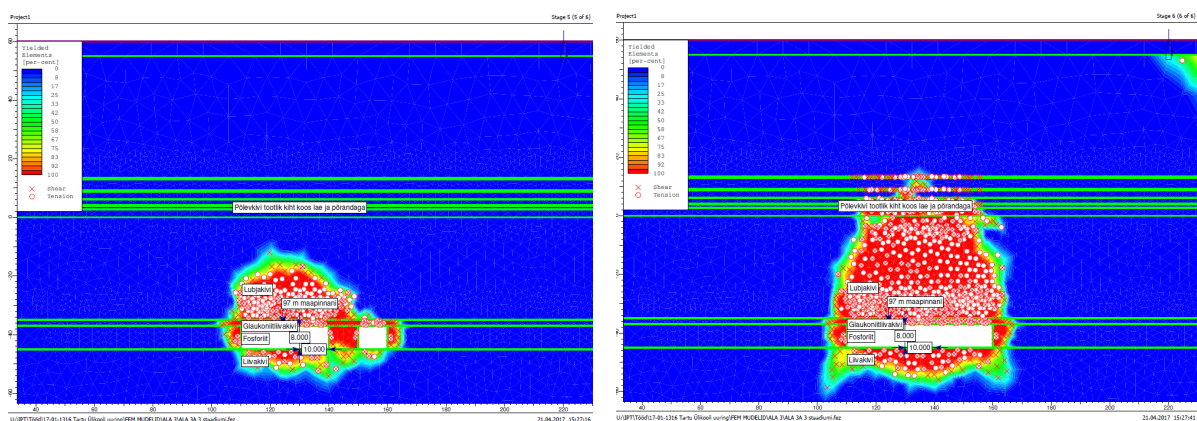
Joonis 16.6 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

8 m kõrgune ja 30 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Deformatsioonid on laia avaase kohal kuni 20 cm ehk selgelt mittelineaarsed ja põhjustatud lae purunemisest. Lagi kukub sisse. Kivim on purunenud tõmbepingete tõttu suures kõrguses lae kohal. Purunenud on ka kõrval asuv kaeveõõs ja tervik.



Joonis 16.7 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

5 m kõrgune ja 50 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Lagi on täielikult suures paksuses purunenud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni 8 m laiselt.



Joonis 16.8 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

30 m laiune ja 50 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Lae purunemisega kaasnev purunenud kivimi tsoon ulatub 30 m laiuse korral 20-25 m kõrgusele ja 50 m laiuse korral 40-50 m kõrgusele kaeveõõne kohal. Viimasel juhul ulatub purunenud kivimi tsoon põlevkivi tootssasse kihti ja laekihitidesse. Ühtlasi on näha kuidas purunemine toimub piki kivimimassiivi nõrgemaid vahekihikesi.

6.4.2 8 m kõrgused ja 5 m laiused kaeveõoned 97 m sügavuses

8 m kõrgused ja 5 m laiused kaeved virtuaalse kaevanduse VK3A alal modelleeriti eesmärgiga võrrelda maa-aluse kaevandamise kaeveõonte laiuse muutmise mõju kaeveõõsi ümbritseva massiivi stabiilsusele. FEM mudeliga on analüüsitud järgmised olukorrad:

- lõpmatu pikkusega 8 m kõrge ja 5 m lai kaeveõõs, vastab tinglikult transpordi tarbeks rajatud käigule või laava-kaevandamise alustamiseks rajatud käigule;
- 2 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikuga nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (1/3 tervikuid) aga ka olukorda kus kaevandusvälja läbib 2 paralleelset käiku;
- 3 lõpmatu pikkusega 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt, tervikute mõõtmetega 5 m ja 10 m nende vahel, modelleerib erineva suurusega tervikute mõju püsivusele, tinglikult kamberkaevandamist (2/5 ja 3/5 tervikuid);
- 3 lõpmata pikkusega 8 m kõrgust kaeveõõnt, üks kolmest kaeveõõnest on 10 m lai;
- 4 lõpmata pikkusega 8 m kõrgust kaeveõõnt erineva suurusega tervikute ja kaeveõõnte laiusega.

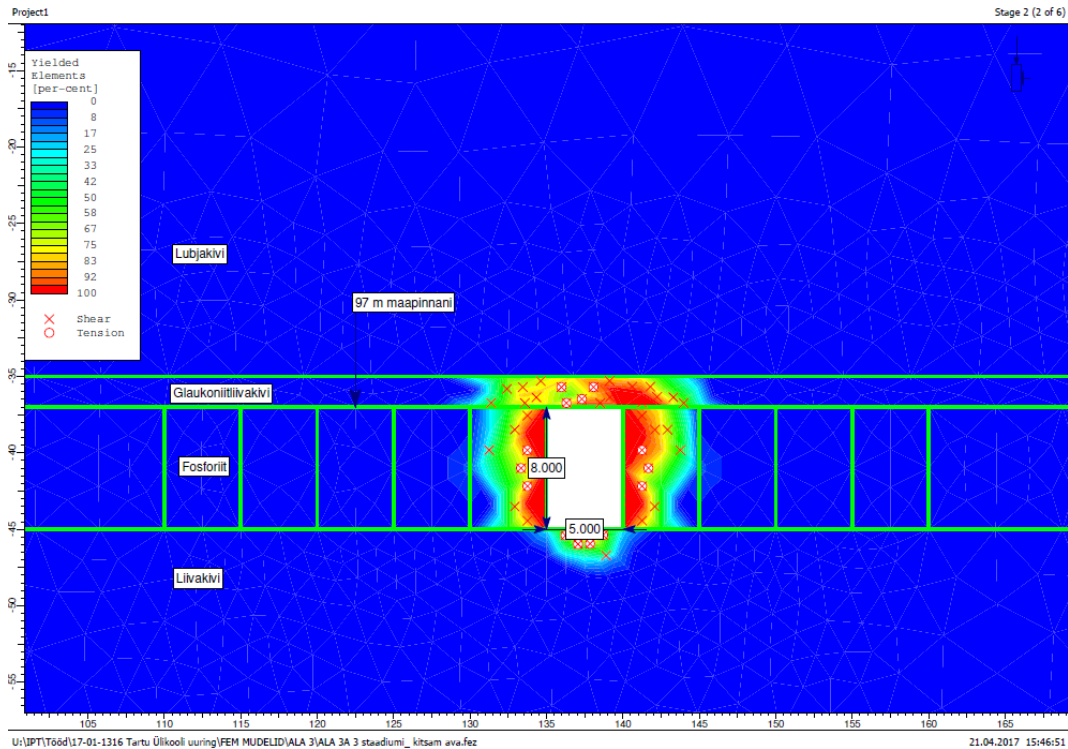
FEM mudelite väljund on esitatud Joonistel 17.1...17.9.

Hoolimata asjaolust, et purunenud tsoon 5 m laiuse kaeveõõne ümber on oluliselt väiksem, kui 10 m laiuse kaeveõõne ümber, siis tõenäoliselt ei saa ikkagi kogu tootvat kihti läbivat 8 m kõrgust kaeveõõnt ca 100 m sügavusele projekteerida ka 5 m laiusena. Seinad purunevad kuni 2-3 m laiuses tsoonis kaeveõõne kõrval, osaliselt puruneb ja võib variseda ka lagi.

Kahe kõrvuti asetseva kaeveõõne korral on näha, et puruneb kogu 5 m laiune tervik, samuti puruneb 10 m laiune tervik. Deformatsioonide suurus kaeveõõne ümber on kuni 3,6...4,8 cm nii laes kui seintel, mis on selge viide purunemisejärgsetele deformatsioonidele. Igasugune ulatuslikum kaeveõõnte süsteem põhjustab nii lae kui tervikute purunemise, purunenud tsoon areneb 10...15 m kõrgusele kaeveõõnte kohale.

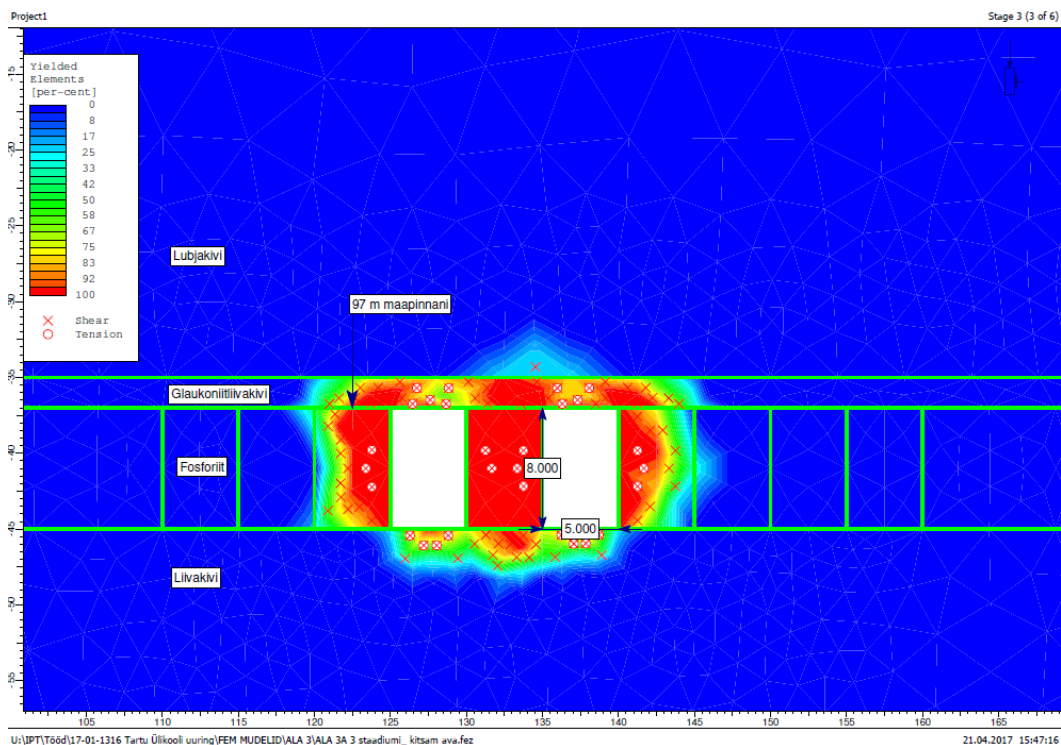
Seega, ainult kaeveõõnte kitsamaks muutmine ei ole piisav meede kaeveõõnte stabiilsuse tagamiseks ca 100 m sügavusel.

