

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

**Ida-Viru põlevkivi aherainepuistangute geokeemiline ja mineraloogiline iseloomustus ning  
väärimise potentsiaal teisese toormena**

**Bruno Kadak**

Juhendaja: Riho Mõtsep

**Tartu 2025**

## **Abstrakt**

### **Ida-Viru põlevkivi aherainepuistangute geokeemiline ja mineraloogiline iseloomustus ning väärindamise potentsiaal teisese toormena**

Bakalaureusetöö pakub ülevaate olulisest tööstusjäätmest. Töö eesmärk on valitud aherainepuistangute (Edise, Kohtla, Sompa) geokeemilise ja mineraloogilise iseloomustamise kaudu mõista materjali koostiselisest heterogeensust. Töö annab ülevaate aheraine potentsiaalsetest kasutusvõimalustest teedehituses, põllumajanduses, plastides täiteainena ja betooni 3D-printimisel, tuginedes teaduskirjandusele. Kokkuvõttes rõhutab töö aheraine väärtust teisese toormena ja selle potentsiaali keskkonnaprobleemide leevendamisel Ida-Virumaal. Käesoleva bakalaureusetöö raames teostatud kirjanduse ülevaade ja aheraine väärindamise potentsiaali hindamine tugineb valdavalt Eesti ülikoolides (nt Tallinna Tehnikaülikool, Tallinna Tehnikakõrgkool) kaitstud magistritöödele ning teistele kohalikele teadusuuringutele ja aruannetele.

Märksõnad: põlevkivi aheraine, Ida-Virumaa, geokeemia, mineraloogia, väärindamine, taaskasutus

CERCS kood: P420 - Petroloogia, mineroloogia, geokeemia; P430 - Maavarad, majandusgeoloogia.

### **Geochemical and Mineralogical Characterization of Ida-Viru Oil Shale Waste Dumps and Their Valorization Potential as Secondary Raw Material**

This bachelor's thesis provides an overview of a significant industrial waste. The aim of the work is to understand the compositional heterogeneity of selected oil shale waste dumps (Edise, Kohtla-Nõmme, Sompa) through geochemical and mineralogical characterization of the material. The work provides an overview of the potential uses of oil shale waste in road construction, agriculture, as a filler in plastics, and in 3D concrete printing, based on scientific literature. In summary, the thesis emphasizes the value of waste rock as a secondary raw material and its potential to mitigate environmental problems in Ida-Viru County. The literature review and assessment of waste rock valorization potential carried out within the framework of this bachelor's thesis are predominantly based on master's theses defended at Estonian universities (e.g., Tallinn University of Technology, Tallinn University of Applied Sciences) and other local scientific studies and reports.

Keywords: oil shale waste, Ida-Viru, geochemistry, mineralogy, valorization, reuse

CERCS code: P420 - Petrology, mineralogy, geochemistry; P430 – Mineral deposits, economic geology.

## SISUKORD

Sissejuhatus.....	5
1. Ülevaade põlevkivi aherainest .....	7
1.1. Põlevkivi kaevandamine ja rikastamine Ida-Virumaal.....	7
1.1.1. Lühike ajalooline ülevaade .....	7
1.1.2. Kaevandamise ja rikastamise protsesside kirjeldus.....	8
1.1.3. Aheraine tekkimine .....	9
1.2. Aheraine puistangud Ida-Virumaal.....	9
1.2.1. Puistangute paiknemine ja mastaabid .....	9
1.2.2. Aheraine kogused ja nende dünaamika ajas .....	12
1.2.3. Varasemad uuringud aheraine kohta Eestis .....	13
1.3. Aheraine koostis ja omadused.....	14
1.3.1. Peamised mineraalsed komponendid.....	14
1.3.2. Orgaanilise aine (jääkpõlevkivi) sisaldus ja selle varieeruvus.....	14
1.3.3. Aheraine füüsikalised ja keemilised omadused .....	15
1.4. Ressursi raiskamine tööstusjäätmete ladestamisega.....	15
1.4.1. Vajadus jäätmete väärimiseks ringmajanduse põhimõttel .....	15
1.4.3. Potentsiaal näha jäätmeid kui väärtuslikku tooret .....	16
1.4.4. Betooni 3D-printimine ja aheraine kasutusvõimalused selles.....	17
2. Materjalid ja Metoodika .....	19
2.1. Uurimisalad ja proovivõtt .....	19
2.2. Proovide ettevalmistamine laboratoorseteks analüüsideks .....	19
2.3. Kasutatud analüüsimeetodid .....	19
2.3.1. Mineraloogiline analüüs: Röntgenfluorestsentsanalüüs (XRD).....	19
2.3.2. Keemiline analüüs: Röntgenfluorestsentspektromeetria (XRF).....	20
3. Tulemused .....	21
3.1. Aherainepuistangute visuaalne iseloomustus ja proovivõtupunktid .....	21
3.2. Mineraloogilise analüüsi tulemused (XRD) .....	22
3.2.1. Koostiselised erinevused erinevates puistangutes .....	24
3.3. Keemilise analüüsi tulemused (XRF).....	24
4. Arutelu .....	26

4.1. Aherainepuistangute koostiselise heterogeensuse analüüs.....	26
4.2. Aheraine potentsiaalsed taaskasutus- ja väärimisvõimalused, arvestades materjali koostist.....	27
4.3. Tehnoloogilised ja majanduslikud aspektid .....	29
4.4. Tuleviku uurimissuunad .....	30
5. Kokkuvõte.....	31
Summary .....	33
Tänuõnad .....	34
Kasutatud kirjandus .....	35

## Sissejuhatus

Tänapäeva ühiskond on tugevas sõltuvuses majandusest ja tööstusest. Eestimaa tähtsaim tööstusharu, põlevkivitööstus, asub Ida-Virumaal. Esimesed kirjalikud teated "põlevast kivist" Eestis pärinevad juba A. W. Hupeli poolt 1777. aastast, teadlasteni jõudis see avastus aasta hiljem Toona ei osatud veel arvatagi, et kunagi kujuneb sellest Eesti tähtsaim maavara nn. "must kuld", sest tõeliseks väärtuseks kujunes põlevkivi Eestis alles 20 saj. alguses, tööstusliku kasutamise algusega (Tammiksaar, 2013).

Põlevkivi kasutamise jooksul on sellest maavarast arenenud terve suur tööstusharu, mis on andnud olulise panuse Eesti majandusse. Samas on kaevandamine kaasa toonud palju erinevaid keskkonnaprobleeme, millega esialgu ei osatud arvestada. Lisaks põlevkivi kasutamisega seotud keskkonnamõjudele on omad mõjud ka põlevkivi kaevandamisel ja suures koguses kaevandusjääkide tekkega (Maves, 2014). Keskkonnariski vähendamise eesmärgil, kui ka esmaste toormete kaevandamismahtude vähendamiseks, tuleb kaevandamisjätmeid taaskasutada ja ringmajandusse suunata. Kaevandamisjätmetele uute kasutusvõimaluste väljatöötamine võib aidata tulevikus lahendada nii ehitusmaterjalide, kriitiliste maavarade kui ka meile vajalikke keemilisi elemente kandvate mineraalide kriisi. Üheks lihtsamaks alternatiiviks näiteks lubjakivi kaevandamisele killustiku toormeks on aheraine kasutamine.

**Probleemipüstitus:** Ida-Virumaa põlevkivitööstusest jääb igal aastal üle miljoneid tonne aherainet, mille kvaliteet võib olla kohati väga kõikuv (Prank, 2015). Aherainekillustiku kasutusvaldkondi piiravad selle kvalitatiivsed näitajad, eelkõige Los Angelese tegur ja külmakindluse näitaja (Prank, 2015). Oluline on selgitada, kas aheraine puistangutes esineb süstemaatilist koostiselist erinevust ja kuidas see mõjutab aheraine võimalikku taaskasutust ja väärindamist uuteks toodeteks.

**Uurimistöö eesmärgid:** Käesoleva töö eesmärk on uurida Ida-Virumaa aherainepuistangute koostiselist heterogeensust ning selle mõju aheraine taaskasutusvõimalustele teise toormena. Selle raames teostatakse proovide geokeemiline ja mineraloogiline iseloomustus, ning antakse süsteemne ülevaade aheraine väärindamise potentsiaalset, tuginedes varasemates uurimistöodes ja teaduskirjanduses käsitletud võimalustele.

### Uurimisülesanded:

- Anda kirjanduse põhjal ülevaade aherainepuistangute paiknemisest ja mõjust keskkonnale.
- Iseloomustada valitud aherainepuistanguid (Edise, Kohtla, Sompä), nende mineraalset ja keemilist koostist.
- Analüüsida aheraine koostiselist heterogeensust puistangutes.

- Hinnata aheraine potentsiaalseid taaskasutus- ja väärindamisvõimalusi, arvestades selle koostist ja olemasolevaid tehnoloogiaid.
- Anda esialgne majandusliku tasuvust mõjutavad tegurid aheraine väärindamisele.
- Sõnastada tuleviku uurimissuunad antud teema raames.

**Hüpoteesid:** Käesoleva töö hüpotees on, et põlevkivi aheraine koostiseline heterogeensus mõjutab selle taaskasutatavust erinevateks otstarveteks, näiteks täiteainena ja ehitusmaterjalina (Strazdin, 2021; Teede Tehnokeskus AS, 2015), ning et selle omadusi on võimalik parandada stabiliseerimise teel (Prank, 2015). Eeldatakse, et orgaaniliste immutusvahendite, nagu epoksüvaik, kasutamine vähendab oluliselt aheraine veeimavust ja parandab külmakindlust. Samuti eeldatakse, et põlevkivi aheraine ja paekivisõelmed sobivad plastmaterjalides täiteainena kasutamiseks, mõjutades plastkomposiitmaterjalide omadusi positiivselt või lubades nende kasutamist tööstuslikes rakendustes (Strazdin, 2021). Lisaks eeldatakse, et teatud aherainepuistangute materjalid, mis sisaldavad kõrgemaid savimineraalide või orgaanilise aine kontsentratsioone, toetavad paremini mullaelustiku taastumist (Siilik, 2014).

**Töö piirangud:** Käesolev bakalaureusetöö keskendub peamiselt Ida-Virumaa valitud aherainepuistangute (Edise, Kohtla, Somp) iseloomustamisele ja esialgsetele taaskasutusvõimalustele. Töö ei hõlma majanduslikku tasuvusanalüüsi kõikide potentsiaalsete kasutusvaldkondade kohta. Laboratoorsete analüüside maht oli piiratud ning varasemates aruannetes kirjeldatud katsete detailidesse ei süvenetud põhjalikult, mistõttu käesoleva töö tulemused vajaksid edasist valideerimist.

**Töö struktuur:** Käesolev töö on jaotatud viieks peatükiks. Sissejuhatuses antakse ülevaade uurimistöö sisust ja vajalikkusest. Järgneb ülevaate osa põlevkivi aheraine ja kohati laiemalt põlevkivitööstuse jäätmete tekkest, mastaapidest, ajaloost ja keskkonnaprobleemidest. Materjal ja meetodika peatükk kirjeldab uuritud materjali ja kasutatud analüüsimeetodeid. Tulemuste peatükis esitatakse uuringute käigus saadud andmed. Arutelu peatükk analüüsib tulemusi ja seostab neid püstitatud eesmärkidega. Töö lõpeb kokkuvõttega.

# 1. Ülevaade põlevkivi aherainest

## 1.1. Põlevkivi kaevandamine ja rikastamine Ida-Virumaal

### 1.1.1. Lühike ajalooline ülevaade

Põlevkivi kaevandamine ja kasutamine Ida-Virumaal on Eesti energeetika ja tööstuse jaoks olnud sajandi vältel äärmiselt oluline tegevus. Esimesed kirjalikud teated "põlevast kivist" Eestis pärinevad 1777. aastast A. W. Hupeli poolt. 19. sajandil uurisid mitmed teadlased põlevkivi ja seda kasutati kohalikes majapidamistes madala kütteväärtusega kütusena. 1838. aastal avastati Vanamõisas "põlevat kivimit", mille analüüs näitas potentsiaali kütteks ja õli tootmiseks (Tammiksaar, 2013).

