

29. Määruse „Lõhketöö projektile esitatavad nõuded“ vastavus praeguste kaevandamistingimustega põlevkivikaevanduses

Raul Roots

Sissejuhatus

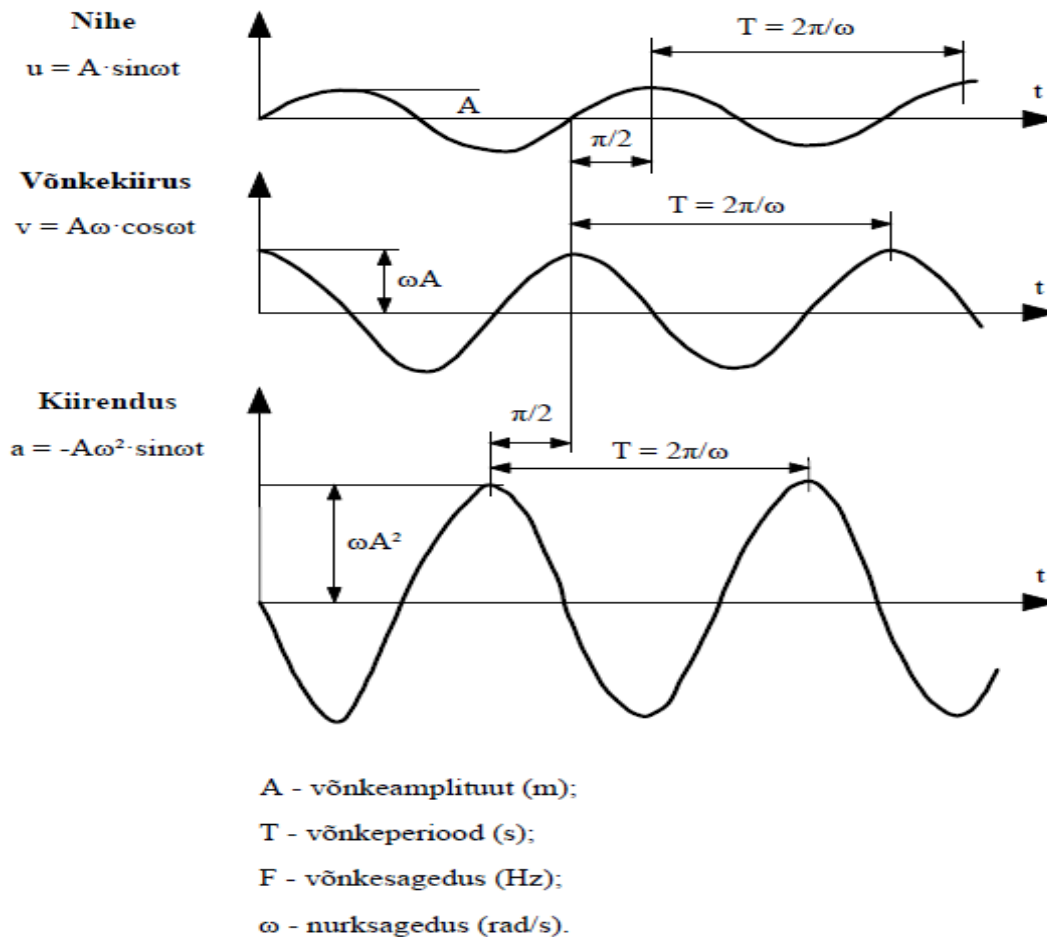
Eesti põlevkivikaevandustes on lõhketööd peamiseks kivimi raimamise mooduseks kaeveõõnsuste rajamisel, mis on tehnoloogilise protsessi üks olulisemaid osi. Lõhketöödega kaasnevad mitmed negatiivseid nähud, mis võivad häirida või kahjustada mõjupiirkonnas olevaid seadmeid ja hooneid ning inimesi. Suurimaks mõjuteguriteks võib pidada maapinna vibratsiooni ja impulssmüra.