Igasugune detailsem arvutus vajab informatsiooni kivikihtide tugevusest konkreetsetes asukohtas.



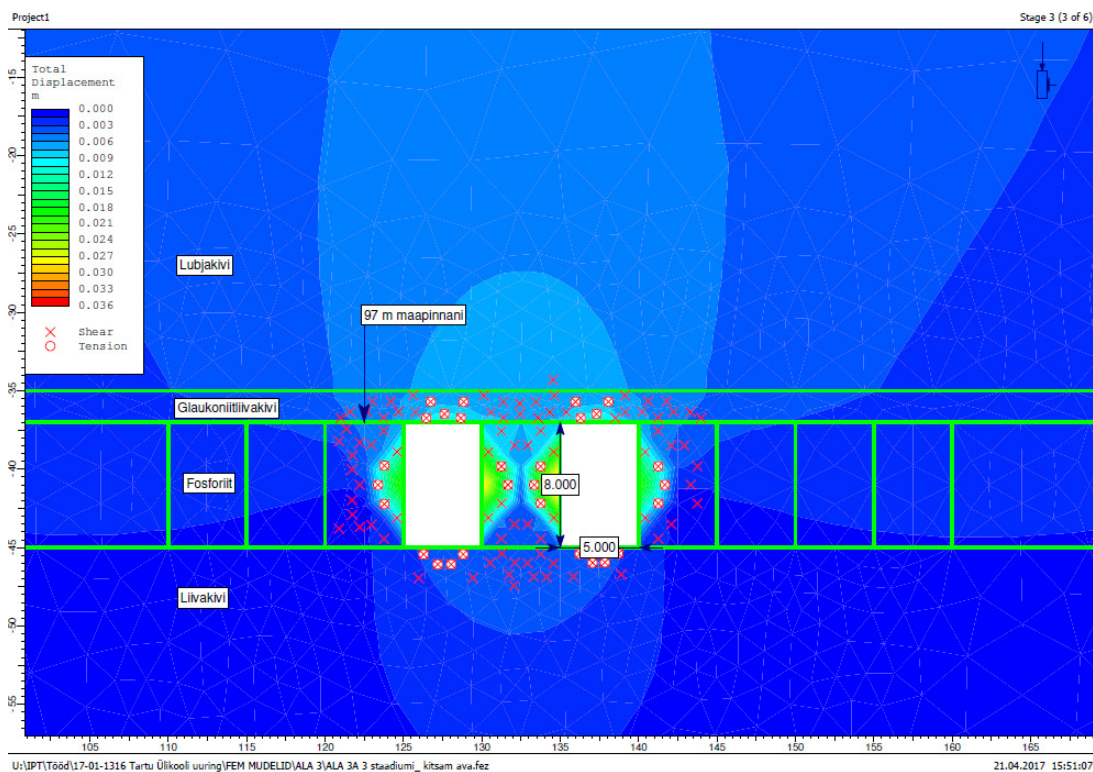
Joonis 17.1 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

8 m kõrgune ja 5 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni ca 3 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbeepingete poolt. Lagi ei pruugi olla veel alla kukkunud.



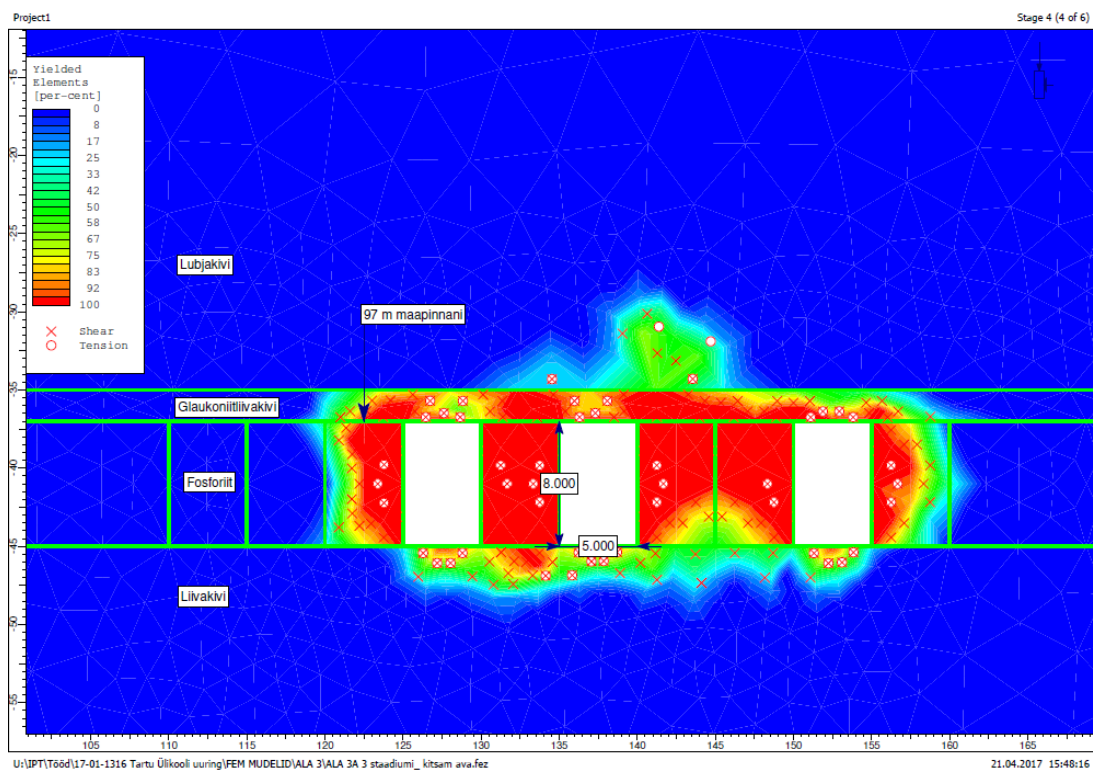
Joonis 17.2 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kaks 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 4 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbeepingete poolt. Lagi on alla kukkunud. Toestav 5 m laiune tervik on täies ulatuses purustatud.



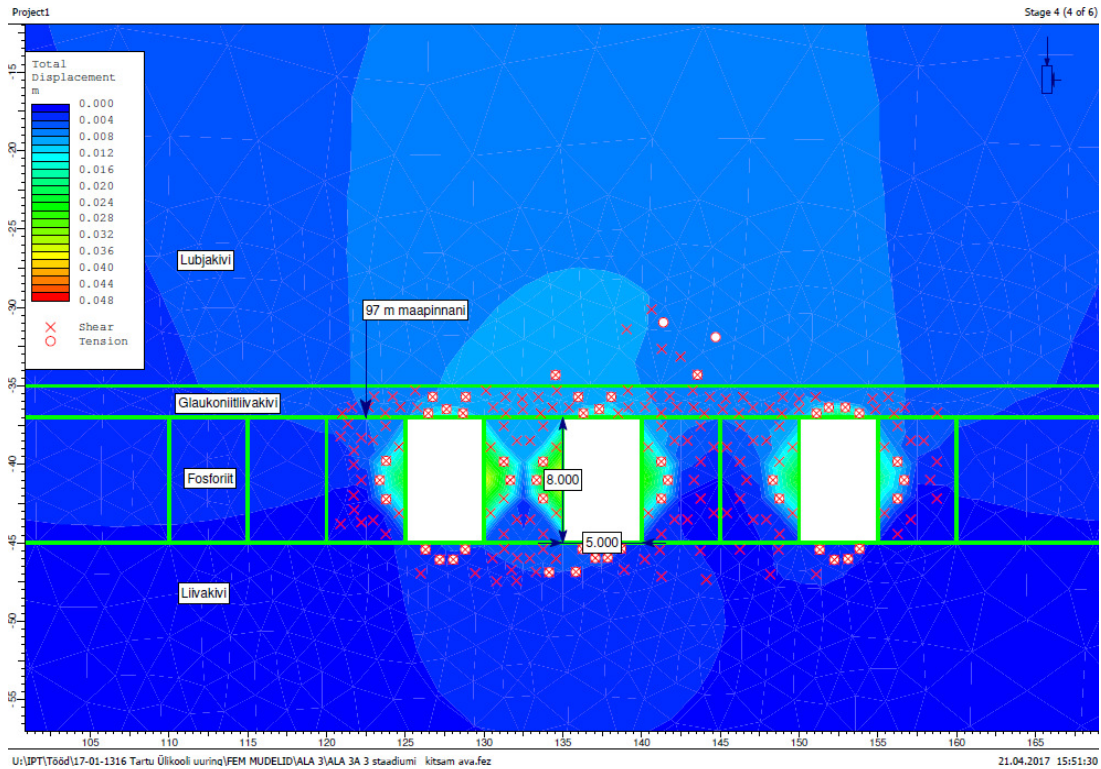
Joonis 17.3 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kaks 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaevõõnt 97 m sügavusel. Deformatsioonid 3,6 cm viitavad purunemise olukorrale nii seintes kui lagede osas.



