



MÄRGSETITI ALLJIG-S400 TÖÖPARAMEETRITE OPTIMEERIMINE EESTI PÕLEVKIVI KAEVISELE

Magistritöö

Üliõpilane: Ragnar Kauril 204341LARM

Juhendaja: Erik Väli, vanemlektor, PhD

Õppekava: Maapõueressursid LARM18/20

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Ragnar Kauril
/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Erik Väli
/allkirjastatud digitaalselt/

Töö on lubatud kaitsmisele.
Kaitsmiskomisjoni esimees: Olle Hints
/allkirjastatud digitaalselt/

Sisukord

Mõisted.....	5
Sissejuhatus	13
1. Uuringuvaldkonna ülevaade	15
1.1 Põlevkivi	15
1.2 Kaevis.....	17
2. Rikastamine ja selle ajalugu	19
2.2 Põlevkivikaevise käsitsi rikastamine maa all	20
2.3 Pneumaatiline ehk õhkrikastamine.....	21
2.4 Hüdrotsüklon ja märgrikastamine.....	21
2.5 Rikastusvabriku tootmismahud VKG näitel.....	22
2.6 Rikastamine ja selle efektiivsustegurid	24
2.7 Rikastusjätmed	25
3 Märgsetiti AllJig-S400.....	27
3.1 AllJig S-400 (edaspidi ka setiti) üldiselt	27
3.2 AllJig-S400 setiti peamised komponendid	27
4. Märgsetitamise katsetööd Aacheni ülikoolis	30
4.1 TalTech Geoloogia instituudi märgsetitamise uuring ja selle tulemused	30
4.2 Valem kütvuse arvutamiseks mahumassi alusel.....	34
5. Märgsetitamise katsetööd TalTech GI mäendustingimuste laboris	36
5.1 Katsetööde metoodika.....	36
5.1.1 Katse 1.....	48
5.1.2 Katse 2	50
5.1.3 Katse 3.....	54
5.1.4 Katse 4.....	56
5.1.5 Katse 5.....	58
5.2 Proovide edasine käsitlemine	59
6. Kütvuse määramine	61
7. Kivimite mahumassi määramine.....	65
8. Katsetööde tulemused	71
8.2 Katsetööde tulemuste analüüs	74

8.3	Rikastamisprotsessi tunnuste arvutuskäik	78
8.4	Järeldused	82
	Kokkuvõte	84
	Tänuavaldused.....	85
	Kasutatud kirjandus.....	86
	Lisad	89
	Lisa 1: TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud kütteväärtuse määramise tulemused, 05.04.2022.....	89
	Lisa 2: Põlevkivi kaevis allmaarikastamine ja rikastusjääkide ladustamine väljatöötatud alasse uuringu raames TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud põlevkivi kütteväärtuste tulemused, 30.03.2021	90
	Lisa 3: Põlevkivi kaevis allmaarikastamine ja rikastusjääkide ladustamine väljatöötatud alasse uuringu raames TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud põlevkivi kütteväärtuste tulemused, 08.12.2020	92
	Elektronilised lisad.....	93
	Lõputöö ülesanne	94
	Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	95

Mõisted

Kaevis – Kaevandamisel raimatud kivim

Aheraine – kaevandatava maavara kaevises esinevad kivimid, mida kaevandamise ajal pole majanduslikult või tehnoloogiliselt mõtet kasutada, kuid mis võib leida hiljem kasutust (Ignatovets, 2014).

Kütvus – materjali energia ja massi suhe, mõiste „kütteväärtus“ soovitatav vorm

Rikastamine – kaevisse väärtust tõstev või edasist töödeldavust parandav protsess või tehnoloogia

Märgsetiti – töös kasutatav seade põlevkivi kaevisse rikastamisel, mis kasutab pulseerivat veejuga

Kerogeen – orgaaniline aine põlevkivis, mille kütteväärtus võib olla 30-40 MJ/kg

Tase/level – märgsetitis rikastamisel tekkinud kihid

Rikastamise produktide saagis – näitab, millise osa kaevisest moodustavad rikastamise produktid

Saagis – kasuliku aine kogus lähtemassist või pindalalt

Rikastusefekt – arvvärtus, mis näitab, mitu korda suureneb kütvus kaubapõlevkivis võrreldes kaevisega

Koonduvusaste – näitab, mitu korda lõpp-produkti mass on väiksem kaevisse massist

ROM (*Run of mine*) – kaevis inglise keeles

Annotatsioon

Maavarade kaevandamisel ja töötlemisel pööratakse tänapäeval üha rohkem tähelepanu ressursitõhusate, ringmajanduslike ja keskkonnasõbralike tehnoloogiate arendamisele. Maavarade rikastamine on maavarade väärtuslike koostisosade ja aheraine eraldamine toormest nende keemilist koostist muutmata. Maailmas levinumad rikastusmeetodid on mehaaniline rikastamine, gravitatsioonirikastamine, magnetiline rikastamine ja elektrostaatiline rikastamine.

Eesti põlevkivikaevandustes kasutatakse käesoleval ajal kaevis rikastamiseks gravitatsioonirikastamise meetodit, mis põhineb kaevis märgetitamisel magnetiidi suspensioonis ja mille käigus eraldatakse kaevis mineraalne osa, orgaaniline osa ja suletised. Selle protsessiga kaasnev veemajandus ei ole keskkonnohutu, nõuab samuti suuremahuliste hiiva- ja settebasseinide rajamist ja muu kallihinnalise taristu olemasolu. Protsessi omahinda tõstab samuti erinevate lisandite nagu magnetiit jm. sisseost ja töömahukus protsessi läbiviimisel.

Aastatel 2019-2021 tegeles TalTech Geoloogia instituudi teadusgrupp, kuhu kuulus ka käesoleva magistritöö autor, põlevkivi efektiivsemate ja keskkonnasäästlike tehnoloogiate otsimisega. Uuringu raames koostati andmebaas põlevkivi võimalike rikastamise tehnoloogiate kohta ja loodi arvutusmudel, mille abil käesoleva töö autor analüüsis erinevate tehnoloogiate sobivust põlevkivi kaevis rikastamiseks. Uuringute tulemusena sai kinnitust pulseeriva veejoga setiti sobivus põlevkivi rikastamiseks, samuti selle protsessi suurem keskkonnasäästlikkus ja majanduslik efektiivsus magnetiidi suspensiooniga rikastamise ees.

Teoreetilistele uuringutele järgnesid praktilised tegevused, mille raames koostati pilootseadmel läbiviidavate katsetööde metoodika saksa teadlaste jaoks, magistrant valmistas ette partii kaevist Ojamaa kaevanduses ja selle transpordi Saksamaale, Acheni Ülikooli. Katsetööde järgselt osales ta Saksamaalt tulnud proovide kütvuse määramisel TalTech Energiatehnoloogia instituudis.

Magistritöö valmimise käigus on koostatud rida uuringumaterjale ja sooritatud teadusuuringule jätkutöö, mis kujunes ka lõputöö kandvaks teemaks – uurida AllJig-S400 setiti tehniliste parameetrite, veejoo pulsseerimis sagedus ja veemahuti rõhk, väärtuste muutmise mõju seadme rikastamiseefekti suurendamiseks.

Selleks tarnis autor Ojamaa kaevandusest katsetöödeks täiendava koguse kaevist, töötles ja katsetas seda Saksamaa seadmega analoogsel, GI mäendustingimuste labori AllJig-S400 setitil. Rikastamistööde järgselt osales autor TalTech Energiatehnoloogia instituudis katsetatud kaevis proovide kütvuste määramisel.

Magistritööle püstitatud eesmärk sai saavutatud, kuna töö käigus leiti soovitud seosed setiti veemahutisse suunatava õhu suruõhu ja mahuti veekeskonna pulsside sageduste vahel. Katsetööde käik ja tulemuste analüüs kinnitab, et setiti AllJig-S400 tööparameetrite väärtuste optimeerimine muudab rikastamise töörežiimid efektiivsemaks, mis toob omakorda kaasa

rikastamisefekti suurenemise s.t. rikastatava materjali kütvuse suurenemise võrreldes sisendtoorme kütvusega.

Abstract

In the extraction and processing of mineral resources, more and more attention is paid today to the development of resource-efficient, circular economic and environmentally friendly technologies. Mineral enrichment is the separation of valuable mineral resources and waste material from raw materials without changing their chemical composition. The most common enrichment methods are mechanical enrichment, gravity enrichment, magnetic enrichment and electrostatic enrichment.

In Estonian oil shale mines, a method of gravitation enrichment is currently used for enriching the ROM, which is based on wetting the ROM in magnetite suspension, during which the mineral part of the ROM, the organic part and the closures are separated. However, the water management involved in this process is not environmentally safe, and it also requires the construction of large-scale slime- and sedimentary pools and other high-cost infrastructure. The cost of the process is also increased by buying various additives such as magnetite, etc. and the work-intensity in carrying out the process.

In 2019-2021, the mining and mineral technology research group at the TalTech Department of Geology, including the present author, was engaged in the search for more efficient and environmentally friendly oil shale technologies. Within the framework of the study, a database of the technologies of possible enrichment of oil shale was compiled and a calculation model was created, with the help of which the author analyzed the suitability of different technologies for enriching oil shale ROM. As a result of the studies, the suitability of sediment with a pulsating jet of water for oil shale enrichment was accepted, as well as the greater environmental sustainability and economic efficiency of this process compared to the magnetic suspension enrichment.

The theoretical studies were followed by practical activities, in the framework of which the methodology of the experimental work carried out on the pilot device for German scientists was compiled, the author prepared a batch of ROM in the Ojamaa mine and its transport to Germany, the University of Aachen. After the test work, he participated in determining the calorific value of the samples from Germany at the Institute of Energy Technology of TalTech.

In the course of completing the master's thesis, a number of research materials have been prepared and a follow-up work has been carried out for the research, which also became the main theme of the thesis – to study AllJig-S400 technical parameters, water jet pulse frequency and water tank pressure, the effect of changing values to increase the enrichment effect of the device.

To this end, the author supplied the required amount of trenches for experimental work from the Ojamaa mine, processed and tested it on an AllJig-S400 device in the GI Mining Conditions Laboratory, analogous to the German device. After the enrichment work, he participated in determining the calorific value of the ROM samples tested at the Department of Energy Technology of TalTech.

The goal set for the thesis was achieved, as in the course of the work the desired connections were found between the compressed air directed to the water tank and the frequencies of the pulses of the aquatic environment of the tank. The course of the test work and the analysis of the results confirms that optimizing the values of the operating parameters of the AllJig-S400 makes the operating modes of enrichment more efficient, which in turn leads to an increase in the enrichment effect, i.e. an increase in the calorific value of the enriched material compared to the calorific value of the input raw material

Jooniste loetelu

Joonis 1. Põlevkivikihind, raimates saadud kaevis ning rikastades toodang (Reinsalu ja Jürs, 2019)	16
Joonis 2. Põlevkivi levikuala (Aaloe jt, 2006)	17
Joonis 3. Kaevis maa all kambris. Pilt tehtud emeriitprofessor Enno Reinsalu poolt.	18
Joonis 4. AllJig S-400 kolmvaates (Weitkämper, 2020)	29
Joonis 5. Märgsetitamise kolme katse eri kihtide proovid	31
Joonis 6. Märgsetitamise kolme katse eri kihtide proovid (Väli jt, 2021)	33
Joonis 7. Märgsetitamise produktide mahumass ja kütvus režiimil indeksiga V2 (Väli jt, 2021)	33
Joonis 8. Märgsetitamise produktide mahumass ja kütvus režiimil indeksiga V3 (Väli jt, 2021)	33
Joonis 9. Märgsetitatud kaevis produktide mahumassi ja mõõdetud kütvuse vaheline seos on kirjeldatud valemiga $Q = -\ln((d-1)/1,55)/0,07$. MJ/kg (Väli jt, 2021)	34
Joonis 10. AllJig-S400 märgsetiti	37
Joonis 11. Kaevis big-bag kotis Särghaua õppekeskuse territooriumil	38
Joonis 12. Koppladur Avant 745 koos mobiilse purusti Komplet Italia SLR RCB 6000	39
Joonis 13. Lõputöö autor koppladurit koos purustiga opereerimas	39
Joonis 14. Kaevis purustamine mahutitesse	40
Joonis 15. Kaevis purustamisprotsess	40
Joonis 16. Ämbrid täis purustatud kaevis	41
Joonis 17. Purustatud kaevis kaalumise	42
Joonis 18. Purustatud kaevis, mis läks sõelumisele	43
Joonis 19. Sõelumiseks kasutatud sõelad	44
Joonis 20. Tükisuurusega 32-63 mm sõelumisel saadud kuhila	44
Joonis 21. Esialgse kuhja jaotamine neljaks	45
Joonis 22. Proovide kvarteerimine sobivaks koguseks	46
Joonis 23. Katse 1 setitis AllJig-S400	48
Joonis 24. Katse 1 kihid pärast setitamist	49
Joonis 25. Nelja erineva kihi separeeritud põlevkivi kogused, vasakult L1-L4	50
Joonis 26. Katse nr 2 setitis AllJig-S400	51
Joonis 27. Katse 2 neli kihti	52
Joonis 28. Katse 2 pärast setitamist, paremalt L1-L2	53
Joonis 29. Katse 2 pärast setitamist, paremalt L3-L4	53
Joonis 30. Katse 3 setitis AllJig-S400	54
Joonis 31. Katse 3 pärast setitamist, kujutatud pealmist kihti L1	55
Joonis 32. Katse 3 pärast setitamist, paremalt L1 ja L2	55
Joonis 33. Katse 3 pärast setitamist, paremalt L3 ja L4	56
Joonis 34. Katse nr 4 setitis AllJig-S400	56
Joonis 35. Katse 4 erinevad tasemed setitis	57
Joonis 36. Katse 4 tasemete jaotus ämbrites, paremalt L1-L4	58
Joonis 37. Katse 5 setitis AllJig-S400	58
Joonis 38. Katse 5 neli erinevat taset	59
Joonis 39. Eraldatud proovid kütteväärtuse määramiseks	60
Joonis 40. Proovide purustamine energiatehnoloogia laboris	61
Joonis 41. Metallkuulid anumas proovi jahvatamiseks	62

Joonis 42. Seade proovi jahvatamiseks	63
Joonis 43. Erinevad proovid enne ja pärast jahvatamist.....	63
Joonis 44. Anum kütteväärtuse määramiseks koos prooviga	64
Joonis 45. Seade IKA-Calorimeter C5000 kütteväärtuse määramiseks	64
Joonis 46. Silindriline anum, kuhu asetatakse proov kütteväärtuse määramiseks	65
Joonis 47. Mahumass ja kütteväärtused katsele 1	72
Joonis 48. Mahumass ja kütteväärtused katsele 2	72
Joonis 49. Mahumass ja kütteväärtused katsele 3	73
Joonis 50. Mahumass ja kütteväärtused katsele 4	73
Joonis 51. Mahumass ja kütteväärtused katsele 5	74
Joonis 52. Mahumass ja kütteväärtused katsele 6	74
Joonis 53. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 1	76
Joonis 54. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 2	76
Joonis 55. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 3	76
Joonis 56. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 4	76
Joonis 57. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 5	77
Joonis 58. Arvutatud ja mõõdetud kütvuse punktide paiknemine normatiivse valemi pöördfunktsiooni: $Q = -\ln((d - 0.98)/1,3831)/0,0717$ MJ/kg graafikul	77

Tabelite loetelu

Tabel 2. Rikastusvabriku konveierite tootmismahud (Birjuk, 2014).....	24
Tabel 3. Komponentide tabel (Weitkämper, 2020).	27
Tabel 4. Kaevis Ojamaa kaevandusest Aacheni laboratoorsete katseteks (Väli jt, 2021).....	30
Tabel 5. Märgsetitamise katsete režiimid ja töötlus (Väli jt, 2021).	32
Tabel 6. Anumates olnud kaevise mass	43
Tabel 7. Proovide massid	46
Tabel 8. Katsete tööparameetrid	48
Tabel 9. Katse 1 analüüs.....	49
Tabel 10. Katse 2 analüüs.....	51
Tabel 11. Katse 3 analüüs.....	54
Tabel 12. Katse 4 analüüs.....	57
Tabel 13. Katse 5 analüüs.....	59
Tabel 14. Setiti 1. katse mahumassi määramine.....	66
Tabel 15. Setiti 2. katse mahumassi määramine.....	67
Tabel 16. Setiti 3. katse mahumassi määramine.....	67
Tabel 17. Setiti 4. katse mahumassi määramine.....	68
Tabel 18. Setiti 5. katse mahumassi määramine.....	68
Tabel 19. Mahumasside keskmised.....	70
Tabel 20. Katsetööde tulemused tabelina	71
Tabel 21. Massijaotuse suhe katsete lõikes	75
Tabel 22. Võimalikud setiti kihtide kütteväärtuste nihkumised	75
Tabel 23. Rikastusefekti väärtused	78
Tabel 24. Kihtide keskmised rikastamistunnuste arvutamiseks.	80
Tabel 25. Rikastamistunnused.	80
Tabel 26. Kahe erineva meetodiga saadud rikastusefekti väärtused	80

Sissejuhatus

Põlevkivist toodetud elekter ja põlevkiviõli on olnud Eesti riigile ajalooliselt oluliseks energiaallikaks. Kaasaegse elektrijaama energiaplokkides toodetakse elektrienergiat põlevkivile lisatuna ka muudest materjalidest nagu hakkepuut, jäätmed või põlevkivigaas, mis tekib kõrvalsaadusena vedelkütuste tootmisel. Kasutades lisana põlevkivigaasi, kasutatakse ära peaaegu kogu põlevkivis leiduv energia. Põlevkiviõli kasutatakse eelkõige põlevkivi keemiatööstuse toorainena ning kütte- ja immutusõlina.

Et elektri ja põlevkiviõli tootmise protsess muutuks veelgi efektiivsemaks tuleb sinna kaasata võimalikult kõrge kvaliteediga tooret, mida saavutatakse kaevise rikastamise teel. Rikastamise tehnoloogia valiku määravaks teguriks on lisaks energeetilise kaubapõlevkivi tootmisele tükikivist (Viru Keemia Grupp OÜ Kiviter tehnoloogia ja Kiviõli Keemiatööstus TSK-500) (Meybaum, 2020) ning peenikivist (Eesti Energia Enefit Power, Enefit 140 ja 280 [Sutter, H ja Klasen, H., 2021], Petroter I, II, III Viru Keemia Grupp OÜ-s) (VKG, 2022) põlevkiviõli tootmine.

Põlevkivi kütteväärtus (edaspidi kütvus) sõltub kerogeeni sisaldusest kivimis ning tavaliselt jääb see vahemikku 5-20 MJ/kg. Rikastamisega suurendatakse seda kvalitatiivset näitajat sellest paekivi eraldamisega. Põlevkivis kasuliku komponendi, kerogeeni kütvus pärast seda on ligikaudu 30-40 MJ/kg.

Eestis on põlevkivi läbi aastate rikastatud erinevate tehnoloogiatega. Sadakond aastat tagasi toimus see protsess naiste kätetöö abil. Käesoleval ajal on protsess mehhaniseeritud ning rikastamine toimub rikastusvabrikutes märgetitamise teel magnetiidi suspensioonis. Kaevise koostisosadel: orgaanikal, mineraalsel osal ja suletistel on erinev mahumass ning see asjaolu tekitab nende osade eraldumise teineteisest teatud magnetiidi suspensiooni tiheduse juures. See põhjustab raskemate lubjakivitükkide vajumise põhja, ning kergematel põlevkivi tükkidel suspensiooni pinnale jäämise. Suspensiooni tiheduse reguleerimisega, saab muuta rikastamise saagikust.

Uute kaevanduste, Uus-Kiviõli, Estonia 2 või Narva allmaa, tekkimisel on tarvis muuta nii kaevandamine, kui ka rikastamine Euroopa direktiivide (Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2001/81/EÜ ja 2010/75/EL, Piiriülese keskkonnamõju hindamise konventsioon ning Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2011/92/EL) (Energiatalgud, 2021) põhjal keskkonnasõbralikuks, tänu millele ei pea kaevandusettevõtted direktiivide täitmisel maksma suuri kompensatsioone.

Käesoleva magistr töö autor osales perioodil 2019-2022 TalTech Geoloogia instituudi erinevates uuringutes, mis otsisid Eesti põlevkivile uusi, efektiivsemaid ja keskkonnasõbralikumaid rikastamistehnoloogiaid.

Käesoleva magistr töö eesmärgiks oli setiti AllJig-S400 tehniliste parameetrite muutmise teel optimeerida rikastamise töörežiimid efektiivsemaks. Töö teoreetilise osa jätkuks tehti katsetöid, mille käigus magistr töö autor tõestas praktilise tegevusega püstitatud eesmärkide saavutamise.

Töö eesmärgi fokusseerimiseks püstitati järgnevad uuringuküsimused:

1. Kas setiti AllJig-S400 tööparameetrid, nagu õhu surverõhu ja vedeliku pulseerimis sageduse muutmisel on mõju kivimitükkide sorteerivusele ja nende kütvusele?
2. Kas kaalutud proovide tegelikud mahumassid on samas suurusjärgus arvutatud mahumassidega ning kas ja kuidas nende erinevus võib mõjutada akrediteeritud laboris tehtud kütvuste väärtusi?
3. Millised eelised ja puudused on märgetitamisel põlevkivikaevandustes kasutusel oleva magnetiidi suspensioonis rikastamistehnoloogia ees?