Tööstusliku kasutuse alguseks loetakse 1916. aastat, kui rajati esimesed karjäärid Pavandus, Kukrusel ja Järvel Ida-Virumaal. 1920. aastal alustas Kukrusel tegevust esimene allmaakaevandus. 1924. aastal rajati Kohtla-Järvele esimene tööstuslikus mahus põlevkiviõli tootev tehas ja samal aastal hakati põlevkiviga kütma Tallinna soojuselektrijaama, mida loetakse Eesti põlevkivienergeetika alguseks. Aastatel 1920-1940 rajati Virumaale mitmeid õlivabrikuid (Kohtla, Sillamäe, Kiviõli jt) ja 1930. aastate lõpuks tegutses Eestis juba 7 põlevkivitööstuse ettevõtet (Tammiksaar ja Pae, 2012).

Nõukogude perioodil (1944-1991) laienes põlevkivitööstus märkimisväärselt, muutes Ida-Virumaa suurimaks põlevkivi kaevandamise ja töötlemise piirkonnaks maailmas. Rajati uusi kaevandusi (nt Estonia, Viru, Ahtme, Tammiku, Sompa) ja elektrijaamu (nt Eesti, Balti), kus põlevkivi kasutati peamiselt elektrienergia ja põlevkiviõli tootmiseks (Reinsalu, 2011)

Eesti iseseisvuse taastamise järel (alates 1991) on tööstus kohanenud uute majanduslike ja keskkonnaalaste väljakutsetega (Keskkonnaagentuur, 2021). Kuigi kaevandamismahud ajutiselt vähenesid, on need 21. sajandi algusest taas tõusnud, keskendudes säästlikumale kasutamisele, kõrgema lisandväärtusega toodetele (nt põlevkiviõli) ja keskkonnamõjude vähendamisele. Mitu vanemat kaevandust on suletud (nt Kiviõli, Kohtla), kuid avatud on uusi karjääre (nt Ojamaa, Põhja-Kiviõli). Põlevkivitööstus on jätkuvalt oluline tööandja Ida-Virumaal, kuid seisab silmitsi väljakutsetega seoses karmistuvate keskkonnanõuete ja energiamajanduse muutustega (Maves, 2014; Prank, 2015).

Põlevkivi rikastamine on ajalooliselt olnud oluline osa tootmisprotsessist, et eraldada põlevkivi mineraalsest osast ja tõsta selle kütteväärtust (Kukk, 2012). Esialgu toimus see peamiselt mehaaniliselt, purustamise ja sorteerimise teel. Aja jooksul on tehnoloogiad arenenud, kasutusele on võetud keerukamad sorteerimis- ja rikastusseadmed (Siirde, 2009). Näiteks Kohtla kaevanduses kasutati kuni sulgemiseni naiste käsitsitööd unikaalses sorteerimiskompleksis. Tänapäeval on rikastamine endiselt oluline, et tagada elektrijaamadele ja õlitööstustele sobiva kvaliteediga tooraine.

### 1.1.2. Kaevandamise ja rikastamise protsesside kirjeldus

Põlevkivi kaevandamine ja rikastamine Ida-Virumaal hõlmavad mitmeid etappe ja meetodeid, mis on aja jooksul oluliselt arenenud.

**Kaevandamine:** Põlevkivi kaevandatakse Ida-Virumaal kahel viisil:

- **Pealmaakaevandamine (karjäärid):** See meetod sobib madalamal lasuvate põlevkivikihtide korral, kus kattekiht (liiv, savi, paas) ei ole liiga paks. Kõigepealt eemaldatakse pinnas ja katendikiht ja ladestatakse puistangutesse. Põlevkivi kaevandatakse kas selektiivselt (kihiti, kui kvaliteet varieerub) või mitteselektiivselt (kogu kiht korraga). Kaevandatud põlevkivi veetakse rikastusvabrikusse või otse elektrijaamadesse. Näidetena võib tuua Narva karjääri ning endiseid Aidu ja Kiviõli karjääre (Reinsalu, 2011).
- **Allmaakaevandamine (šahtid):** Seda meetodit kasutatakse sügavamal asuvate põlevkivikihtide korral. Rajatakse vertikaalsed šahtid (pääsu- ja õhutussõlmed) ja horisontaalsed käigud (strekid, ortid, laavad) põlevkivikihini jõudmiseks ja selle kaevandamiseks. Põlevkivi raimatakse massiivist puurimise ja lõhkamise teel või kombainidega (lankaevandamine, kamberkaevandamine). Kaevandatud põlevkivi laaditakse punkritesse ja transporditakse konveierite või vagonettidega šahtihoovi ning sealt maapinnale. Näited hõlmavad Estonia ja Viru kaevandust (Reinsalu, 2011; Prank, 2015).

**Rikastamine:** Kaevandatud põlevkivi sisaldab lisaks orgaanilisele ainele (kerogeenile) ka mineraalset osa (peamiselt lubjakivi). Rikastamise eesmärk on suurendada põlevkivi kütteväärtust, eraldades sellest osa aherainet (madala kütteväärtusega materjal). Rikastamisprotsessi erinevad meetodid:

- **Purustamine ja sõelumine:** Esmalt purustatakse suur tükiline põlevkivi väiksemaks ja seejärel sõelutakse fraktsioonideks vastavalt edasisele kasutusele (nt elektrijaamadele vajalik peenem fraktsioon).
- **Käsitsi sorteerimine:** Ajalooliselt ja osaliselt ka tänapäeval eraldatakse suuremad aherainetükid käsitsi.
- **Mehaanilised meetodid:** Kasutatakse erinevaid seadmeid, mis kasutavad ära põlevkivi ja aheraine füüsikalisi omaduste erinevusi (tihedus, tugevus, magnetilisus jne) Näiteks: (Mäeõpik, 2012)
  - Tihedussepareerimine: Materjalid eraldatakse erineva tihedusega vedelikes või õhus.
  - Magnetiline separatsioon: Kasutatakse, kui aheraines on magnetilisi komponente, üldjuhul mitte kasutatav põlevkivi juures.

- Flotatsioon: Peenestatud materjal segatakse veega ja reaktiividega, mille tulemusena kasulik mineraal (põlevkivi) seostub õhumullidega ja tõuseb pinnale, samal ajal kui aheraine vajub põhja (vähem levinud põlevkivi puhul).
- **Kuivrikastamine:** Allmaakaevandustes on katsetatud ka kuivrikastamise meetodeid, et aheraine juba maa all eraldada ja mitte seda maapinnale transportida (Väli, et al., 2021). Nt kaksikpaasi tükid, millest varajastes kaevandustes laoti postid, millele kaevanduse lagi langetati.

### 1.1.3. Aheraine tekkimine

Põlevkivi aheraine tekib peamiselt kahel viisil:

- **Kaevandamise käigus:** Põlevkivikihid ei ole kunagi täiesti puhtad. Nende vahel ja ümbruses esinevad madala kütteväärtusega või puhtalt mineraalse kihid. Kaevandamisel eraldatakse see materjal põlevkivist ja ladestatakse aherainemägedesse. Karjäärikaevandamisel tuleb eemaldada põlevkivikihi peal olev pinnas ja katend, mis samuti ladestatakse aherainena (Kukk, 2012):
- **Rikastamise käigus:** Rikastamise eesmärk kaevandatud põlevkivist mineraalse osa eraldamine, et tõsta põlevkivi orgaanilise aine kontsentratsiooni ja seeläbi kütteväärtust. Erinevate rikastamismeetodite (purustamine, sõelumine, tihedussepareerimine) tulemusena eraldatakse põlevkivist karbonaatne osa, mis moodustabki aheraine. Mõnikord kaevandatakse ka madala kütteväärtusega põlevkivi, mis rikastamise käigus eraldatakse põlevkivi väärtuslikumast osast ja ka see fraktsioon läheb aherainesse. (Kukk, 2012)

Kokkuvõtvalt on aheraine vältimatu kõrvalprodukt, mis tekib nii maavara kaevandamisel kui ka selle hilisemal töötlemisel (rikastamisel). Aheraine kvantitatiivne ja kvalitatiivne koostis sõltub otseselt maardla geoloogilisest ehitusest ja kasutatavatest kaevandamis- ning rikastamistehnoloogiatest.

## 1.2. Aheraine puistangud Ida-Virumaal

Ida-Virumaa, olles Eesti põlevkivitööstuse südameks, on aastakümnete pikkuse kaevandustegevuse tulemusena kujunenud piirkonnaks, kus domineerivad ulatuslikud aherainepuistangud. Need tehismaastikud on oluline osa piirkonna tööstuslikust pärandist ja keskkonnast (Käiss, 2008).

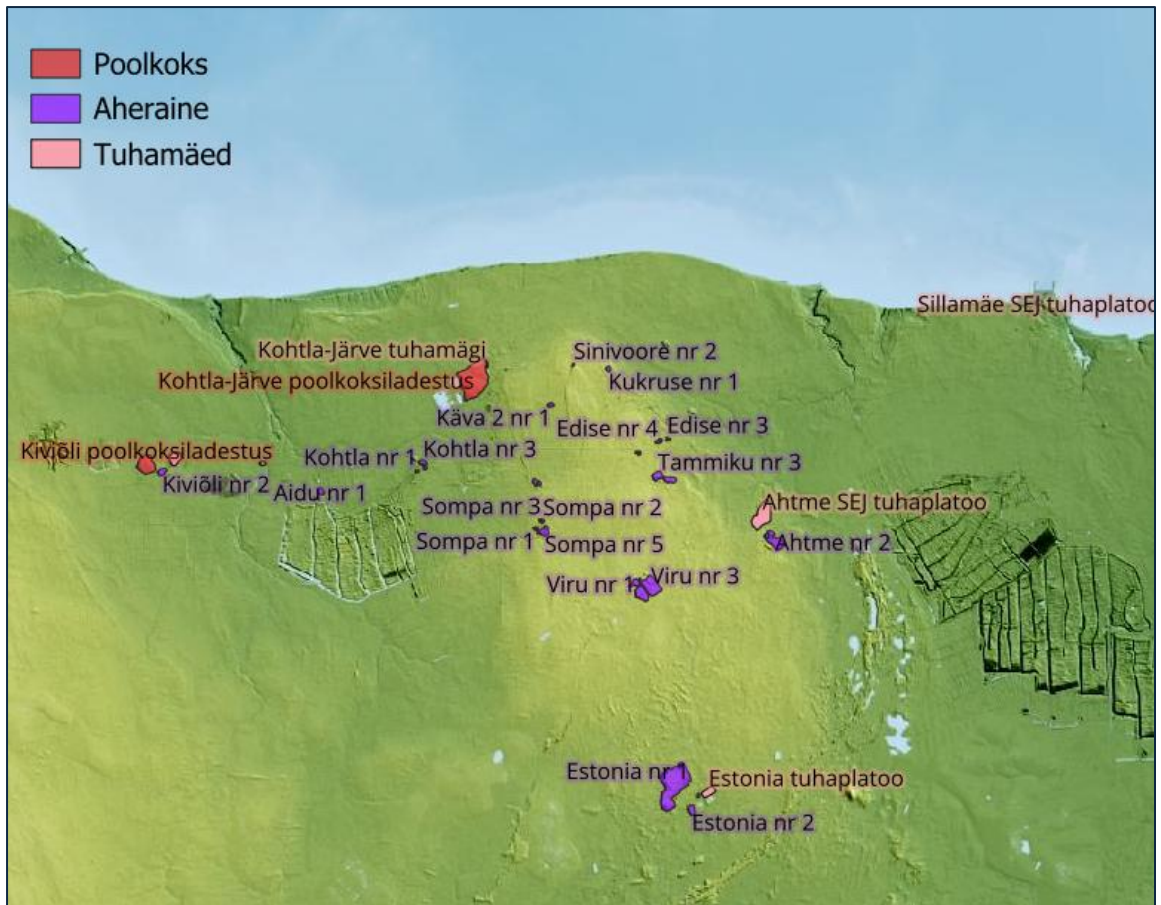
### 1.2.1. Puistangute paiknemine ja mastaabid