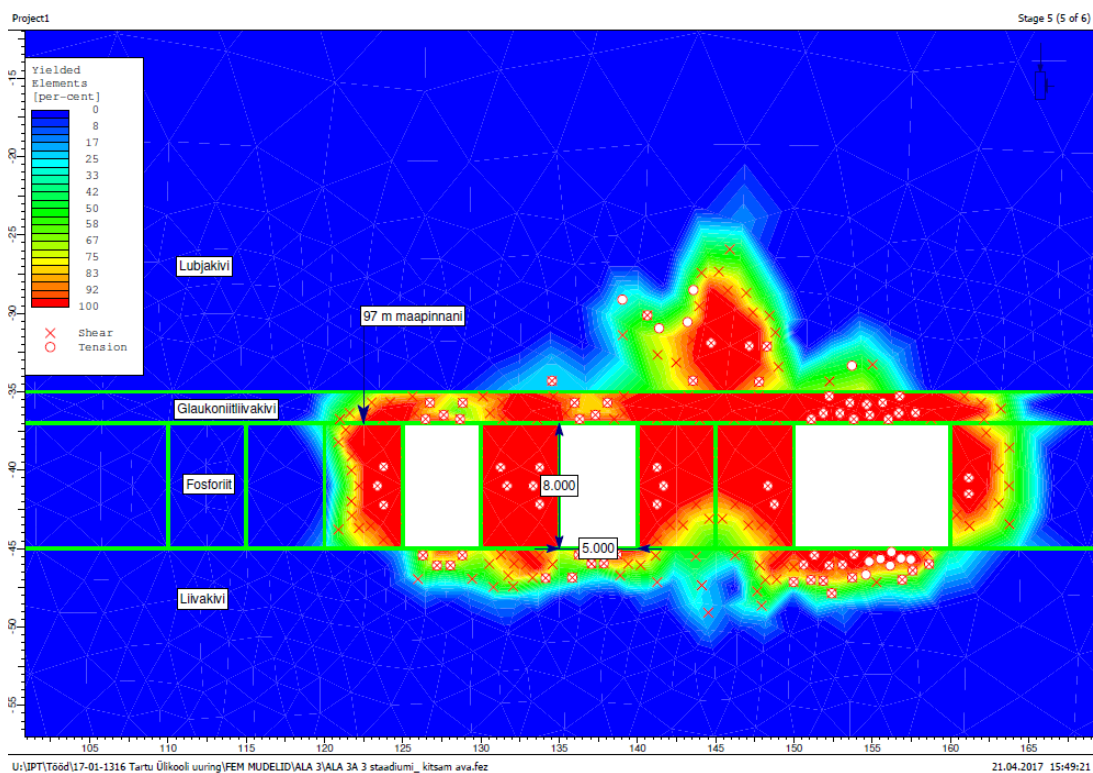
Joonis 17.4 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kolm 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaevõõnt 97 m sügavusel. Üks tervik on 5 m laiune ja teine 10 m laiune. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiusest, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. Mõlemad toestavad tervikud on purustatud praktiliselt täies ulatuses.



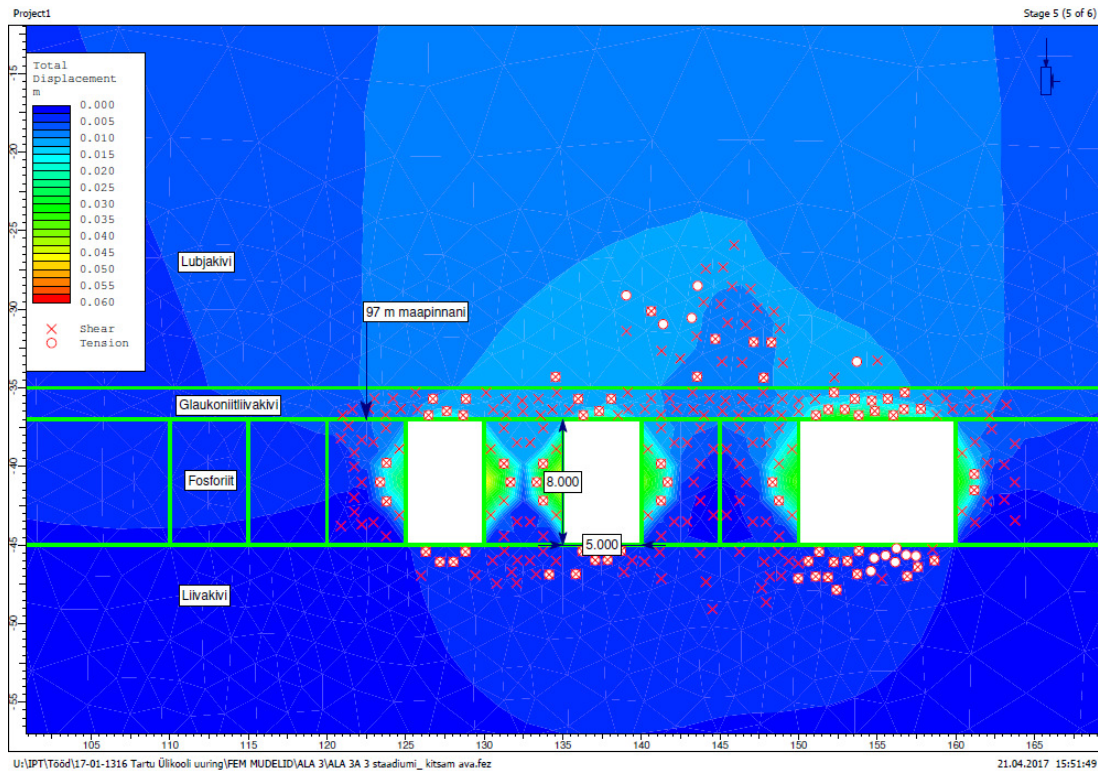
Joonis 17.5 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kolm 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Deformatsioonid 4,9 cm viitavad purunemise olukorrale nii seintes kui lagede osas.



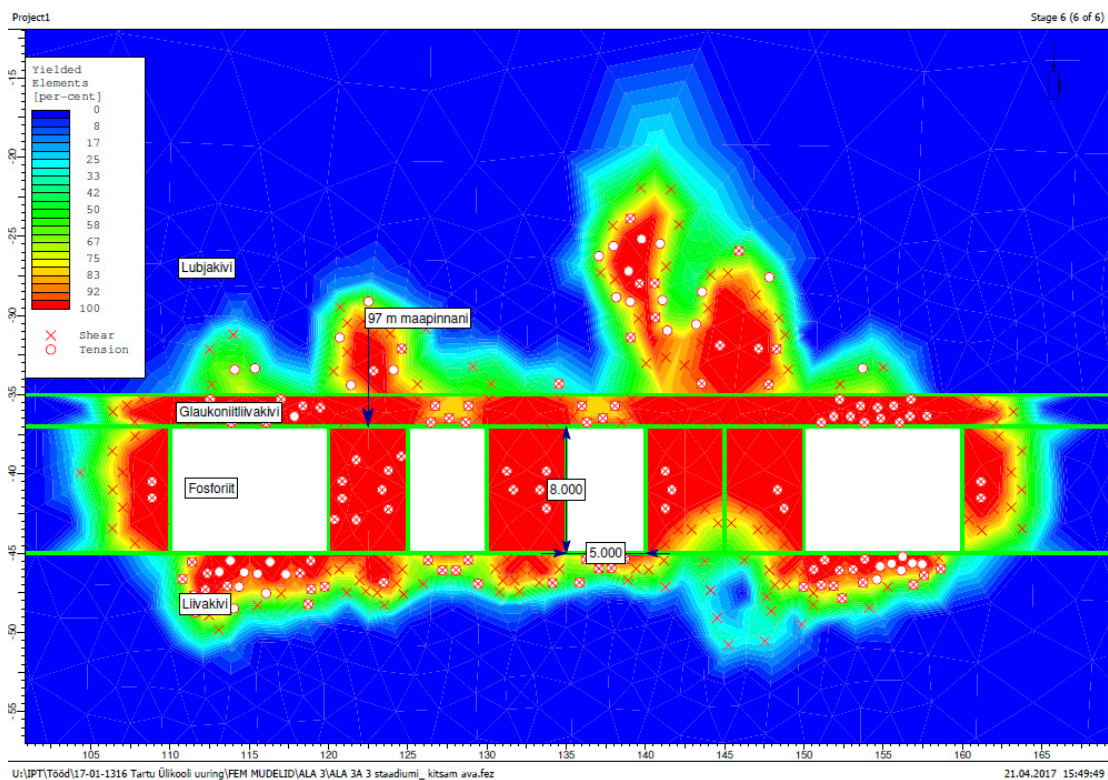
Joonis 17.6 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kaks 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel, kolmas kaeveõõs on 10 m laiuseks laiendatud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. Mõlemad toestavad tervikud on purustatud praktiliselt täies ulatuses. Purunemine areneb lubjakivisse.



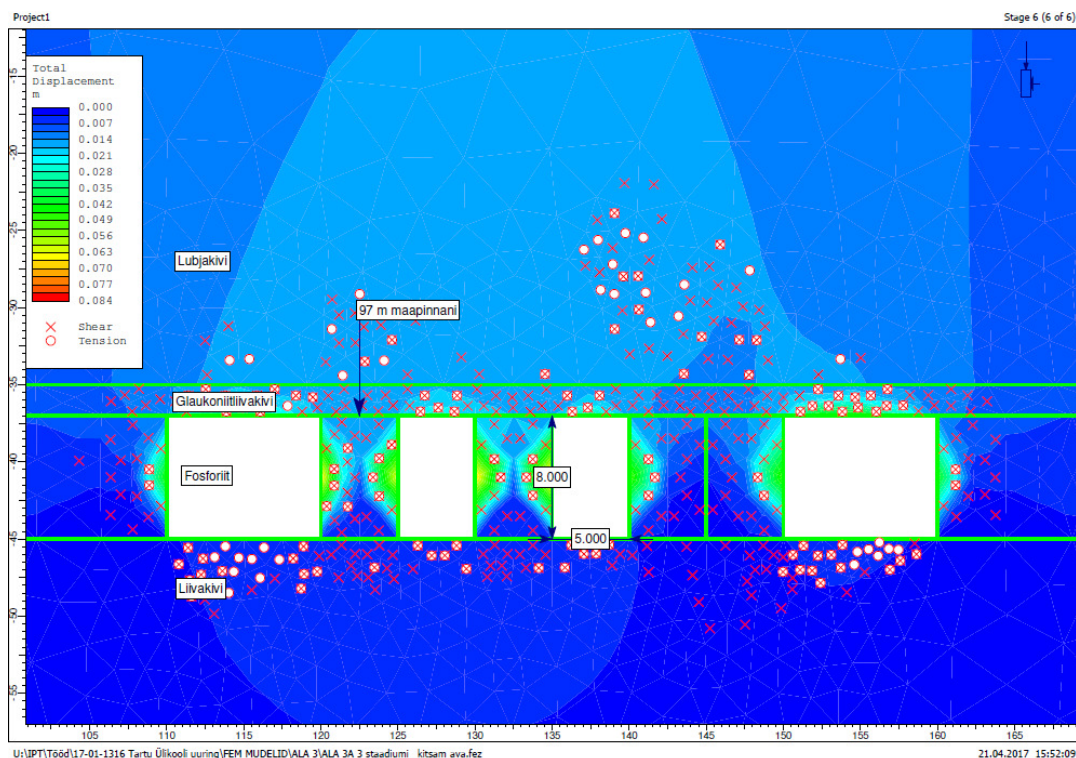
Joonis 17.7 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kaks 8 m kõrgust ja 5 m laiust kaevetõnt 97 m sügavusel, kolmas kaevetõnt on 10 m laiuks laiendatud. Deformatsioonid 6,0 cm viitavad purunemise olukorrale nii seintes kui lagede osas.