Lõputöö esimestes peatükkides annab magistritöö autor ülevaate maavarade rikastamise valdkonnast, fokusseerides tähelepanu Eesti põlevkivile ja selle ajalooliselt väljakujunenud rikastamistehnoloogiatele.

Üldosale järgnevates peatükkides kirjeldab autor oma tegevusi erinevates uuringutes, mille käigus sai tõestatud pulseeriva õhujoaga märgetiti AllJig-S400 sobivus põlevkivi rikastamiseks. Lõputöö raames uuriti setiti konstruktsiooni, tööpõhimõtteid ja tehniliste parameetrite reguleerimisvõimalusi eesmärgiga suurendada rikastamise efekti. Katsetööde ja meetodikate kirjeldustes on antud ülevaade kasutatud toormest, selle omadustest, sisendmaterjali ettevalmistamisest ja seadme seadistamisest tööks.

Töö annab ülevaate tegevustest Ojamaa kaevanduses toorme hankimisel ja selle eeltöötlemisel seal ning mäendustingimuste laboratooriumis läbiviidud tegevustest nagu toorme purustamine, sõelumine, setitamine, saagise mahumasside mõõtmine ja valminud proovide kütvuste määramisest.

Tulemuste osas analüüsib autor katsetöid, võrdleb neid Tallinna Tehnikaülikooli varasemate uuringutega. Magistritöö järelduste peatükis ja kokkuvõttes esitatakse ettepanekud setiti tööparameetrite reguleerimise ja töörežiimide optimeerimise kohta ning antakse ülevaade selle positiivsest mõjust rikastusefektile.

1. Uuringuvaldkonna ülevaade

Põlevkivi rikastamine on kaevise väärtust tõstev või töötlemist parandav protsess või tehnoloogia ning väärindamine on mineraaltoorme töötlemine kas õliks, ehitusmaterjaliks või täiteks. Kaevist saab kirjeldada kui kivimit või setet, mida kavatakse rikastada, et saada kõrgema väärtusega toodet. Rikastamisel tekivad kontsentraat, jääk ja hiib, mis kõik on rikastamisel saadud produktid. Põlevkivis on tuumaines kukersiit, mille kasulik komponent on kerogeen. Kasutu aine on lubjakivi ja vesi ning kahjulik lisand on väävel. Kukersiit ehk puhas põlevkivi on tuumaines, mida üritatakse kätte saada. Kerogeeni sisaldus kukersiidis on enamasti 30-50% vahemikus (Reinsalu & Väli, 2022). Orgaaniline aine määrab ära õlisaagise ja kütteväärtuse (Adamson jt, 2005).

Rikastamise eesmärgid on suurendada kasuliku aine sisaldust ning samal ajal kasutu aine sisaldust vähendada. Minimeerida kahjuliku aine sisaldust ning parandada kivimite mehaanilisi omadusi. Rikastamisel kivimite mineraloogiline ega keemiline koostis ei muutu. Rikastamise tehnoloogia projekteerimisel lähtutakse kivimite ja mineraalide omaduste erinevusest. Eesti maavarade puhul on aluseks kasuliku ja kasutu kivimi osiste erinev suurus, erinev tugevus, erinev tihedus ehk mahumass, mineraalide erinev märguvus ning mineraalide erinev magnetilisus (Reinsalu & Väli, 2022).

1.1 Põlevkivi

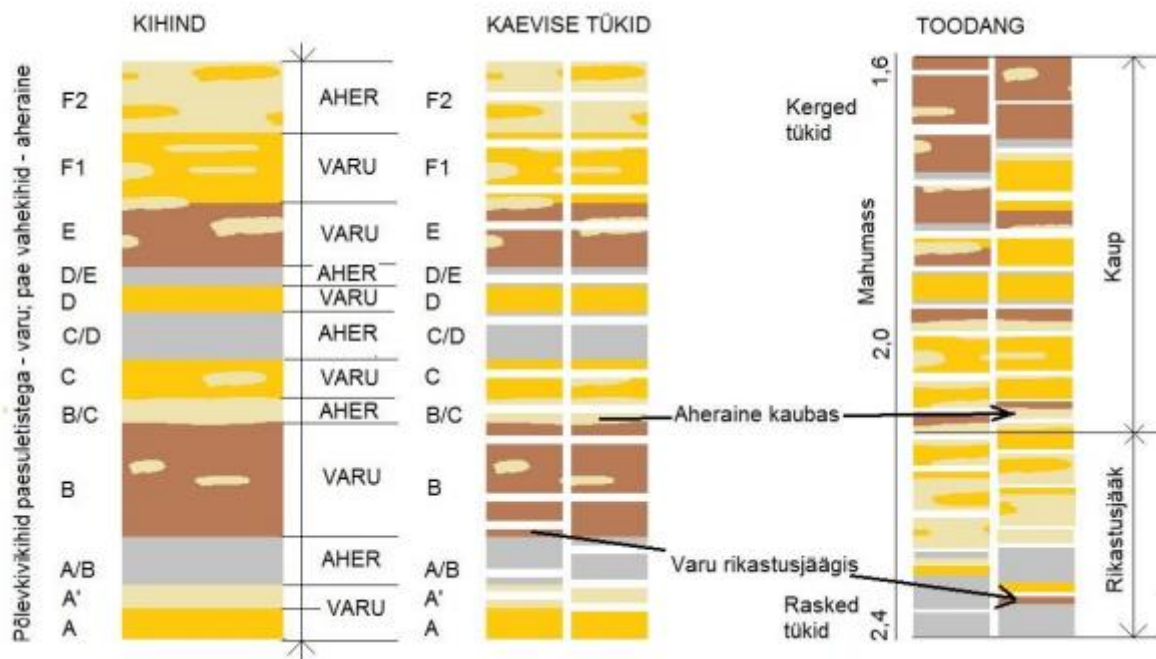
Põlevkivi on kujunenud keskordoviitsiumi šelfimeres. Tekkinud on ta peamiselt mikroskoopiliste vetikate jäänustest, mis koosnesid suhteliselt püsivast rakuainest ja merepõhja sattunult allusid vaid vähesel määral lagunemisprotsessidele. Mere osa, kus toimus meie põlevkivi (kukersiidi) intensiivseim kuhjumine, oli kõikide sellal elanud loomarühmade elutegevuseks väga soodne. Sellest annavad tunnistust põlevkivis rikkalikult esinevate fossiilide lubiainest skeletijäänused ja rohked uuristusjäljed. Nähtavasti oli see erakordselt toitainerikas soe madalmereseosa, võimalik, et isegi lahepiirkond. (Pirrus, 1999)

Põlevkivi on orgaanilist ainet sisaldav kivim. Üks peamistest tunnustest, mille alusel kivimit teaduskirjanduses klassifitseeritakse põlevkiviks ning eristatakse teistest orgaanikasisaldusega biogeensetest põlevatest kivimitest on õli ehk tõrva saagis orgaanilisest aineist (üle 20%) (Reinsalu, 2011). Põlevkivi orgaanilist ainet iseloomustab tema elementkoostis. Põlevateks komponentides on süsinik (C) ja vesinik (H). Orgaanilise aine koostisesse kuuluvad veel hapnik, lämmastik ning vähemal määral fosfor, kloor ja teised elemendid. Oluliseks näitajaks orgaanilise aine iseloomustamisel on vesiniku ja süsiniku aatomsuhe (H/C). Mida suurem on see suhe, seda suurem on põlevkivi õlisisaldus. Kukersiidi puhul on selle suhte väärtus 1,51 (Aaloe jt, 2006).

Põlevkivis ei ole õli nagu õliliivas, õli saab termilise töötlemisega – utmisega. Põlevkivi kasulik komponent on orgaaniline aine (kerogeen). Kerogeeni kütteväärtus (kütvus) on vahemikus 30-40 MJ/kg ja sõltub süsiniku, vesiniku ja hapniku sisaldusest ning nende elementide omavahelisest suhtest. Põlevkivide kütteväärtus on vahemikus 5-20 MJ/kg ja sõltub kerogeeni sisaldusest kivimis (Reinsalu, 2011).

Üheks põlevkivi kvaliteedi määravaks faktoriks on tema erikütteväärtus (ühe ühiku kütteväärtus), mida hinnatakse ja mõõdetakse kuiva põlevkivi kohta kas MJ/kg või kcal/kg. Energeetikute jaoks on kvaliteedi hindamise aluseks töökütuse põlemissoojus (koos niiskuse sisaldusega), põlevkivi koos lubjakivi vahekihtidega (edaspidi kaevis) ilma rikastamata ei vasta oma kvaliteedilt tarbijate poolt esitatavatele nõuetele (Vesiloo jt, 2010).

Kaevandamisvääreks loetakse Kukruse lademe kõige alumisi kihte. Eestis tähistatakse neid suurtähtedega A...F. Need kihid lasuvad lähestikku, olles eraldatud suhteliselt õhukeste lubjakivi kihtidega, mida omakorda tähistatakse põlevkivikihtide tähekombinatsioonidega E/F...A/B (Jürs ja Reinsalu, 2019).



Joonis 1. Põlevkivikihind, raimates saadud kaevis ning rikastades toodang (Reinsalu ja Jürs, 2019)

Kõigi tootsa kihindi komponentide – puhta põlevkivi (= kukersiidi), kihtides olevate suletiste ja kihtide vahel lasuva lubjakivi keskmised kvaliteeditunnused vt **Error! Reference source not found..** määras mäeinsener Heino Sits statistilise analüüsi abil. Selleks tegi ta tuhandeid analüüse Eesti ja Oudova maardlate uuringul, ajal, kui kukersiit eraldati puursüdamikust käsitsi. Andmete usaldusväärsus on suurim Eesti maardla keskosas. Põlevkivi varu arvestust peetakse kihtide kaupa, kuid tootsas kihindis on puhtast kukersiidist ainult kihid A ja D. Teistes kihtides on suuremal või vähemal määral paekivist suletisi, milles kerogeeni on keskmiselt 8%. Sõltuvalt suletiste rohkusest varieerub ka põlevkivikihtide kütvus – mida enam on suletisi, seda madalam on kihi energiasisaldus (Reinsalu, 2011).

Põlevkivi kvaliteeti hinnatakse mitme tunnusega. Eestis ja Venemaal on peamiseks kütvus (Q), mis on põlevkivi massiühiku põletamisel saadava soojusenergia kogus. Mujal on levinum laboratoorne, nn Fischeri retordi abil määratav õliandvus (T), mis korreleerub põlevkivi utmisel massiühikust saadava õli kogusega (Reinsalu, 2011).

Kivimite: kukersiidi ja lubjakivi kütvus, kerogeenisisaldus ning mahumass ja tihedus muutuvad maardla piires vähe, kuid kihtide ja kihindi kvaliteeditunnused varieeruvad oluliselt. Maardla kaugemates osades: Narva karjääris, Peipsi lähistel ja Kiviõli ning Ubja kaevandusväljal on kihtide ja kihindi kütvus märgatavalt väiksem kui parimal alal – Kohtla-Kukruse-Jõhvi kolmnurgas (Jürs ja Reinsalu, 2019). Kihindi eripõlemissoojus väheneb keskmiselt 60...80 kJ/kg ühe kilomeetri peale (Vesiloo jt, 2010). Põlevkivikihtide kvaliteedi langus äärealadel on tingitud kukersiidi vähesusest ja suurematest suletistest. Tootsa kihindi kvaliteet on maardla äärealadel madalam seetõttu, et heade B- ja E-kihi paksus on seal väiksem ning lubjakivi vahekihid paksemad (Jürs ja Reinsalu, 2019).

Hinnanguliselt on maakoore naftavarud 160–170 miljardit tonni. Arvestades praegust aastatoodangut 4 miljardit tonni naftat (samal kasutuse pidevat suurenemist ei arvestata), uuritud ressursid suudavad varustada meie vajadusi ligikaudu 40 aastat. Kuigi info paljude põlevkivimaardlate kohta on napp, on potentsiaalsed maailma põlevkiviõli ressursid tohutud. Potentsiaalsete maailma põlevkivimaardlate mahu hinnangul on põlevkivi 530 kuni 1430 miljardit tonni. See on 3–9 korda suurem kui praegused naftavarud Maal. Põlevkivi leidub mitmes kohas maailmas, enam kui 600 maardlat on teada rohkemas, kui 30. riigis. Suurimad põlevkivivarud on USA-s, Brasiilias, Jordaania ja Marokos. Seni on põlevkivi potentsiaali maailmas vähe puudutatud, kuid on kindel, et see on potentsiaalne tuleviku energia allikas (Live, 2007).



Joonis 2. Põlevkivi levikuala (Aaloe jt, 2006).

1.2 Kaevis

Kaevis, kaevanduses ja karjääris väljatud purustatud kivim on segu põlevkivi ja aheraine tükkidest ja tolmu. Tolmuks loeme kaevis kõige peenemat osa (<1 mm), kaevises on tolmu enam kui 5%. Kõige jämedamad (>400 mm) on põlevkivist ja lubjakivist koosnevad kamakad. Kaevis tekib kihindist, kõigest põlevkivi kihtidest ja lubjakivi vahekihtidest. Kaevisesse lisandub alati ja kõikjal madalakvaliteedilist põlevkivi kaeveõnte laest ja tihti ka kihindi alt (lamamist). Seda nähtust nimetatakse aherdumiseks. Eriti intensiivselt toimub see neis paigus, kus laekivimid kipuvad

geoloogiliste häirete tõttu varisema. Peamine aheraine allikas on siiski põlevkivikihtide vahelised lubjakivi kihid (Jürs ja Reinsalu, 2019).



Joonis 3. Kaevis maa all kambris. Pilt tehtud emeriitprofessor Enno Reinsalu poolt.

Raimatud (= lõhatud, irrutatud, väljatud) kaevisse peamised omadused on tükisus (lõimis, granulomeetriline koostis) ja energia sisaldus (kütvus). Nende omaduste kasutamisel tehniliste lahenduste projekteerimisel on vaja teada kaevisse massi ja energia jaotumist. Raimamisel purunevad kivimi nõrgemad erimid rohkem kui tugevamad. Seetõttu on kaevisse peenemas osas rohkem kukersiiti ja jämedamas – lubjakivi. Teisisõnu, kaevisse peenem osa kannab märksa rohkem energiat kui jämedam. Seda seaduspärasust kirjeldatakse analüütiliselt kaevisse massi- ja energijaotusega. Massi jaotust kirjeldab astmefunktsioon. Teist olulist seost – energia jaotumist kaevisse kirjeldab veidi keerulisem, funktsioon, mille alumiseks piirväärtuseks on kaevisse kütvus. (Jürs ja Reinsalu, 2019).

2. Rikastamine ja selle ajalugu

Rikastamine on mäetehniline protsess kauba kvaliteedi tõstmiseks, vajalik, kui kaevis lihtmoel ei sobi tarbijale ja kui teiste mäetehniliste meetoditega, nagu selektiivse või osalise väljamisega pole võimalik kvaliteeti tagada (Reinsalu, 2008).

Mineraaltoorme rikastamisel ja töötlemisel (Reinsalu, 2019). :

- rikastamine on maavara või maavara sisaldava kaevisse väärindamine, töötlemine mäeettevõtte tooteks;
- rikastamisel ei muutu kivimite mineraloogiline ega keemiline koostis;
- rikastamisel kasutatakse ära kivimite, mineraalide ja kaevisfraktsioonide omaduste: tiheduse, tugevuse, magnetilisuse, elektrijuhtivuse, märgvuse, osiste kuju jne erinevust

Eristatakse järgmisi rikastamise mooduseid: (Reinsalu, 2019).

- kontsentreerimine, kus suurendatakse kasuliku aine sisaldust kaevises;
- separeerimine, kus eraldatakse kaevisse kasulikke, kasutuid ja kahjulikke aineid kandvad komponendid (mineraalid, kivimid, tolm),
- sortimine (= klassifitseerimine), kus kaevis jaotatakse tüki- või terasuuruse alusel, enamasti sõeludes.

Rikastamise viisid, nagu setitamine, vahtrikastamine (= floteerimine), valikpurustamine, brikettimine jne on loetletud kolme mooduse tehnoloogilised toimingud. Rikastamisviisiks võib pidada ka ehituskaevise pesemist, uhtmist jne, sest selle tulemusel paraneb kaevisse ja toodangu kvaliteet (Reinsalu, 2019).

Balti maardlates on olnud või on seni kasutusel: (Reinsalu, 2019).

- sortimine ja käsitsi separeerimine (= noppimine) kõigis endisaegsetes põlevkivi ja fosforiidikaevandustes;
- mehhaaniline ja märgsortimine (= sõelumine) kõigis kaasaegsetes ehitusmaavarasid kaevandavates ettevõtetes;
- brikettimine Tootsi ja Oru turbatööstuses;
- vahtrikastamine (= floteerimine, flotokontsentreerimine) Maardu fosforiiditööstuses;
- põlevkivi valikpurustamine (sortimise alaliik), trummelsõelaga Sompka kaevanduses ja Viivikonna karjääris;
- põlevkivi märgsepareerimine (= gravitatsioonirikastamine): märgsetitamine pulseeriva veega (Ahtme põlevkivikaevanduses) või separeerimine raskes vedelikus Aidu karjääris ja Viru, Tammiku ning Estonia ja Ojamaa kaevandustes, viimastes kuni käesoleva ajani. 183
- Oudova põlevkivimaardla kaevanduses nr 3 (Slantsõ, Venemaa) oli kasutusel klassi 30- 100 mm õhksepareerimine (= õhksetitamine). See oli võimalik, kuna sügavast kaevandusest

väljatud kaevis oli üsna kuiv ja kvaliteedinõuded tehnilisele põlevkivile (õlikivile) ei olnud nii kõrged kui Eesti kaevandustes.

- Oudova põlevkivimaardla Kirovi kaevanduses oli pilootseade, millel katsetati nn radiomeetrist meetodit s.t. separeeriti lindil liikuvat kaevist tükkide gamma-reaktiivsuse alusel. Sisuliselt oli tegu gravitatsioonilise meetodiga.

Maailmas kasutatakse magnetilist separeerimist enamasti metallide rikastamiseks. Kaevandamisector on hetkel suurim sektor, kus kasutatakse magnetilist separeerimist maakide töötlemiseks, sorteerimiseks ning puhastamiseks (Iranmanes & Hulliger, 2017). Võib tuua näitena boksiidi, mis on peamine alumiiniumi allikas. India boksiidi maagid on tavaliselt goetiidi, hematiidi ning titaanoksiidi rikkad. Nende eemaldamine on vajalik, et saavutada puhast alumiiniumi. Magnetilise- ning ka gravitatsioonilise rikastamisega on näidanud, et Arkansase boksiidil, mis sialdab 11,3% Fe_2O_3 ning kuni 2% TiO_2 on võimalik boksiiti väärindada kuni 1,2% Fe_2O_3 ning 0,7% TiO_2 (Bhagat jt, 2006).

Teine tänapäeval rohkem tähelepanu pälviv metall on mangaan, mida on võimalik rauast eraldada magnetilise separeerimisega. Rohkem, kui 90% mangaani maagist kasutatakse terase valmistamisel ning muu kasutatakse patareide, prillide, reagentide, väetiste, keraamika ja loomatoidu valmistamiseks. Nõudlus mangaani järele on kasvanud aastast 2008-2018 29%. Lisaks magnetilisele separeerimisele kasutatakse mangaani väärindamiseks ka leostumist. Enamasti kasutatakse väävelhapet leostamiseks, eelkõige selle saadavuse ja odavuse tõttu (Soner, 2019). Leostamine on protsess, kus enamasti hapete abil leostatakse mittevajalikud ühendid pulbilaadsest vedelikust välja ning kasulik mineraal või metall jääb tahkena sinna pulpi. Antud meetod on üks tõsisemaid keskkonnaprobleeme, millega metallitööstus hetkel silmitsi seisab (Saria jt, 2006).

2.2 Põlevkivikaevise käsitsi rikastamine maa all

Käsitsi rikastamist kasutati kuni 1960. Maa all lankides käsitsi kaevandades valiti välja lubjakivi ja liidete suured tükid, millest rajati tugiriidad. Peenem lubjakivi loobiti labidaga tugitervikute vahele väljatöötatud alasse. Maapinnale toodud materjalist loobiti aeglaselt liikuvalt konveieri lindil välja lubjakivi >50 mm. Käsitsi rikastamisel oli oma osa ka põlevkivi ja lubjakivi värvuste erinevusel (optiline rikastamine). Käsitsi rikastamine andis rahuldava tulemuse, kuid füüsilise töö suure mahu tõttu pole tänapäeval kasutatav (Väli jt, 2021).

Orgaanilise aine kadu käsitsi rikastamisel oli suur. Mõõtmisandmed puuduvad, kuid asjaolu, et rikastusjäätmete ladestud (aherainemäed, terrikonid) kuumentesid põlemiseni, lubab oletada, et orgaanilise aine (kerogeeni) kadu rikastusjärgis oli keskmiselt suurusjärgus 10%. Valikulise purunemise ning jaotumise tõttu koondus rikastusjäägi peenenenud kukersiit terrikoni tuuma, kus algas selle termiline lagunemine. Olulist rolli mängis seejuures püriit (Väli jt, 2021).

2.3 Pneumaatiline ehk õhkrikastamine

Põlevkivi pneumaatilist rikastamist, õhksepareerimist (õhksetitit) on katsetatud ja ka kasutatud Venemaal Leningradslanetsi kaevanduses nr 3. Esmalt, alates 1960. oli see separaator SPV-100M ja 1968. aastast separaator SP-12. Separeerimise printsiip põhineb sellel, et kiire õhuvoolus langeb lubjakivi tükk maa gravitatsiooniväljas üldisest voolust samasuurte tükide puhul enim välja, sest tema õhutakistuse suhe massi on väiksem. Sama printsiipi kasutatakse ka õhu vastuvoolu separaatorites, kuid käesoleva töö autoritele teadaolevalt ei ole seda meetodit põlevkivi puhul tööstuslikult katsetatud (Väli jt, 2018).