Aherainepuistangud on Ida-Virumaal laiali hajutatud, paiknedes peamiselt endiste ja praeguste põlevkivikaevanduste läheduses. Suuremad puistangualad on koondunud järgmistesse piirkondadesse:

- **Kohtla-Järve ümbrus:** Siin asuvad mitmed suuremad ja vanemad puistangud, mis on seotud endiste Kohtla, Käva ja Sompa kaevandustega. Nende hulgas on nii lamedamaid kui ka koonusekujulisi mägesid (Maves, 2014).
- **Kiviõli piirkond:** Endise Kiviõli Keemiatööstuse ja kaevanduse alal on samuti märkimisväärsed aherainemassiivid. Kiviõli vana poolkoksiladestu on saanud teisese kasutuse seikluspargina (Käiss, 2008).
- **Narva ja Sillamäe piirkond:** Siin leidub puistanguid, mis on seotud elektrijaamade ja varasema kaevandustegevusega. Põlevkivi kasutamisel tekkivate jäätmete ladestamiseks on rajatud kümme suuremat tuha- ja poolkoksiladestut, mis hõlmavad kokku 21,5 km<sup>2</sup> maad. Balti Soojuselektrijaama tuhaladestule nr 2 on ehitatud tuulepark (Maves, 2014).
- **Jõhvi ja Ahtme ümbrus:** Nende piirkondade läheduses on tuvastatavad aherainemäed, mis on seotud Ahtme kaevanduse ja teiste varasemate kaevandusväljadega. Jõhvi valla territooriumist on kaevandatud 60% (Maves, 2014).
- **Tammiku/Pauliku ja Edise piirkond:** Need alad on samuti olnud aktiivse kaevandustegevuse piirkonnad, kus on kujunenud mitmed aherainepuistangud.

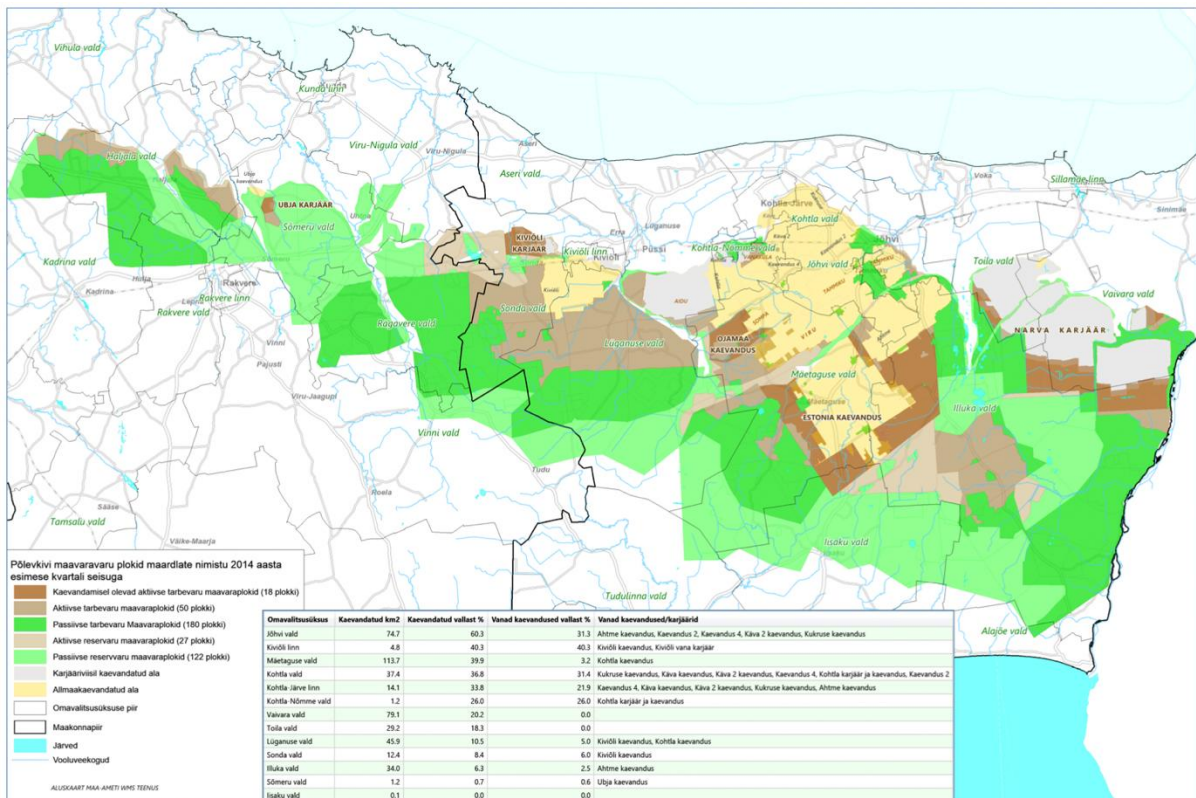
Puistangute mastaabid on muljetavaldavad. Need katavad Ida-Virumaal olulist maa-ala ja ulatuvad kümnetesse meetritesse kõrguselt. Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016-2030 KSH aruande (Maves, 2014) kohaselt oli 2013. aasta lõpuks Ida-Virumaal karjääriviisiliselt või allmaaviisil kaevandatud ala kogupindala 441 km<sup>2</sup>, millest 290 km<sup>2</sup> oli allmaakaevandatud ja 151 km<sup>2</sup> karjääriviisil aruande (Maves, 2014). Põlevkivi rikastamise järel tekkinud aheraineladestuid on 34 ja need hõlmavad kokku 4,5 km<sup>2</sup> maad aruande (Maves, 2014).

Joonisel 1 on märgitud Ida-Virumaa olulisemad põlevkivi aherainepuistangud. Need puistangud moodustavad osa Tartu Ülikooli projektist "Ida-Virumaa tahkete tööstusjäätmete levik, omadused ja taaskasutuse võimalused" uurimisobjektidest. Käesolev bakalaureusetöö tuginetakse neist kolme puistangu geokeemilisele ja mineraloogilisele iseloomustusele ning väärindamise potentsiaalile teisese toormena, saades sellelt kaardilt ruumilise konteksti valitud uurimisaladele.



**Joonis 1.** Ida-Virumaa põlevkivi aherainepuistangute paiknemine. (Alus Maa- ja ruumiameti reljeefikaart).

Joonisel 2 on kujutatud Eesti põlevkivimaardla ulatus ja sellele jäävate kaevandamisalade ja -plokkide paiknemise omavalitsuste lõikes Ida- ja Lääne-Virumaal. See kaart annab ruumilise konteksti põlevkivi kaevandustegevusele ja aheraine tekkepiirkondadele.



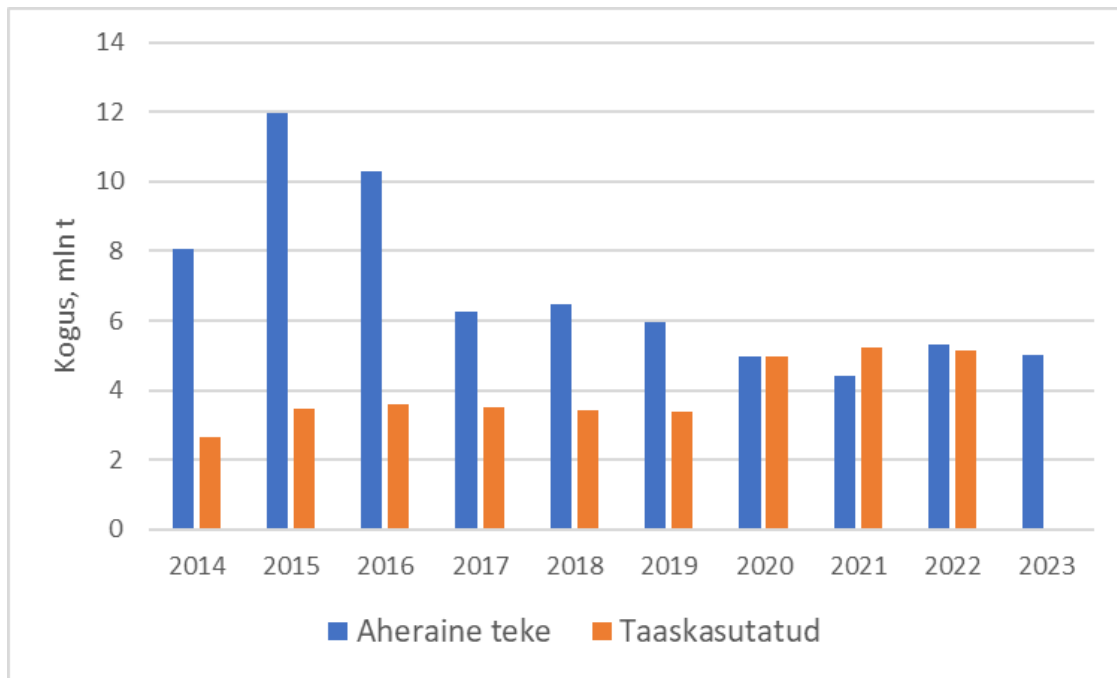
**Joonis 2.** Eesti põlevkivimaardla ülevaateplaan ja põlevkivi kaevandamisalad omavalitsustes (Maves, 2014).

### 1.2.2. Aheraine kogused ja nende dünaamika ajas

Aheraine kogused Ida-Virumaal on aastakümnete jooksul pidevalt kasvanud seoses jätkuva põlevkivi kaevandamisega (Strazdin, 2021). 2013. aasta seisuga oli kaevandamisjätmete hoidlatesse paigutatud ligikaudu 212 miljonit tonni aherainet (Väli, et al., 2021). Suurimad aheraine hoidlad on Estonia kaevanduse töötav jäätmeoidla nr 1 (ligi 100 miljonit tonni), Viru kaevanduse jäätmeoidla (nr 3) (ligi 35 miljonit tonni) ja Ahtme aheraine jäätmeoidla (ligi 27-28 miljonit tonni), mida praegu ei kasutata (Väli, et al., 2021).

Praeguse kaevandamiskoguse (15-16 mln tonni aastas põlevkivivaru) juures lisandub kaevandamisjätmete hoidlatesse kuni 4 mln tonni aherainet. Põlevkivitööstuses tekkinud jäätmekogus sõltub nii põlevkiviõli kui põlevkivielektri tootmismahitudest ehk nõudlusest ja muud jäätmekoguse mõjutamise võimalused on piiratud (Maves, 2014).

Joonisel 3 on toodud Eesti mäetööstuses tekkinud aheraine kogused ja taaskasutuse hulgad miljonites tonnides aastatel 2014–2023. See graafik rõhutab mäetööstuse tekitatavate jäätmete suuri mahtusid Eestis, mis tingib vajaduse nende taaskasutuseks ja ringmajandusse suunamiseks. Siiski aheraine puhul on taaskasutuse osakaal jõudnud võrdeliseks selle tekkemahuga.



**Joonis 3.** Eesti mäetööstuses tekkinud aheraine ja selle taaskasutuse mahud [Eesti põlevkivitööstuse aastaraamat 2023, Enefit ringmajandus, VKG].