Joonis 17.8 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Neli 8 m kõrgust ja 5-10 m laiust kaevetõnt 97 m sügavusel, tervikute mõõtmed samuti 5-10 m. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 6 m laiuks, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. Mõlemad toestavad tervikud on purustatud praktiliselt täies ulatuses. Purunemine areneb lubjakivisse.



Joonis 17.9 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Neli 8 m kõrgust ja 5-10 m laiust kaeveõnt 97 m sügavusel, tervikute mõõtmed samuti 5-10 m. Deformatsioonid 8,4 cm viitavad purunemise olukorrale nii seintes kui lagede osas.

6.4.3 4 m kõrgused ja 5 m laiused kaeveõned 97 m sügavuses

4 m kõrgused ja 5 m laiused kaeved virtuaalse kaevanduse VK3 alal modelleeriti eesmärgiga võrrelda maa-aluse kaevandamise kaeveõnte kõrguse ja laiuse muutmise mõju kaeveõnse ümbritseva massiivi stabiilsusele. FEM mudeliga on analüüsitud järgmised olukorrad:

- lõpmatu pikkusega 4 m kõrge ja 5 m lai kaeveõõs, vastab tinglikult transpordi tarbeks rajatud käigule või laava-kaevandamise alustamiseks rajatud käigule;
- 2 lõpmatu pikkusega 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt, samade mõõtmetega tervikuga nende vahel, modelleerib tinglikult kamberkaevandamist (1/3 tervikuid) aga ka olukorda kus kaevandusvälja läbib 2 paralleelset käiku;
- 3 lõpmatu pikkusega 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt, tervikute mõõtmetega 5 m ja 10 m nende vahel, modelleerib erineva suurusega tervikute mõju püsivusele, tinglikult kamberkaevandamist (2/5 ja 3/5 tervikuid);
- 3 lõpmata pikkusega 4 m kõrgust kaeveõõnt, üks kolmest kaeveõõnest on 10 m lai;
- 4 lõpmata pikkusega 4 m kõrgust kaeveõõnt erineva suurusega tervikute ja kaeveõõnte laiusega.

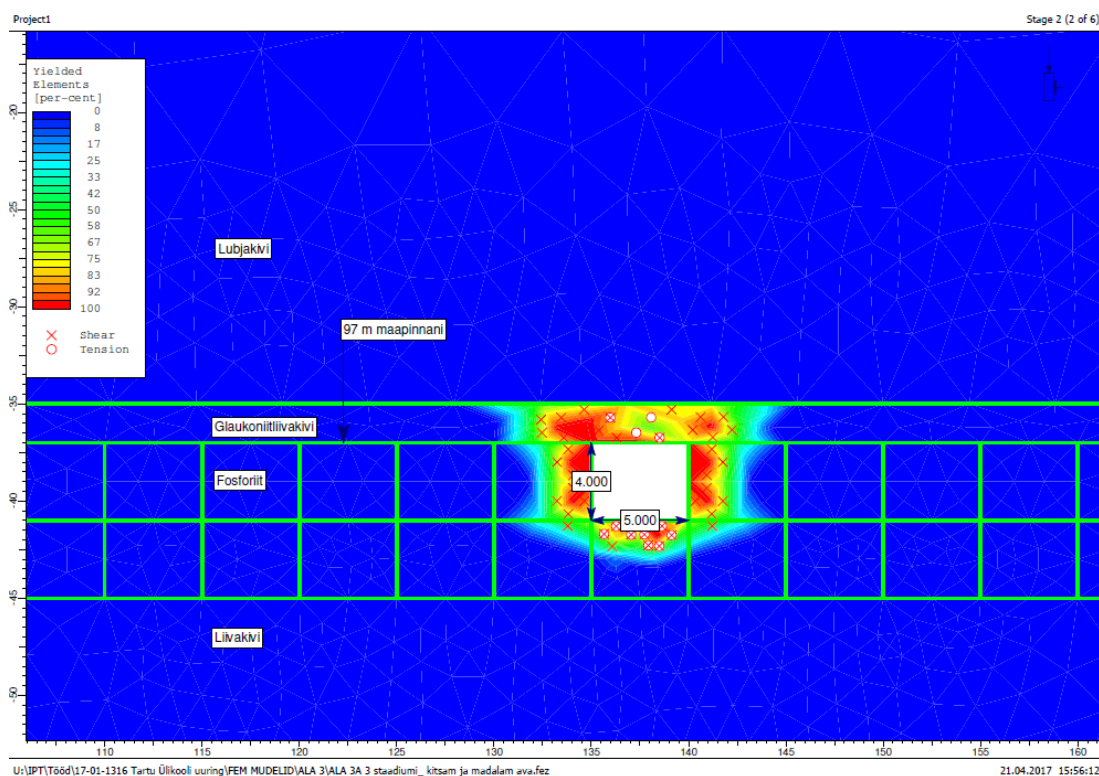
FEM mudelite väljund on esitatud Joonistel 18.1...18.9.

Kaeveõõnse kõrguse vähendamine koos laiuse vähendamisega loob soodsama olukorra kaeveõõne ümbruses. Purunenud tsoon 5 m laiuse ja 4 m kõrguse kaeveõõne ümber on oluliselt

väiksem. Seinad purunevad kuni 1-2 m laiuses tsoonis kaeveõõne kõrval, osaliselt puruneb ka lagi, mistõttu lage tuleb varisemise tõkestamiseks toestada.

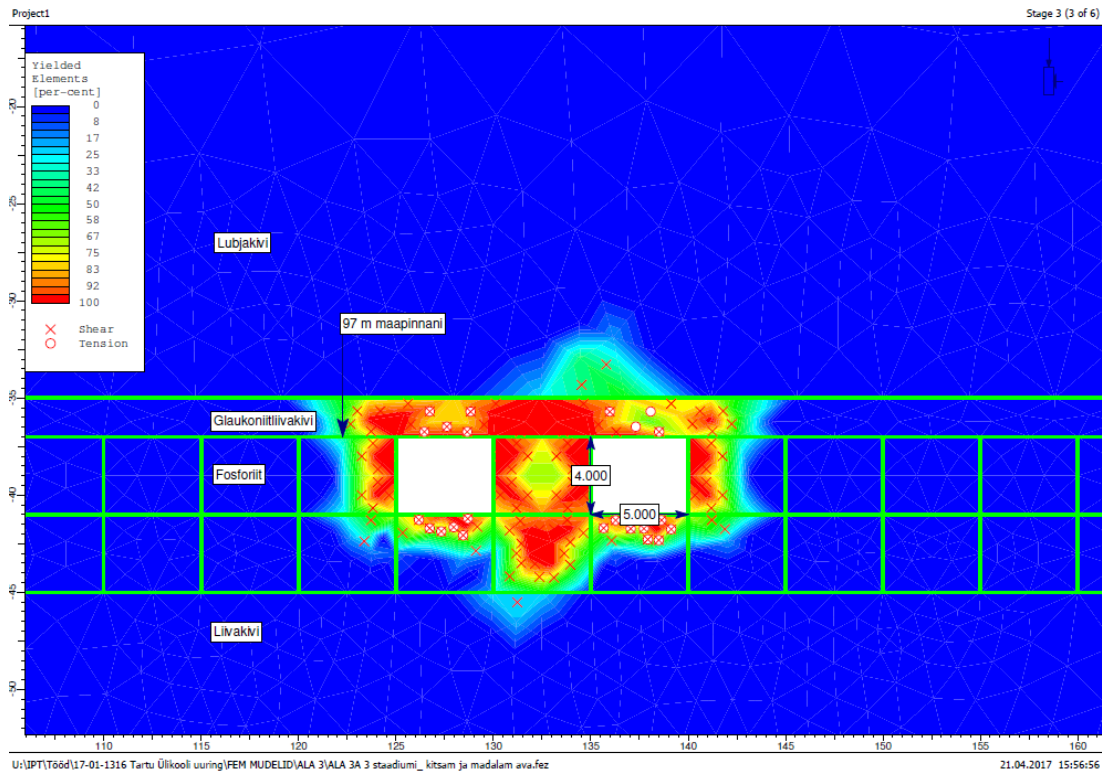
Kahe kõrvuti asetseva kaeveõõne korral on näha, et 5 m laiune tervik ei pruugi olla piisav. Terviku keskele jääb küll vähem purustatud tsoon, kuid kuna purunenud tsoonid seintes liituvad, on pigem tõenäoline, et 5 m laiune tervik siiski puruneb. 10 m laiuse terviku korral aga säilib ca 5 m laiune purustusteta tsoon, mis viitab, et tervikuid on võimalik 5 m laiuste ja 4 m kõrguste kaeveõõnte vahele luua. Tõsi, tervikute mõõtmed on suured, võrreldes tühjaks kaevatud mahuga. Deformatsioonide suurus kaeveõõne ümber on kuni 2 cm nii laes kui seintel, mis on selge viide purunemisjärgsetele deformatsioonidele. Seega tuleb seinu ja lagesid toestada. Igasugune ulatuslikum kaeveõõnte süsteem põhjustab nii lae kui tervikute purunemise, kui tervikute laius on 5 m, purunenud tsoon areneb 5...8 m kõrgusele kaeveõõnte kohale.