Võnkeliikumine

Maapinna vibratsioon on võnkeliikumine, mida põhjustavad eelkõige lõhketöödest tekkivad seismilised lained. Horisontaalsed kihtidevahelised kontaktpinnad ja vertikaalsete lõhede võrk mõjutavad vibratsiooni tugevust eri suundades erinevalt, sõltudes lõhkelaengu ja –tööde piirkonnas asuva objekti vastastikusel paigutusest võnkeskkonnas. Korduva lõhkamise korral tuleb arvestada lõhkelaengu ja mõjustatava objekti asenditega võnkeskkonna geoloogilise ehituse suhtes. Seismilised lained võivad esile kutsuda lähedal asuvate hoonete ja muude tehisrajatiste kahjustusi [6].

Lihtsustades saab laineliikumist vaadelda kui harmoonilist võnkumist. Harmoonilise võnkumise parameetriteks on võnkekiirus, –kiirendus ja –amplituud. Sinusoidi võnkumiste põhiparameetrid ja nende vaheline seos on toodud Joonis 29-1 [5].

Lõhketööde seismilist mõju keskkonnale on Eesti põlevkivimaardlates uuritud juba kaheksakümnendate aastate lõpust. Algseks põhjuseks olid karjäärilõhkamised, kus korraga lõhati kümneid tonne lõhkeainet, mis põhjustasid suuri õhu- ja maavõnkeid. Allmaatöödel on alati kasutatud väikseid lõhkelaenguid, mida mõõdetakse kilogrammides. Kuna Eesti kaevandused on suhteliselt madalal, siis on lõhkelaengute kaugus maapinnani väike ja probleemid tekivad seal, kus allmaatööde eed lähenevad maapealsetele või maa-alustele objektidele (kaevud, kommunikatsioonid) [6,10].



Joonis 29-1 Võnkumise põhiparameetrid [5]

Mõju

Lõhketööde mõjupiirkonnas asuvaid objekte mõjutavad objektideni otse, peegeldunult ja murdunult levinud seismilised liitlained, mis on moodustunud laineliikide ühinemisel [1]. Liitlained koosnevad kolmest komponendist, mis mõjutavad objekte erinevalt. Need komponendid on [8]:

- pikikomponent, mida võib nimetada pikilaineks, mis tekitab mõjutatavates objektides perioodilisi horisontaalseid tõmbe- ja survepingeid;
- vertikaalne ristikomponent, mida võib nimetada ristlaine vertikaalkomponendiks, mis tekitab mõjutavates objektides perioodilisi vertikaalseid nihkepingeid;
- horisontaalne ristikomponent, mida võib nimetada ristlaine horisontaalkomponendiks, mis tekitab mõjutavates objektides perioodilisi horisontaalseid.

Lainekomponendid põhjustavad rikkeid seadmete töös ja kahjustusi ehitistes.

Standardid

Maksimaalne võnkekiirus on peamine hindamise kriteerium, millega on võimalik prognoosida lõhketööde mõju hoonetele. Lõhketöödest põhjustatud kahjustuste uurimiseks on erinevates riikides kehtestatud erinevad standardid, mis määravad ehitisele maksimaalse ohutu võnkekiiruse [2]. Eestis on seismiliste lainete intensiivsuse ja võimaliku kahjustava mõju hindamise peamiseks kriteeriumiks maksimaalne võnkekiirus. Sõltuvalt objekti konstruktsioonist, seismiliste lainete valdavast sagedusest, võnkeskkonna omadustest ja lõhketööde iseloomust, võib neile ehitistele kahjustusi tegemata mõjuda erineva intensiivsusega võnkeliikumine [8].

Eesti „Lõhketööde projektile esitatavad nõuded“ määrus põhineb Soome normatiivile [11], kus leitakse ehitise suurim lubatud võnkekiirus arvutuslikult. Selle meetodi kõige olulisemaks puuduseks on aga asjaolu, et Eestis puudub lubatud võnkesageduste piirnormid. Lõhketööde projekteerimisel ehitise maksimaalne lubatud võnkekiirus arvutatakse järgmise valemiga [3]:

$$v_{maks} = v_l F_k \text{ (mm/s),}$$

kus v_l – kaitstava ehitise kaugusest ja aluspinnast sõltuv suurim lubatud võnkekiirus (mm/s) (Tabel 29-1);

F_k – ehitise liigist sõltuv parandustegur (

Tabel 29-2).