### 1.2.3. Varasemad uuringud aheraine kohta Eestis

Aheraine on Ida-Virumaal pikka aega olnud uurimisobjektiks erinevate asutuste ja teadlaste poolt. Varasemad uuringud on peamiselt keskendunud:

- **Aheraine geokeemilisele ja mineraloogilisele koostisele:** Näiteks on leitud, et aheraine peamiseks mineraaliks on kaltsiit, millele lisanduvad kvarts, savimineraalid ja dolomiit (Kukk, 2012).
- **Aheraine füüsikalistele ja mehaanilistele omadustele:** TalTechi ehitusteaduskonna teadlased on uurinud aheraine potentsiaali ehitusmaterjalina, analüüsid selle tugevust, tihedust ja teisi olulisi parameetreid. Pranki (2015) magistritöö "Killustiku ja aherainekillustiku väärimine" ning Teede Tehnokeskuse lõpparuanne "Aheraine killustiku omaduste kaardistamine Eestis ning nõrga kivi väärimise teadusuuringud" (Teede Tehnokeskus AS, 2015) on käsitlenud aherainekillustiku purunemiskindlust (LA tegur) ja külmakindlust, mis on peamised täitematerjalide probleeme põhjustavad tegurid.
- **Aheraine keskkonnamõjude hindamine:** Keskkonnaagentuur on läbi viinud mitmeid uuringuid aherainemägede keskkonnamõjude kohta, sealhulgas vee ja õhu kvaliteedi analüüse ning mõju mullaelustiku tekkele (Keskkonnaagentuur, 2021).

- **Aheraine taaskasutamise võimaluste esialgsed uuringud:** Põhiline aheraine kasutus on ümbertöötlemata täiteainena. Samas on tehtud katseid aheraine kasutamiseks tsemendi tootmise lisandina ja kasutamist plastmaterjalis täiteainena (Kukk, 2012; Strazdin, 2021)

### 1.3. Aheraine koostis ja omadused

Põlevkivi aheraine on heterogeenne materjal, mille koostis ja omadused sõltuvad oluliselt kaevandamise piirkonnast, kaevandatud põlevkivikihtidest, rikastamistehnoloogiast ja puistangu vanusest. Selle detailne iseloomustamine on kriitilise tähtsusega aheraine võimalike kasutusviiside hindamisel.

#### 1.3.1. Peamised mineraalsed komponendid

Põlevkivi aheraine peamine mineraalne komponent on kaltsiumkarbonaat ( $\text{CaCO}_3$ ) ehk lubjakivi, mis sageli moodustab suurema osa aheraine massist. Lisaks lubjakivile sisaldab aheraine märkimisväärses koguses savimineraale (illiit, smektiit, kaoliniit jt), mille osakaal võib varieeruda sõltuvalt põlevkivikihist ja rikastusprotsessist. Kolmandaks oluliseks komponendiks on kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) ehk ränidioksiid, mis esineb peamiselt liivateradena. Vähemal määral võib aheraine sisaldada ka dolomiiti ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), päevakive ja teisi silikaatseid mineraale.

Nende mineraalide suhe aheraines määrab oluliselt selle füüsikalised ja keemilised omadused ning seega ka potentsiaalsed kasutusvaldkonnad. Näiteks kõrge kaltsiumkarbonaadi sisaldus annab aherainele leeliselised omadused, samas kui savimineraalid mõjutavad selle veepidavust ja plastilisust.

#### 1.3.2. Orgaanilise aine (jääkpõlevkivi) sisaldus ja selle varieeruvus

Põlevkivi rikastamise protsess ei ole kunagi 100% efektiivne, mistõttu sisaldab aheraine alati teatud hulgal jääkpõlevkivi ehk orgaanilist ainet (kerogeeni). Selle sisaldus võib varieeruda laias vahemikus, sõltuvalt kasutatud rikastustehnoloogiast ja põlevkivi algsest orgaanilisest sisaldusest. Mõned uuringud on näidanud, et jääkpõlevkivi sisaldus võib ulatuda mõnest protsendist kuni 30 protsendini aheraine massist. Esiteks satub kerogeen rikastamisjääki koos eraldatud karbonaatse osaga, millega kerogeen tugevalt seotud on. Teiseks ei kasutatud püsivalt ära kogu põlevkivi kerogeeni fraktsiooni. Tükipõlevkivi, mida kasutati põlevkivi keemiatööstuses läks enamasti kaubaks. Kuid peenpõlevkivi, mida kasutati elektrijaamades, vahetevahel mitte, eriti suurtest elektrijaamadest kaugemal asuvates kaevandustes. Ja see peenem fraktsioon heideti koos aherainega puistangutesse. Jääkpõlevkivi olemasolu aheraines on oluline mitmel põhjusel: see võib mõjutada aheraine füüsikalisi omadusi (nt tihedust, poorsust) ja keemilist käitumist (nt oksüdeerumine, leeliselisus). Samuti kujutab see potentsiaalset ressursi, kui leidub tehnoloogiaid selle täiendavaks väärindamiseks (nt energia tootmine madalal temperatuuril pürolüüsi teel). Samas võib orgaaniline aine lagunemisel tekitada keskkonnaprobleeme, (nt orgaaniliste ühendite vabanemine ja kõrge

orgaanikasisaldus aherainepuistangutes põhjustas mitmel pool ka nende isesüttimist ja põlemist.

### 1.3.3. Aheraine füüsikalised ja keemilised omadused

Põlevkivi aheraine füüsikalised ja keemilised omadused on mitmekesised ja olulised selle käitlemise, ladestamise ja potentsiaalse kasutamise seisukohalt.

- **Tihedus:** Aheraine tihedus varieerub sõltuvalt selle mineraalsest ja orgaanilisest koostisest ning poorsusest. Väli et al. (2021) aruanne näitab, et kukersiidi keskmine tihedus on 1,4 t/m<sup>3</sup> ja lubjakivil 2,4 t/m<sup>3</sup>.
- **Poorsus:** Aheraine on poorne materjal, mille poorsus mõjutab veepidavust, gaaside läbitavust ja potentsiaali saasteainete sidumiseks.
- **Leeliselisus:** Kõrge kaltsiumkarbonaadi sisalduse tõttu on aheraine tavaliselt leeliseline.

## 1.4. Ressursi raiskamine tööstusjäätmete ladestamisega

Põlevkivi kaevandamise ja rikastamise tulemusena tekkinud suured aherainemäed Ida-Virumaal kujutavad endast märkimisväärset raiskamist potentsiaalse toorme jäätmena ladestamise tõttu.

### 1.4.1. Vajadus jäätmete väärindamiseks ringmajanduse põhimõttele

Traditsiooniline tööstuslik lähenemine, kus jäätmed ladestatakse, on vastuolus ringmajanduse põhimõtetega. Ringmajanduse lähenemine näeb ette ressursside kasutamist, jäätmetekke minimeerimist ja tekkinud jäätmete väärtustamist uute toodete või materjalidena. Põlevkivi aheraine tohutud kogused Ida-Virumaal kujutavad endast olulist potentsiaalset ressursi, mille väärindamine aitaks vähendada keskkonnamõjusid, säästa looduslikke ressursse ja luua majanduslikku väärtust. Keskkonnaministeeriumi KSH aruanne rõhutab vajadust vähendada põlevkivi kasutamisega tekkivate ohtlike jäätmete suurt mahtu (Maves, 2014). Toetudes selles Jäätmehierarhia põhimõttele (Joonis 4), millest on lähtutud ka riigi jäätmekavas perioodiks 2023-2028 (KLIM, 2023). Joonis visualiseerib jäätmekäitluse hierarhia põhimõtteid, mis seavad esikohale jäätmetekke vältimise, järgnevad korduskasutuseks ettevalmistamine, materjali ringlussevõtt, muu taaskasutus (nt põletamine) ja viimasena prügilasse ladestamine. See hierarhia on aluseks ringmajanduse põhimõtetele, suunates ressursside tõhusale kasutamisele ja jäätmete väärindamisele, et minimeerida keskkonnamõju.



**Joonis 4.** Eesti riigi jäätmekäitluse hierarhia (KLIM, 2023).

### 1.4.3. Potentsiaal näha jäätmeid kui väärtuslikku tooret

Mitmel pool maailmas on sarnaseid tööstusjäätmeid (nt kaevandusjäätmed, põletustuhk) edukalt väärdatud erinevates valdkondades.

- **Ehitusmaterjalid:** Kaevandusjäätmeid on kasutatud täitematerjalidena teedehituses, betooni ja tsemendi tootmises, silikaattelliste ja -plokkide tootmises. ERR-i artiklid "Rail Baltic ehitamisel kasutatakse ka põlevkivi aherainet" (ERR, 2020) ja Postimehe artikkel "Eesti Energia: põlevkivi aheraine sobib mitmel pool ehituseks" kinnitavad aheraine kasutamist teedehituses (Postimees Majandus, 2021). LIFE OSAMAT projekt ("Põlevkivituha keskkonnaohutu kasutamine teede ehituses") on testinud põlevkivituha sideainena tee-ehituses ja leidnud selle sobivuse (OSAMAT, 2025).
- **Keskkonnakaitse:** Leeliselisi tööstusjäätmeid on kasutatud happeliste muldade neutraliseerimiseks ja saastunud vee puhastamiseks (fosfori sidujana ja adsorbendina raskmetallidele). Siiliku (2014) magistritöö uuris aheraine kasutamist mullaviljakuse parandamiseks ja mullaelustiku taastamiseks.
- **Oluliste elementide eraldamine:** Mõnedes kaevandusjäätmetes võib leida madalas kontsentratsioonis väärtuslikke metalle.
- **Geopolümeerid:** Tööstusjäätmeid (sh põletustuhka ja teatud tüüpi kaevandusjäätmeid) uuritakse kui potentsiaalset toorainet geopolümeeride tootmiseks, mis on alternatiiv traditsioonilisele tsemendile [Paiste, 2017; Paaver, 2021].

- **Plastmaterjalide täiteaine:** aherainet koos paekivisõelmetega saab kasutada täiteainena plastmaterjalides (Strazdin, 2021).
- **Tehismaastikud ja spordirajatised:** Põlevkivi rikastamise jääke on võimalik kasutada tehismaastike spordirajatiste ehitamiseks. Näitena võib tuua Kiviõli keemiatööstuse endise poolkoksi mäe, mille mäeküljed on haljastatud ja mille põhjanõlvadele on rajatud mäesuusarajad (Käiss, 2008).

#### 1.4.4. Betooni 3D-printimine ja aheraine kasutusvõimalused selles

Betooni 3D-printimine (3DCP) on kiiresti arenev digitaalne ehitustehnoloogia, mis võimaldab betooni kiht-kihilt ekstrudeerida, luues täpseid, skaleeritavaid ja jäätmetõhusaid ehituslahendusi (Ehitusuudised.ee, 2023; Vertico, 2025). See tehnoloogia pakub suurt disainivabadust keeruka geomeetriaga struktuuride loomisel ja vähendab oluliselt vormitöö vajadust (Heidelberg Materials, 2025).

Traditsioonilised 3D-prinditavad betoonisegud sisaldavad sageli suures proportsioonis tsementi ja teisi peeneteralisi pulbreid, mis annab neile kõrge süsinikujalajälje (M-ERA.NET, 2023; Sinka et al., 2025). See on tingitud vajaduse arendada välja uusi, keskkonnasäästlikumaid segusid, mis kasutaksid alternatiivseid tsementi asendavaid materjale (SCM – *Supplementary Cementitious Materials*) (Hanžič et al., 2025).

Põlevkivituhk kergesti kättesaadav tööstusjäätmete materjal, millel on suur potentsiaal SCM-ina betooni 3D-printimisel (M-ERA.NET, 2023; Hanžič et al., 2025). Selle kasutamine aitab vähendada tsemendi osakaalu, mis omakorda vähendab betooni süsinikujalajälge ja pakub lahendust tööstusjäätmete taaskasutamiseks (Sinka et al., 2025).

Uuringud on näidanud, et põlevkivituha kasutamine SCM-ina 3D-prinditavas betoonis on teostatav. Näiteks on leitud, et suitsugaasidest eraldatud kerajate osakestega põlevkivituhk, mis sisaldab  $\beta$ -kaltsiumsilikaati, omab suurimat potentsiaali SCM-ina. Sellist tüüpi tuhka sisaldava betooni 56-päevane survetugevus on ligikaudu 60 MPa, mis on võrreldav referentskompositsiooniga (Hanžič et al., 2025). Samuti on leitud, et kuni 10% tsemendi asendamine põlevkivituha abil ei vähenda oluliselt betooni survetugevust ja võib isegi parandada külmakindlust (Conect, 2025). Seejuures on võimalik vähendada süsinikuemissioone 5% kuni 30% (Sinka et al., 2025).