Õhkrikastamine eeldab kuiva materjali. Kaevise eelkuivendamise vajadus teeb Eesti põlevkivi kuivrikastamise üsna kalliks (Väli jt, 2018).

On teada, et Leningradslanetsi kaevanduses võimaldas SP-12 kasutusele võtmine suurendada aastatoodangut 250 tuhande tonni võrra aastas. Majanduslik hinnang ei osutunud TTÜ Geoloogia Instituudile kättesaadavaks (Väli jt, 2018).

1979. uuriti Sompka kaevanduse kamberplokist kaevandatava kaevise õhkrikastamise võimalusi Venemaal Ljubertsõs kaeviste rikastamise instituudis IOTT SP-12 tüüpi separaatoris. Rikastamisele läks materjal 25...100mm. Katsetööde maht oli väike. Selgus, et meie põlevkivikaevise rikastamine seadmega SP-12 on võimalik, kuid: (Väli jt, 2018).

- töödelda saab ainult kuiva kaevist,
- rikastatav materjal tuleb jagada tükisuuruse järgi klassidesse,
- rikastada saab kaevist tükisuurusega kuni 50mm,
- plaatjad terad (tükid) häirivad protsessi.

Hiinas on kasutusel ka APASS tehnoloogial põhinev õhkseparaator. Antud tehnoloogiat kasutatakse kivisöe separeerimiseks. Kivisüsi separeeritakse erinevate opereerimisparameetrite järgi: õhuvool, pulseerimissagedus ning kivisöe etteandmiskiirus. Kivisöe etteandmiskiiruse vähendamise ja õhuvoolu suurendamisega suureneb separeeritava kivisöe kogus. Kõrge tuhasaldusega kivisütt suudab APASS tehnoloogia rikastada. Tuha kogus langes 42,12%-lt 30,05%-le. Kui võrrelda teisi õhksepareerimistehnoloogiaid, siis APASSi eelis on lihtsas struktuuris ning lihtne separeerimise protsess. See tehnoloogia sobib vähese veekogusega piirkondades (Xie jt, 2019).

2.4 Hüdrotsüklon ja määrgrikastamine

Põlevkivi peenrikastamiseks saaks kasutada ka hüdrotsüklonit. See on seade, kuhu siseneb tahke ja vedela aine segu ehk pulp, millest pöörlemisega eraldatakse tahke komponent ja puhastatud vedelik enne settebasseini minekut. Sõltuvalt seadmest, saab pulbist eraldada näiteks 0-5 ja 0-8 mm osakesi. Kasutades ära aheraine ja põlevkivi tihedusomadused oleks ka see meetod üks võimalikest peenpõlevkivi rikastusmeetoditest (Väli jt, 2018).

1960. aastal alustas Ahtme põlevkivikaevanduse juures tegevust esimene katserikastusvabrik BOMS-10. Kaevis purustati ning setitus toimus suruõhu abil veejoaga pulseerimisel. Tulemusena jagunes erinevatesse kihtidesse eri tihedusega lubja- ja põlevkivi. Põlevkivi tiheduseks võeti 1,3-1,8 g/m³ ning aherainel 2,0-2,5g/m³. Märgsetitamisega küll suurenes kütteväärtus 8,8-9,2 MJ/kg-lt 14,5-14,7 MJ/kg-ni, kuid kaevis eelpurustamise vajaduse tõttu loobuti Eestis sellest (Lauringson ja Reier, 1981).

Setitamisel kasutati kaevis klassi 25-125 mm. Peenem materjal sõeluti juba varasemalt välja, sest suuremad tükid purustati enne rikastamisele suundumist. Peene klassi 0-25 mm tagas piisava kütteväärtuse, et kasutada energeetilise kütusena (Lauringson ja Reier, 1981).

Järgnevalt on toodud selle meetodi eelised ja puudused: (Väli jt, 2018).

- On olnud edukalt kasutusel Ahtme kaevanduses. Eelisteks raskes vedelikus rikastamise ees on suhteliselt väikesed kaod ning madalam rikastamise ühikukulu.
- Kui kaubapõlevkivi kütvus piirduks vahemikuga 8,0...8,4 MJ/kg, oleks see rikastamisviis käsitletuist sobivaim.
- Puuduseks on mahukas ja keskkonda koormav veemajandus.
- Loobuti raskes vedelikus rikastamise kasuks viimase mõnevõrra suurema rikastamise efekti tõttu.

Tänapäeval rikastatakse põlevkivi raskes vedelikus, milleks on jahvatatud magnetiidist suspensioon (Varb & Tambet, 2008). Kaevis suunatakse rikastusvabriku suspensioonivannidesse, kus vedeliku tihedus on 2,1 g/m³ (Ignatovets, 2014). Põlevkivi kui väiksema tihedusega maavara jääb vedeliku pinnale ning kooritakse ära. Raskem materjal, ehk lubjakivi vajub põhja. Rikastusvabrikutes saadakse mäemassi töötlemisel kolm põhiprodukti: enne rikastamist väljasõelatud peenpõlevkivi (0-25 mm), kontsentraat (25-125 mm) ja lubjakivijäägid (20-300 mm) (Kattai jt, 2000).

DMS (*dense medium separation*) on ilmselt kõige lihtsam kogu gravitatsioonilistest protseduuridest ja on pikka aega olnud standardviis erinevate mineraalide eraldamiseks. Seda kasutatakse mineraalide puhul, kus on eristatav tiheduste erinevus. Osakesed, mis on vedelikust kergemad jäävad pinnale ulpima ning raskemad vajuvad põhja. Seda rikastamisviisi praktiseeritakse üle maailma (Bustillo, 2018).

Hiina on suurim söetootja ning kasutaja maailmas. Kuivadel aladel ei ole piisavalt vett, et tagada tavapärasel töötlemisel. Umbes 3-5 tonni vett kulub ühe tonni söe jigmiseks. Hiina kivisöe märkimisväärseid varusid ei saa jätkata väärindades vees, sest kivisüsi kipub lagunema. Sellest tingitult on ladustamine ja transport väga keeruline jäisetes temperatuurides (Chen & Yang, 2003).

2.5 Rikastusvabriku tootmismahud VKG näitel

Eesti põlevkivikaevandustes, kus toimub allmaakaevandamine, liigub põlevkivi maa alt pealmaa rikastusvabrikusse. Rikastusvabrik on kaevanduse jaoskond, mis on mõeldud põlevkivi esmatöötamiseks ja mille eesmärgiks on kivimi purustamine, sorteerimine ning rikastamine. Pärast kivimi purustamist, sorteerimist ja rikastamist eristatakse nelja erinevat toodet. Nendeks on II sordi

põlevkivi läbimõõduga 25–125 mm, III sordi põlevkivi läbimõõduga 0–25 mm ning rikastamise kõrvaltootena kivim ja muda (Birjuk, 2014).

Kogu kaevandatud põlevkivi läheb rikastusvabrikusse. (Birjuk, 2014) 2020. aastal langetas VKG Kaevandused kaubakivi toodangu mahu 4,14 miljoni tonnini, kuna kriisist lähtuvalt oli eesmärk kärpida kulusid ja kasutada rohkem laos olevat kivi. Tulenevalt turu taastumisest on 2021. aastal plaan Ojamaa kaevanduses taas toota maksimaalne lubatud kogus kaubakivi ehk 4,35 miljonit tonni. (VKG, 2021) Rikastusvabrikus on igale materjalitüübile ette nähtud oma konveierlint. Iga rikastusvabriku konveierlindil on nimikoormus, mille järgi reguleeritakse kraapsööturi pöörlemiskiirust. Rikastusvabriku konveierite tootmismahud on toodud tabelis (Birjuk, 2014).

Tabel 1. Rikastusvabriku konveierite tootmismahud (Birjuk, 2014).

Konv nr	Transporditav materjal	Keskmine tootmismaht, t/h	Lindi laius mm	Konveieri pikkus m	Max tootmismaht t/h
CV-129	Mäemass 25-400 mm	840	1200	120	1000
CV-1001	Mäemass 25-125 mm	300	1000	65	700
CV-802	Põlevkivi 0-25 mm	350	800	64	400
CV-803	Peenpõlevkivi 2-6 mm + filtrikook 0-25 mm	50	800	15	170
CV-804	Peenpõlevkivi 2-6 mm + filtrikook 0-25 mm	50	800	22	100
CV-805	Põlevkivi 25-125 mm	150	800	18	560
CV-806	Põlevkivi 0-25 mm	350	800	130	560
CV-807	Põlevkivi 25-125 mm	150	800	97	560
CV-808	Lubjakivi 25-125 mm	250	800	75	560

Keskmiselt vabrikusse liikuva mäemassi maht on 840 t/h. Millest 350 t on kolmanda sordi põlevkivi, 300 t teise sordi põlevkivi, 250 t lubjakivi ning ülejäänud osa on muda (Birjuk, 2014).

Oluline on jälgida, et käesolevas töös käsitletava tööstusliku märgsetitamise seade AllJig-S400 tagaks samalaadsed tootmismahud ehk siis sobiks Eesti mõistes optimeeritud suurusega kaevemahuga kaevandust teenindama. Tähtis on ka fakt, et uue AllJig-S400 tehnoloogia lisamisel ei ole vaja vahetada välja projektiga ettenähtud konveierlinte ja muid kaalukaid seadmeid, sest see võib kaasa tuua lõpptoodangu hinnakasvu.

2.6 Rikastamine ja selle efektiivsustegurid

Rikastamise protsessi ei saa hinnata ühe näitajaga, tuleb kasutada mitmeid tunnuseid, mis iseloomustavad mitmekülgset rikastamisprotsessi tervikuna (Väli jt, 2021).

Põhilised tunnused, mis iseloomustavad põlevkivi rikastamise protsessi on (Väli jt, 2021):

- kaevise ja rikastamise produktide kütvus;
- kasuliku komponendi energia, orgaanilise aine (kerogeeni) saagis (*yield*, väljatulek)
- energia jaotumine rikastamise produktides;

- kasuliku komponendi (energia) kontsentratsiooni tõus rikastamise sihtproduktis kaubas ja langus jäägis (rikastamiskaos, aheraines);

Rikastamise produktide saagis

näitab, millise osa kaevisest moodustavad rikastamise produktid

Kaubapõlevkivi saagis:

$$\gamma_k = \frac{100(Q_k - Q_j)}{Q_t - Q_j} \% \text{ (Väli jt, 2021)}$$

Jääkide saagis:

$$\gamma_j = \frac{100(Q_t - Q_k)}{Q_t - Q_j} \% \text{ (Väli jt, 2021)}$$

Q_k - kaevise kütvus MJ/kg

Q_j - jääkide kütvus MJ/kg

Q_t – rikastamisest väljuva materjali kütvus MJ/kg

Saagis. Näitab milline osa kasulikust komponendist läheb rikastamise produktidesse

$$\varepsilon_k = \frac{\gamma_k * Q_t}{Q_k} \% \text{ (Väli jt, 2021)}$$

$$\varepsilon_j = \frac{\gamma_j * Q_j}{Q_k} \% \text{ (Väli jt, 2021)}$$

Rikastamisaste ehk rikastamise efekt

...näitab mitu korda suureneb kütvuse sisaldus kaubapõlevkivis võrreldes kaevisega.

$$R_k = \frac{Q_t}{Q_k} \text{ (Väli jt, 2021)}$$

2.7 Rikastusjätmed

Maavarade kaevandamisel maailmas tekib suurtes kogustes kaevandamisjääke, mida tuleb ladustada või vastavalt omadustele taaskasutada. Erandiks ei ole ka Eestis olev tähtsaim maavara põlevkivi. Põlevkivi lausväljamisel kaevandatud mäemassi rikastatakse vajaliku kütteväärtuseni kaubapõlevkivi saamiseks ning rikastamisjäägi eraldamiseks (Tohver, 2011). 2008. aastaks oli Eestis

üle 150 miljoni tonni põlevkivi rikastusjääke ladestatud aherainemägedesse (Valgma jt, 2008). Sõltuvalt sellest, mis omadustega aheraine on, saab seda kasutada teedehituses, täitematerjalina või kaevanduste täitmisel. Viimane neist aitab vähendada põlevkivi kaevandamisel tekkivaid kadusid ning suurendab kaevandatud alade püsivust (Pastarus jt, 2011).

Rikastusjääk on kaevisest rikastamisega eraldatud madala kütvusega kivimid, peamiselt lubjakivi. Näiteid võib tuua Poolast, Prantsusmaalt, Saksamaalt, Soomest, Belgiast, Iirimaa. Üheks perspektiivsemaks suunaks on kasutada ladustamisele minevat aherainet ja põlevkivituhka kaevandusekaeveõõnte täitmiseks (Pastarus jt, 2008).

Märgsetitit AllJig-S400 kasutades võib tekkida olukord, kus aheraine osakaal suureneb, mis võib mõjutada tööstusettevõtteid negatiivselt, eelkõige finantsiliselt, sest saastetasud tõusevad tulevikus. Hetkel on põlevkivi aheraine, sealhulgas rikastusjäätmete keskkonnatasu 1,31 eurot/m³ (Riigiteataja, 2021).

Eestis on 34 rikastamisjäätmehoidlat ja enamus neist paikneb Ida-Virumaal. Tänapäeval ladestatud aheraine puistanguid saab liigitada B-riskikategooria jäätmehoidlate hulka, sest ladestatav aheraine on vähese orgaanilise aine sisaldusega, mis teeb materjali inertseks ja ei kujuta suurt ohtu ümbruskonnale (Ignatovets ja Valgma, 2014). Osa ladestatud aherainest saab kasutada ka alternatiivsel moel. Antud tootmisjäätmel ja jääke saab kasutada täitesegude valmistamiseks.

3 Märgsetiti AllJig-S400

3.1 AllJig S-400 (edaspidi ka setiti) üldiselt

TTÜ Mäeinstituut soetas aastal 2013 projekti Min-Novation käigus setiti AllJig-S400 (Nurme, 2015). Seade on toodetud Saksamaal ettevõttes Allmineral. Setiti eesmärk on separeerida kaevisest kasulik kivim ning eraldada aheraine. Setiti toimib pulsseeriva suruõhu veejoa abil, millega surutakse rõhu all õhk paaki, kuhu paigutatakse kaevis. Suruõhk toob esile materjali võnkumise, millega raskemad osakesed teoreetiliselt langevad paagi põhja ning kergemad osakesed jäävad pinnale. Paagis olev materjal jaotub mitmeks kihiks. Pealmised kihid on küllastunud kasulikust kivimist ning alumised kihid aherainest.

Mineraalide eraldamine setitis põhineb asjaolul, et osakesed hakkavad kihistuma pulseerivas vees. Üles- ja allavoolud voolavad ja tihendavad osakesed suhteliselt homogeenseteks kihtideks. Madala tihedusega osakesed kihistuvad pindmises osas ja eriti rasked osakesed settivad setiti alumisele tasemele. Allmineral setitid toimivad pulsseeriva õhujoaga ja seega ka vee pulsatsioon võib olla praktiliselt kulumisvaba, mistõttu pulsi liikumist (sagedus, amplituud ja kuju) saab töö ajal reguleerida laiade parameetrite piires. AllJig setitite opereerimisparameetreid (sõelu) on võimalik optimeerida kaevise parameetrite järgi (Allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG, 2022).

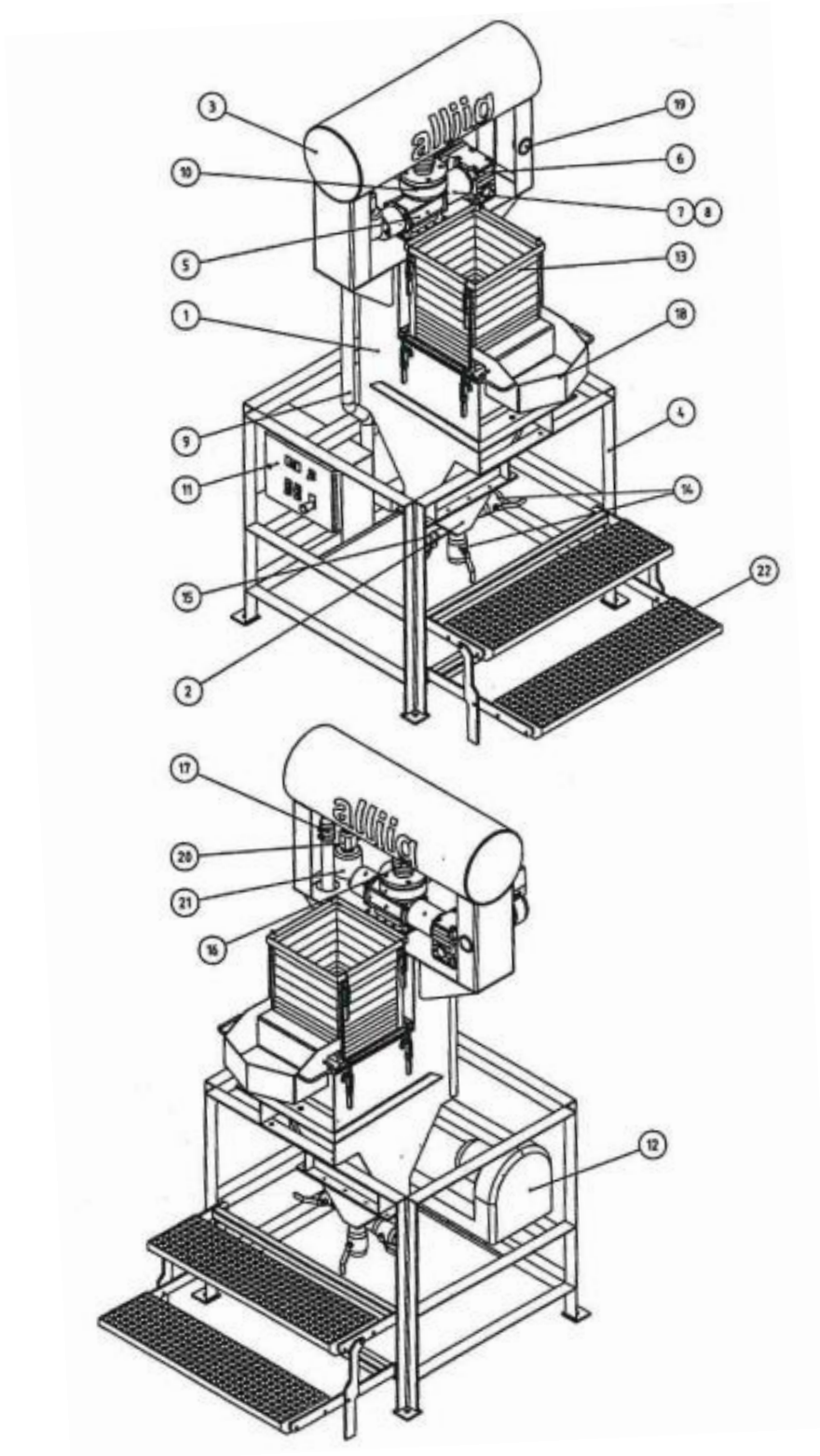
Elektroonseid sensoreid kasutatakse automaatse jälgimise ja juhtimise jaoks. Seade on füüsiliselt stabiilne ning individuaalselt reguleeritav, mis omakorda kasutab minimaalselt energiat. Tööstusliku setiti tootlikkus ulatub 5 tonni tunnist kuni 700 tonni tunnini. Tööstuslikus AllJigis kasutatav maksimaalne tükisuurus võib olla kuni 150 mm. Setiti on loodud rikastama primaarseid ning sekundaarseid toormaterjale nagu süsi, kruusa, liiva, põlevkivi ning isegi erinevaid taastöödeldavaid materjale. Süsteem on kasutajasõbralik, nõuab vähe hooldamist, energiasõbralik ja töötab minimaalse energiakuluga (Allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG, 2022).

3.2 AllJig-S400 setiti peamised komponendid

Tabel 2. Komponentide tabel (Weitkämper, 2020).

Tähise nr	Nimetus (inglise keeles)	Nimetus (eesti keeles)
1	Jig hutch	Jigi puur
2	Hopper	Punker
3	Air vessel	Õhualus
4	Frame	Raam
5	Rotary piston valve	Pöörleva kolvi ventiil
6	Gear motor rotary piston valve	Käigukasti mootori pöörleva kolvi ventiil
7	Coupling	Sidur
8	Protection cover	Kaitsev kate
9	Pipe	Toru

10	Knife gate valve DN 65	Noa värava ventiil DN 65
11	Control cabinet	Juhtkabinet
12	Blower	Puhur
13	Plexiglas box	Pleksiklaasist kast
14	Ball valve G2''	Kuulventiil G2''
15	Ball valve G1''	Kuulventiil G1''
16	Rubber bellow rotary piston valve	Kummist lõõtsa pöörleva kolvi ventiil
17	Rubber bellow air supply	Kummist lõõtsa õhuvarustus
18	Sampling chute	Proovivõtturenn
19	Pressure gauge	Rõhumõõdik
20	Knife gate valve 1 ¼''	Noa värava ventiil 1 ¼''
21	Silencer	Summuti
22	Stair	Aste



Joonis 4. AllJig S-400 kolmvaates (Weitkämper, 2020).