Tabel 29-1 Ehitise suurim lubatav võnkekiirus sõltuvalt kaugusest ja aluspinnast [3]

Kaugus ehitiseni (m)	Suurim lubatud võnkekiirus (mm/s)		
	Ehitise aluspinnas		
	Savi, kruus, liiv, pehme moreen	Tugev moreen, kildad, pehme lubjakivi, liivakivi	Graniit, gneiss, tugev lubjakivi, tugev liivakivi
1	18	35	140
5	18	35	85
10	18	35	70
20	15	28	55
30	14	25	45
50	12	21	38
100	10	17	28
200	9	14	22
500	7	11	15
1000	6	9	12
2000	5	7	9

Tabel 29-2 Ehitise liigist sõltuv parandustegur [3]

Ehitise klass	Ehitise liik	Parandustegur, F_k
1	Rasked ehitised, nagu sillad ja sadamakaid	2,00
2	Betoon-, raudbetoon- ja teraskonstruksioonid, eelmainitud konstruksioonidest tööstushooned, pritsbetooniga kaetud allmaarajatised	1,50
3	Tellistest ja betoonist büroo- ja ühiskondlikud hooned, betoonvundamendile või kaljupinnasele ehitatud puuhooned	1,20
4	Betoonist või tellistest elumajad (ehitises ei tohi olla kasutatud kergbetooni ega silikaattelliseid), allmaakaablid. Kivistuv valubeton eaga üle ühe nädala	1,00
5	Kergbetonehitised (ka kõik muud ehitised, milles on kasutatud kergbetooni). Kivistuv valubeton eaga 3–7 ööpäeva	0,75
6	Eriti vibratsioonitundlikud ehitised, nagu muuseumid, kirikud ja teised kõrgete võlvide ja suurte pingeväljadega hooned, silikaattellistest hooned. Kivistuv valubeton eaga kuni 3 ööpäeva	0,65
7	Varinguohtlikud ajaloo- ja arhitektuurimälestised, varemed	0,50

Eesti lõhketööde määrus arvestab maksimaalse lubatava võnkekiiruse määramisel võnkekeskkonda, ehitise kaugust ja ehitise liiki. Kuid antud määrus ei määra lõhketöödest põhjustatud võnkesageduse suurusi, mille puhul oleks negatiivne mõju olemata.

Euroopa standardid arvestavad maksimaalse võnkekiiruse määramisel ka võnkesagedust ja kaitstava hoone liiki. Saksa standard DIN 4150 (Tabel 29-3) esitab piirmäärad, millest allapoole on ebatõenäoline, et vibratsioon põhjustab hoonetele viimistluskahjustusi. Eluhoonetes ei tohiks lühiajalise vibratsiooni kiirus ületada 5 mm/s madalatel sagedustel (≤ 8 Hz) ning vibratsiooni lubatud tasemed tõusevad kuni 20 mm/s sagedusel 100 Hz [2]. Prantsusmaa standard 87/70558 (Tabel 29-4) sarnaneb Saksa standardiga, kus on samuti määratud piirmäärad, millest allapoole on ebatõenäoline, et vibratsioon põhjustab hoonetele negatiivset mõju. Rootsi standard SS 460 48 66 arvestab lubatava võnkekiiruse määramisel võnkekeskkonna aluspinda (Tabel 29-5) [2].

Tabel 29-3 Ehitise suurim lubatav võnkekiiruse määramine Saksa standardi järgi [2]

Ehitise liik	Maksimaalne võnkekiirus (mm/s)		
	4-8 Hz	8-30 Hz	30-100 Hz
Tööstushooned	20	20-40	40-50
Elamud	5	5-15	15-20
Eriti tundlikud	3	3-8	8-10

Tabel 29-4 Ehitise suurim lubatav võnkekiiruse määramine Prantsusmaa standardi järgi [2]

Ehitise liik	Maksimaalne võnkekiirus (mm/s)		
	4-8 Hz	8-30 Hz	30-100 Hz
Vastupidavad	8	12	15
Tundlikud	6	9	12
Eritundlikud	4	6	9