Põlevkivituha eeltöötlus, näiteks kokkupõrkega jahvatamine (*collision milling*), võib parandada selle omadusi SCM-ina, vähendades osakeste suurust ja suurendades reaktiivsust (Paaver, 2021; Hanžič, 2025; RTU, 2025). See võimaldab formuleerida tasakaalustatud ja suure jõudlusega tsementkomposiite, mis sobivad ekstrusioonipõhiseks 3D-printimiseks (RTU, 2025).

Eestis on Tallinna Tehnikakõrgkoolil olemas betooni 3D-printimise labor, kus arendatakse betooni printimise tehnoloogiat, segusid ja seadmeid koostöös ettevõttega Haragrupp OÜ

(Tallinna Tehnikakõrgkool, 2025). Eesti inseneridel ja teadlastel on ette näidata toimivad lahendused ja esimene valminud 3D-prinditud betoonehitis (Visionest Institute, 2023). See loob soodsa pinnase aheraine ja põlevkivituha edasiseks uurimiseks ja rakendamiseks 3D-prinditavas betoonis.

## 2. Materjalid ja Metoodika

### 2.1. Uurimisalad ja proovivõtt

Aherainematerjali proovid koguti Ida-Virumaal asuvatest järgmistest aherainepuistangutest: Edise, Kohtla ja Sompä (aherainemägede asukohad vaata Joonis 1). Proovivõtt teostati ajavahemikul 23.10-30.10.2025. Iga valitud puistangu piires võeti 7-16 erinevast kohast proovi, kokku 35 proovi, püüdes esindada visuaalselt eristuvaid materjale (nt põlevkivirikkam ja lubjakivirikkam aheraine) ning võttes proove erinevatelt nõlva kõrgustelt, et iseloomustada puistangu koostiselisest heterogeensust. Iga proovi kohta tehti visuaalne kirjeldus (värvus, tekstuur, nähtavad komponendid) ja dokumenteeriti fotodega. Kogutud proovide esmaseks säilitamiseks kasutati suletavaid plastikkotte, mis märgistati vastavalt proovivõtukohtade ja -ajale.

Välitööde käigus tuvastati visuaalselt, eriti Sompä ja Kohtlapuistangutel, märkimisväärne kerogeeni sisaldus peeneteralises fraktsioonis, mis andis aherainele iseloomuliku pruunika varjundi.

### 2.2. Proovide ettevalmistamine laboratoorseteks analüüsideks

Laborisse toimetatud aheraineproovid esmalt kuivatati, et eemaldada liigne niiskus. Kuivatamine viidi läbi temperatuuril 105 °C 24 tunni jooksul. Pärast kuivatamist purustasin suuremad proovitükid esmalt lõugpurustiga Retsch BB 50, et saada analüüsiks sobiva fraktsiooni suurus. Seejärel homogeniseerisin purustatud materjal hoolikalt ja vajalik kogus (ca 10 g) jahvatasin peeneks pulbriks planetaarkuulveskis Retsch PM 100. Jahvatamine toimus 4 minuti jooksul kiirusel 400 p/min, kasutades wolframkarbiit jahvatusnõusid ja -kuule, et tagada piisav peensus mineraloogilise ja keemilise analüüsi jaoks. Valmistatud pulbrilised proovid säilitati õhukindlates viaalides kuni analüüsimiseni röntgendifraktomeetriga D8 ADVANCE.

### 2.3. Kasutatud analüüsimeetodid

#### 2.3.1. Mineraloogiline analüüs: Röntgenfluorestsentsanalüüs (XRD)

Proovide mineraloogilise koostise määramiseks kasutati pulbriliste proovide röntgendifraktsioonanalüüsi (XRD) seadmega Bruker D8 ADVANCE. Proovid mõõdeti CuK $\alpha$  monokromaatilise kiirgusega 5 kuni 75 °2 $\theta$  vahemikus. Saadud difraktogrammid analüüsiti tarkvara Bruker Topas 6 Rietveld analüüsil põhineva programmiga, kasutades standardseid mineraalide difraktsioonimustreid (nt ICDD andmebaas), et tuvastada proovides esinevad mineraalid ja hinnata nende suhtelist sisaldust poolkvantitatiivselt.

### 2.3.2. Keemiline analüüs: Röntgenfluorestsentspektromeetria (XRF)

Proovide elementaarse keemilise koostise määramiseks kasutati röntgenfluorestsentspektromeetrit (XRF) Rigaku ZSX Primus IV. Analüüs teostati varem valmistatud klaassulanditest. Mõõtmised viidi läbi 15.04 kuni 09.05.2025. Kalibreerimiseks kasutati sertifitseeritud standardeid. Tarkvara abil teostati andmetöötlus, et määrata proovides sisalduvate peamiste ja kõrvalelementide sisaldused.

## 3. Tulemused

### 3.1. Aherainepuistangute visuaalne iseloomustus ja proovivõtupunktid

Välitööde käigus dokumenteeriti kolme erineva Ida-Virumaa aherainepuistangu (Edise, Kohtla, Sompa) visuaalne iseloomustus ja proovivõtupunktid.

- **Edise nr 4 puistang:** Visuaalselt domineeris Edise puistangul heledam, valdavalt lubjakivile iseloomulik hallikasvalge värvus. Materjal oli segu peeneteralisest fraktsioonist ja suurematest, kuni 10-15 cm läbimõõduga lubjakivitükkidest. Taimestik oli hõre, koosnedes peamiselt pioneerliikidest. Proovid võeti puistangu erinevatelt nõlvadelt, et tabada võimalikku horisontaalset ja vertikaalset varieeruvust.
- **Kohtla nr 2 ja nr 3 puistang:** Kohtla-Nõmme puistang oli visuaalselt tumedam, hallikaspruun, mis viitas potentsiaalselt kõrgemale orgaanilise aine või savimineraalide sisaldusele. Materjal oli valdavalt peeneteraline, meenutades kohati liivast pinnast. Proovid võeti puistangu ülemisest ja alumisest osast, et hinnata vertikaalset heterogeensust.
- **Sompa nr 4 ja nr 5 puistang:** Sompa puistang paistis silma oma märkimisväärse heterogeensusega, kus vaheldusid heledad lubjakivirikkad kihid ja tumedamad, põlevkivi sisaldavad fraktsioonid. Materjali terasuurus varieerus samuti oluliselt. Proovid võeti visuaalselt erinevatest kihtidest, et iseloomustada koostise varieeruvust (Foto 1 ja 2).



**Fotod 1.** Sompas uuritud aherainemägi, mille kerogeeni sisaldus ulatus kohati kuni 30%-ni (autori foto)



**Foto 2.** Sompaa aherainemäest toodetud sõelmete kuhjatised BRD MINERAL OÜ territooriumil. Tänaeks on kogu sellest aherainemäest valmistatud erinevas fraktsioonis sõelmed (autori foto).

Visuaalsel vaatlusel ilmnes, et puistangud erinesid üksteisest värvuse intensiivsuse ja terasuuruse jaotuse poolest. Sompaa puistang oli visuaalselt kõige heterogeensem, samas kui Edise ja Kohtla puistangud olid visuaalselt ühtlasema koostisega.

### 3.2. Mineraloogilise analüüsi tulemused (XRD)

Röntgendifraktsioonanalüüsi (XRD) tulemused tuvastasid kõigis uuritud aheraineproovides peamiste mineraalidena kaltsiidi ( $\text{CaCO}_3$ ) dolomiit ( $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_2)$ ) ja kvartsi ( $\text{SiO}_2$ ). Olulises koguses esinesid ka savimineraalid. Vähemal määral leiti K- ja Na-päevakive ja püriiti. Uuritud puistangutest saadud XRD tulemused on esitatud Tabelis 1.

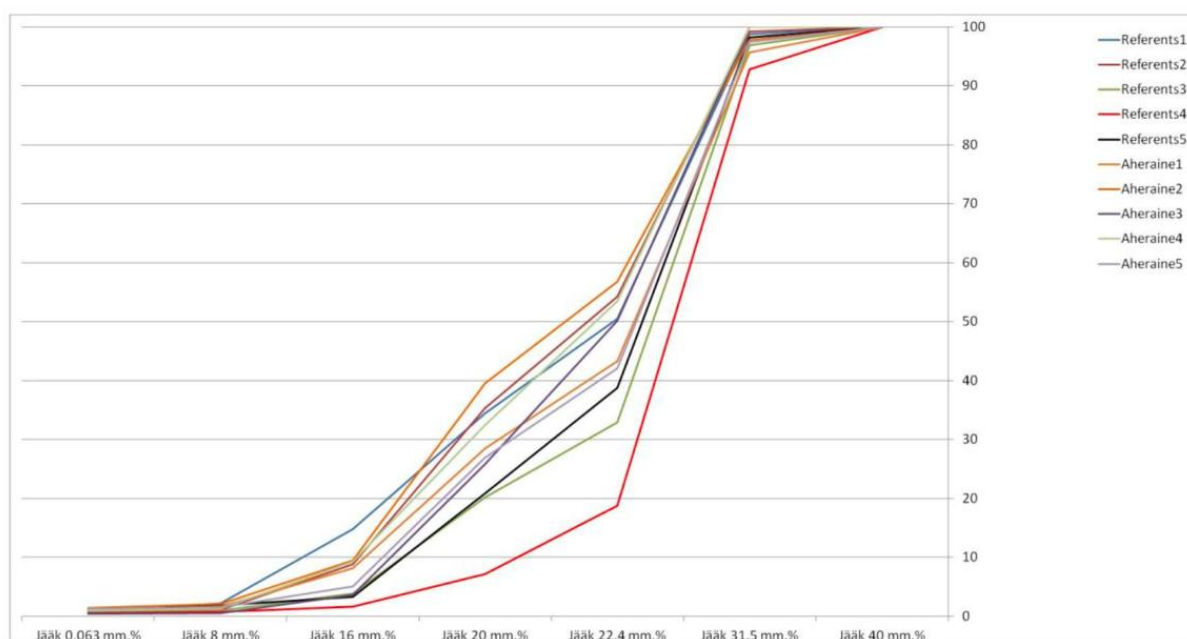
**Tabel 1.** Uuritud aheraineproovide mineraalne koostis, massi%.