4. Märgsetitamise katsetööd Acheni ülikoolis

4.1 TalTech Geoloogia instituudi märgsetitamise uuring¹ ja selle tulemused

Uuring viidi läbi töörühma poolt, kuhu kuulus ka käesoleva magistr töö autor. Töörühma kuulusid emeriitprofessor Enno Reinsalu, emeriitprofessor Enn Lüütre, PhD dotsent Erik Väli, mäeinsener Ragnar Kauril ja mäeinsener Tauri Põldema. Projekti raames on kasutati emeriitprofessor Reinsalu poolt loodud rikastamise arvutusmudeleid selgitamiseks välja, milline rikastamisviis on põlevkivile sobilikum. Lõputöö autori roll selles uuringus oli kaevis soetamine, selle ettevalmistamine Saksamaale saatmiseks ning katsetööjärgsete tulemuste analüüsimine. Uuringus võrdlesime omavahel nii märg- kui õhksetitamist. Töös hindasime erinevate setitite tootlikkusi, nende massi ja gabariite. Uuringu tulemusena selgus märgsetitamise eelised õhksetitamise ees.

Märgsetitamise ettevalmistustööd :

Katsetamiseks võeti vajaliku tükisuurusega proov Ojamaa kaevandusest saadud kaevisest. Proov massiga 0,6 t saadeti Saksamaale Acheni Ülikooli, et kasutada katsetamisel nende märg- ja õhksetitamise seadmeid. Enne Aachenisse saatmist kaevis klassifitseeriti. Igast klassist võeti pisteline proov, mille kütvus määrati TalTechi energiatehnika laboris (Väli jt, 2021).

Nagu eelnevalt märgitud, sõltub setitamise efektiivsus mitte ainult kivimi mahumassist, vaid ka tükkide suurusest ja kujust. Liistakulisi osiseid kergitab pulseeriv meedia (õhk, vesi, raske suspensioon) hõlpsamalt kui isomeetrisi. Kuna tükkide kuju mõju protsessile antud uuringus ei uuritud, siis Eestisse tagastatud proovide lõimist ei muudetud s.t. materjali täiendavaltei purustatud. Kütvuse mõõtmise osaproovid võeti peenendamata materjalist. Sellest tingituna osutus mõõdetud kütvuse hajuvus mõnevõrra suuremaks (Väli jt, 2021).

Tabel 3. Kaevis Ojamaa kaevandusest Acheni laboratoorsete katseteks (Väli jt, 2021).

Klass	Mass	Osalus	Kütvus
mm	kg		MJ/kg
>60	195,0	0,33	5,39
32...64	287,1	0,49	12,07
<32	105,1	0,18	8,17
<16			7,8
Kokku	587,2	1,00	9,15

¹ Keskkonnainvesteeringute Keskuse projekt „Põlevkivi kaevis allmaarikastamine ja rikastusjäädike ladustamine väljatootatud alasse“ raames tehtud uuring, 2019-2021

Aacheni ülikoolis setitati klassi 32...64 mm. Kokku tehti kuus katset Alljig (vesi-) ja Allair (õhk-)separaatoritega, kolm katset kummagagi.

Märgetitamise katsetööd seadmel AllJig:

Esimene test nimega V1 tehti sagedusega 52 pulssi minutis ning rõhuga 0,17 bar. Test V2 korral alandati rõhku 0,15 barile ning suurendati sagedust 66 pulssi minutis. Kolmandal katsel vähendati kaevise kogust 26 kg-lt 18 kg-le. Sealhulgas survet tõsteti 0,25 bar peale ja sagedust vähendati 49 pulssini minutis. Kolme erineva testi eesmärk oli katsetada erinevaid seadeid, et leida optimaalsemat jõudlust ning saada paremat aimu separatsiooni efektist (Väli jt, 2021).

Saksamaal läbiviidud katsete tulemused osutusid edukateks. Setiti veemahutis alumine settinud kiht koosneb enamjaolt aherainest ning ülemine kiht kerogeenist. Keskmised kihid koosnevad valdavalt omavahel segunenud kivimitest. Fraktsioon 32-63 mm osutus sobivaimaks tükisuuruseks antud setitis kasutamiseks kuna <32 mm sisaldab palju savi, on peen ja see võib sobida oma kütvuselt kohe kaubatoodangusse või rikastamiseks muudel viisidel, nagu hüdrotsüklon, õhkseparaatoris jms. >63 mm fraktsiooni ei ole võimalik sepaatorites separeerida, sest vajab kaevise eelkuivatamist ja muud töötlemist (Väli jt, 2021).

AllJig-S400 on teoreetiliselt võimeline vastu võtma kuni 70 mm suuruseid osakesi, kuid antud fraktsioonidega pole katsetöid läbi viidud ning puudub taust. Kõik rikastatud valmisproduktid pakiti kottidesse ning saadeti tagasi Eestisse. Eestis määrati iga produkti mahumass ja kütvus (Väli jt, 2021).



Joonis 5. Märgetitamise kolme katse eri kihtide proovid

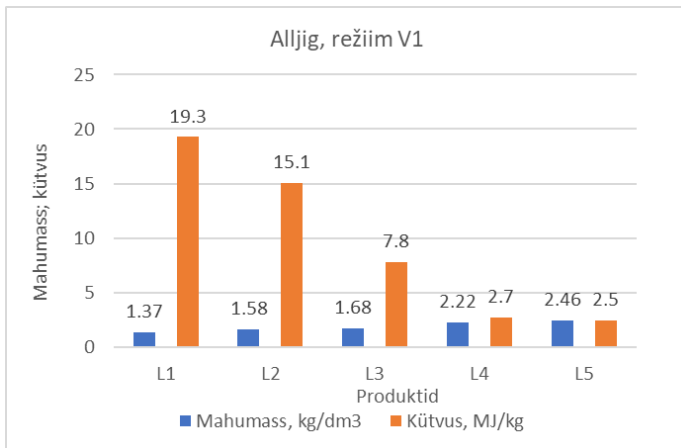
Tabelis: Mahumass mõõdeti geoloogia instituudi laboris igast produktist pistelise osaproovi uputamise meetodil (Väli jt, 2021).

Tabel 4. Märgsetitamise katsete režiimid ja töötlus (Väli jt, 2021).

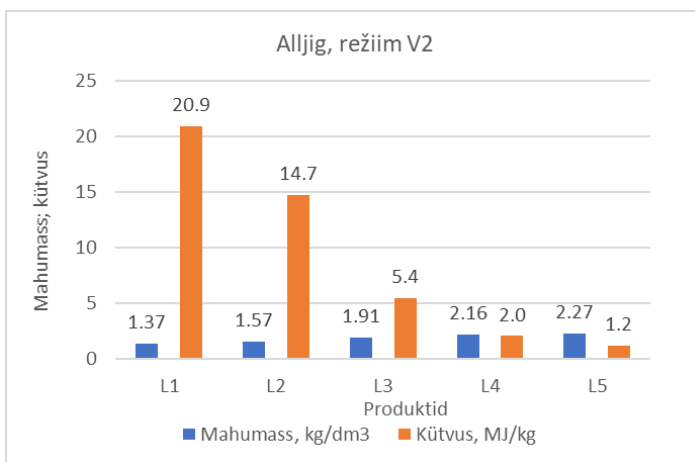
Katsesetitamise tulemused						Kütvus		
Indeks	Pulss	Rõhk	Produkt	Produkti mass	Osalus	Mahu-mass	Tule-tatud	Mööde-tud
	1/min	bar		kg	%	kg/dm ³	MJ/kg	MJ/kg
V1	52	0,2	L1	2,98	11,33	1,37	17,5	19,28
			L2	4,41	16,76	1,58	11,6	15,08
			L3	5,52	20,98	1,68	9,6	7,78
			L4	7,62	28,96	2,22	1,5	2,73
			L5	5,78	21,97	2,46	0,0	2,46
			Sum	26,3	100	1,86	6,4	7,68
V2	66	0,2	L1	5,51	19,13	1,37	17,6	20,89
			L2	2,94	10,21	1,57	11,9	14,72
			L3	5,24	18,19	1,91	5,5	5,44
			L4	7,14	24,79	2,16	2,3	2,03
			L5	7,97	27,67	2,27	1,0	1,19
			Sum	28,8	100	1,83	6,8	7,32
V3	49	0,3	L1	1,74	9,3	1,35	18,5	21,86
			L2	3,59	19,2	1,71	8,9	15,56
			L3	5,77	30,86	2,00	4,3	8,37
			L4	7,6	40,64	2,22	1,5	4,11
			Sum	18,7	100	1,92	5,4	9,27
Kokku märgsetitatud kaevis				73,81	100	1,86	6,3	7,9

Arvutatud kütvus arvutati mahumassi alusel (punkt **Error! Reference source not found.. Error! Reference source not found.**).

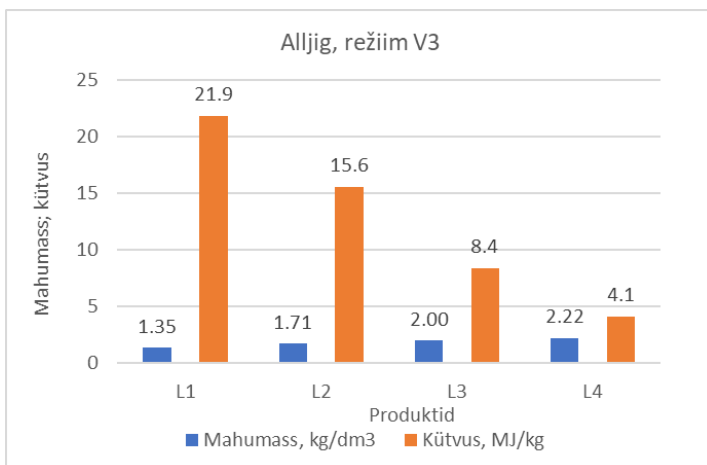
Möödetud kütvus määrati TTÜ energiotehnoloogia instituudi laboris produktidest võetud osaproovide alusel; iga osaproov oli massiga umbes 1 kg (**Error! Reference source not found.**). Kahel erineval meetodil määratud kütvuste erinevus on tingitud osaproovide võtmisest peenendamata materjalist. Märgsetitamise tulemusi illustreerivad järgmised diagrammid. Diagrammidel on produktid kihtidena (L - layers) ülevalt alla: L1...L5 (Väli jt, 2021).



Joonis 6. Märgsetitamise kolme katse eri kihtide proovid (Väli jt, 2021).

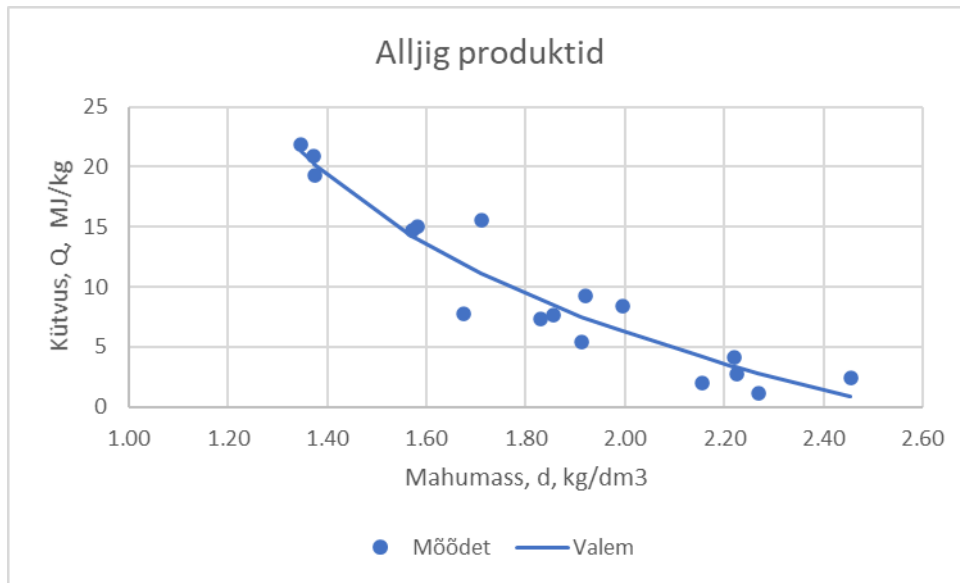


Joonis 7. Märgsetitamise produktide mahumass ja kütvus režiimil indeksiga V2 (Väli jt, 2021).



Joonis 8. Märgsetitamise produktide mahumass ja kütvus režiimil indeksiga V3 (Väli jt, 2021).

Diagrammid näitavad väga selget energia (kütvuse) jaotumist produktide (kihtide) vahel, sõltuvalt materjali mahumassist. Kuidas produktide kütvus on seotud mahumassiga, näitab järgmine pilt.



Joonis 9. Märgsetitatud kaevise produktide mahumassi ja möödetud kütvuse vaheline seos on kirjeldatud valemiga $Q = -\ln((d-1)/1,55)/0,07$. MJ/kg (Väli jt, 2021).

Diagramm illustreerib seost põlevkivi kaevise tükide kütvuse ja mahumassi vahel: kivim, mille kütvus $Q = 0$, on lubjakivi, tihedusega $d = 2,3...2,4$ g/cm³. Kaevise komponent, mille tihedus on $d \approx 1$ g/cm³ on kerogeen, kütvusega $Q \approx 35$ MJ/kg. Nõrk korrelatsioon on seletatav proovimisest tekkinud mõõtemääramatusega (Väli jt, 2021).

4.2 Valem kütvuse arvutamiseks mahumassi alusel

Põlevkivikihi kivimite (kukersiidi, lubjakivi vahekihtide ja suletiste) kütvuse ning mahumassi vahel kehtib tugev empiiriline seos. Kuna tiheduse laboratoorne määramine on töömahukas, määratakse maavarade uurimise kehtiva korra (normatiivi) kohaselt põlevkivi mahumass kütvuse alusel. Kasutatakse vastavat tabelit. Tabeli sisu on asendatav valemiga (Väli jt, 2021):

- $d = 1,3831 \exp(-0,0003 Q) + 0,98$, kg/dm³

kus d on kivimi mahumass, kg/dm³ ja Q on kuiva massi kütvus kcal/kg.

Kütvuse esitamiseks tänapäevastes ühikutes sobib kordaja 0,004186 MJ/kcal. Siis tekib mahumassi (normatiivne) valem (Väli jt, 2021)

- $d = 1,3831 \exp(-0,0717 Q) + 0,98$, kg/dm³

kus

- Q on kütvus, MJ/kg;
- 0,98 kg/dm³ on põleva aine arvutuslik tihedus, mis vastab kerogeeni kütvuse väärtusele $Q \approx 35$ MJ/kg;
- 1,3831 kg/dm³ on lubjakivi ja kerogeeni tiheduse vahe, sest kui $Q = 0$, siis $d = 1,38 + 0,98 = 2,35$, kg/dm³, 0,0717 seob ühikuid. (Väli jt, 2021)

Tuletasime normatiivse valemi pöördfunktsiooni

- $Q = -\ln((d - 0.98)/1,3831)/0,0717$ MJ/kg (Väli jt, 2021)

...mis on kasutatav setitamisporduktide kütvuse hindamiseks mahumassi alusel. Arvutatud valem võimaldab oluliselt lihtsustada rikastusporduktide energiasalduse määramist ja vältida kallist laboratoorset mõõtmist (Väli jt, 2021).

Üldiselt allub porduktide kütvuse sõltuvus mahumassist üldisele (normatiivsele) seaduspärasusele. Oluline erinevus on märgatav Ojamaa kaevise setitamise tulemuste puhul. Lubjakivi ja kerogeeni mahumassi tavatust suurema vahe alusel näib, nagu oleks Ojamaa lubjakivi „raskem“ kui mujal, mahumass oleks 2,5...3 kg/dm³. Võimalik, et see nähtus tuleneb sellest, et põlevkivi tükid on „liistakulisemad“ ja kerkivad meediumi (vesi, õhk) voos kõrgemale. Teisisõnu, lubjakivi tükid kerkivad vähem ja näivad seetõttu raskemad. Seda oletust toetab asjaolu, et Slantsõ kaevise setitamisel, kus erineva tüki kujuga kaeviseid setitati eraldi, porduktide tiheduse ja kütvuse suhe on väga lähedane normaalsele (Väli jt, 2021).

5. Märgetitamise katsetööd TalTech GI mäendustingimuste laboris

Lisaks 2019-2021 aasta uuringule, kus tõestasime märgetiti AllJig-S400 sobivuse põlevkivi rikastamiseks, tein 2022. aastal käesoleva magistritöö valmimise käigus eelmisele uuringule lisaks jätkutöö, mille raames analüüsisin AllJig-S400 setiti tehniliste parameetrite reguleerimise võimalusi, katsetasin seadme tööd muudetud parameetritega ja pakkusin välja uued töörežiimid rikastamiseefekti suurendamiseks.

Püstitasin tööle konkreetsed ülesanded, mida jätkutöö raames lahendada soovisin:

1. Kas setiti AllJig-S400 tööparameetrid, nagu õhu surverõhu ja vedeliku pulseerimis sageduse muutmisel on mõju kivimitükkide sorteerivusele ja nende kütvusele?
2. Kas kaalutud proovide tegelikud mahumassid on samas suurusjärgus arvutatud mahumassidega ning kas ja kuidas nende erinevus võib mõjutada akrediteeritud laboris tehtud kütvuste väärtusi?
3. Millised eelised ja puudused on märgetitamisel põlevkivikaevandustes kasutusel oleva magnetiidi suspensioonis rikastamistehnoloogia ees?

5.1 Katsetööde metoodika

Ettevalmistustööd

AllJig-S400 märgetiti on seade, mis koosneb mitmest osast. Enne katsetööde alustamist tuleb esmalt täita seadme veepaak ääreni veega täis. Tuleb tähelepanelikult jälgida, et setiti veepaagi all asetsevad kraanid on suletud, sest täidetud vesi jookseb kraanidest muidu välja. Veega täitumise korral asetatakse veepaagi peale sõel. Sõelad on enamasti läbimõõduga 1-4 mm. Sõela peale asetatakse tugevalt kinnitatud raam, mille peale laotakse pleksiklaasist 5-6 proovikasti.



Joonis 10. AllJig-S400 märgsetiti

Tooksin välja asjaolu, et kõikide kastide ääred on kaetud kummitihenditega, mis võimaldab kastidel haakuda teineteisega, sealhulgas muuta kastid ka vettpidavaks. Antud katsetööde jaoks on proovikastide asetamine oluline. Suuremad proovikastid tuleb asetada allapoole ning väiksema läbimõõduga proovikastid pealmisteks. Põhjus on selles, et täpsemaid tulemusi on vaja põlevkivi või ka kerogeeni kohta ning väiksemad kastid annavad võimaluse katsetöid paremini hinnata. Kastide ristlõige on ruut ning mõõtmed 350x350 mm. Pleksiklaasi paksus on 19 mm, mis annab sisemise mõõdu 331x331 mm. Kastid on jaotatud kahte kõrgusklassi. Väiksemad kastid on kõrgusega 25 mm ning suuremad 50 mm. Kuna mõõtmed on teada, siis on võimalik leida, et väikesed kastid mahutavad 2,7 liitrit ning suuremad kastid 5,5 liitrit. Setiti kogumaht on 44 liitrit. Pärast veega täitmist ning kastide paigaldamist tuleb sisse kallata katsetatav kogus ettevalmistatud põlevkivi kaevist.

Seadme käivitamine.

Järgnevalt on võimalik setiti käivitada. Esialt tuleb vajutada AllJig-S400 seadme vasakul küljel juhtpaneelist rohelist värvi nuppu, millel on kirjas „Rotary Valves“, siis vajutada nuppu „Blower“. See võimaldab mootoril ja ventilaatoril tööle hakata. Paneelil on võimalik leida nupp „Stroke Adjustment“, millega saab reguleerida veepulsside sagedust. Numbriline väärtus kirjeldab, mitu pulssi minutis setiti teeb.

Seadmel on veepaagi kohal ka õhupaak, mille küljes on reguleeritav rool. Seda kasutatakse rõhu reguleerimiseks. Töötavas masinas tõuseb vesi läbi sõela materjaliga varustatud kasti, kus

pulsseeriva veega sorteeritakse ning pestakse kaevist. Sõela kaudu liigub välja kaevise küljest tolmu ning peenosakesed, mida arvestatakse kadude alla. Katse kestab tootja poolt pakutud ajavahemiku 15-20 minutit ning katse lõpus peaks kogu setitsisse kallatud materjal olema jagunenud eri klassidesse. Pealmistesse kihtidesse jäävad kergemad osakesed ehk suuremal määral kerogeeni sisaldav põlevkivi ning alumistesse kihtidesse lubjarikas aheraine.

15-20 minuti pärast katsetööde lõpetamisel tuleb seade välja lülitada. Vesi voolab rikastatud materjali vahelt tagasi veepaaki. Veepaagist tuleb läbi kraanide juhtida nn. suspensioon, mis sisaldab tolmu, vett ja peenosakesi, masinast välja. Seejärel vastavalt katsetööde vajadusele tühjendada setiti materjalist. Tänu pleksiklaasist kastidele on võimalik hästi identifitseerida suure erinevusega tasandid ning eraldada need klassid, mis lähevad edasisele uurimisele. Vastavalt vajadusele korratakse samalaadset setitamist uute kaevise kogustega katsetööde meetodikaga ettenähtud kordi

Katsetatav materjal

Katsetöödeks valiti puur-lõhketöödega raimatud ligikaudu 0,5 tonni kaevist, mis on pärit VKG Ojamaa kaevandusest. Kaevandusest maa peale saadetud kaevist oli esialgselt tükisuurusega 0-300 mm ja see transporditi minu poolt TalTech Geoloogia instituudile kuuluvale Särghaua õppekeskuse territooriumile, et läbi viia kaevise edasine ettevalmistamine rikastamisprotsessiks märgetitusseadmes.