Tabel 29-5 Ehitise suurim lubatav võnkekiiruse määramine Rootsi standardi järgi [2]

Aluspind	Võnkekiirus (mm/s)
Savi, liiv, kruus, pehme moreen	18
Tugev moreen, kildad, pehme lubjakivi, liivakivi	35
Graniit, gneiss, tugev lubjakivi	70

Lõhketööd

Allmaakaevandamisel kasutatakse puur-lõhketöid koristustöödel tulptervikutega kamberkaevandamise viisi korral. Puur-lõhketöid kasutatakse ettevalmistus- ja kapitaalkaevanduste läbindamisel. Horisontaalsed lõhkeaugud, mille läbimõõt on 35-45 mm ja sügavusega 4 m puuritakse pehmetesse põlevkivikihtidesse [6]. Plahvatusenergia purustab nii põlev- kui ka lubjakivi vahekihid. Lööklaine levib ühelikiirusega, mis põhjustab deformatsioone ja pingeid, mis on suuremad kivimi tugevusest ja mille tulemusena materjal puruneb lõhkeaugu lähipiirkonnas [7]. Plahvatusenergia paremaks ära kasutamiseks puuritakse vabapinna tekitamiseks kuni 6 horisontaalset puurauku, mille läbimõõt on 280 mm ja sügavus 4 m. Ära kasutatud energia suurus sõltub ka kivimi füüsikalise-mehaanilistest omadustest.

Mõõtesead

Seismouuringutel kasutatakse maavõngete registreerimiseks elektroonilisi seismomeetreid, millede mehaanilised võnkumised muundatakse geofoonide abil elektriliseks signaaliks. Geofoonid on kolmeteljelised (piki-, risti- ja vertikaallaine). Seismomeetritega on võimalik mõõta ka võnkesagedust, -kiirendust ja/või -amplituudi [6,8].

Käesoleva uuringu tegemiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituudile kuuluvat seismomeetrit. Mõõtesead on kaasaskantav ning on mõeldud kasutamiseks välimõõtmisteks.

Mõõtmistulemused

Töökäigus fikseeriti 99 seismilist aktiivsust mõõtekaugusel 135-271 m. Laengukogus varieerus 64-255 kg piires ning võnkekiirused jäid 1,7-4,2 mm/s piiridesse.

Seismiliste lainete intensiivsus

Lõhketöödest põhjustatud seismiliste lainete intensiivsuse prognoos seisneb seismiliste lainete intensiivsuspameetrite määramises, kui on teada plahvatusel vabanenud energia, kaugus lõhkamiskohast ja võnkekeskkonna omadused. [9].

Vabanenud energiakogus sõltub ühel ajahetkel plahvatavast lõhkeainekogusest ning lõhkeaine omadustest. Kuna lõhkeainete plahvatusenergia on põlevkivi kaevandamisel küllaltki kitsastes piirides muutuv suurus, siis tekkinud seismiliste lainete intensiivsus sõltub viitegrupi või laengu suuruselt. Kaevanduses lõhketöödest põhjustatud seismiliste lainete prognoosimiseks tuleb leida võnkekiiruse sõltuvust kahest muutujast – kaugusest lõhkamiskohast (d) ja laengu suuruselt (Q) [6,8].

Taandatud kaugus

Taandatud kaugus (d_s) on normaliseeritud tegur, mida kasutatakse selleks, et samas võnkekeskkonnas erinevate kauguste ja laengusuurusete juures sooritatud mõõtmised oleksid võrreldavad. Taandatud kauguse kaudu saab oletada maksimaalset võnkekiirust, kui on teada laengukogus (Q) ja mõõtekaugus (d) [4]. Taandatud kauguse valem on [5]:

$$d_s = d \cdot Q^n,$$

kus d – mõõtekaugus (m) ja Q^n – laengumass (kg).