Igasugune detailsem arvutus vajab informatsiooni kivikihtide tugevusest konkreetsetes asukohas.



Joonis 18.1 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

4 m kõrgune ja 5 m laiune kaeveõõs 97 m sügavusel. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt kuni ca 2 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lagi ei pruugi olla veel alla kukkunud.

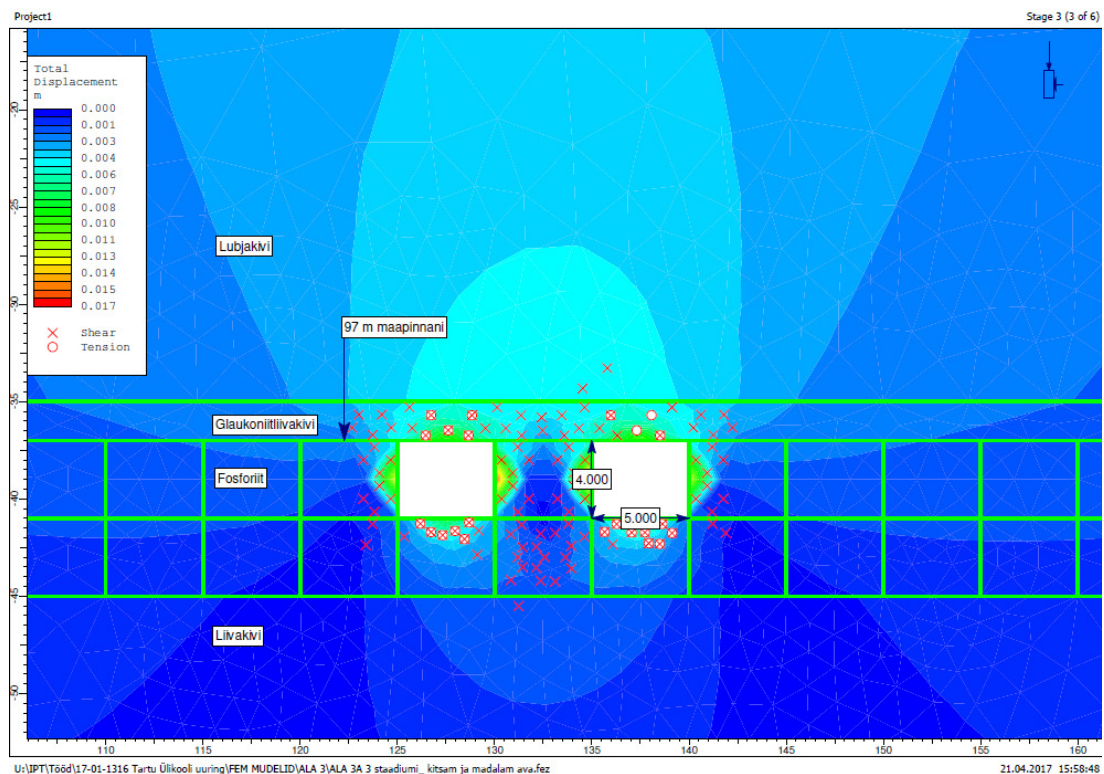


U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\ALA 3\ALA 3A 3 staadiumi_kitsam ja madalam ava.fez

21.04.2017 15:56:56

Joonis 18.2 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kaks 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Seinal on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 3 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Lagi on alla kukkunud. Toestav 5 m laiune tervik on täies ulatuses purustatud.

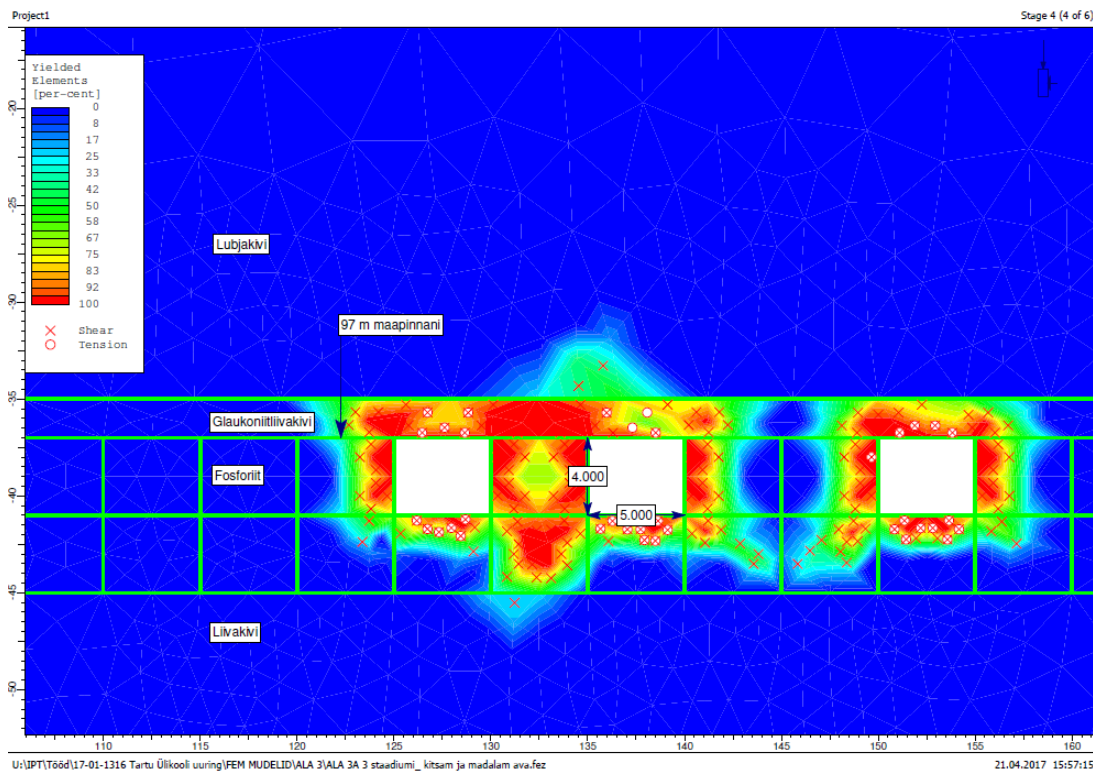


U:\IPT\Tööd\17-01-1316 Tartu Ülikooli uuring\FEM MUDELID\ALA 3\ALA 3A 3 staadiumi_kitsam ja madalam ava.fez

21.04.2017 15:58:48

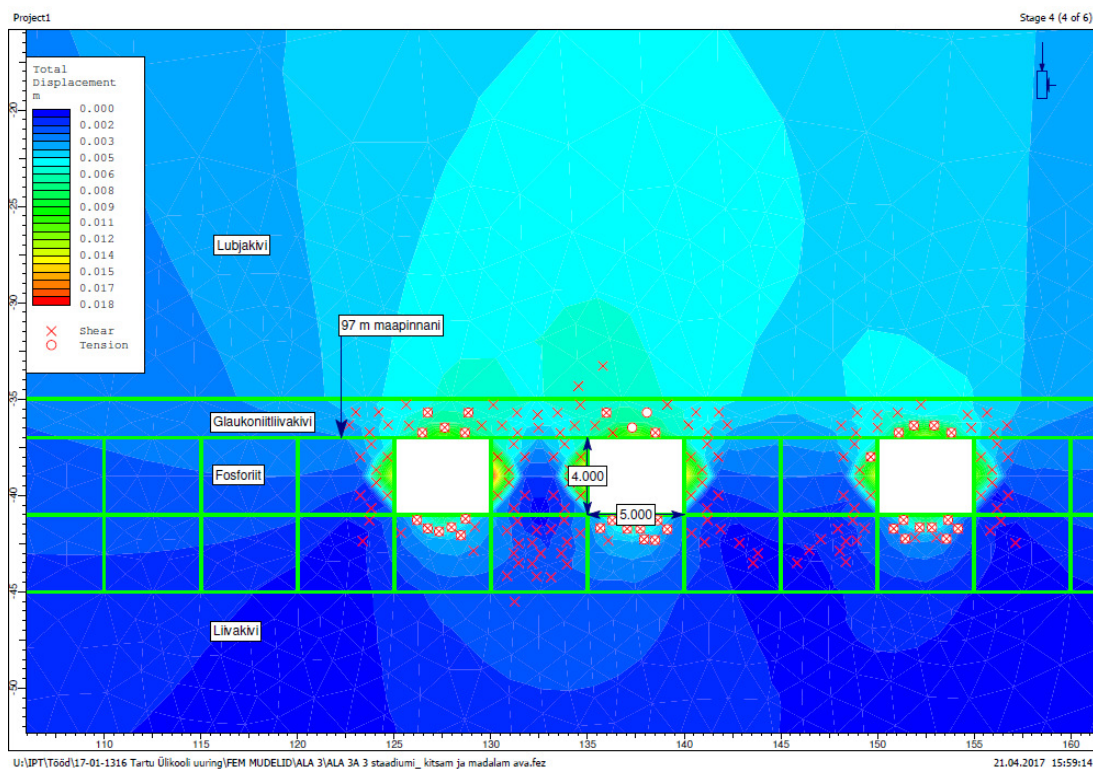
Joonis 18.3 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kaks 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel. Deformatsioonid 1,7 cm viitavad purunemise või purunemise eelsele olukorrale nii seintes kui lagede osas.