Proov	Kvarts	K-päevakivi	Kaltsiit	Dolomiit	Püriit	Saviviik
Edise 4-A	3,32	1,99	87,24	4,03	0,60	2,82
Edise 4-B	3,58	2,31	76,33	13,91	0,90	2,98
Edise 4-C	4,31	3,04	53,29	34,07	0,79	4,51
Edise 4-D	4,95	2,89	80,52	5,46	0,66	5,54
Edise 4-E	6,27	3,85	63,35	17,71	1,19	7,63
Edise 4-F	1,91	1,00	94,60	1,36	0,49	0,64
Edise 4-G	4,23	2,50	65,23	22,74	1,07	4,23
Edise 4-I	3,56	3,30	38,87	50,48	0,58	3,23
Edise 4-J	3,75	2,33	53,28	37,11	0,76	2,79
Edise 4-K	4,94	3,19	60,55	25,54	0,72	5,07
Edise 4-L	2,74	1,94	77,75	14,57	1,05	1,94
Kohtla 3-A	3,33	1,77	84,84	6,21	0,83	3,02
Kohtla 3-B	3,95	2,17	87,88	2,25	0,37	3,39
Kohtla 3-C	4,62	1,99	86,25	2,07	0,97	4,11
Kohtla 3-D	5,14	2,80	81,88	3,69	0,65	5,85
Kohtla 3-E	3,40	1,86	89,63	2,16	0,40	2,55
Kohtla 3-F	3,53	1,87	89,82	1,71	0,53	2,54
Kohtla 3-G	4,60	2,66	82,72	2,48	0,47	7,07
Kohtla 3-H	4,45	2,17	85,94	2,94	0,60	3,91
Kohtla 3-I	5,16	3,02	82,48	3,63	0,65	5,07
Kohtla 3-J	3,92	1,89	85,83	5,73	0,31	2,32
Kohtla 3-K	3,93	2,22	80,78	6,01	0,71	6,36
Kohtla 3-L	4,12	2,64	85,62	2,69	0,82	4,11
Kohtla 2-A	3,90	1,87	88,10	2,41	0,43	3,30
Kohtla 2-B	3,83	2,18	78,63	10,84	1,59	2,93
Kohtla 2-C	2,88	1,25	91,90	1,73	0,49	1,75
Kohtla 2-D	1,68	0,49	94,42	1,67	1,14	0,61
Sompa 4-A	4,42	3,25	43,00	44,59	0,45	4,29
Sompa 4-B	6,16	3,46	47,34	35,42	0,60	7,02
Sompa 4-C	5,26	3,49	53,48	30,66	1,96	5,15
Sompa 4-D	5,44	2,75	68,81	17,06	1,11	4,84
Sompa 4-E	7,07	4,10	19,13	60,32	0,52	8,87
Sompa 4-F	5,40	3,31	69,06	16,12	0,52	5,59
Sompa 4-G	5,39	3,02	74,03	11,75	0,69	5,12

### 3.2.1. Koostiselised erinevused erinevates puistangutes

Põhiline erinevus mineraalse koostise järgi eri puistangute materjalis on seotud dolomiidi sisaldusega, mis on keskmiselt kordades kõrgem Kohtla puistangutes kui Edise ja Sompä puistangus. Mõneti suurem on Kohtlas ka savi sisaldus. Teised faasid on suhteliselt ühtlase varieeruvusega, va kaltsiit, mille sisaldus siis suhestub dolomiidi sisaldusega.

Prank (2015) uurib oma magistritöös aherainepuistangutest pärit killustikuproovide (Aheraine1-5) ja võrdlusmaterjalina kasutatud lubjakivikillustiku (Referents1-5) terakoostise jaotust (Joonis 5). Graafikult on näha, et aherainepuistangute materjal on valdavalt peeneteralisem ja heterogeensem terakoostisega võrreldes referentskillustikuga. See on kooskõlas vältitöödel tehtud tähelepanekuga kerogeeni (põleva orgaanilise aine) märkimisväärse sisalduse kohta just aheraine peenemas fraktsioonis. Ehkki terakoostis on füüsikaline omadus, annab see olulise konteksti mineraloogilisele analüüsile, aidates mõista materjali üldist koostist ja käitumist.



**Joonis 5.** Uuritud aherainekillustiku ja referentskillustiku terakoostise jaotus (Prank, 2015).

### 3.3. Keemilise analüüsi tulemused (XRF)

Röntgenfluoretsentspektromeetria (XRF) abil määrati aheraineproovide keemiline koostis. Tulemused on esitatud oksiidide sisaldusena (massiprotsentides) Tabelis 2.

Keemilise koostise tulemused näitavad ühtlast keskmist kuumutuskadu kõikide uuritud puistangute proovides, mis on ~43%, enamasti viitab LOI orgaanika ja CO<sub>2</sub> lendumisele karbonaatide lagunemisel. Kui teised elemendid on suhteliselt sarnase sisaldusega erinevate puistangute proovides, siis CaO ja MgO varieeruvus on üksteisest sõltuvuses. Märkimisväärne on magneesiumi sisalduse muutus Edise ja Sompa (kõrgem sisaldus) ning teisalt Kohtla proovide (madal sisaldus) vahel, mis langeb hästi kokku dolomiidi kõrgema sisaldusega mineraloogia tulemustes vastavates puistangutes, ehk siis dolomiiti palju Edise ja Sompa ning vähe Kohtla proovides.

**Tabel 2.** Aheraineproovide keskmine keemiline koostis, massi%.

Puistang	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	LOI
Edise	39,0	6,6	1,6	1,7	3,4	0,5	0,05	1,9	0,05	43,2
Kohtla	43,3	6,6	1,6	1,4	0,96	0,5	0,03	1,5	0,05	42,2
Sompa	33,5	9,6	2,4	1,7	5,1	0,8	0,07	1,8	0,07	42,8

## 4. Arutelu

### 4.1. Aherainepuistangute koostiselise heterogeensuse analüüs

Uuringu tulemused kinnitavad, et Ida-Virumaa aherainepuistangud on koostiselt heterogeensed puistangute vahel, kuid üldiselt suhteliselt ühtlased ühe puistangu piires.

**Leitud süstemaatilised koostiselised erinevused:** Erinevates puistangutes leiti süstemaatilisi erinevusi mineraalses ja keemilises koostises. Näiteks Edise ja eriti Kohtla puistangus on kõrgem kaltsiidi sisaldus, mis viitab lubjakivirikkamale materjalile. Langeb see hästi kokku kõrgema CaO sisaldusega Kohtla puistangus. Siiski suurim erinevus on magneesiumi sisalduse vahel, kõrgem on see Edise ja Sompas ja oluliselt madalam Kohtla puistangus. See läheb kokku hästi mineraalse koostise muutustega dolomiidi ja kaltsiidi sisalduste vahel neis proovides. Nimelt on dolomiidi sisaldus kuni suurusjärgu võrra suurem Sompas ja natuke vähem Edise aherainepuistangus võrrelduna Kohtla aherainega. Samuti on mõneti süstemaatilisem erinevus savi sisalduses, mille suurem sisaldus langeb kokku dolomiidi suurema sisaldusega. Need erinevused võivad olla seotud mitmete teguritega:

- **Aluspõhja geoloogia:** Põlevkivikihid Ida-Virumaal ei ole ühtlase koostisega. Esineb karbonaatse ja terrigeense materjali vaheldumist, mis kajastub ka aheraine koostises. Selgelt on Edise ja Sompas kaeväljas põlevkivi olnud algselt dolomiidirikkam võrrelduna Kohtla kaevanduse põlevkiviga.
- **Rikastustehnoloogia:** Kaevandamis- ja rikastustehnoloogia mõjutab seda, kui palju mineraalset ainet põlevkivilt eraldatakse. Väli, et al. (2021) selgitab, et aheraine koostis sõltub rikastusvabriku protsesside efektiivsusest. Näiteks varasemad rikastusmeetodid võisid jätta aherainesse rohkem põlevkivi ja seeläbi rohkem savimineraale.
- **Proovide ettevalmistus:** Uuritud proovide ettevalmistamisel enne mineraalset ja keemilist analüüsi ei eraldanud me orgaanilist osa ehk kerogeeni. Teatud koostiseline erisus võib tulla orgaanikasisalduse varieeruvusest proovides.

**Vastavus püstitatud hüpoteesidele:** Uuringu tulemused näitavad, et erinevates aherainepuistangutes esineb oluline erinevus kaltsiidi/dolomiidi suhte ja savimineraalide sisalduses, mis on seotud eelkõige seotud aluspõhja geoloogia ja rikastustehnoloogia erinevustega. Kuna materjali (aheraine) koostis on olulise mõjuga selle kasutatavuse osas erinevates aheraine kasutamise võimalustes. Siis on oluline teada puistangutes oleva materjali koostiselisi erisusi ja kas heterogeensus on vaid eri puistangute vahel, mis tuleneb selle piirkonna põlevkivi koostise iseärasusest. Või ka puistangu sees, mis siis juba mõjutab aherainepuistangu kasutamist teisese toormena.

## 4.2. Aheraine potentsiaalsed taaskasutus- ja väärindamisvõimalused, arvestades materjali koostist

Uuringu tulemused annavad olulist teavet aheraine võimalike taaskasutus- ja väärindamisvõimaluste kohta.

### Ehitusmaterjalides:

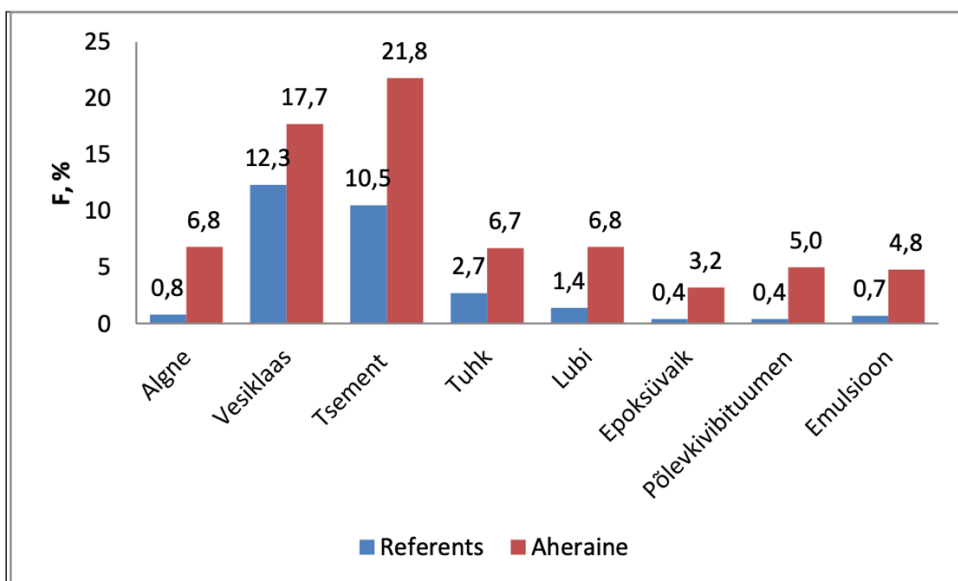
**Killustikuna ja betooni täiteainena:** Aheraine karbonaatne koostis muudab selle potentsiaalselt sobivaks kasutamiseks killustikuna teedeehituses ja betooni täiteainena. Pranki (2015) magistritöö on käsitlenud aherainekillustiku purunemiskindlust ja külmakindlust. Teede Tehnokeskuse lõpparuanne "Aheraine killustiku omaduste kaardistamine Eestis ning nõrga kivi väärindamise teadusuuringud" (Teede Tehnokeskus AS, 2015) näitab, et epoksüvaik võib oluliselt parandada aheraine veemavust ja Los Angelese koefitsienti. Aherainekillustiku kasutamine kompleksstabiliseeritud segudes koos freespuruga võib alandada kompleksstabi maksumust keskmiselt kuni 20% (Teede Tehnokeskus AS, 2015).

Tabel 3 annab konsulteeriva hinnangu erinevate stabiliseeritud segude (koosnedes aherainest, freespurust ja paekillustikust ning erinevatest sideainetest) kasutuspotentsiaalile teekatendite aluskihtidena. See aitab hinnata materjalikombinatsioonide sobivust ja otstarbekust teedeehituses, võttes arvesse nii tehnilisi omadusi kui ka majanduslikke aspekte. Kõrged hinnangud aga näitavad suundi, kuhu tasub edaspidi panustada pilootprojektide ja praktilise rakendamise osas.