Joonis 11. Kaevist big-bag kotis Särghaua õppekeskuse territooriumil

Kaevise purustamiseks ja sõelumiseks vajaliku tükisuuruseni kasutasin instituudi kopplaadurit Avant 745, mis oli varustatud mobiilse purustiga Komplet Italia SLR RCB 6000.



Joonis 12. Kopplaadur Avant 745 koos mobiilse purusti Komplet Italia SLR RCB 6000



Joonis 13. Lõputöö autor kopplaadurit koos purustiga opereerimas
Järgnevalt viisin läbi esimese purustamistsükli.



Joonis 14. Kaevisse purustamine mahutitesse



Joonis 15. Kaevisse purustamisprotsess

Kokku tuli purustamistsükleid kaks. Kogu purustatud kaevisse laadisin 40 liitriste anumatesse. Kokku sain 13 anumat purustatud kaevist. Kaalumisel sain koguseks ~506 kg.



Joonis 16. Ämbrid täis purustatud kaevist

Pärast purustamist oli vaja eraldada rikastusprotsessi läbiviimiseks märgsetitusseadmes AllJig-S400 katsetöödeks sobiliku tükisuurusega (32-63 mm) materjal ning viia see setitamiseks Geoloogia instituudi mäendustingimuste laborisse.



Joonis 17. Purustatud kaevisse kaalumise

Seal kaalusin üle kõik 13 anumad kaevist. Kaalule ei olnud kalibreeritud tühja anuma mass, mistõttu oli vaja lahutada maha hiljem mahuti mass 1,4 kg igast kaalumise korrast. Kaevisse mass erinevates mahutites jäi enamasti ühte suurusjärku, mis on välja toodud järgnevas tabelis (Tabel 5).

Tabel 5. Anumates olnud kaevisse mass

Ämber	Mass (kg)
1	46,0
2	41,2
3	44,0
4	44,2
5	42,9
6	44,7
7	38,0
8	44,7
9	37,3
10	43,0
11	37,0
12	32,2
13	28,8
Kokku	524,0

$$524 \text{ kg} - 13 * 1,4 = 505,8 \text{ kg}$$

Järgnevas tegevuses oli kaevisse tükkide klassifitseerimine. Selleks oli vaja purustatud kaevisse sõeluda, mida tehti käsitsi instituudi laboris olevate sõeltega. Kõik 13 anumad kaevisse kallati laboriruumi avatud põrandale ühte kuhja



Joonis 18. Purustatud kaevis, mis läks sõelumisele

Pildil toodud kuhi segati mitu korda läbi ja tõsteti labidaga ühe või mitu labidatäie kaupa sõeltele ning sõelalune valgus tühjadesse 40 liitristesse anumatesse tagasi. Sõelapealse materjali kogusin teistesse proovianumatesse. Kasutasin 31,5 mm ja 63 mm avadega sõelu. Kõige ülemisele sõelale ei jäänud peale materjali sinna kuhjast mitte ühtegi kaevisetükki. Sellest saab järeldada, et purustamistamisjärgselt on kaevisse tükisuurus väiksem, kui 63 mm.



Joonis 19. Sõelumiseks kasutatud sõelad

Pärast sõelumist tekkis uus kuhila tükisuurusega 32-63 mm. Ülejäänud materjal vahemikus 0-32 mm säilitasin 40 liitristes anumates tulevasteks võimalikeks põlevkivi peenkivi rikastamise uuringuteks.



Joonis 20. Tükisuurusega 32-63 mm sõelumisel saadud kuhila

Järgnevalt tegin standardi EVS-EN 932-1:2000 punktile 9.4 vastav „Koondproovi vähendamine kvarteerimise teel“ materjali segamine (Standardikeskus, 2020).

Platsile valatud kaevis tuleb segada selle koonustesse kuhjates ning moodustada ringi pöörates uus koonus. Seda protsessi tuleb teha kolm korda. Alati tuleb asetada uus kuhjatäis kaevist koonuse tippu, et materjal valguks naturaalselt alla, jaotuks ühtlasemalt ning tagaks ühtlase segunemise. Kolmandal korral tuleb koonus tasandada, selleks vajutatakse kühvel läbi tipu vertikaalselt mitmeid kordi, mis muudab kuhja lamedaks. Lame kuhila on vaja jaotada mööda ristuvaid diagonaale neljaks. Üksteisele vastu asetsev kuhila paar eemaldatakse ning jääk kühveldatakse algsesse kuhilasse tagasi. Antud tegevust tuleb korrata kolm korda.



Joonis 21. Esialgse kuhja jaotamine neljaks



Joonis 22. Proovide kvarteerimine sobivaks koguseks.

Kogu kuhila, mille sõelumisel sain, tuleb kvarteerimisel jaotada ligikaudu 20-30 kg suurusteks proovideks. Kokkuvõtteks võib öelda, et kõik viis (5) saadud esinduslikku proovi valmistasin ette AllJig-S400 setitusmasinasse katsetamiseks kindlal s.t. üldtunnustatud kvarteerimismeetodil. Proovid ning nende mass on toodud järgnevas tabelis (Tabel 6). Lisaks on pildil näha proovide ettevalmistamise jääki nn. 0-32 mm tükisuurusega kaevist, mis jäi sõelumisest alles ja kuulub säilitamisele võimalikeks tuleviku uuringuteks.

Tabel 6. Proovide massid

Proov	Kogus (kg)
1	21,0
2	25,5
3	22,1
4	24,9
5	22,8
Kokku	116,3

Viie esindusliku proovi kogumass on 116,3 kg. Kui enne proovide ettevalmistamist ehk siis kaevise purustamist ja sõelumist oli kaevise mass 506 kg, siis pärast purustamist sain kaevist tükisuurusega 32-63 mm ligikaudu 1/5 kogumassist. Saadud viis proovi valasin 40 liitristesse anumatesse ning sellele järgnesid juba konkreetset katsetööd setitiga AllJig-S400.

Rikastamine seadmega AllJig-S400

Alustuseks tegin veel kord ettevalmistatud proovide kontrollkaalumise. Seejärel reguleerisin setiti töörežiimi esimesele ettenähtud rõhuga tasemele, lasin setitisse vajalik hulk vett ja asetasin mahuti põhja 4 mm avausega sõela. Enne esimese kivimiproovi lisamist seadmesse kontrollisin üle ka erinevad pulsside spektri režiimid.

Katsetööde käigus tegin viis erinevat katset, igaühega viiest proovist erinev. Tööde käigus muutsin setitusseadme parameetreid: rõhku ja pulsside sagedust eesmärgiga selgitada välja põlevkivi jaoks parim seadme seadistus.

Seadme töötamise ajal reguleerisin kahte parameetrit: rõhku ja pulsside arvu minutis. Kolm katset tegin ühesuuruse rõhuga, kuid erinevate pulsside sagedusega ja viimased kaks katset erineva rõhuga, kuid samade pulsside sagedusega, mis eelmistel katsetel. Kõik katsed kestsid 20 minutit

2019-2021 a. katsetöödel Saksamaal firma AllMineral testseadmel AllJig-S400 katsetati rõhuga 0,3 bar ning pulsside sagedusega 49 pulssi/minutis. Saksamaa laboris tehtud erinevatest katsete tulemustest optimaalseim sai kasutatud võrdleva näitena käesoleva töö tulemuste analüüsid.

Alljärgnevalt on toodud välja tabel (Tabel 7), kus on kirjeldatud minu poolt setitusmasina viiel erineval katsel kasutatud tööparameetreid.

Tabel 7. Katsete tööparameetrid

Katse	Rõhk (bar)	Pulss (pulssi minutis)
1	0,2	40
2	0,2	30
3	0,2	50
4	0,3	30
5	0,3	40
6 (Saksamaal)	0,3	49

5.1.1 Katse 1

Esimesel katsel seeditati kaevise proovi, mille kogus oli 21,0 kg. Proov tõsteti AllJig-S400 mahutisse ja seadme tööparameetrid seadistati sagedusele 40 pulssi minutis ning rõhk 0,2 bar. Katse kestis 20 minutit.



Joonis 23. Katse 1 setitis Alljig-S400



Joonis 24. Katse 1 kihid pärast setitamist

Järgnevas tabelis (Tabel 8) on toodud tulemused.

Tabel 8. Katse 1 analüüs

Level	Mass (kg)	%
L1	1,4	6,76
L2	4,4	21,25
L3	5,6	27,05
L4	9,3	44,93
Kokku	20,7	100
Kadu	0,3	1,43

Pärast katset võtsin setitist välja iga settinud kiht eraldi ja asetasin need eraldi anumatesse. Anumad, koos erinevate setitatud põlevkivi kihtidega on näidatud pildil nr 25. Pildil on selgelt näha erinevates anumates setitatud proovide erinevust: massijaotust ning ka värvuse erinevusi. Setitatud proovide kihid L1-L4 on pildil suunaga paremalt vasakule.



Joonis 25. Nelja erineva kihi separeeritud põlevkivi kogused, vasakult L1-L4²

5.1.2 Katse 2

Teise katse kaevise kogus oli 25,5 kg. Seadme töötamise aeg nagu eelmiselgi oli 20 minutit, rõhk 0,2 bar-i ning pulsside sagedus 30 pulssi/minutis. Madalam pulsi sagedus tekitab tugevamaid õhulööke setitis, mis suurendas ka jaotust proovi erinevate fraktsioonide vahel.

Tabelis nr. 10 (Tabel 9) on esitatud katse nr. 2 proovi massijaotus

² L1-L4 kujutab endas märgsetitis AllJig-S400 tekkinud kihte. Kõige pealmine kiht on L1 ning viimane kiht L4. Pealmised kihid on põlevkivirikkamad ning alumised lubjakivirikkamad.



Joonis 26. Katse nr 2 setitis AllJig-S400

Tabel 9. Katse 2 analüüs

Level	Mass (kg)	%
L1	3,6	14,34
L2	6,4	25,50
L3	6,9	27,50
L4	8,2	32,67
Kokku	25,1	100
Kadu	0,4	1,57



Joonis 27. Katse 2 neli kihti

Teise katse puhul on näha, et settinud kihid L2 ja L3 segunesid omavahel halvasti. Piiri oli raske tuvastada, sest suured kivimi tükid sattusid mõlema „leveli“ sisse. Seda võib põhjendada ilmselt asjaoluga, et pulsi löögi hetkel loksus setitist vett välja, mistõttu oli oluline jälgida, et kogu proov oleks vee all kogu katse kestusel. Seega kehv massijaotus on suure tõenäosusega tingitud katsetööde läbivijast.



Joonis 28. Katse 2 pärast setitamist, paremalt L1-L2



Joonis 29. Katse 2 pärast setitamist, paremalt L3-L4

5.1.3 Katse 3

Kolmandal katse puhul kaalus proov 22,1 kg. Seekord sai pulsside sageduseks võetud 50 pulssi/minutis ning rõhk 0,2 bar. Katse kestvus endiselt 20 minutit ning seekord oli tagatud piisav kogus vett setitis, mis tagas selge lineaarselt kasvava massijaotuse.



Joonis 30. Katse 3 setitis AllJig-S400

Tabel 10. Katse 3 analüüs

Level	Mass (kg)	%
L1	1,9	8,72
L2	3,8	17,43
L3	6,1	27,98
L4	10,0	45,87
Kokku	21,8	100
Kadu	0,3	1,36

Tulemuseks on proovi erinevate settinud kihtide massijaotuse lineaarne suurenemine. Antud katse osutus üheks väljapaistvamaks, seetõttu on ka tulemuseks eesmärgistatud näitajad. Järgnevalt on piltidel näha setitist tekkinud tasemed.



Joonis 31. Katse 3 pärast setitamist, kujutatud pealmist kihti L1



Joonis 32. Katse 3 pärast setitamist, paremalt L1 ja L2



Joonis 33. Katse 3 pärast setitamist, paremalt L3 ja L4

5.1.4 Katse 4

Neljanda katse tegin prooviga, mille mass oli 25,0 kg. Pulsside arvu minutis reguleerisin 30 pulssi/min ning rõhk 0,3 bar-i. Katse kestis endiselt 20 minutit ning setitiga katse käigus ei juhtunud midagi, vett oli piisavalt. Massijaotus kujunes endiselt lineaarseks.



Joonis 34. Katse nr 4 setitis AllJig-S400

Tabel 11. Katse 4 analüüs

Level	Mass (kg)	%
L1	3,8	15,70
L2	5,1	21,07
L3	6,8	28,10
L4	8,4	34,71
Kokku	24,2	100
Kadu	0,8	3,2



Joonis 35. Katse 4 erinevad tasemed setitis

Katse nr. 4 iseärasuseks on suur massi kadu. Peaaegu kahekordse kao tekkimise põhjuseks võib pidada suuremat põlevkivitolmu või nõrkade kivimiliistakute olemasolu proovis, mis sai setiti poolt välja pestud.



Joonis 36. Katse 4 tasemete jaotus ämbrites, paremalt L1-L4

5.1.5 Katse 5

Viimane katse proovi kogus oli 22,8 kg. Reguleerisin pulsside arvu minutis 40 pulssi/minpeale ning rõhu jätsin eelmise katse tasemele, 0,3 bar. Katsetulemused on toodud järgnevas tabelis (Tabel 12). Varasemate katsetega võrreldes ei toimunud suuri muutusi massijaotuses ega kadudes.



Joonis 37. Katse 5 setitis AllJig-S400

Tabel 12. Katse 5 analüüs

Level	Mass (kg)	%
L1	2,1	9,33
L2	4,4	19,55
L3	7,4	32,88
L4	8,6	38,22
Kokku	22,5	100
Kadu	0,3	1,32



Joonis 38. Katse 5 neli erinevat taset

5.2 Proovide edasine käsitlemine

Pärast proovide setitamist setitusmasinaga AllJig-S400 kogusin saadud proovide tasemed eraldi 40 liitristesse anumatesse ja märgistasin need.

Järgnevas sammuks oli vastavalt katsetööde metoodikale proovide kihtide kütvuse määramine. Kuna oli viis proovi ning neli erinevat kihti, siis sain kokku 20 proovi. Kuna lisaks setitist tulnud proovidele oli plaan määrata ka kuiva kaevise kütvus eesmärgiga näidata rikastamise mõju setitis, siis kvarteerisin ka tükisuurusega 0-32 mm ja 32-63 mm proovid. 0-32 tükisuurusega kuiva proovi sain KIK (Keskkonnainvesteeringute keskuse)2019-2021 poolt rahastatud projekti raames

järelejäänud proovidest. Kokku viisin TTÜ Energiatehnoloogia instituudi laborisse kütteväärtuse määramiseks 22 proovi. Kütteväärtuse määramiseks kaalusin valmis 1 kg massiga proovid vastavalt EVS standard nr punktile EVS-EN 932-1:2000 punktile 9.4 „Koondproovi vähendamine kvarteerimise teel“ alusel (Standardikeskus, 2020). Proovikotid märgistasin ja igale proovile lisasin numברי milliselt tasemelt see pärineb. Kütuse määramiseks valmis proovid on näha alljärgneval pildil.



Joonis 39. Eraldatud proovid kütteväärtuse määramiseks

6. Kütvuse määramine

Järgnevalt viisin kõik ettevalmistatud 22 proovi, kaaluga 1 kg/proov, kütvuse määramiseks energiatehnoloogide laboratooriumi. Proovide ettevalmistajana osalesin ka kütvuse määramise töödel.

Kütvuse määramiseks toodud proovidest oli vaja eraldada üks või mõned kivimitükid, mis läksid käsipurustisse, millega jahvatati need 5-10 mm osakesteks. Käsipurusti meenutab vanaaegset haklihamasinat, kus purustatakse mass ühtlaseks. Kivimeid on vaja purustada peenikeseks massiks, sest jahvatusseade ei tolereeri suuri osakesi.

Tööde käigus proovide ettevalmistamisel selgitati sealsete spetsialistide poolt, milliseid seadmeid on vaja kasutada ja kuidas need ette valmistada. Osalesin kogu protsessis ning praeguseks on selge matetrijalide kütvuse määramise tehnoloogia. Võin kinnitada, et kahekümne kahe (22tk) proovi määratud kütteväärtused on usaldusväärsed ning need on ametlikult protokollitud. Vaata (Lisa 1: TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud kütteväärtuse määramise tulemused, 05.04.2022) protokoll.



Joonis 40. Proovide purustamine energiatehnoloogia laboris

Pärast tükkide purustamist käsipurustis asetati saadud proov anumasse, kus asub viis metallkuuli ja mis jahvatab antud massi ühtlaseks pulbriks. Seade jahvatab 30 minutit ning seadmest tulnud proov meenutab oma tekstuuri ja visuaaliga jahu.



Joonis 41. Metallkuulid anumasse proovi jahvatamiseks



Joonis 42. Seade proovi jahvatamiseks



Joonis 43. Erinevad proovid enne ja pärast jahvatamist

Pulbrilisest proovist läheb vaja kõigest mõni gramm materjali, mis asetatakse pöidla suuruse anumasse.



Joonis 44. Anum kütteväärtuse määramiseks koos prooviga

Anum riputatakse metallist silindri külge, kuhu kinnitatakse ka puuvillasest materjalist süütenöör, mis süütab proovi. Proov asetatakse kütteväärtuse määramiseks seadmesse IKA-Calorimeter C5000 ning katse kestab 15 minutit. Pärast katset ilmub seadme ekraanile kütteväärtus, mis pannakse eraldi kirja. Proovist jääb pärast katset seadmes järele tuhk. Sel moel akrediteeritud laboris saadud tulemused protokollitakse ja saadud dokument saadetakse tööde tellijale.



Joonis 45. Seade IKA-Calorimeter C5000 kütteväärtuse määramiseks



Joonis 46. Silindriline anum, kuhu asetatakse proov kütteväärtuse määramiseks

7. Kivimite mahumassi määramine

Järgnevalt oli vaja teostada kivimite mahumassi määramise. Mahumass võimaldab rikastatud toote ja aheraine kohta arvutada teoreetilise arvutusliku kütteväärtuse. Arvutatud kütteväärtust võrdlen TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud tulemustega ning annan hinnangu, kas väärtused on omavahel võrreldavad. Arvutusliku mahumassi määramiseks võetud valemid on saadud TalTech Geoloogia instituudi mahumassi määramise juhendist. Mahumassi määramise kirjeldus on järgmine:

Kivimi mahumassiks nimetatakse kivimi ruumalaühiku massi.

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Kus:

m – kivimi mass (kg)

V – kivimi ruumala (m³)

Kivimi mahumass sõltub kivimi mineraloogilisest koostisest, kivimi struktuurist, tekstuurst ja poorsusest. Kivimi mahumass määratakse hüdrostaatilise kaalumise. Mahumass on mäenduses vajalik peamiselt kaevisse laadimise, transpordi ja töötlemisega seotud ülesannete lahendamisel.

Töö käik:

- Katsetamiseks tuleb võtta vähemalt kolm kivimitükki samast proovist:
- Määrata kivimitüki mass õhus m (g)
- Parafiinida kivimitükk, määrata parafiinitud kivimitüki mass õhus m_1 (g)
- Määrata parafiinitud kivimitüki kaal vees m_2 (g)
- Määrata parafiinitud kivimitüki ruumala, kasutades valemit:

$$V_{k+p} = \frac{m_1 - m_2}{\rho_v} (cm^3)$$

Kus ρ_v – vee tihedus laboritingimustes ($1g/cm^3$)

Määrata parafiini ruumala, kasutades valemit:

$$V_p = \frac{m_1 - m}{\rho_p} (cm^3)$$

Kus ρ_p – laboris kasutatava parafiini tihedus ($0,93 g/cm^3$)

Arvutada kivimi mahumass:

$$\rho = \frac{m}{V_{k+p} - V_p} (cm^3)$$

Järgnevas tabelites on välja toodud iga katse taseme kohta kolm mahumassi määramist õhus, parafiinitult õhus ja parafiinitult vees. Lisaks leitud ka iga taseme kohta keskmine kivimi mahumass.