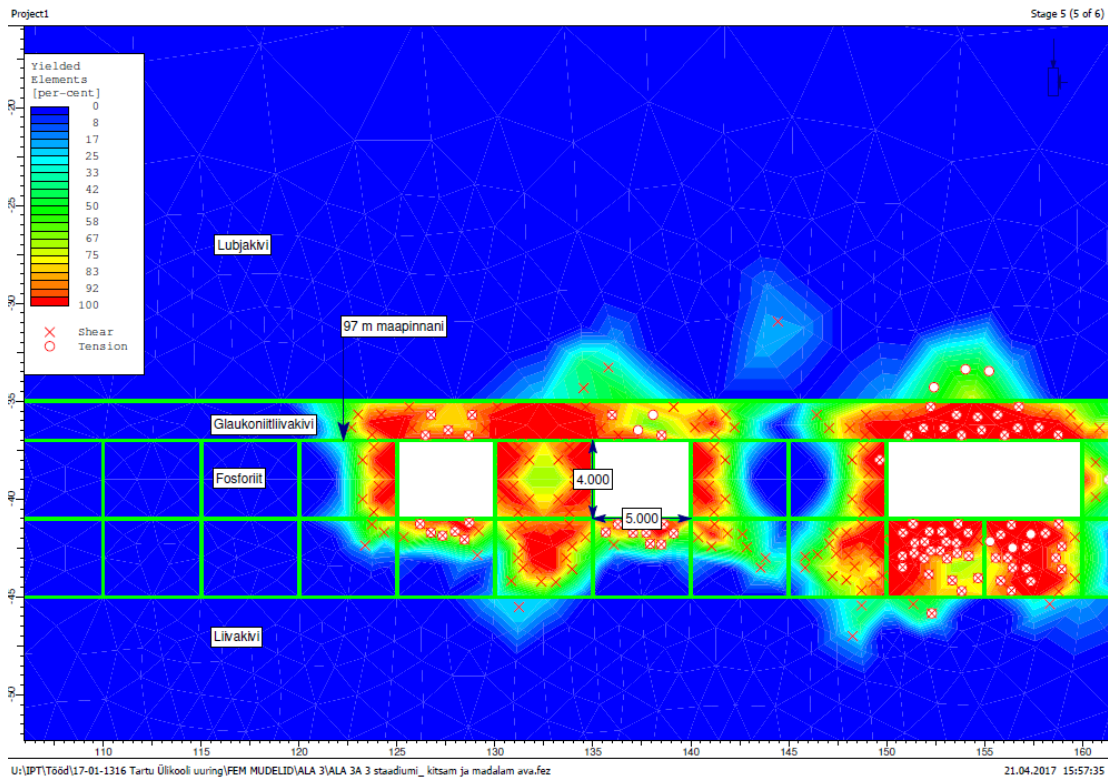
Joonis 18.4 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kolm 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaevõõnt 97 m sügavusel. Üks tervik on 5 m laiune ja teine 10 m laiune. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. 10 m laiuse terviku korral on ca 50% tervikust terve, põrandas areneb aga ka selle terviku all nihkepingete poolt purustatud tsoon.



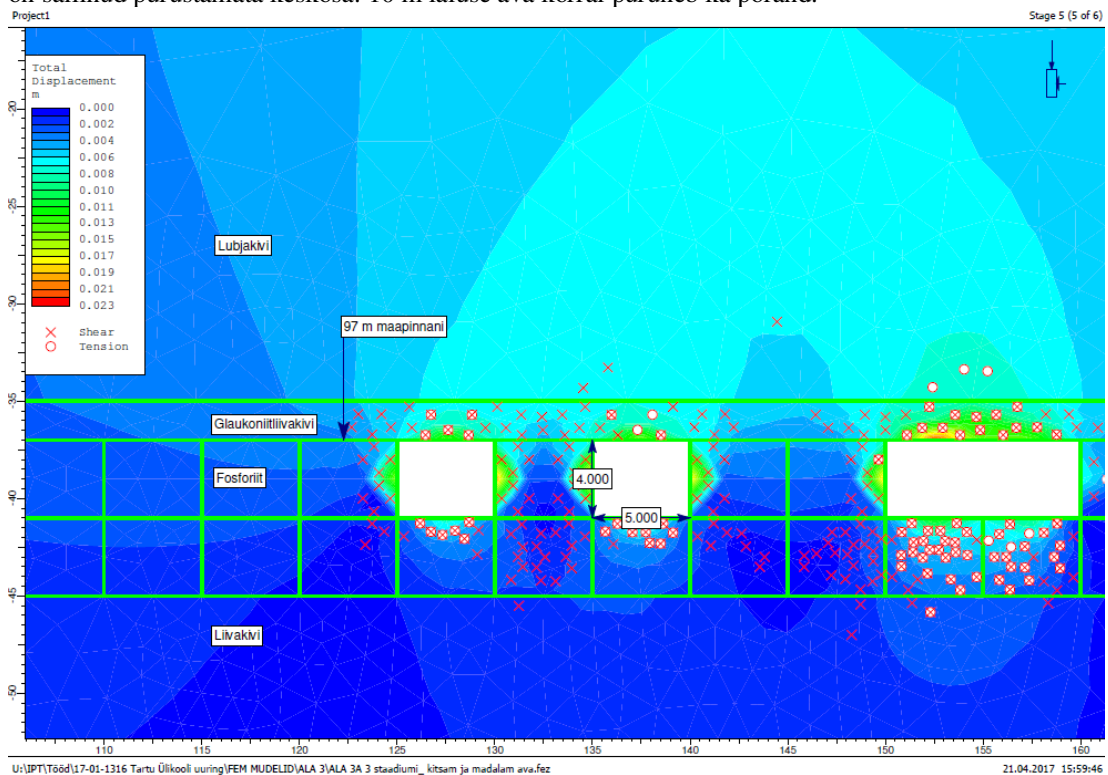
Joonis 18.5 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kolm 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaevõõnt 97 m sügavusel. Deformatsioonid 1,8 cm viitavad purunemise või purunemisele olukorrale nii seintes kui lagede osas. Laiema tervikuga eraldatud kaevõõds käitub lae osas nagu eraldi asuv üksik kaevõõd, põrandas aga areneb tsoon kus nihkepinged ületavad nihketugevust.



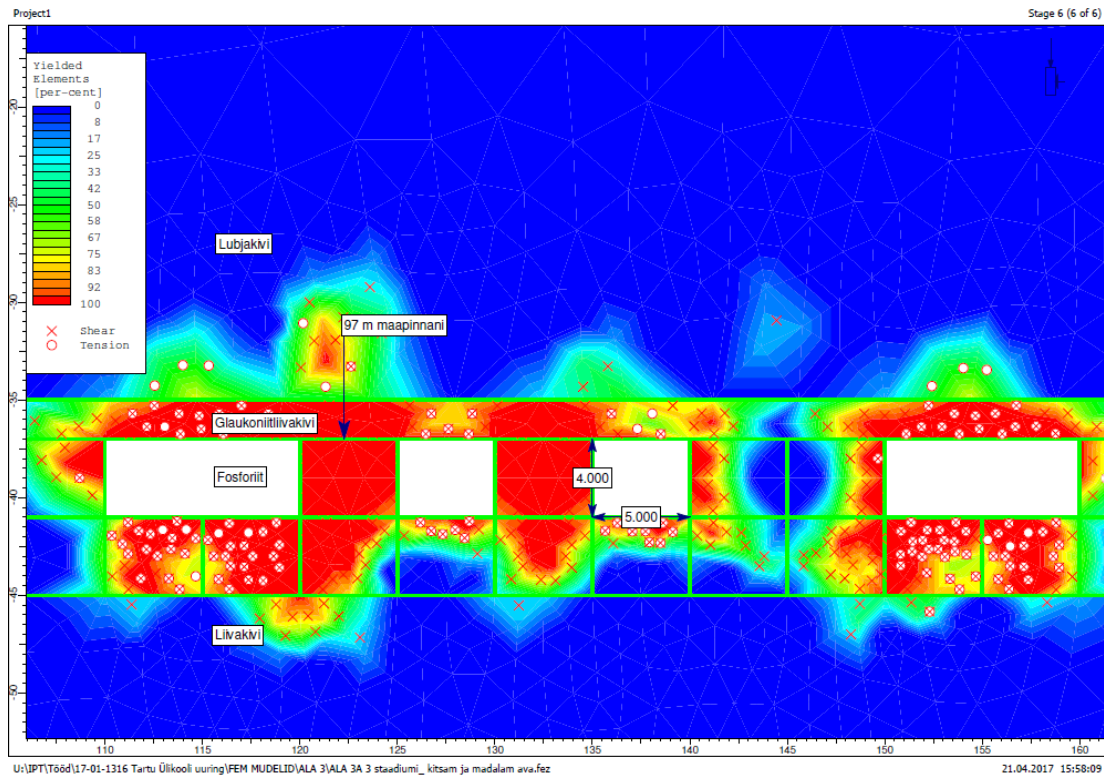
Joonis 18.6 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Kaks 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel, kolmas kaeveõõs on 10 m laiuseks laiendatud. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiuseks, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. 5 m laiune toestav tervik on purustatud praktiliselt täies ulatuses, 10 m laiuses toestavas tervikus on säilinud purustamata keskosa. 10 m laiuse ava korral puruneb ka põrand.