**Tabel 3.** Hinnang erinevate stabikombinatsioonide kasutuspotentsiaalile (Teede Tehnokeskus AS, 2015).

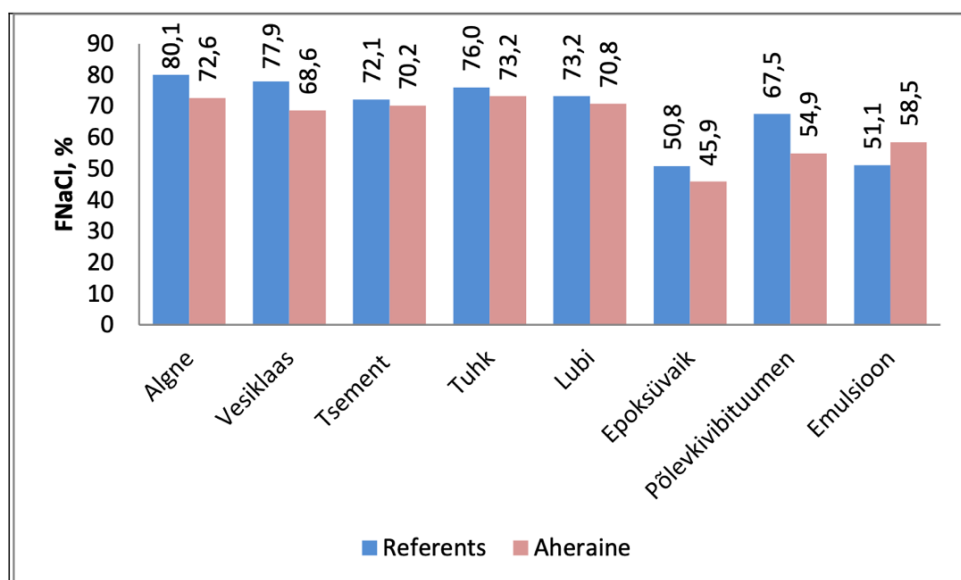
Täitematerjal/ stabi liik	Freesipuru+aheraine killustik	Aheraine killustik	Paekillustik
<b>Kompleksstabi</b>	5	4	4
<b>Tsementstabi</b>	3	1	2
<b>Tuhkstabi</b>	4	3	3
<b>Lubistabi</b>	1	0	0

Joonis 6 visualiseerib uuritud killustikuproovide (aheraine ja referents) massikadu protsentides (F%) pärast külmutamis-sulatustsükleid destilleeritud vees. See annab ülevaate materjalide vastupidavusest vee jäätumisest tingitud purunemisele, kus madalam F% näitab paremat külmakindlust (Prank, 2015).



**Joonis 6.** Külmakindlus destilleeritud vees (joonis võetud Prank, 2015)

Joonis 7 esitab killustikuproovide massikadu protsentides (F%) pärast külmutamis-sulatustsükleid 1% NaCl lahuses. See katse simuleerib reaalsemaid teede tingimusi, kus teekonstruktsioone mõjutab soolalahus, ning võimaldab hinnata materjalide vastupidavust soola ja külma koosmõjule (Prank, 2015).



**Joonis 7.** Külmakindlus soolalahuses (1% NaCl) (joonis võetud Prank, 2015)

#### **Muud potentsiaalsed kasutusvaldkonnad:**

- **Põllumajandus:** Aheraine võib sisaldada taimedele vajalikke elemente (nt kaltsium, magneesium) ja seda võib potentsiaalselt kasutada mullaparandusainena (Siilik, 2014).
- **CO<sub>2</sub> sidumine:** Aheraine karbonaatne koostis võimaldab selle kasutamist CO<sub>2</sub> sidumiseks mineraliseerimise protsessis (Uibu, et al., 2010).
- **Plastmaterjalide täiteaine:** Strazdin (2021) tulemused näitasid, et kaevandamisjäätmete kasutamine täiteainena plastmaterjalides on võimalik.
- **Tehismaastikud ja spordirajatised:** Aherainemäed kui võimalikud rekreatiivsed alad. Nt Aidu kärjäär, kus kärjääris on tagasi pandud aherainest kujundatud elamusspordi keskus.

Lisaks loetletud potentsiaalsetele kasutusvõimalustele on oluline arvestada aheraines esineva kerogeeni (jääkpõlevkivi) sisaldusega, eriti selle peenemas fraktsioonis, mis võib mõjutada materjali veeimavust, külmakindlust ja teatud rakenduste puhul ka keemilisi reaktsioone. See tingib vajaduse kerogeeni sisaldusega arvestada konkreetsete väärimisprotsesside ja -rakenduste planeerimisel. Lisaks saab kerogeeni aherainest eraldades kasutada eraldiseisva toormena.

### **4.3. Tehnoloogilised ja majanduslikud aspektid**

Aheraine taaskasutamine nõuab erinevaid ümbertöötlemistehnoloogiaid ja sellega kaasnevad majanduslikud kaalutlused.

#### **Vajalikud ümbertöötlemistehnoloogiad:**

- **Mehaaniline töötlemine:** Aheraine kasutamine ehitusmaterjalina nõuab purustamist, sõelumist ja fraktsioneerimist. TalTechi Geoloogia instituudi aruanne "Põlevkivi kaevise allmaarikastamine ja rikastusjääkide ladustamine väljatöötatud alasse" (Väli, et al., 2021) kirjeldab detailselt erinevaid purustamise ja sõelumise meetodeid (nt hammasvaltspurustid, sõelpurustid).
- **Keemiline töötlemine:** Muud kasutusvaldkonnad (nt CO<sub>2</sub> sidumine, saasteainete sidumine) võivad nõuda keemilist töötlemist, nagu kaltsineerimine või happega töötlemine.

**Esialgne majandusliku tasuvuse hinnang:** Aheraine taaskasutamise majanduslik tasuvus sõltub mitmest tegurist:

- **Ressursi kättesaadavus:** Ida-Virumaal on aherainet suures koguses, mis tagab toorme kättesaadavuse.

- **Transpordikulud:** Puistangute paiknemine kaevanduste läheduses võib vähendada transpordikulusid. Aherainekillustik on konkurentsivõimeline isegi kuni 60 km ja suurema veokauguse korral võrreldes paekillustikuga, mis toob kaasa potentsiaalse säästu kompleksstabi maksumuses kuni 20% (Teede Tehnokeskus AS, 2015).
- **Töötlemiskulud:** Ümbertöötlemistehnoloogiate maksumus on oluline kuluartikkel. Kukk (2012) mainib, et suurte tükkide purustamine täiteaineks sobivasse fraktsiooni on lisakulu, mis vähendab majanduslikku kasu.
- **Potentsiaalne turuväärtus:** Lõpptoodete, nt killustik, tsement turuväärtus määrab taaskasutamise majandusliku tasuvuse.

#### 4.4. Tuleviku uurimissuunad

Antud teema raames oleks vaja veel uurida:

- Aheraine peenfraktsiooni omaduste detailsem iseloomustamine ja selle potentsiaalne kasutamine (nt uute ehitusmaterjalide, nagu geopolümeerid, tootmiseks).
- Aheraine leostumise pikaajaline mõju keskkonnale ja selle leevendamise meetodid.
- Uute tehnoloogiate (nt mineraliseerimine) arendamine aheraine CO<sub>2</sub> sidumiseks.
- Aheraine kasutamise majanduslik tasuvus erinevates kasutusvaldkondades, arvestades transpordi- ja töötlemiskulusid.
- Teede Tehnokeskuse AS lõpparuanne (2015) soovib jätkata stabiisegude uuringuid aheraine ja põlevkivituha baasil, kombineerides neid freespuru ja muude sideainetega nagu bituumenemulsioon, põlevkivibituumen ja tsement.
- Katselõikudena tuleks uurida tuha kasutamisega seotud probleeme (nt tuha omaduste stabiilsus, alg- ja lõpptugevus, põikpragude risk).
- Immutamise osas tuleks uurida paekivi veeimavuse dünaamikat ja kaaluda katsemetoodikate muutmist (nt veesoleku aja lühendamine), et paremini iseloomustada immutuse mõju reaalses teetarindis.
- Aleks Strazdini magistritöö (2021) soovib edasisi uuringuid kaevandamisjätmete kasutamiseks plastmaterjalides täiteainena, et suurendada jätmete ringlussevõttu.

## 5. Kokkuvõte

Põlevkivi kaevandamise ja rikastamise käigus on aastakümnete jooksul kuhjatud üle Ida-Virumaa hulgaliselt aherainepuistanguid. Mõni üksik vana ja aktiivsest kasutusest välja puistang on tänasel päeval nõ kasutusel madalakvaliteedilise killustiku purustamise ja tootmise kohana. Enamus aherainemägedest on kasutuseta. Kuid tegemist on materjaliga mida saab ja peaks kasutusse võtma otse maa seest kaevandatava lubjakivi asemel. Seni on aherainet peamiselt kasutatud madalakvaliteetse killustikuna täitematerjalina. Kuid püüdma peaks aheraine suurema väärimdamise poole. Esimene samm selleks on hinnata aherainepuistangutes oleva materjali koostis ja selle muutlikkus. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli alustada aheraine puistangute materjali koostise uuringutega ja uurida aheraine väärimdamise ja taaskasutuse võimalusi.

### Peamised uurimistulemused ja järeldused:

- Ida-Virumaa aherainepuistangud on koostiselt heterogeensed uuritud puistangute vahel, kuid üsna ühtse koostisega ühe puistangu piires. Muutlikus puistangute vahel on tingitud aluspõhja geoloogiast, kaevandamise ja rikastamise tehnoloogiatest ning puistangute kujunemise ajaloost.
- Peamised mineraalsed komponendid aheraines on kaltsiit, dolomiit, kvarts ja savimineraalid. Aheraine keemilise koostise analüüsi tulemused langesid hästi kokku proovide mineraalse koostisega, näidates koostise varieeruvust uuritud puistangute vahel
- Aheraine koostisest lähtuvalt on potentsiaali selle kasutamiseks mitmel otstarbel: ehitusmaterjalina (betooni täiteaine), põllumajanduses (mullaparandajana). Eriti paljutootav oleks kvaliteetsema aheraine kasutamine plastmaterjalides täiteainena ja betooni 3D-printimisel.
- Aheraine omaduste parandamine läbi immutustehnoloogiate teedeehituse jaoks võiks olla üks viis seni vähesese kvaliteedinõuetega aherainekillustiku kasutamiseks nõ suurema kvaliteedinõudega teehituses.
- Aheraine ja põlevkivituha kasutamine teedeehituses ning betooni 3D-printimisel on tehniliselt võimalik, vähendades vajadust looduslike materjalide järele ning pakkudes keskkonnasõbralikumaid lahendusi.

### Vastused püstitatud uurimisküsimustele:

- **Kas aheraine puistangutes eristame lubjakivi süstemaatilist koostiselist erinevust ja kas või kuidas see mõjutab aheraine võimalikku taaskasutust ja väärimdamist uuteks toodeteks?** Jah, uuring kinnitas aheraine koostiselist heterogeensust puistangute vahel. See varieeruvus mõjutab aheraine sobivust erinevateks taaskasutusviisideks.

Näiteks kõrgema kaltsiidi sisaldusega aheraine sobib paremini lubjakivi asendamiseks ehituses ja samuti mullaparandajana happeliste muldade neutraliseerijana. Orgaanilise aine sisaldus mõjutab selle potentsiaali mullaparanduses või termilises väärindamises.

- **Millised on aheraine taaskasutuse võimalused, mis ei piirdu vaid (madala)kvaliteedilise lubjakivi killustiku tootmisega?** Lisaks killustikule on aherainel potentsiaali betooni täiteainena, happeliste muldade neutraliseerijana, saasteainete sidujana, mullaparandusainena põllumajanduses, CO<sub>2</sub> sidumiseks mineraliseerimisel, plastmaterjalide täiteainena ning tehismaastike ja spordirajatiste rajamiseks. Eriti esile tõuseb selle potentsiaal 3D-prinditavas betoonis.
- **Millised on ümbertöötlemise ja väärindamise võimalused arvestades tänapäevaseid olemasolevaid tehnoloogiaid ja esialgne majanduslik tasuvuse hinnang?** Ümbertöötlemiseks on vajalik mehaaniline (purustamine, sõelumine) ja vajadusel keemiline töötlemine. Kuigi need eeldavad investeringuid, on aheraine laialdane kättesaadavus ja madal omahind ning vähenevad transpordikulud võrreldes looduslike materjalidega majanduslikult soodsad. Esialgsed hinnangud näitavad märkimisväärset säästupotentsiaali (kuni 20% teatud segude puhul). Edukaid analooge leidub ka mujal maailmas ja ka Eestis (nt põlevkivituha kasutamine tee-ehituses ja 3D-printimises).