Tabel 13. Setiti 1. katse mahumassi määramine

Katse 1	m (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	Kivimi mahumass ρ (g/cm ³)
L1				
1	22,0	22,4	4,4	1,25
2	34,2	34,8	5,6	1,20
3	27,4	28,0	4,8	1,21
Keskmine				1,22
L2				
1	34,2	35,0	9,0	1,36
2	34,2	35,0	11,2	1,49
3	28,2	29,0	7,2	1,35
Keskmine				1,40
L3				
1	37,2	38,4	19,2	2,08

2	37,8	39,0	19,0	2,02
3	43,8	45,2	22,8	2,10
Keskmine				2,06
L4				
1	42,8	44,8	23,0	2,18
2	52,0	54,2	30,6	2,45
3	46,4	48,4	27,4	2,46
Keskmine				2,36

Tabel 14. Setiti 2. katse mahumassi määramine

Katse 2	m (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Kivimi mahumass p (g/cm ³)
L1				
1	39,0	40,0	7,2	1,23
2	28,8	29,6	5,0	1,21
3	37,8	39,2	6,6	1,22
Keskmine				1,22
L2				
1	24,0	25,0	5,8	1,32
2	38,8	40,4	11,2	1,41
3	54,0	56,8	18,8	1,54
Keskmine				1,43
L3				
1	58,2	60,2	31,8	2,22
2	61,2	63,8	31,6	2,08
3	67,4	70,2	36,0	2,16
Keskmine				2,15
L4				
1	62,0	64,8	33,8	2,22
2	77,2	80,6	43,4	2,30
3	63,6	65,8	32,8	2,46
Keskmine				2,33

Tabel 15. Setiti 3. katse mahumassi määramine

Katse 3	m (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Kivimi mahumass p (g/cm ³)
L1				
1	13,0	13,2	1,8	1,16
2	15,6	16,0	4,2	1,37
3	15,4	15,8	2,8	1,23
Keskmine				1,25

L2				
1	39,0	39,2	19,4	1,99
2	25,2	25,6	5,4	1,27
3	36,0	36,6	9,0	1,34
Keskmine				1,53
L3				
1	37,0	37,2	20,0	2,18
2	42,6	43,0	22,0	2,07
3	60,0	60,4	31,2	2,09
Keskmine				2,11
L4				
1	36,8	37,0	21,6	2,42
2	40,6	40,8	22,6	2,26
3	63,4	63,8	35,6	2,28
Keskmine				2,32

Tabel 16. Setiti 4. katse mahumassi määramine

Katse 4	m (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Kivimi mahumass p (g/cm ³)
L1				
1	40,8	41,2	12,0	1,42
2	37,6	37,8	7,8	1,26
3	31,2	31,8	7,4	1,31
Keskmine				1,33
L2				
1	78,2	79,4	19,0	1,32
2	39,2	39,8	13,0	1,50
3	56,0	56,6	19,2	1,52
Keskmine				1,45
L3				
1	55,2	55,8	30,4	2,23
2	64,4	65,2	36,2	2,29
3	90,4	91,0	49,4	2,21
Keskmine				2,24
L4				
1	82,8	83,4	44,8	2,18
2	76,0	76,8	42,4	2,27
3	49,4	50,0	27,0	2,21
Keskmine				2,22

Tabel 17. Setiti 5. katse mahumassi määramine

Katse 5	m (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Kivimi mahumass p (g/cm ³)
L1				
1	26,0	26,4	5,4	1,26
2	30,6	31,2	5,8	1,24
3	34,8	35,2	7,2	1,26
Keskmine				1,25
L2				
1	43,6	44,4	12,2	1,39
2	35,0	35,6	11,0	1,46
3	42,4	43,0	12,2	1,41
Keskmine				1,42
L3				
1	47,6	48,0	24,6	2,07
2	58,0	58,6	29,8	2,06
3	51,2	52,0	27,0	2,12
Keskmine				2,08
L4				
1	104,6	105,2	57,2	2,21
2	66,0	66,4	34,4	2,09
3	82,0	82,8	43,0	2,11
Keskmine				2,14

Tabel 18. Mahumasside keskmised

Mahumassi keskmine (g/cm ³)	Katse 1	Katse 2	Katse 3	Katse 4	Katse 5
L1	1,22	1,22	1,25	1,33	1,25
L2	1,40	1,43	1,53	1,45	1,42
L3	2,06	2,15	2,11	2,24	2,08
L4	2,36	2,33	2,32	2,22	2,14

Mahumassi määramise usaldatavust saab suurendada iga tasemele eraldi võetud proovide suurendamisega. Kolme kivimi määramise asemel kasutades 10 kivi suurendab usaldusväärsust tunduvalt. Saadud tulemustega on võimalik leida arvutatud kütteväärtust. Kütteväärtuse leian järgneva valemiga:

- $Q = -\ln((d - 0.98)/1,3831)/0,0717 \text{ MJ/kg}$ (Väli jt, 2021)

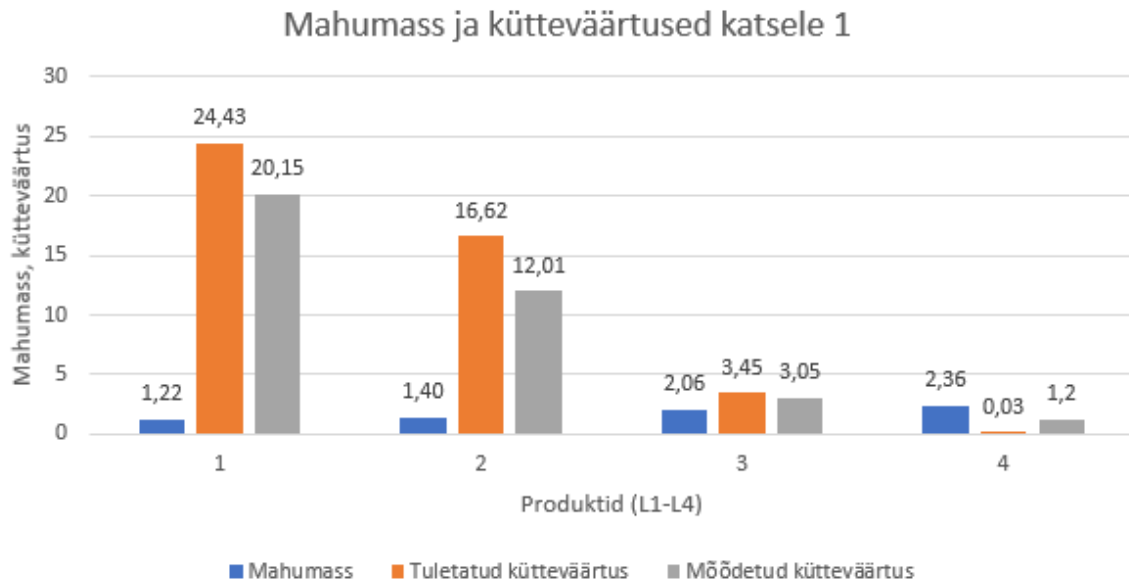
Arvutatud kütteväärtuse tulemused on toodud välja (Tabel 19):

8. Katsetööde tulemused

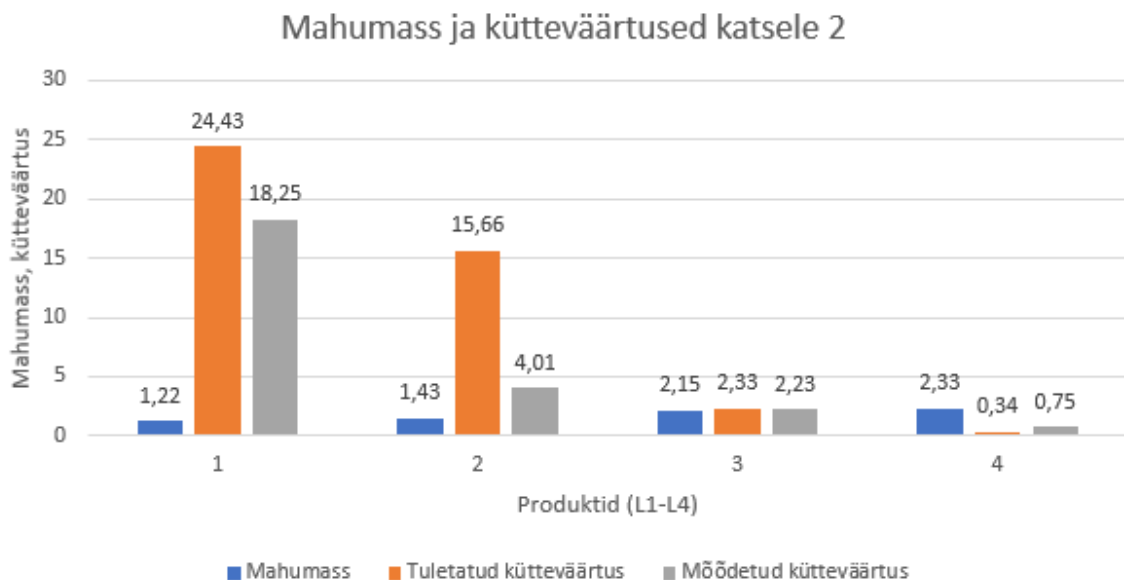
Tabel 19. Katsetööde tulemused tabelina

Setitamise katsetööde tulemused							Kütteväärtus		
Katse nr	Pulss	Rõhk	Level	Taseme mass	Massijaotus	Mahumass	Arvutatud	Möödetud	Vahe arvutatud ja möödetud kütteväärtusel
	1/min	bar		kg	%	kg/dm ³	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
V1	40	0,2	L1	1,4	6,76	1,22	24,43	20,15	4,28
			L2	4,4	21,25	1,40	16,62	12,01	4,61
			L3	5,6	27,05	2,06	3,45	3,05	0,40
			L4	9,3	44,93	2,36	0,03	1,20	-1,17
			SUM	20,7	100,00				
V2	30	0,2	L1	3,6	14,34	1,22	24,43	18,25	6,18
			L2	6,4	25,50	1,43	15,66	4,01	11,65
			L3	6,9	27,50	2,15	2,33	2,23	0,10
			L4	8,2	32,67	2,33	0,34	0,75	-0,41
			SUM	25,1	100,00				
V3	50	0,2	L1	1,9	8,72	1,25	22,78	20,45	2,33
			L2	3,8	17,43	1,53	12,86	8,16	4,70
			L3	6,1	27,98	2,11	2,82	2,77	0,05
			L4	10,0	45,87	2,32	0,44	1,91	-1,47
			SUM	21,8	100,00				
V4	30	0,3	L1	3,8	15,70	1,33	19,17	19,65	-0,48
			L2	5,1	21,07	1,45	15,05	6,95	8,10
			L3	6,8	28,10	2,24	1,30	1,57	-0,27
			L4	8,4	34,71	2,22	1,52	0,76	0,76
			SUM	24,2	100,00				
V5	40	0,3	L1	2,1	9,33	1,25	22,78	21,20	1,58
			L2	4,4	19,55	1,42	15,97	11,34	4,63
			L3	7,4	32,88	2,08	3,19	2,61	0,58
			L4	8,6	38,22	2,14	2,45	2,11	0,34
			SUM	22,5	100,00				
V6	49	0,3	L1	1,74	9,30	1,35	18,50	21,86	-3,36
			L2	3,59	19,20	1,71	8,90	15,56	-6,66
			L3	5,77	30,86	2,00	4,30	8,37	-4,07
			L4	7,6	40,64	2,22	1,50	4,11	-2,61
			SUM	18,7	100,00				

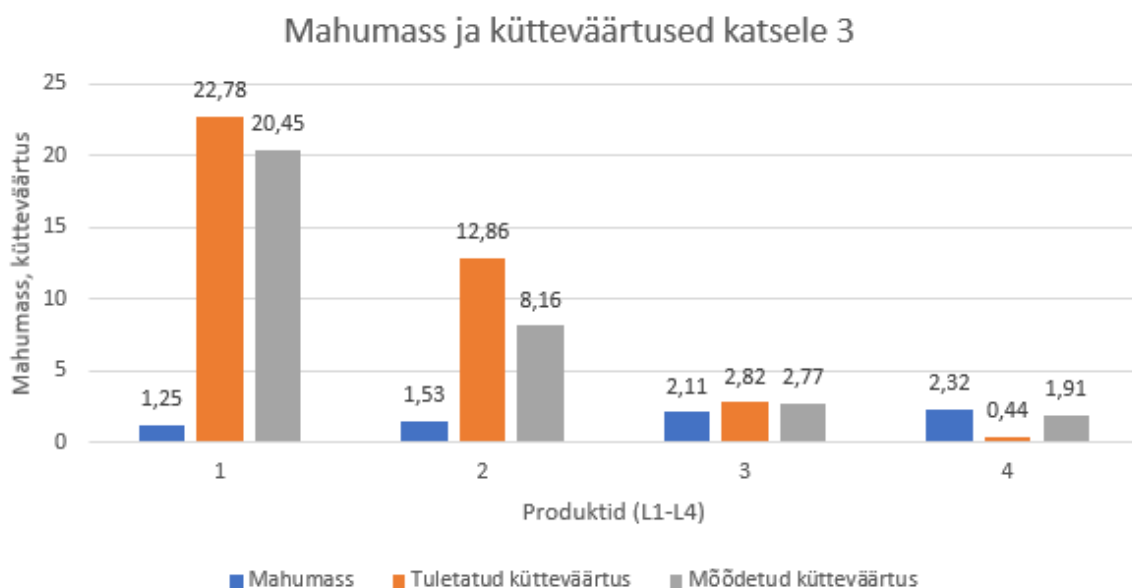
Eelnevas tabelis (Tabel 19) on toodud välja katsetööde käigus kõikide proovide erinevate kihtide mass, massijaotus ning arvutatud ja mõõdetud kütteväärtused. Lisatud on ka 2019-2021.a. Saksamaal tehtud katsetööde proov V6 koos andmetega. Määratud on igale proovile mahumass ning selle põhjal arvutatud teoreetiline kütteväärtus. Saksamaal tehtud proovi jaoks kasutasin eelmise, varasemalt tehtud uuringu käigus määratud mahumassi. Kahe meetodi mõningane kütvuste erinevus võib olla tingitud osaproovide võtmise tehnikast peenendamata materjalist.



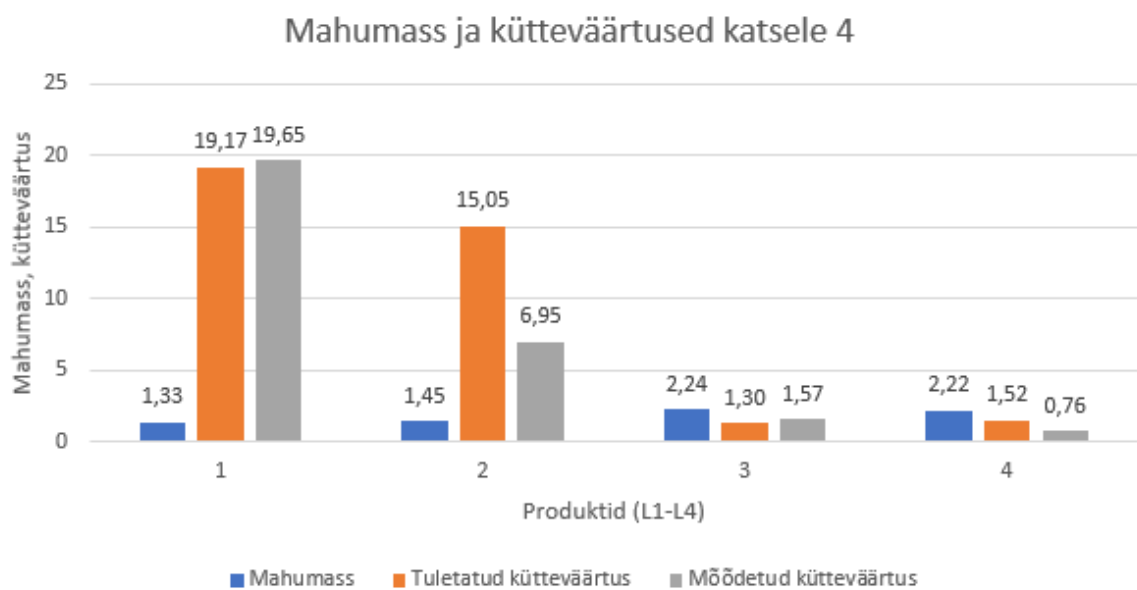
Joonis 47. Mahumass ja kütteväärtused katsele 1



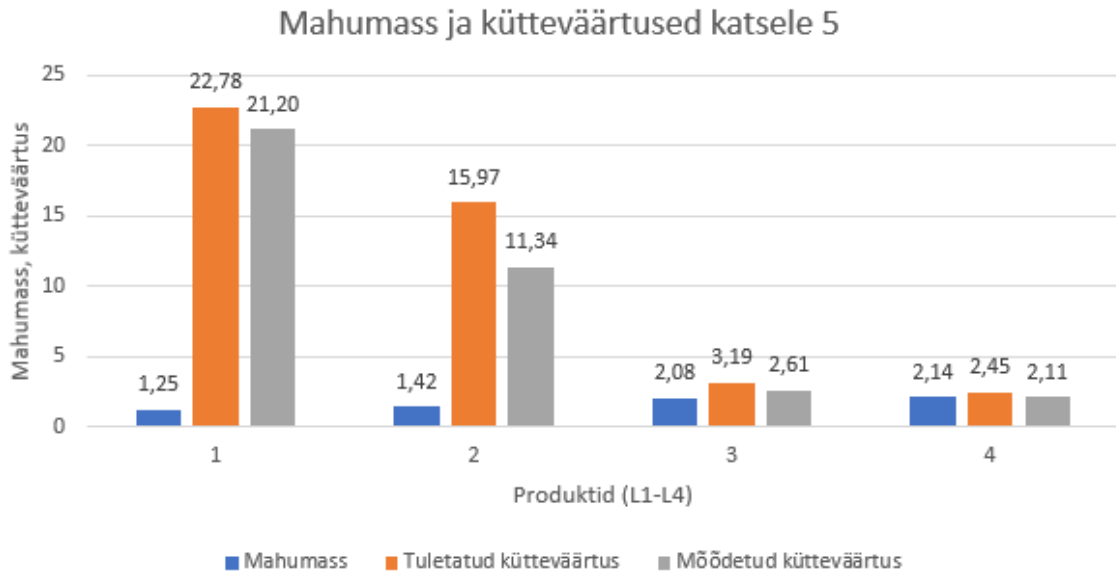
Joonis 48. Mahumass ja kütteväärtused katsele 2



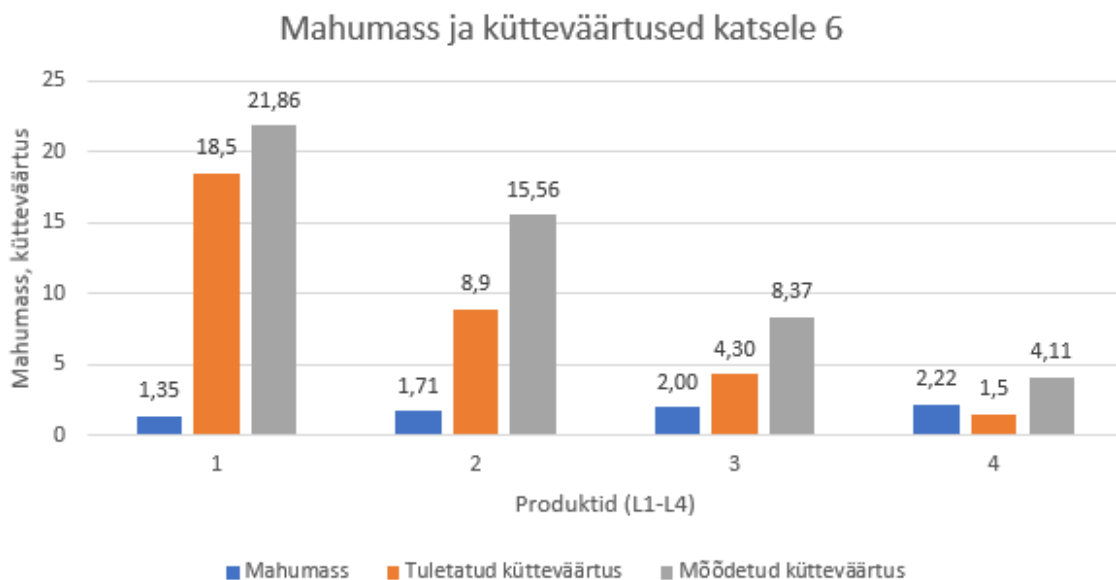
Joonis 49. Mahumass ja kütteväärtused katsele 3



Joonis 50. Mahumass ja kütteväärtused katsele 4



Joonis 51. Mahumass ja kütteväärtused katsele 5



Joonis 52. Mahumass ja kütteväärtused katsele 6

8.2 Katsetööde tulemuste analüüs

Analüüs ja parimate töörežiimide väljaselgitamisel arvestasin arvutatud ning mõõdetud kütteväärtust ja nende erinevust ent ka massijaotust. Eelnevast tabelist (Tabel 19) on võimalik välja tuua V3 ja V5. Mõlema katse L1 kütteväärtused erinevad kuni 2,5 MJ/kg ning L2 kütteväärtused maksimaalselt 5 MJ/kg. Lisaks on nende katsete L3 ja L4 kihtide erinevused samuti minimaalsed. Katse V1 mõõdetud ja arvutatud kütteväärtuste vahe kihtidele L1 ja L2 jääb 5,11-5,23 vahele. Saksamaal laboris tehtud katse V6 määratud mahumassi meetod ei ühti käesolevas lõputöös määratud mahumassi meetodiga. Varasema projekti (KIK 2019-2021) raames määratud mahumassi leidmine uputamise meetodil oli tehtud emeriitprofessor Enn Lüütre poolt välja mõeldud

meetodiga. Samas projektis järeldati, et see meetod ei anna piisava täpsusega usaldusväärseid tulemusi, mispärast kasutasin parafiinimise meetodit. Katsetööde tulemustest selgub, et katsete (V2 ja V4) kihtide L1-L2 määratud kütteväärtus on madalam, kuid massijaotus ligikaudu 10% – 15% suurem.

Esimese kolme katse (V1-V3) korral on märgata trendi, et pulsside sageduse tõstmisel muutub esimese kihi (L1) määratud kütteväärtus suuremaks.

Tabel 20. Massijaotuse suhe katsete lõikes

Katse/massijaotus	L1+L2 (%)	L3+L4 (%)	Kadu (%)
V1	27,96	71,98	0,06
V2	39,84	60,17	0
V3	26,15	73,85	0
V4	36,77	62,81	0,42
V5	28,88	71,10	0,02
V6	28,50	71,50	0
Keskmine	31,35	68,57	0,08

Arvestan, et esimesed 2 kihti (L1-L2) kasutatakse tootena, siis massijaotuse suhe tootel ja jäägil on keskmiselt ligikaudu 30%-70%. Järgnevas tabelis (Tabel 21) toon välja võimaliku kütteväärtuse määramisel tekkinud tulemuste nihked.