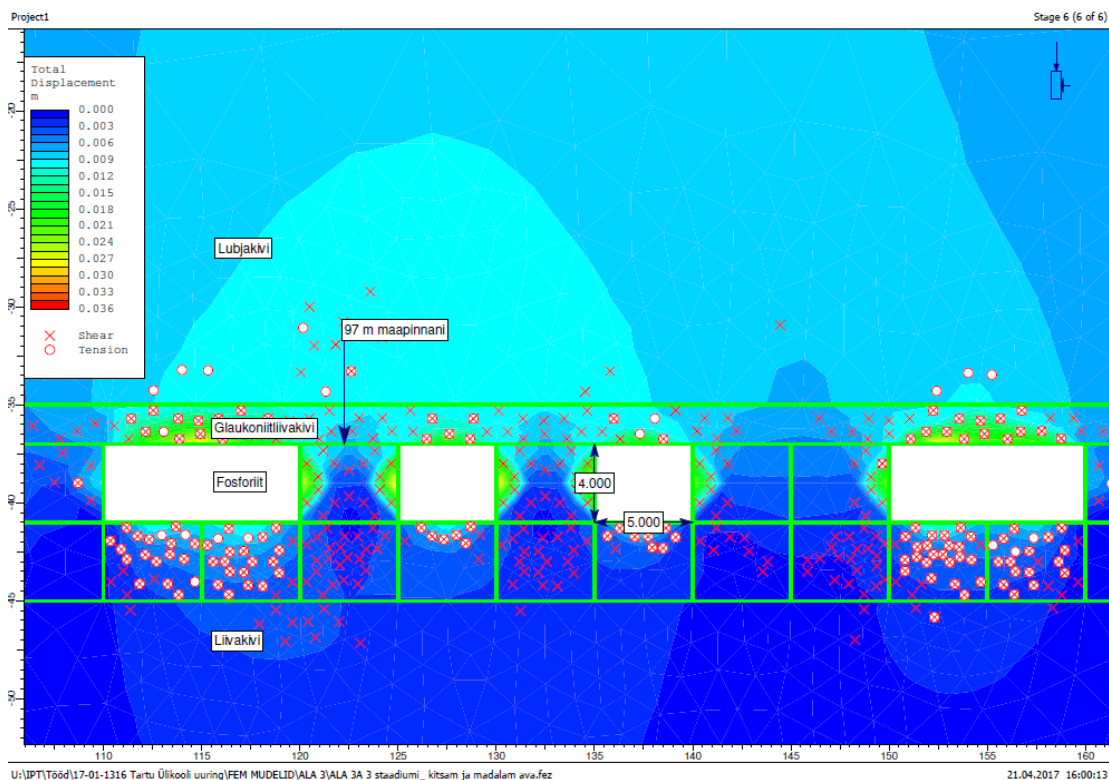
Joonis 18.7 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Kaks 4 m kõrgust ja 5 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel, kolmas kaeveõõs on 10 m laiuseks laiendatud. Deformatsioonid 2,3 cm viitavad purunemise olukorrale nii seintes kui lagede osas. 10 m laiuse terviku osas on näha purunemata keskosa.



Joonis 18.8 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab purunenud elementide protsenti).

Neli 4 m kõrgust ja 5-10 m laiusd kaevetõnt 97 m sügavusel, tervikute mõõtmed samuti 5-10 m. Seinad on nihkepingete poolt purustatud maksimaalselt ca 5 m laiuselt, lagi ja põrand on purustatud tõmbepingete poolt. Laed on alla varisenud. Mõlemad 5 m laiused toestavad tervikud on purustatud praktiliselt täies ulatuses. 10 m laiuse terviku keskosa on purunenemata. 10 m laiuse ava põrand on purunenud.



Joonis 18.9 Virtuaalne kaevandus VK3A (värvikood näitab deformatsiooni suurust meetrites).

Neli 4 m kõrgust ja 5-10 m laiust kaeveõõnt 97 m sügavusel, tervikute mõõtmed samuti 5-10 m. Deformatsioonid 3,6 cm viitavad purunemise olukorrale nii seintes kui lagede osas. 10 m laiuse terviku keskosas on näha purunemata tsoon.

6.5 KASUTATAVAD KAEVANDAMISVIISID JA NENDE MÕJU

Allmaakaevandamisel tuleb valida kaevandamisviis, mis tagab maapinna pikaajalise stabiilsuse. Lae toetamiseks jäetakse tervikud, lagi varistatakse või täidetakse kaeveõõned langatuste vältimiseks.

Kamberkaevandamisel suureneb maavara kadu tervikute jätmise tõttu, seepärast kasvab vastavalt kaevanduse pindala maa-aluses osas. Arvutatud sügavuses (97 m) lae toetamiseks vajalike tervikute maht ulatub 80-90%-ni fosforiidi mahust ja ei ole seetõttu otstarbekas. Lisaks tuleb arvestada, et selles sügavuses eeldab igasuguse kaeveõõne rajamine fosforiidilasundisse toetamist, puruneva kivimimassiivi ulatus kaeveõõne ümber on suur. Fosforiiti sisaldav kiht on VK3 alal eeldatavalt keskmiselt 8 m paksune ja nii kõrge kaeveõõne rajamine ilma toetamata on praktiliselt võimatu. Eeldatavalt tuleb valida fosforiidilasundi tootlikum osa ja vähendada kaeveõõne kõrgust. Võib kaevandada ka kahe-kolme korruse kaupa. Tervikud vajavad oluliselt ulatuslikumat toetamist, võrreldes sügavusega ca 40 m puruneb kivim kaeveõõnte ümbruses 100 m sügavusel kuni 2 korda kaugemale (vastavalt ca 2,5 m ja ca 5 m kaeveõõne seinast 8 m kõrguse korral).

Kaevandamisel lae varistamisega puruneb mäemassiiv langatuse kohal, 50 m laiuse kaeveõõne korral ulatub purunemistsoon 40-50 m kõrgusele, nii põlevkivisse kui ka seda katvatesse kivimitesse. Arvutustulemusi ekstrapoleerides saab eeldada, et alates ca 80 m laiusest laavast võib purustatud tsoon ulatuda maapinnani. Ka maapind ise vajub, seda peamiselt vahetut kaeveõõnt täitva alla kukkunud koheva materjali tihenemise arvel. Kui laava laius jääb alla 80 m, siis eeldatavalt moodustub laava kohale võlv ning maapinnani langatuse mõju ei ulatu.

Kaevandades fosforiiti lae varistamisega, ei ole hilisemalt võimalik enam põlevkivi kaevandada. Teoreetiliselt oleks ehk võimalik põlevkivi väljata enne fosforiidi kaevandamist.

Kaevandamisviisil oluline mõju põhjaveele, kuna toimub ulatuslik katendi purunemine ning veekihte eraldavad veepidemed hävivad. Samuti jääb tuleb tekkivale aherainele, mida moodustub puistena umbes 21 milj. m³, leida ladestuskoht või kasutus.

Kaevandamisel kaeveõõnte täitmisega toetatakse kaevanduse opereerimiseks vajalikud käigud. Väljaveo ja tuulutuskäigud võib rajada ka tugevamasse liivakivisse fosforiidikihtide all, ning ilmselt vajavad ka need toetamist. Kaevandamine ise toimub kitsaste (kuni 5 m laiuste) käikudena, mis rajatakse püsikäikude vahele 90° nurga all, sarnaselt laavakaevandamisele. Erinevuseks on, et kaevandamise käigud tuleb rajada üksteisest küllaldaselt kaugemale, et vältida tervikute ja lae purunemist ning täita koheselt. Alles peale täitematerjali tardumist saab kaevandada täidetud kaevandamiskäikude vahel, seda sarnaselt eelpool kirjeldatule – kitsa käiguna ja tagasitäitega. Selliselt võib, sõltuvalt esialgse terviku vajalikule suurusele, kaevandamine toimuda mitme tsükliks. Ilmselt tuleb kaevandada korrustena alustades alumisest korrusest.

Täitmisega kaevandamisel on täiteaineks võimalik kasutada aherainet, mida puistena tekib aastas umbes 0.7 milj. m³ ning kogu kaevandamisperioodi jooksul umbes 21 milj m³. Tootsa kihi väljatav maht on aastas umbes 1.1 milj. m³, kokku 30 aasta jooksul umbes 32 milj. m³.

Seega saab aherainega täita suurema osa kaeveõõntest ning puudu olev täitematerjal tuleb kohale tuua (näiteks põlevkivituhk). Seejuures tuleb tagada, et täitematerjalist ei leostuks põhjavette ebasoovitavaid aineid.

Sõltumata kaevandamisviisist tuleb alandada O-C liivakivides oleva põhjaveekihi survetase, mis tekitab surveanguse ulatuslikul alal. Mõju ülemisele lubjakividega seotud veekihtile sõltub konkreetsest kaevandamisviisist ja veepidemete omadustest, kuid arvestades tekkivat suurt vertikaalsuunalist gradienti, võib survetaseme langus igal juhul oluliselt mõjutada ka lasuvaid veekihte.

Olemasolevate andmete põhjal on kaeveõõnte täitmine praktiliselt ainuke viis selles sügavuses fosforiiti kaevandada. Sel juhul puuduvad ka põlevkivi kaevandamisele piirangud ning seda saab teha vastavalt vajadusele kas samaaegselt fosforiidiga või muul ajal.

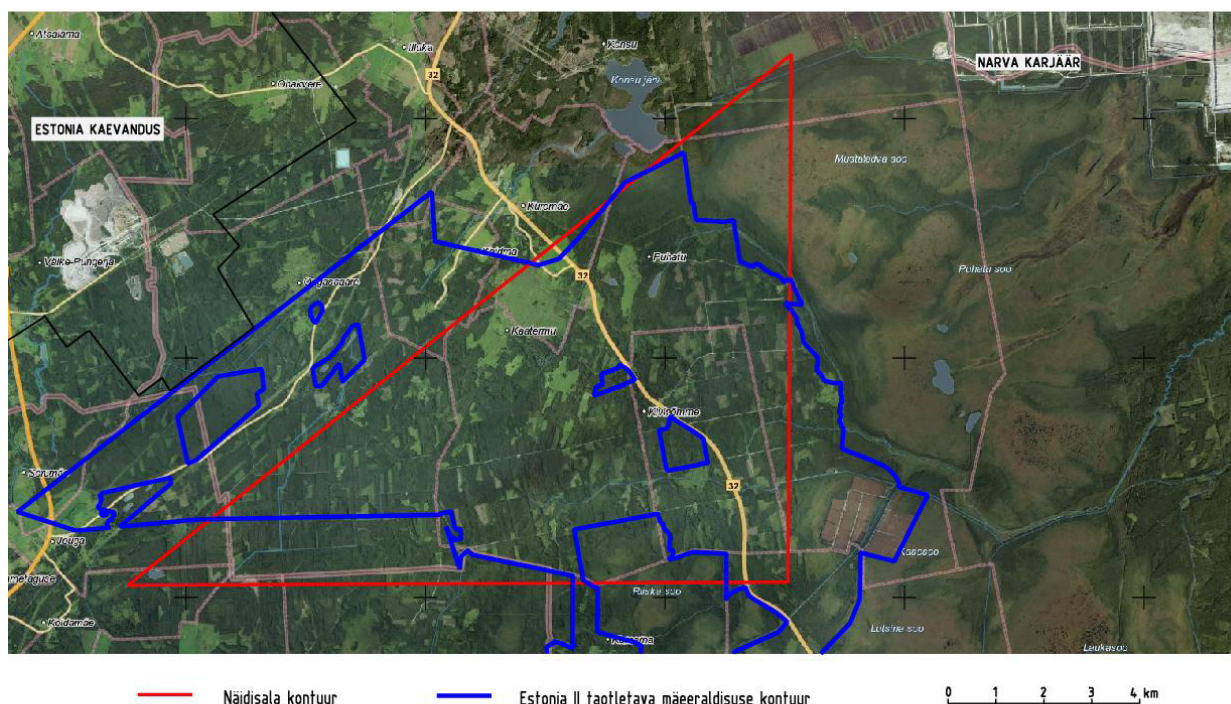
7 VIRTUAALNE KAEVANDUS VK4

Peatükk on koostatud AS Eesti Energia poolt esitatud andmete põhjal (eeskätt Estonia II kaevandamisloa taotluse materjalid).