Astendaja n väärtus sõltub plahvatuse mõjukaugusest. Kui plahvatuse mõjukaugus põlevkivikaevandamiselt on üle 30 m, siis võetakse astendaja suuruselt $-\frac{1}{2}$, seega seismilise mõju hindamiseks kasutatakse allolevat valemit [6,17]:

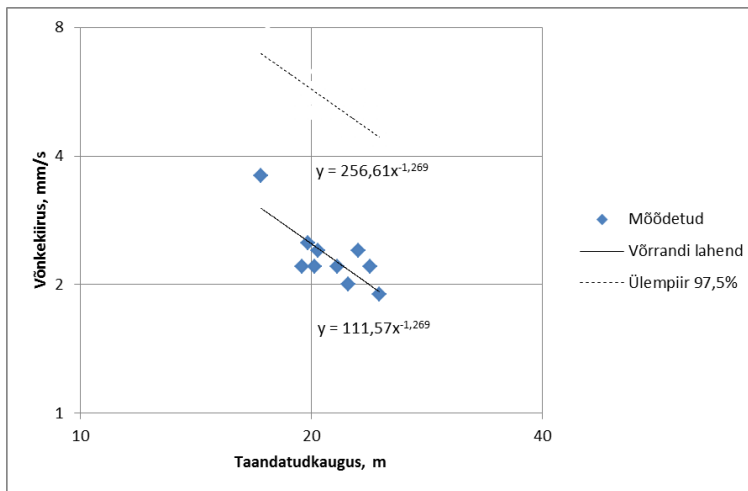
$$d_s = \frac{d}{\sqrt{Q}},$$

kus d – mõõtekaugus (m) ja Q – laengumass (kg).

Võnkekiiruse prognoos

Võnkekiirus sõltub hoitava objekti kaugusest lõhkamiskohast ja laengu massist. Joonisel (Joonis 29-2) on näha mõõtepunktide koonduvust sõltuvalt taandatud kaugusest ühele joonele. Sellega seonduvalt võib väita, et mõõdetud võnkekiiruse ja taandatud kauguse

vahel valitseb lineaarne seos. Matemaatiliselt on tuletatud 97,5% tõenäosusega võrrandi ülemine usalduspiir [6].



Joonis 29-2 Võnkekiiruse prognoosimise graafik

Tulemused

Maksimaalsete seismiliselt ohutute laengu suuruste võrdlemisel kasutati „Lõhketöö projektile esitatavad nõuded“ määruse arvutusvalemeid. Maksimaalseks seismiliselt ohutuks laengusuuruseks nimetatakse laengut, mis kindlas võnkekeskkonnas plahvatades ei tekita hoitavates objektides lubatust suuremat võnkeliikumist [6]. Määruses on maksimaalne seismiliselt ohutu laengu suuruse arvutusvalem kaevandamissügavusel 60 m [3]:

$$Q = \left[\frac{d}{\left(\frac{6657}{v_{maks}} \right)^{0,459}} \right]^2.$$

Seda valemit on võimalik avaldada taandatud kauguse kaudu [8]:

$$d_s = \frac{d}{\sqrt{Q}} \rightarrow \frac{d}{\sqrt{Q}} = \left(\frac{B}{v} \right)^{-\frac{1}{A}},$$