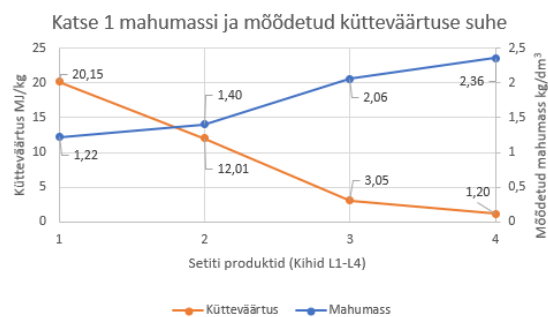
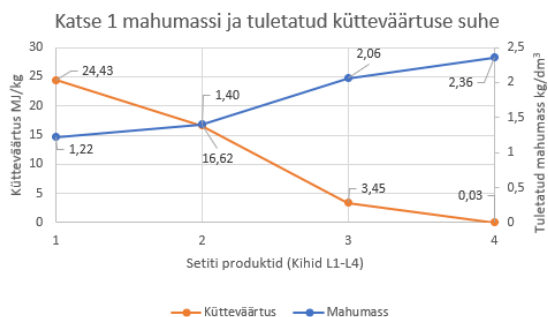
Tabel 21. Võimalikud setiti kihtide kütteväärtuste nihkumised

Katse	Kiht	Kütteväärtus (MJ/kg)	Katsete V1-V5 arvatud kütteväärtuste kihi L2 keskmine (MJ/kg)
V2	L2	4,01	15,23
V3	L2	8,16	15,23
V4	L2	6,95	15,23

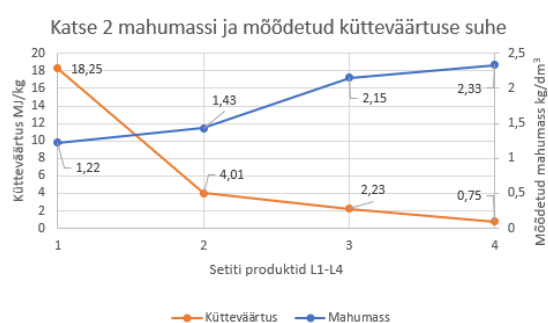
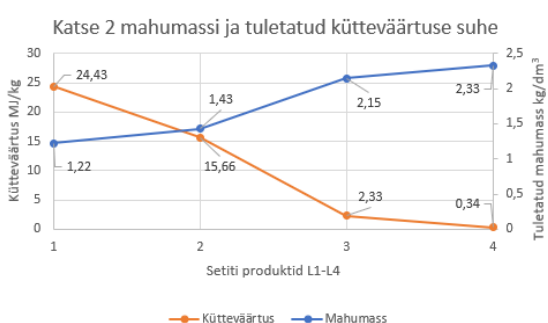
Suuremad erinevused ilmsid ainult L2 kihtides. Eksimistulemused katsetel L2 võivad tuleneda lubjakivitükkide rohkusest ettevalmistatud proovis. Lubjakivitükkide rohkus proovis võis tekkida pistelise osaproovi võtmisel, kus sattus juhuslikult liigselt lubjakivisemaid kivimitükke, mis ei kirjelda kogu proovi. Setitist tulnud L2 tase oli iga katse korral ligikaudu 5 kg. Sellest tehti osaline proov, mille kogus oli 1 kg. Energiatehnoloogia labori meetodika ei näinud ette kogu proovi jahvatamist. 1 kilogrammisest proovist võeti juhusliku meetodiga üksikud kivimitükid.

Diagrammidelt joonestub välja kütteväärtuse ja mahumassi polüjoonte suhe. Kütteväärtuse polüjoone lõikumispunkt või ületamine mahumassi polüjoonest indikeerib tooteks mõeldud põlevkivi. Polüjooned enamasti ristuvad L2 punktis või selle vahetusläheduses ent määratud kütteväärtuste korral ristumispunkt nihkub L1 ja L2 vahele. Ristumispunkti edasist käsitlem aherainena, kuna märgata on selget kütteväärtuse ja mahumassi lahknevust skaala vastastippudeni. Eksitud tulemuste diagrammid ei kujuta õiget ristumispunkti asukohta. Arvutatud

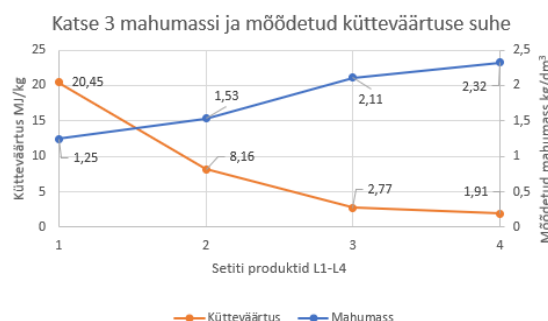
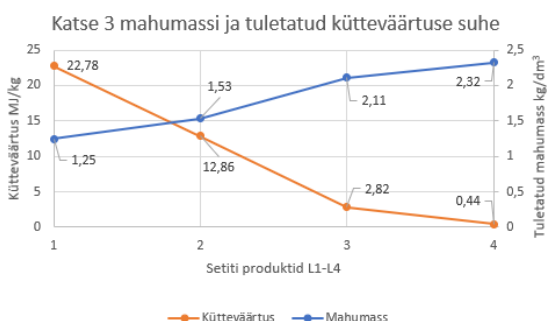
kütteväärtuse ja määratud mahumassiga tulemused ning diagrammid kujutavad selgelt stabiilsemaid trende.



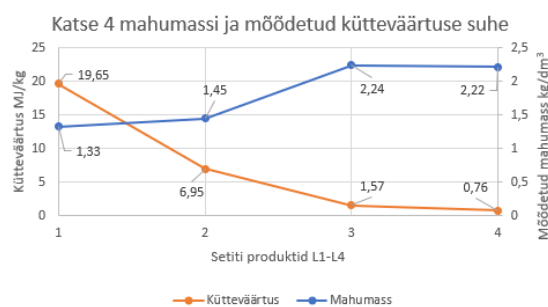
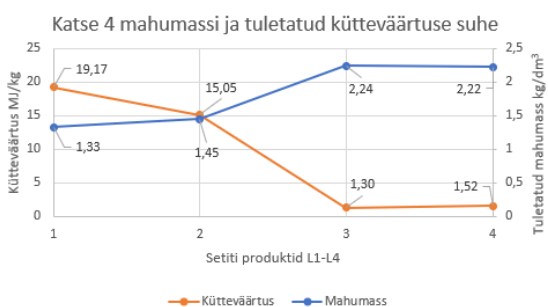
Joonis 53. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 1



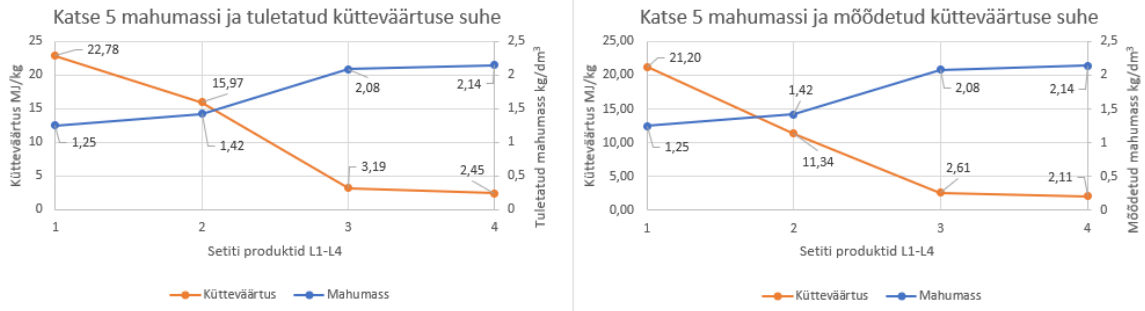
Joonis 54. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 2



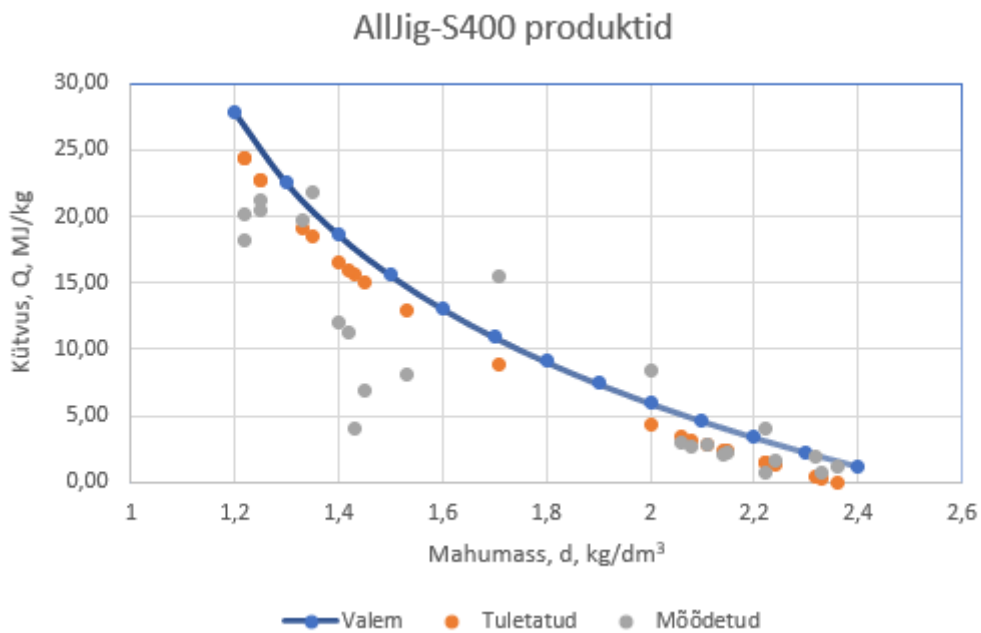
Joonis 55. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 3



Joonis 56. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 4



Joonis 57. Arvutatud ja määratud kütteväärtuse seos mahumassiga katsele 5



Joonis 58. Arvutatud ja mõõdetud kütuse punktide paiknemine normatiivse valemi pöördfunktsiooni: $Q = -\ln((d - 0.98)/1,3831)/0,0717$ MJ/kg graafikul

Arvutatud kütuse määramisega tekkis valemiga sarnane punktide pilv. Punktid käituvad korrapäraselt ning on võimalik tekitada samalaadne polüjoon. Mõõdetud kütuste korral ühtib aheraine punktide pilv arvutatud ning valemi punktidega. Suurimad kõrvalenihted esinevad L2 kihi punktides. L1 punktidega on samuti märgata nihet, kuid mitte nii märkimisväärselt.

8.3 Rikastamisprotsessi tunnuste arvutuskäik

Rikastamise rikastusefekti määramiseks valisin analoogse meetodika, mida kasutasime 2018 aasta uuringus. See võtab arvesse rikastamisel olnud osaprotsentide kaudu sisendmaterjali Q_s kütvuse (Väli jt, 2018).

Rikastusefekti leidmine 1. katse tasemele L1 läbi määratud kütteväärtuse

$$L1 - 6,76\% \times 20,15 \text{ MJ/kg} = 136,21$$

$$L2 - 21,25\% \times 12,01 \text{ MJ/kg} = 255,21$$

$$L3 - 27,05\% \times 3,05 \text{ MJ/kg} = 82,50$$

$$L4 - 44,93\% \times 1,20 \text{ MJ/kg} = 53,92$$

$$\text{Summa} = 527,84$$

Leian L1 rikastusefekti

$$Q_s = \frac{510,5275}{100\%} \approx 5,28 \text{ MJ/kg}$$

$$Q_v = 20,15 \text{ MJ/kg}$$

$$E = \frac{Q_v}{Q_s} = \frac{20,15}{5,28} = 3,82$$

Edaspidi on kõik tulemused samade valemitega arvutatuna näidatud alljärgnevas koondtabelis:

Tabel 22. Rikastusefekti väärtused

	Arvutatud kütteväärtus			Määratud kütteväärtus		
	Q_s (MJ/kg)	Q_v (MJ/kg)	E	Q_s (MJ/kg)	Q_v (MJ/kg)	E
Katse 1						
L1	6,13	24,43	3,99	5,28	20,15	3,82
L2	6,13	16,62	2,71	5,28	12,01	2,27
KESKMINE			3,35	KESKMINE		3,05
	Arvutatud kütteväärtus			Määratud kütteväärtus		
	Q_s (MJ/kg)	Q_v (MJ/kg)	E	Q_s (MJ/kg)	Q_v (MJ/kg)	E
Katse 2						
L1	8,25	24,43	2,96	4,50	18,25	4,06
L2	8,25	15,66	1,90	-		
KESKMINE			2,43			
	Arvutatud kütteväärtus			Määratud kütteväärtus		
	Q_s (MJ/kg)	Q_v (MJ/kg)	E	Q_s (MJ/kg)	Q_v (MJ/kg)	E
Katse 3						

L1	5,22	22,78	4,36	4,86	20,32	4,21	
L2	5,22	12,86	2,46	4,86	8,11	1,68	
KESKMINE			3,41	KESKMINE			2,95
Arvutatud kütteväärtus				Määratud kütteväärtus			
	Q _s (MJ/kg)	Q _v (MJ/kg)	E	Q _s (MJ/kg)	Q _v (MJ/kg)	E	
Katse 4							
L1	7,08	19,17	2,71	5,25	19,65	3,74	
L2	7,08	15,05	2,13	5,25	6,95	1,32	
KESKMINE			2,42	KESKMINE			2,53
Arvutatud kütteväärtus				Määratud kütteväärtus			
	Q _s (MJ/kg)	Q _v (MJ/kg)	E	Q _s (MJ/kg)	Q _v (MJ/kg)	E	
Katse 5							
L1	7,24	22,78	3,15	5,87	21,20	3,61	
L2	7,24	15,97	2,21	5,87	11,34	1,93	
KESKMINE			2,68	KESKMINE			2,77
Arvutatud kütteväärtus				Määratud kütteväärtus			
	Q _s (MJ/kg)	Q _v (MJ/kg)	E	Q _s (MJ/kg)	Q _v (MJ/kg)	E	
Katse 6 (Saksamaal)							
L1	5,37	18,50	3,45	9,27	21,86	2,36	
L2	5,37	8,90	1,66	9,27	15,56	1,68	
KESKMINE			2,56	KESKMINE			2,02

Rikastusefekti erinevad väärtused näitavad esialgse kaevise ja rikastatud põlevkivi kütvuse muutumist suurenemise suunas. Tabelist (Tabel 22) on võimalik näha, et väiksemate massijaotustega ent suuremate kütteväärtustega katsete rikastusefekt on suurem, kui kõrgema massijaotuse ja väiksema kütteväärtusega katsetel.

Kaubapõlevkivi saagis:

$$\gamma_k = \frac{100(Q_k - Q_j)}{Q_t - Q_j} \%$$

Jääkide saagis:

$$\gamma_j = \frac{100(Q_t - Q_k)}{Q_t - Q_j} \%$$

Saagis:

$$\varepsilon_k = \frac{\gamma_k * Q_t}{Q_k} \%$$

$$\varepsilon_j = \frac{\gamma_j * Q_j}{Q_k} \%$$

Rikastamisaste ehk rikastamise efekt:

$$R_k = \frac{Q_t}{Q_k}$$

Võtame katse 1, kus

$Q_k = 7,29$ MJ/kg – mõõdetud Energiatehnoloogia laboris

$Q_{j1} = 1,74$ MJ/kg – arvutatud kütteväärtus

$Q_{j2} = 2,13$ MJ/kg – mõõdetud kütteväärtus

$Q_{t1} = 20,53$ MJ/kg – arvutatud kütteväärtus

$Q_{t2} = 16,08$ MJ/kg – mõõdetud kütteväärtus

Q_{j1} , Q_{j2} , Q_{t1} ja Q_{t2} on võetud põlevkivikihtide L1-L2 ja aheraine kihtide L3-L4 keskmised

Tabel 23. Kihtide keskmised rikastamistunnuste arvutamiseks.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Q_k (MJ/kg)	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	12,07
Q_{j1} (MJ/kg)	1,74	1,34	1,63	1,41	2,82	2,90
Q_{j2} (MJ/kg)	2,13	1,49	2,34	1,17	2,36	6,24
Q_{t1} (MJ/kg)	20,53	20,05	17,82	17,11	19,38	13,70
Q_{t2} (MJ/kg)	16,08	11,13	14,31	13,30	16,27	18,71

Tabel 24. Rikastamistunnused.

Katse/tähis	Arvutatud					Mõõdetud				
	γ_k	γ_j	ε_k	ε_j	R_k	γ_k	γ_j	ε_k	ε_j	R_k
V1	29%	71%	83%	17%	2,83	37%	63%	82%	18%	2,21
V2	32%	68%	88%	12%	2,76	60%	40%	91%	8%	1,53
V3	35%	65%	86%	14%	2,46	41%	59%	81%	19%	1,96
V4	37%	63%	87%	13%	2,36	50%	50%	92%	8%	1,82
V5	27%	73%	72%	28%	2,67	35%	65%	79%	21%	2,23
V6	85%	15%	96%	4%	1,14	47%	53%	73%	27%	1,55

Tabel 25. Kahe erineva meetodiga saadud rikastusefekti väärtused

	Arvutatud	Määratud
V1 (I meetod)	3,35	3,05
V1 (II meetod)	2,83	2,21
KESKMINE	3,09	2,63
V2 (I meetod)	2,43	-
V2 (II meetod)	2,76	1,53

KESKMINE	2,60	-
V3 (I meetod)	3,41	2,95
V3 (II meetod)	2,46	1,96
KESKMINE	2,94	2,46
V4 (I meetod)	2,68	2,77
V4 (II meetod)	2,36	1,82
KESKMINE	2,52	2,30
V5 (I meetod)	2,68	2,77
V5 (II meetod)	2,67	2,23
KESKMINE	2,68	2,50
V6 (I meetod)	2,56	2,02
V6 (II meetod)	1,14	1,55
KESKMINE	1,85	1,79

Mõningane tulemuste erinevus 2018 aasta uuringu ning käesoleva, 2022 a. magistr töö tulemuste vahel on tingitud ilmselt proovideks võetud kaevis kvaliteedist ja geoloogiast. Uuringu kaevis on võetud rohkem kui 3 aastat tagasi. Kaevanduse mäeeraldise piires liiguvad mäetööd enamasti kõrgema kvaliteediga kaevisega alalt madalama kvaliteediga alade suunas. Uuringutes kasutatud kaevis on pärit erineva kihinditootlusega ja kõrgusega kambriplakkidest. Selle tõestuseks on enne rikastamist erinevatele kaevistele tehtud kütvuste määramise tulemused. TTÜ Energiatehnoloogia instituudi laboris määratud kütvus käesoleva magistr töö raames soetatud kaevisele on 7,29 MJ/kg, kuid varasema uuringu kaevisele määratud kütteväärtus on 12,07 MJ/kg. Arvutuslikul meetodil saadud kaevis on varieeruv ning jäi alla 7,29 MJ/kg.

8.4 Järeldused

Magistritöö raames Ojamaa kaevanduse kaevisega läbiviidud viis (5) katsed Geoloogia instituudi mäendustingimuste laboris ja varasemalt 2018 a. Saksamaal tehtud katsed olid sooritatud erinevate pulsside sageduse ja suruõhu väärtustega. Katsed V1, V3, V5 ja V6 tehti pulsside sagedusega kas 40 või (~) 50 ning rõhuga 0,2 bar või 0,3 bar. Katsed V2 ja V4 tehti pulsside sagedusega 30 ja rõhuga 0,2 bar ning 0,3 bar. Esmalt (V1, V3, V5 ja V6) välja toodud katsed võimaldasid produktidel saavutada kõrgemat kütteväärtust, kui katsetel V2 ja V4. Viimasena (V2 ja V4) tehtud katsed andsid tulemuseks väiksema kütteväärtuse, kuid rohkem produkti. Lõpliku valiku teeb kaevandaja, kas soovib saada väiksemat kogust, kuid suurema kütteväärtusega põlevkivi, või suuremat kogust ning väiksema kütteväärtusega põlevkivi.

Katsetööd näitavad, et massijaotus toote ja jäägi vahel on katse V1, V3, V5 ja V6 puhul võrdne ~30%-70% ning katsetel V2 ja V4, kus produkti tekkis rohkem, jäi massijaotus ~40%-60%. Massijaotus on iga katse puhul lineaarselt kasvav kihist L1-L4. Üldjuhul oli ka mahumass lineaarselt kasvav.

Kõikide katsetatud kihtidele L1-L4 oli määratud ka iga kihi mahumass. Mahumassi leidmine toimus läbi kivimi parafeerimise meetodi. Tulemuste usaldatavust veelgi võib vajadusel suurendada kivimiproovide koguse suurendamisega. Magistritöö käigus määrati mahumassid TalTech Geoloogia instituudi mahumassi määramise juhendi järgi ning tulemused on usaldusväärsed, sest need langevad kokku teoreetiliste arvutustega. Arvutatud kütteväärtused andsid enamjaolt paremaid kütteväärtuse tulemusi, kui mõõdetud kütteväärtused.