7.1 ASUKOHT JA SUURUS

Taotletav mäeeraldis paikneb Ida-Viru maakonnas Iisaku ja Illuka vallas ning mäeeraldise kogupindala on umbes 93 km² ning see on suures osas metsamaa. Virtuaalse kaevandusena VK4 on käesolevalt käsitletud näidisala piiresse jäävat osa pindalaga umbes 55 km². Mäeeraldise ja näidisala paiknemine on toodud *Joonisel 19*.

Vastavalt kaevandamisloa taotlusmaterjalidele selgitatakse mäeeraldise teenindusmaa paiknemine välja keskkonnamõju hindamiste käigus. Taotletava mäeeraldise lääneosa teenindamiseks on plaanis kasutada Estonia kaevanduse pealmaa-kompleksi. Idaosa arendamisel tuleb välja ehitada uus kaevandus-kompleks. Teenindusmaa vajalik pindala on ~40...100 ha, mille suurust ja kuju täpsustatakse projekteerimise käigus sõltuvalt valitavast kaevandamistehnoloogiast ja keskkonnaningimustest. Pindala on hinnanguline ja sisaldab konservatiivsuse huvides ka settetiiki, olmehooneid, katlamaja, hiivabasseine jms rajatisi, kuid mitte aherainepuistanguid.



Joonis 19. Estonia II taotletava mäeeraldise paiknemine.

7.2 MÄENDUSLIK ISELOOMUSTUS

Virtuaalne kaevandus VK4 paikneb Alutaguse maastikurajoonis, mille kujunemist mõjutasid oluliselt jääaja lõpu geoloogilised tegurid, eriti jääpaisjärvede teke ja kadumine, samuti pärastjääajal alanud soostumine [17].

Maapinna reljeef on suhteliselt tasane ning maapinna absoluutkõrgused jäävad vahemikku 40...55 m.

Pudeda katendi moodustavad kvaternaarisetted, mis koosnevad jääpaisjärve savikatest ja liivastest setetest ning moreenist. Pudeda katendi paksus on enamasti kuni 5 m, Kivinõmme mõhnastiku ning Vasavere ürgoru piirkonnas suurem.

Kivimkatendi paksusega 30...60 m moodustavad Ordoviitsiumi Nabala (O_{3nb}), Raiküla (O_{3rk}) lademe lubjakivid, Oandu (O_{2on}) savikas lubjakivi, Keila (O_{2kl}), Jõhvi (O_{2jh}), Idavere (O_{2id}) ja Kukruse (O_{2kk}) lademe lubjakivid.

Katendi kogupaksus on umbes 42...64 m, olles suurim näidisala (kaevanduse) lõunapiiril.

Tootsa kihi moodustavad põlevkivikihid A-F₁ koos karbonaatsete vahekihtidega. Tootsa kihi paksus näidisalal jääb vahemikku 2.6...3.1 m. Tootsa kihi pealispind lasub absoluutkõrgustel 1...-22 m, pealispinna langus toimub lõunasse aluspõhja üldise kallakuse suunas, keskmiselt umbes 3 m 1 km kohta.

Virtuaalse kaevandusena VK4 on käsitletud taotletava mäeeraldise näidisala piiresse jäävat osa pindalaga umbes 55 km². Virtuaalse kaevanduse toodangu ja aheraine kogused on arvatud kasutades Estonia II kaevandamisloa taotluse seletuskirjas Tabelis 4.1 toodud tootsa kihi keskmisi põhinäitajad. Kaevanduse eaks on kavandatud 30 aastat ja tervikutena 35% kaevanduse pindalast.

30 aasta jooksul kaevandatav kogus on umbes 170 milj. tonni ning aastane kogus umbes 5.6 milj. tonni. Aherainet tekib sellest kokku 60 milj. tonni ehk 2 milj. tonni/aastas. Aheraine maht puistena (puiste mahukaaluks on tinglikult 1.6 t/m³) on umbes 1.2 milj. m³ aastas.

Aluskihiks ehk lamamiks on Kesk-Ordoviitsiumi Uhaku (O_{2uh}) lademe savikas lubjakivi ja mergel, mis lasub maapinnast umbes 45...67 m sügavusel absoluutkõrgustel -1.7...-25 m.

Katendi paksuse tõttu on kaevandamismooduseks allmaakaevandamine.

Vastavalt kaevandamisloa seletuskirjale on kasuliku kihi avamiseks kaks võimalust – vertikaal- või kaldšaht. Arvestades antud objekti konfiguratsiooni ja olemasoleva kaevanduse infrastruktuuri lähedust on tõenäoline ja võimalik, et Estonia uuringuvälja plokk 18 kaevandatakse sisuliselt Estonia kaevanduse laiendusena ja avatakse strekiga piki kasulikku kihti. Puhatu ja Permisküla plokkide kaevandamiseks rajatakse eraldi kaldšaht. On tõenäoline, et aherainet pealmaa kompleksi maa-alale ei ladustata. Võimalik, et ka rikastusvabrikut selle kaevanduse teenindusmaale ei rajata. Eskiislahenduse järgi transporditakse kaemis lintkonveieriga Narva karjääri, mille tööstusterritooriumile rikastusvabriku rajamine on lihtsam.

Maavara väljamine toimuks kas puur-lõhketööde ja kamberkaevandamisega, lühi-eekombainiga kamberkaevandamisega või pika-eekombainiga lankkaevandamisega. Tõenäoline on, et kasutatakse mitmeid tehnoloogiaid kombineeritult.

Arvestades Eesti põlevkivimaardla eripära ja rikkevööndite paigutust on peaveostreki asetus üldjuhul kirde-edela suunal. Peaveostrekiga lõikuvad paneelstrekid, millede laius sõltub valitavast tehnoloogiast, näiteks kamberkaevandamise puhul on see ~1 200 m.

Kamberkaevandamisel toimuks kasuliku kihi kaevandamine kambrites. Altkaevandatud ala hoidmiseks projekteeritakse tervikud, mis on arvutatud lae pikaajaliseks hoidmiseks. Teede ja jõgede alt põlevkivi kaevandada ei kavatseta, nende alla jäetakse hoidetervikud, mis dimensioneeritakse lae igaveseks ülalhoidmiseks. Mäemassi ammutamine ja laadimine toimub kopplaaduritega, mis transpordib kaevis kraap-konveier-ümberlaadijani. Edasi suunatakse kaevis lintkonveierile, mille abil jõuab kaevis ka maapeale. Kamberkaevandamisel on põlevkivivaru kadu tervikutes kuni 35% kui kaevandamine toimub puur-lõhketöödega. Kui kaevandatakse lühi-eekombainiga on kadu 2 ... 5 % väiksem.

Lankkaevandamisel toimuks kihindi kaevandamine lankides (laavades). Kaevandamine toimuks pika-eekombainiga. Laava optimaalne pikkus sõltub valitavast kombainist, kuid varieerub 90 ... 150 m. Kaevandatud ala lagi varistatakse. Mäemassi transport maapeale toimub konveieriga. Lankkaevandamisel on välistatud ebastabiilsete alade tekkimise võimalus, sest toimub maapinna kontrollitud langetamine. Vajumise suurus, suund ja ulatus sõltub kasuliku kihi lasumustingimustest. Tehnoloogilised kaod on hinnanguliselt 7%.

Olenemata kaevandamistehnoloogia valikust tuleb kaevandamiseks tööesi põhjaveest kuivaks pumbata. Selleks tuleb kaevandusse valguv vesi koguda maa-aluste kraavide kaudu pumppla veekogurisse ja pumbata maapinnale, heljum settib settetiigis ja sealt juhitakse puhastatud vesi looduslikku veekogusse.

Kaevanduse tuulutus toimub maapinnale avanevate kaeveõõnte kaudu, tuulutusšurfide kaudu. Šurfide asukoht selgub kaevanduse projekteerimise käigus ja lepatakse kokku maaomanikega. Tuulutusšurfide all on ventilaatorid, mis paigutatakse maa-alla.

Elektrivarustus projekteeritakse võimalikult maa-alune, et minimeerida elektriliine ja juurdepääsuteid maapeal.

7.3 MAA-ALUSE KAEVANDAMISE VÕIMALUSED

IPT Projektijuhtimine OÜ on uurinud lõhede levikut ja iseloomu Narva karjääris põlevkivis ja selle lasumis töö [3] raames. Välja töötatud põlevkivibasseini kivimite tugevusmudel võimaldab projekteerimise käigus vajalikud geotehnilised prognoosid teha. Kuna põlevkivi kaevandamise kogemus erinevates sügavustes on praktiliste lahendustena olemas, ei olnud vajalik kaevandamise mõju hindamiseks geotehnilist analüüsi läbi viia. Samuti on mitmete autorite poolt (Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I. jt) põhjalikult uuritud põlevkivikaevanduste mõju maapinna stabiilsusele.