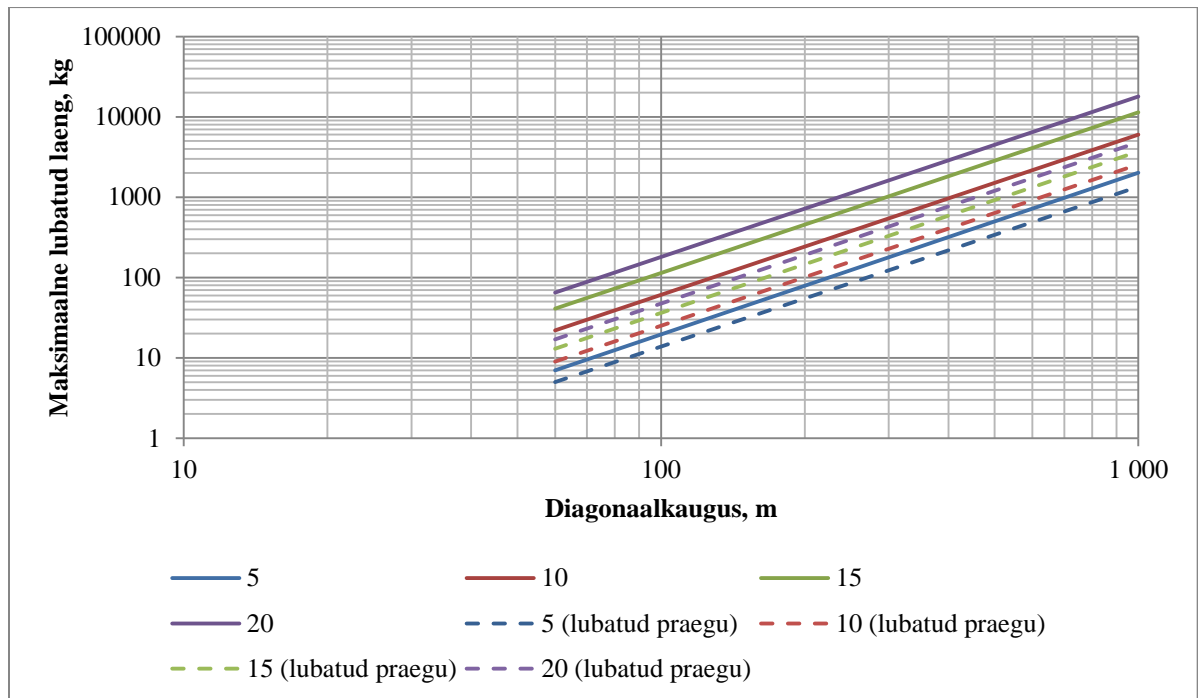
millest avaldub laengusuurus (Q):

$$Q = \left[\frac{d}{\left(\frac{B}{v} \right)^{-\frac{1}{A}}} \right]^2.$$

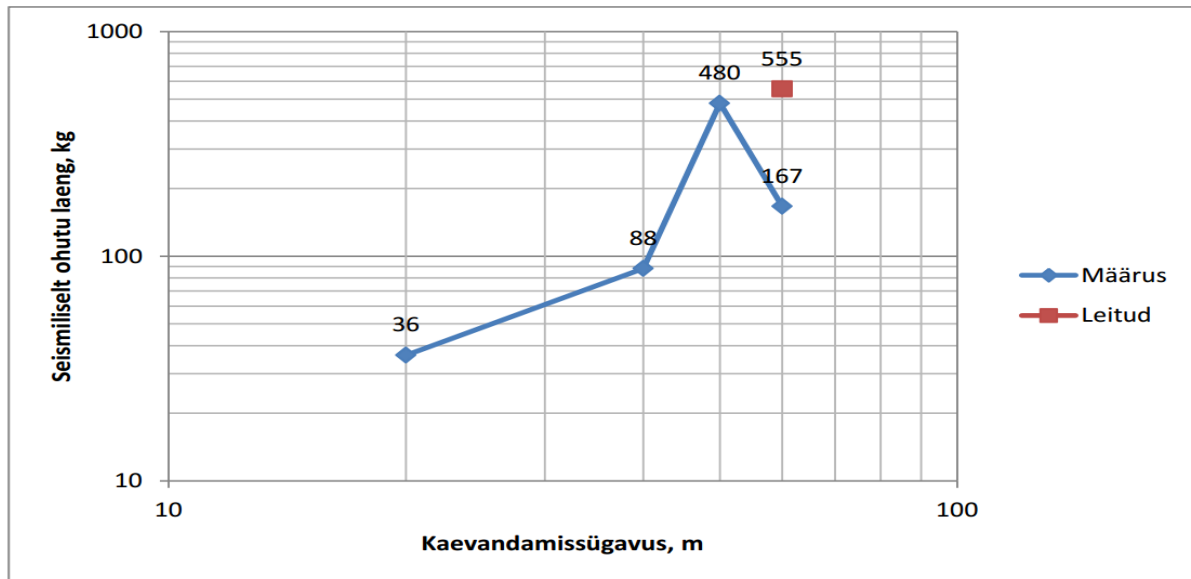
Saadud arvutusvalemi tulemused [6]:

$$Q = \left[\frac{d}{\left(\frac{256,61}{v_{maks}} \right)^{0,788}} \right]^2$$

Ohutu laengusuurus määrati kasutades võnkekiiruse sumbumise võrrandit ülemisel usalduspiiril. Saadud seismilised ohutud laengud on suuremad kui hetkel kehtivas lõhketööde määruses, kus need varieeruvad 1,5-4 korda (Joonis 29-3). Lisaks näitas võrdlusanalüüs, et kasutades lõhketööde määruse arvutusvalemeid, siis alates 50 m kaevandamissügavusest laengukogus väheneb mitu korda (Joonis 29-4).