**Aheraine väärindamise potentsiaal ja soovitused edasiseks tegevuseks:** Aheraine väärindamisel on oluline roll ringmajanduse eesmärkide saavutamisel ning see aitab vähendada nii keskkonnakoormust kui ka säästa looduslike ressursse. Ida-Virumaa aherainepuistangud kujutavad endast tohutut ressursi, mis vajab süsteemset ja teaduspõhist lähenemist.

## Summary

### "Geochemical and Mineralogical Characterization of Oil Shale Mine Waste Rock Dumps in Ida-Viru County and Their Valorization Potential as a Secondary Raw Material"

Bruno Kadak

Over the decades, numerous waste rock dumps have been accumulated across Ida-Viru County as a result of oil shale mining and processing. A few old and inactive dumps are currently being used for the production of low-quality crushed stone. However, most of the waste rock heaps remain unused. Yet this is a material that could and should be utilized as an alternative to virgin limestone extracted directly from the earth. Until now, waste rock has primarily been used as low-quality aggregate for filling purposes. However, efforts should be made toward adding greater value to mine waste rock. The first step in this process is to evaluate the composition and variability of the material in these dumps.

The aim of this bachelor's thesis was to initiate studies on the composition of materials in waste rock dumps and to explore the possibilities for their valorization and reuse.

Key research findings and conclusions:

- The waste rock dumps in Ida-Viru County are compositionally heterogeneous between different dumps but relatively uniform within an individual dump. The variability between dumps is due to the underlying geology of specific mining area, mining and processing technologies, and the historical build up of the dumps.
- The main mineral components in the mine waste rock are calcite, dolomite, quartz, and clay minerals. The results of chemical composition analysis closely matched the mineral composition of the samples, indicating variability between the investigated dumps.
- Based on its composition, mine waste rock has potential for multiple applications: as a construction material (e.g., concrete filler), in agriculture (e.g., soil conditioner /liming acidic soils), and, notably, as a filler in plastic material and for use in 3D concrete printing, especially when using higher-quality waste rock.
- Improving the properties of mine waste rock through impregnation technologies could be one method to upgrade currently lower-quality aggregate for use in road construction with higher quality requirements.
- The combined use of mine waste rock and oil shale ash in road construction and 3D concrete printing is technically feasible, reducing the need for natural resources and offering more environmentally friendly solutions.

## Tänuõnad

Selle lõputöö välitöid rahastati Euroopa Liidu kaasrahastusel projekti „Ida Viru ettevõtluse teadmismahukuse suurendamise toetus: teadusvõimekuse pakkumise arendamine Ida Virumaal TA võrgustiku loomiseks“ raames.

Soovin avaldada siirast tänu oma juhendajale, Riho Mõtlepale. Juhendaja asjatundlikud nõuanded ja konstruktiivne kriitika olid bakalaureusetöö valmimise protsessi vältel edukaks läbiviimiseks suure väärtusega.

Toetuse ja innustuse eest kogu sellel väljakutse vältel on siirad tänud, Kairi Põldsaarele.

Lisaks tänan kogu osakonda toetavale õhkkonnale kus sain läbi viia oma laboratoorsed analüüsid.

Aitäh ka minu kallile perele ja sõpradele kes pakkusid mulle moraalset tuge ja mõistmist selle töö kirjutamise ajal.

See töö ei oleks valminud ilma teie kõigi panuseta.

## Kasutatud kirjandus

**Conect.** (2025). *Proportioning of Oil Shale Ash for Sustainable 3D Printable Mortars*. [WWW] [https://conect.rtu.lv/wp-content/uploads/Alise-Sapata\\_Proportioning-of-Oil-Shale-Ash-for-Sustainable-3D-Printable-Mortars.pdf](https://conect.rtu.lv/wp-content/uploads/Alise-Sapata_Proportioning-of-Oil-Shale-Ash-for-Sustainable-3D-Printable-Mortars.pdf)

**Eesti põlevkivitööstuse aastaraamat 2023.** [WWW] [https://data.vk.edu.ee/PKK\\_AR\\_23/](https://data.vk.edu.ee/PKK_AR_23/)

**Enefit ringmajandus.** [WWW] <https://www.enefit.com/et/ettevottest/vastutustundlik-energia/keskkond/ringmajandus>

**Ehitusuudised.ee.** (2023, 20. märts). *Betooni 3D-printimine on uus, aga jõuliselt arenev tehnoloogia*. [WWW] <https://www.ehitusuudised.ee/uudised/2023/03/20/betooni-3d-printimine-on-uus-aga-jouuliselt-arenev-tehnoloogia>

**ERR.** (2020, 15. jaanuar). *Rail Baltic ehitamisel kasutatakse ka põlevkivi aherainet*. [WWW] <https://www.err.ee/1026193/rail-balticu-ehitamisel-kasutatakse-ka-polevkivi-aherainet>

**Hanžič, I., Štefančič, M., Šter, K., Zalar Serjun, V., Sinka, M., Sapata, A. ja Šahmenko, G.** (2025). Collision Milling of Oil Shale Ash as Constituent Pretreatment in Concrete 3D Printing. *MDPI*, 10(1), 18. doi:10.3390/app10010018

**Heidelberg Materials.** (2025). *3D concrete printing*. [WWW] <https://www.heidelbergmaterials.com/en/sustainability/we-decarbonize-the-construction-industry/3d-concrete-printing>

**KLIM.** (2023). Riigi jäätmekava 2023-2028. Kliimaministeerium, Tallinn.

**Käiss, E.** (2008). Põlevkivimaa tehismaastik kui võimalik tulevane geopark. Kogumikus: I. Valgma (toim.), *Põlevkivimaa- probleemid ja tulevik*, 33-35.

**Keskonnaagentuur.** (2021). *Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016-2030 perioodi 2016-2020 mõjuanalüüs*.

**Maves.** (2014). *Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016-2030 keskkonnamõju strateegiline hindamise aruanne*. Tallinn.

**Kukk, R.** (2012). Põlevkivi aheraine kasutamise ja ümbertöötlemise võimalused. Kogumikus: *Kaevandamine ja keskkond. Mäeinstituut 2012*, 70-73.

**Kuusik, R., Peterson, L., Mägi, T. ja Triikkel, A.** (2007). Carbonation of oil shale ash. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(6), 661–667. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/233215888\\_Carbonation\\_of\\_oil\\_shale\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/233215888_Carbonation_of_oil_shale_ash)

**Mäeõpik.** (2012). *Aheraine kasutusvõimalused*. [WWW] <http://maeopik.blogspot.com/2012/05/aheraine-kasutusvoimalused.html>

**OSAMAT.** (2025). *Põlevkivituha keskkonnaohutu kasutamine teede ehituses. Pilootprojekt Eestis. Layman's Report.*

**Paaver, P.** (2021). Mechanical Activation of the Ca-Rich Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash: Development of an Alternative Binder System. *Minerals*, 11(1), 3 <https://doi.org/10.3390/min11010003>

**Paaver, P.** (2021). Development of alternative binders based on oil shale fly ash. PhD teesid. Tartu Ülikool, Loodus- ja täppisteaduste valdkond, ökoloogia ja maateaduste instituut, 130 lk.

**Paiste, P.** (2017). Geopolymeric potential of the Estonian oil shale processing waste. PhD teesid. Tartu Ülikool, Loodus- ja tehnoloogiateaduskond, Tartu Ülikooli Ökoloogia- ja Maateaduste Instituut, 125 lk.

**Postimees Majandus.** (2021, 9. september). *Eesti Energia: põlevkivi aheraine sobib mitmel pool ehituseks.* [WWW] <https://majandus.postimees.ee/7326753/eesti-energia-polevkivi-aheraine-sobib-mitmel-pool-ehituseks>

**Prank, H.** (2015). *Killustiku ja aherainekillustiku väärindamine.* Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Mäeinstituut. 52 lk.

**Reinsalu, E.** (2011). *Eesti mäendus.* Tallinn: TTÜ Kirjastus. 186 lk.

**RTU.** (2025). *Transforming Waste Into High-Performance 3D Printable Cementitious Composite: About project.* [WWW] <https://transition.rtu.lv/>

**Siilik, K.** (2014). *Erinevate substraatide ning mulla elustiku mõju männi- ja kasevarise lagunemisele.* Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž. 46 lk.

**Siirde, A.** (2009). Põlevkivid - nende kasutamine ja töötlemise tehnoloogiad. Kogumikus: *Põlevkivi kaevandamise, töötlemise ja hariduse perspektiivid*, lk 22-24. Kohtla-Järve: Infotrükk.

**Sillamäe, K.** (2014). *Kaevandamise jääkmaterjalide kasutusvõimaluste uuring.* Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn, 172 lk.

**Sinka, M., Sapata, A., Spurina, E., Puzule, L. ja Šahmenko, G.** (2025). *Proportioning of Oil Shale Ash for Sustainable 3D Printable Mortars.* ResearchGate. [WWW] [https://www.researchgate.net/publication/387988009\\_Proportioning\\_of\\_Oil\\_Shale\\_Ash\\_for\\_Sustainable\\_3D\\_Printable\\_Mortars](https://www.researchgate.net/publication/387988009_Proportioning_of_Oil_Shale_Ash_for_Sustainable_3D_Printable_Mortars)

**Strazdin, A.** (2021). *Põlevkivi aheraine ja paekivisöelme kasutamine plastmaterjalis täiteainena.* Magistritöö. TalTech, 65 lk.

**Tallinna Tehnikakõrgkool.** (2014) *Kaevandamise jääkmaterjalide kasutusvõimaluste uuring*

**Tallinna Tehnikakõrgkool.** (2025). *Betooni 3D-printimise labor.* [WWW] <https://www.ttkk.ee/ettevotjale/laborid/ehitusinstituut/betooni-3d-printimise-labor/>

**Tammiksaar, E. (2013).** Põhijooni Põlevkivitööstuse arengust Eestis. [WWW] <https://www.vkg.ee/wp-content/uploads/2019/10/pohijooni-polevkiviolitoostuse-arengust-eestis.pdf>

**Tammiksaar, E. ja Pae, T. (2012).** Põlevkivi ajalugu. Eesti Loodus. [WWW] [http://vana.loodusajakiri.ee/eesti\\_loodus/artikkel4966\\_4941.html](http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/artikkel4966_4941.html)

**Teede Tehnokeskus AS.** (2015). *Aheraine killustiku omaduste kaardistamine Eestis ning nõrga kivi vääristamise teadusuuringud.* Lõpparuanne.

**Tohver, T. (2010).** Utilization of waste rock from oil shale mining. *Oil Shale*, 4(27), 239-241.

**Uibu, M., Velts, O. ja Kuusik, R. (2010).** Developments in CO<sub>2</sub> mineral carbonation of oil shale ash. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 576–581. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.01.077

**Vertico.** (2025, 15. märts). *What is 3D Concrete Printing? Definition, Process & Benefits.* [WWW] <https://www.vertico.com/3d-concrete-printing>

**Visionest Institute.** (2023, 3. veebruar). *Betooni 3D-printimine Eesti kogemuse näitel.* [WWW] <https://visionest.institute/2023/02/03/betooni-3d-printimine-eesti-kogemuse-naitel/>

**VKG.** Puhtama keskkonna nimel. [WWW] <https://www.vkg.ee/SAA2023/07-puhtama-keskkonna-nimel/>

**Väli, E., Reinsalu, E., Lüütse, E., Kauril, R. ja Põldema, T. (2021).** *Põlevkivi kaevisel allmaarikastamine ja rikastusjäätide ladustamine väljatöötatud alasse.* Aruanne. TalTech Geoloogia instituut, 134 lk.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Bruno Kadak,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Ida-Viru põlevkivi aherainepuistangute geokeemiline ja mineraloogiline iseloomustus ning väärindamise potentsiaal teise toormena,

mille juhendaja on Riho Mõtlep,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Bruno Kadak*

**26.05.2025**