Katsete kihtidele määrati kütteväärtused TalTech Energiatehnoloogia laboris IKA-Calorimeter C5000 masinaga vastavalt standardile: EVS-ISO 1928-MOD:2021. Tulemustes esineb mõningaid nihkeid, eriti L2 kihiga, mida võib selgitada rohke lubjakivi sattumisega proovidesse.

Mõlemal kütteväärtuse määramise viisil on graafiliselt välja toodud mahumassi ja kütteväärtuse polüjooned. Ristumispunkt on arvutatud kütteväärtustel ligilähedane L2-le, kuid mõõdetud kütteväärtustel on ristlõige enamasti nihkunud L1 ja L2 vahele. Saab järeldada, et tooteks sobivad kihid L1 ja L2.

Seos mahumassi ja kütteväärtuse teoreetilise valemiga joonistub graafiliselt paremini välja arvutatud mahumasside korral. Punktivilv on üsna võrreldav valemiga saadud polüjoonega. Mõõdetud kütteväärtuste tulemid punktivilves kujutavad nihkeid nii valemi joonest üles, kui ka alla. Suured mõõdetud eksimused on samuti graafikul märgata. Kõrvalekalded tulenevad enamasti L2 kihist. Lubjakivisemad kihid langevad enamasti kokku teoreetilise tulemusega.

Arvutatud on välja ka rikastamistunnused, kasutades rikastusefekti arvutamiseks varasemate, 2018-2021 uuringute valemeid. Üks valem kasutab rikastusefekti väljaarvutamisel määratud kaevise kütteväärtust. Teine valem kasutab kaevise kütteväärtust läbi setitist tulnud produktide ja jääkide. Kuna teine valem kirjeldab kogu proovi, siis usaldatavus on sellel suurem. Kaevisest saadud üks proov ei kirjelda kogu kaevise proovi ning jätab pealiskaudse kütteväärtuse, sellest ka rikastusefekti tulemuse. Võtsin ka kahe meetodi omavahelise keskmise. Keskmine jäi enamasti

vahemikku 2,00 - 3,00, suuresti 2,50 vahetuslähedusse. Kuna rikastusefekt näitab, kui palju kütteväärtus suureneb esialgse kaevisega võrreldes, siis saab järeldada, et produktid on enamasti 2,5 korda suurema kütteväärtusega, kui kaevis.

Pulseeriva suruõhu vooga töötav märgsetiti AllJig-S400 sobib põlevkivi rikastamiseks. Setiti tehniliste parameetrite: suruõhk ja pulseerimise sagedus, reguleerimine on tehniliselt võimalik ja see toob enesega kaasa töörežiimide ja rikastamisproduktide kvaliteedinäitajate muutumise.

Kokkuvõte

Magistritöö tulemusena sai tõestatud, et seadme parameetrite optimeerimine muudab selle töörežiimid efektiivsemaks ja suurendab rikastamise efekti

Põlevkivi määrgrikastamine suruõhuga veejoas ei jää efektiivsusnäitajate alla hetkel Eestis kasutatavast magnetiidiga rikastamise tehnoloogiast ja mille täiustamise võimalused on aastakümnetega ammendunud

Setiti rikastamise eelis olemasoleva tehnoloogia ees on keskkonnasäästlikus ja majanduslikult odavam veemajandus

Setiti kasutamine allmaatingimustes loob eelduse allmaarikastamisel tekkiva aheraine ladustamisele maa all

Põlevkivi kvaliteedi parendamine parimate võimalike tehnoloogiatega suurendab selle väärtust keemiatööstuse toorainena ja toodab lisandväärtust nii peenkeemia- kui plastitööstuse valdkonnas

Tänuavaldused

Soovin tänada kõiki inimesi, kes aitasid mul valmis kirjutada eduka magistritöö. Esiteks soovin tänada oma juhendajat dotsent PhD Erik Väli, kes aitas, juhendas ja panustas palju aega selleks, et see magistritöö õnnestuks, samas õpetas mulle väga palju põlevkivi rikastamise kohta ning nõudis alati minust rohkemat, kui ma ise. Tänan ka uuringugruppi, kuhu kuulusid lisaks lõputöö juhendajale ka: emeriitprofessorid Enno Reinsalu ja Enn Lüütre ning Tauri Põldema. Suured tänud Sander Kanterile ja Martin Kängseppale, kes aitasid mul läbi viia kaevise soetamise Ojamaa kaevandusest ning selle purustamise Särghaua õppekeskuses. Suur tänu ka Aleks Strazdinile, kes tutvustas mulle setitit AllJig-S400, õpetas seda kasutama ning andis mulle mahumassi määramiseks vajaliku juhendi. Tänan ka Markus Kuldmaad abi eest kivimite mahumassi määramisega. Samuti tänan ka inimesi TalTech Energiatehnoloogia laborist meeldiva koostöö eest põlevkivi kütvuse määramisel.

Kasutatud kirjandus

- Aaloe, A., Bauert, H. ja Soesoo, A. (2006). Kukersiit – Eesti Põlevkivi. Tallinn. MTÜ GeoGuide Baltoscandia.
http://juks.alkohol.ee/txt/www.gi.ee_geoturism/Polevkivi_CMYK_062011_100dpiS.pdf
- Adamson, A., Reinsalu, E., Valgma, I., Sõstra, Ü., Lind, H., Tammoja, T., Tohver, T., Karu, V., Västriik, A. Eesti põlevkiviressursi kasutamissuundade riikliku strateegia aastani 2020 alusuuringud. Tallinn : TTÜ Mäeinstituut, 2005.
- Allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG. (03.04.2022). Allmineral. Kasutatud 03.04.2022, <https://allmineral.com>
- Bhagat, R.P., Banerjee, B., Saha, P., Mukherjee, B.C. (2006). Dry magnetic separation of bauxite ore. Lk 328-333. <https://eprints.nmlindia.org/6254/>
- Birjuk, J. (2014). Ojamaa kaevanduse rikastusvabriku energiakasutuse analüüs [Bakalauresusetöö, Eesti Maaülikool]. Tartu. <http://hdl.handle.net/10492/1608>
- Bustillo, M. B. (2018). Mineral Resources. Madrid. Springer Nature. doi:10.1007/978-3-319-58760-8
- Chen, Q., Yang, Y.(2003). Development of Dry Benefication of Coal in China. Lk 3-12 <https://doi.org/10.1080/07349340302266>
- Energiatalgud, (2021). Euroopa Liidu seadused ning määrused. [veebimaterjal]. <https://energiatalgud.ee/Regulatsioonid>
- Enno Reinsalu, Erik Väli, pers. comm.
- Ignatovets, S. ja Valgma, I. (2014). Põlevkivi rikastamisjääkide ladustamine ja alternatiivne kasutamine, 198-200. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/34699c74-787c-4aba-846f-48223ba7d272>
- Ignatovets, S. Põlevkivi rikastamisjääkide ladustamine Estonia kaevanduse näitel. Lõputöö. Tallinn : Tallinna Tehnikakõrgkool, 2014.
- Iranmanesh, M., Hulliger, J. (2017). Magnetic separation: its application in mining, waste purification, medicine, biochemistry and chemistry. DOI: 10.1039/C7CS00230K
- Jürs, E. ja Reinsalu, E. (2015). Eesti Põlevkivi töötlemine. Kiviõli – Tallinn. Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut. https://www.researchgate.net/profile/Enno-Reinsalu/publication/272166696_Eesti_polevkivi_tootlemine_Estonian_oil_shale_processing/links/54dccb630cf25b09b912d683/Eesti-polevkivi-toeotlemine-Estonian-oil-shale-processing.pdf

- Kattai, V., Saarde, T., ja Savitski, L. (2000). Eesti põlevkivi. Tallinn. Eesti Geoloogiakeskus.
- Kauril, R. (2020). Põlevkivi kaevise optimaalne allmaarikastamine Uus-Kiviõli kaevanduses [Bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool]. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituut. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/c603bf00-1810-402a-96de-34d80f187c0f>
- Keskonnatasude seadus. (01.01.2006). Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/110072020050>
- Lauringson, V. ja Reier, A. (1981). Eesti NSV maapõuevarad ja nende kaevandamine. Tallinn. Perioodika.
- Liive, S. (2007). Oil Shale Energetics in Estonia. Oil Shale, 1-4. <https://kirj.ee/public/oilshale/oil-2007-1-1.pdf>
- Makke, J. (2015). Põlevkivi kaevise ettevalmistamise analüüs märgsepareerimiseks [Bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool]. Tallinn. Mäeinstituut. <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/a0fbf22b-ae97-4fc6-9fc6-c15cfc91696a>
- Meybaum, H. (2020). Põlevkiviõli väärtusahela loodav Eesti rahvuslik rikkus. Tallinn. KPMG Baltics OÜ. https://keemia.ee/sites/default/files/2020-12/Final_Polevkivioli_rahvuslik_rikkus_0.pdf
- Nurme, M. (2015). Märgsepareerimine maavarade kaeviste rikastamisel [Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/>
- Pastarus, J.-R., Valgma, I. ja Adamson, A. (2008). Põlevkivi kasutamise jätkusuutlikkusest. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikool, Mäeinstituut. https://www.researchgate.net/publication/273205657_Pastarus_J-R_Valgma_I_Adamson_A_2008_Polevkivi_kasutamise_jatkusuutlikkusest_Aprillikonverents
- Pastarus, J.-R., Valgma, I., Robam, K. Täitmise tehnoloogia ja kaevandusvesi. Kaevandamine ja vesi. Tallinn : Eesti Mäeselts, TTÜ Mäeinstituut, 2011.
- Pirrus, E. (1999). Maavarade geoloogia. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikool, Mäeinstituut. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/ba2eeb69-a834-47c7-a950-06626e5f66d0>
- Reinsalu, E. (2014). Digitaalne mäesõnastik. Kasutatud 02.05.2022, <https://digikogu.taltech.ee/et/item/df6ed32d-771a-488a-a8c3-62fcbfc3b9ce>
- Reinsalu, E. (2016). Eesti Mäendus. Kasutatud 30.11.2021, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/e7f1382e-e004-44dd-acc4-c1defb847600>
- Reinsalu, E. (2019). Eesti Mäendus III. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikool, LG Mäeosakond. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/b19567af-1af8-4301-8606-089bedb5e9f8>

- Reinsalu, E. (2008). Mäemajandus. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikool, Mäeinstituut
<https://digikogu.taltech.ee/et/Item/b758247b-2bf1-442f-80bf-6eb622296f15>
- Saria, L., Shimaoka, T., Miyawaki, K. (2006). Leaching of heavy metals in acid mine drainage. Lk 134-140. <https://doi.org/10.1177/0734242X06063052>.
- Soner, T. (2019). Separation of Fe and Mn from Manganiferous Iron Ores via Reductive Acid Leaching Followed by Magnetic Separation. lk 297-309. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00113-8>
- Standardikeskus. (2000). EVS-EN-932.
- Sutter, H., Klasen, H. Tegevuskava aastani 2025 ja teekond süsinikuneutraalsuseni aastaks 2045. Tallinn. <https://www.energia.ee/-/doc/8644186/pdf/EestiEnergia.pdf>
- Tohver, T. (2011). Põlevkivi kaevandamis- ja rikastamisjäädide kasutamine. Inseneeria, 48-49. https://issuu.com/eas-estonia/docs/inseneeria_06_2011?e=1268773/9368753
- Valgma, I., Karu, V., Kolats, M. Killustatav killustik – settekivimitel paiknev Eesti vaevleb killustiku kaevandamise hirmudes, teadmatuses ja ehitusmaterjalide puuduses. Killustiku kaevandamine ja kasutamine. Tallinn : TTÜ Mäeinstituut, 2008.
- Varb, N., Tambet, Ü. 90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis. Tallinn : OÜ GeoTrail KS, 2008.
- Vesiloo, P., Haabu, T., Aamer, A., Reinsalu, E. ja Adamson, A. (2010). Allmaakuivrikastamise tehnoloogia valik. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikool Mäeinstituut.
- VKG. (2021). VKG Aastaraamat 2020. Kohtla-Järve, Ida-Virumaa. <https://www.vkg.ee/aastaraamat2020/et/tegevusalad/>
- VKG. (2022). Tehnoloogia. Kohtla-Järve, Ida-Virumaa. <https://www.vkg.ee/tehnoloogia/>
- Väli, E., Reinsalu, E., Lüütse, E., Kauril, R. ja Põldema, T. (2021). Põlevkivi kaevises allmaarikastamine ja rikastusjäädide ladustamine väljatöötatud alasse. Tallinn. Keskkonnainvesteeringute keskus.
- Väli, E., Reinsalu, E., Lüütse, E., Kaur, V., Murd, M. ja Aarniste, M. (2018). Mehhaniseeritud laavakompleksist tuleva mäemassi rikastamise võimaluste uuring. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituudi Mäeosakond.
- Weitkämper, L. (2020). Betriebsanleitung, allmineral Auftrag Nr. 1.1021. Aachen. Allmineral.
- Xie, W., Yu, Z., He, Y., Wang, S., Dong, L., Li, B., Zhang, T. (2019). A novel technology for the deash of fine coal by an active pulsing air separation system. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121842>

Lisad

Lisa 1: TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud kütteväärtuse määramise tulemused, 05.04.2022

Geoloogia instituut Kaevisse märgrikastamise uuring				
Proovi nr	Kliendi proovi nimi	Pommiga mõõdetud keskmine väärtus EVS-ISO 1928-MOD:2021 J/g	Kuivaine ülemine väärtus, $q_{v,gr,dr}$ MJ/kg	Analüütiline niiskus, %
22-293	0 - 32 mm kaevis	7305	7,33	0,34
22-294	32 - 63 mm kaevis	7264	7,29	0,35
22-295	Katse 1 L1	19195	20,15	4,72
22-296	Katse 1 L2	11508	12,01	4,18
22-297	Katse 1 L3	3042	3,05	0,22
22-298	Katse 1 L4	1193	1,20	0,25
22-299	Katse 2 L1	18116	18,25	0,71
22-300	Katse 2 L2	3954	4,01	1,33
22-301	Katse 2 L3	2229	2,23	0,20
22-302	Katse 2 L4	744	0,75	0,25
22-303	Katse 3 L1	20319	20,45	0,62
22-304	Katse 3 L2	8114	8,16	0,58
22-305	Katse 3 L3	2764	2,77	0,20
22-306	Katse 3 L4	1906	1,91	0,21
22-307	Katse 4 L1	19368	19,65	1,44
22-308	Katse 4 L2	6888	6,95	0,95
22-309	Katse 4 L3	1563	1,57	0,47
22-310	Katse 4 L4	757	0,76	0,34
22-311	Katse 5 L1	20612	21,20	2,77
22-312	Katse 5 L2	10944	11,34	3,49
22-313	Katse 5 L3	2600	2,61	0,28
22-314	Katse 5 L4	2108	2,11	0,24

Kalorimeetrilise pommiga mõõdetud väärtused on saadud tabelis toodud analüütilise niiskuse väärtustel

Näiteks jahvatatud proovi 22-295 pommi väärtus pärast proovi kuivatamist 1 tund 105 °C juures oli 19733 J/g

Lisa 2: Põlevkivi kaevis allmaarikastamine ja rikastusjäädide ladustamine väljatöötatud alasse uuringu raames TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud põlevkivi kütteväärtuste tulemused, 30.03.2021



TalTech Geoloogia instituut
Ehitajate tee 5
12616 Tallinn
Kontakt: Ragnar Kauril, Erik Väli
ragnar.kauril@taltech.ee

Teie 12.02.2021
Meie 30.03.2021 Nr 11-40/EI/618-2

Mõõtmistulemuste protokoll

Proovi iseloomustus: Põlevkivi kaevis
Proovi vastuvõtu kuupäev: 12.02.2021
Katse teostamise aeg: 15.02-30.03.2021

Teie poolt toodud proovi analüüside tulemused on esitatud alljärgnevas tabelis vastavalt labori protokollile nr 21-178 kuni 21-202

Labori nr.	Proovi nimetus	Kuivaine ülemine kütteväärtus, MJ/kg	Standard
21-195	LW ALLJIG V1-L1 1,05kg	19,28	ISO 1928
21-197	LW ALLJIG V1-L2 1,06kg	15,08	
21-199	LW ALLJIG V1-L3 1,09kg	7,78	
21-202	LW ALLJIG V1-L4 1,02kg	2,73	
21-180	LW ALLJIG V1-L5 1,16kg	2,46	
21-179	LW ALLJIG V2-L1 1,04kg	20,89	
21-185	LW ALLJIG V2-L2 1,12kg	14,72	
21-191	LW ALLJIG V2-L3 1,30kg	5,44	
21-184	LW ALLJIG V2-L4 1,18kg	2,03	
21-196	LW ALLJIG V2-L5 1,06kg	1,19	
21-193	LW ALLJIG V3-L1 1,047kg	21,86	
21-200	LW ALLJIG V3-L2 1,00kg	15,56	
21-188	LW ALLJIG V3-L3 1,10kg	8,37	
21-190	LW ALLJIG V3-L4 1,28kg	4,11	
21-182	V4-L1 1,08kg	17,92	
21-198	V4-L2 1,10kg	9,44	
21-183	V4L3-1,01kg	4,98	
21-186	V5-L1 1,10kg	20,43	
21-192	V5-L2 1,10kg	14,85	
21-189	V5-L3 1,13kg	8,70	
21-178	V5-L4 1,3kg	3,02	

Lk 1 (2)

Labori nr.	Proovi nimetus	Kuivaine ülemine kütteväärtus, MJ/kg	Standard
21-201	V6-L1 1,28kg	21,41	ISO 1928
21-194	V6-L2 1,06kg	8,68	
21-187	V6-L3 1,08kg	5,03	
21-181	V6-L4 1,33kg	4,10	

Märkused:

1. Tulemused kehtivad ainult Teie poolt 12.02.2021 toodud proovide puhul
2. Katseprotokoll ei tohi osadena paljundada ilma labori loata

Oliver Järvik
Vanemteadur
Energiatehnoloogia instituut
Tallinna Tehnikaülikool
6203909
oliver.jarvik@taltech.ee



Lk 2 (2)

Ehitajate tee 5
19086 Tallinn
Rg-kood 74000323

Tel 620 2002
E-post info@taltech.ee
www.taltech.ee

Lisa 3: Põlevkivi kaevise allmaarikastamine ja rikastusjäädade ladustamine väljatöötatud alasse uuringu raames TalTech Energiatehnoloogia laborist saadud põlevkivi kütteväärtuste tulemused, 08.12.2020



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Taltech Geoloogia instituut
Ehitajate tee 5
12616 Tallinn
Kontakt: Ragnar Kauril
ragnar.kauril@taltech.ee

Teie 09.11.2020
Meie 08.12.2020 Nr 11-40/EI/1711-2

Mõõtmistulemuste protokoll

Proovi iseloomustus: Põlevkivi fraktsioonid
Proovi vastuvõtu kuupäev: 19.11.2020
Katse teostamise aeg: 24.11-26.11.2020

Teie poolt toodud proovi analüüside tulemused on esitatud alljärgnevas tabelis vastavalt labori protokollile nr 20-993 kuni 20-996

Fraktsioon	Labori nr	Kuivaine ülemine kütteväärtus, MJ/kg	Standard
32-63	20-993	12,07	ISO 1928
16-32	20-994	8,17	
0-16	20-995	7,80	
63-150	20-996	5,39	

Märkused:

1. Tulemused kehtivad ainult Teie poolt 19.11.2020 toodud proovide puhul
2. Katseprotokoll ei tohi osadena paljundada ilma labori loata

Mari Sulg
Ettevõtlusspetsialist
Energiatehnoloogia instituut
Tallinna Tehnikaülikool
620 3903, mari.sulg@taltech.ee



Ehitajate tee 5
19086 Tallinn
Rg-kood 74000323

Tel 620 2002
E-post info@taltech.ee
www.taltech.ee

Elektronilised lisad

1. Tulemuste analüüs.xlsx
2. Mahumass ja tihedus (2017) KAURIL.xlsx

Lõputöö ülesanne

Tallinna Tehnikaülikool

Geoloogia instituut

Töö ID	LG70LT	Õppekava	LARM 18/20
Üliõpilane	Ragnar Kauril	Matrikli nr.	204341LARM
Töö liik	Magistritöö	Õppeaine kood	
Juhendaja	Erik Väli	Ülesanne kehtib kuni	01.06.2022

Töö ülesanne	Märgsetiti AllJig-S400 tööparameetrite optimeerimine Eesti põlevkivi kaevisele
Topic of the Thesis	Optimization of AllJig-S400 operating parameters for Estonian oil shale
Töö sisu põhipunktid	<ul style="list-style-type: none"> • Uuringuvaldkonna ülevaade • Rikastamine ja selle ajalugu • Märgsetitamise katsetööd • Kütvuse ja mahumassi määramised • Katsetööde tulemused • Kokkuvõte
Seotud teadusteema ja/või sihtasutus	Rikastamine, ringmajandus, energeetika, keskkonnasõbralikkus.

Tähtajad

Eelkaitsmine	31.05.2022	Kaitsmine	03.06.2022
Üliõpilane	Ragnar Kauril		
Juhendaja	Erik Väli		
Kaasjuhendaja	_____		
	<i>Allkirjastatud digitaalselt</i>		
Ülesanne kinnitatud	_____		
Ülesanne täpsustatud	_____		
Ülesanne pikendatud	_____		

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks³

Mina Ragnar Kauril

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose:
Märgsetiti AllJig-S400 tööparameetrite optimeerimine Eesti põlevkivi kaevisele,

mille juhendaja on Erik Väli

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

01.06.2022

Allkirjastatud digitaalselt

³ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.