Joonis 29-3 Seismiliselt ohutu laengusuurus [6]



Joonis 29-4 Maksimaalne seismiliselt ohutu laengukogus* [6]

*Kaugus lõhkamiskohast hoitava objektini 200 m ja maksimaalne lubatud võnkekiirus ehitisele 17 mm/s

Kokkuvõte

Arvestades ehitise liiki ja lõhketööde kaugust, siis antud võnkekiirused ei kujutanud ohu kaitstavale objektile, kuna tulemused olid umbes 8 korda väiksemad kui praegu nõuetega lubatud.

Saadud maksimaalne seismiliselt ohutu laengusuurus on mitu korda suurem kui kehtivas määruses lubatud. Seda asjaolu võib tingida, et viimased taolised uuringud on läbiviidud 2000. aastate alguses, mil kaevandamissügavus oli 20-30 m vähem kui praegustes Eesti sügavamates põlevkivikaevandustes.

„Lõhketöö projektile esitatavad nõuded“ ohutu laengukoguse arvutamisel väheneb alates 50 m kaevandamissügavusest laengukogus mitu korda. Kaevandamissügavuse suurenedes toimub võnkekiiruse sumbumine ja ohutu laengukogus peaks olema suurem kui eelneval sügavusel. Võib järeldada, et määrus põhineb aegunud andmetel ning andmete töötlemisel oli tehtud viga, mida on võimalik tõestada uute katsemõõtmistega, et viga korrigeerida.

Lisaks antud arvutusvalemid, mis on arvatud põlevkivikaevandustes ja –karjäärides, kehtivad praeguses seadusandluses ka lubjakivi kaevandajatele. Lõhkeaine plahvatusenergia kutsub kivimis esile pingeid ja deformatsioonid, mis on suuremad kui kivimi tugevus. Survetsoonis toimuvad purustused, kus realiseerub plahvatuse energia, mille suurus sõltub kivimi füüsikalise-mehaanilistest omadustest, kuid need suurused on lubja- ja põlevkivil erinevad.

Töö on seotud uuringuga ETP AR12007 nr. 3.2.0501.11-0025 „Põlevkivi kadudeta ja keskkonnasäästlik kaevandamine“ – mi.ttu.ee/etp.

Viited

1. Dowding, C. H. Blast vibration monitoring and controll. New Jersey : Prentice-hall Inc, 1895;
2. Karadogan, A., Kahriman, A., Ozer, U. A new damage criteria norm for blast-induced ground vibrations in Turkey. – Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7, 1617-1626;
3. Lõhkematerjaliseadus. (2004). – Riigi Teataja I, 25, 170;
4. Nateghi, R. Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units. – International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48, 899-908;
5. Persson, P.-A., Holmberg, R., Lee, J. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton : CRC Press, 1994;
6. Roots, R. Lõhketöödest põhjustatud maavõngete analüüs põlevkivikaevanduses : bakalaureusetöö. Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut, Tallinn, 2014;
7. Rževski, V. Osnovõ fiziki gornõh porod. Moskva : Nedra, 1984;
8. Tomberg, T. Lõhketöödest põhjustatud maavõngete analüüs põlevkivi kaevandamisel : magisträtöö. Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut, Tallinn, 1998;
9. Toomik, A., Tomberg, T. Blast vibrations in oil shale underground mining. – Oil Shale, 1998, 1, 65-74;
10. Toomik, A., Tomberg, T. Lõhkamiste mõju ohjeldamine. – Põlevkivi talutav kaevandamine : konverentsi ettekannete teesid ja artiklid, 2000, 16-18;
11. Vuolio, R. Suomen Maarakentajien Keskusliito. Forssa, 1991.