



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Virumaa kolledž

**Jäätmekäitluses ringmajanduse põhimõtete järgimise  
vajalikkusest ja kasulikkusest OÜ NPM Silmet  
haruldaste metallide vabriku näitel**

**The necessity and utility of compliance with the principles of  
circular economy in waste management on the example of rare  
metals factory OÜ NPM Silmet**

KEEMIASTEKNOLOOGIA ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Žanna Ross

Üliõpilaskood: 178743EDKR

Juhendaja: Antonina Zguro, lektor

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"03 " juuni 2021

Autor: Žanna Ross

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle esitatud nõuetele

"07" juuni 2021

Juhendaja: Antonina Zguro

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"07" juuni 2021

Kaitsmiskomisjoni esimees ..... Antonina Zguro

/ nimi ja allkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS**

Mina **Žanna Ross** (sünnikuupäev: 13.03.1979)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Jäätmekäitluses ringmajanduse põhimõtete järgimise vajalikkusest ja kasulikkusest OÜ NPM SILMET haruldaste metallide vabriku näitel**, mille juhendaja on **Antonina Zguro**,
  - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas 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 punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

# TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Žanna Ross, 178743 EDKR

Õppekava, peeriala: EDKR16/17 - Keemiatehnoloogia

Juhendaja(d): lektor, Antonina Zguro, [antonina.zguro@taltech.ee](mailto:antonina.zguro@taltech.ee)

Konsultandid: Andrei Litvinjuk, tootmisdirektor, OÜ NPM Silmet, 53057029, [a.litvinjuk@neomaterials.com](mailto:a.litvinjuk@neomaterials.com); Anti Siinmaa, juhataja, AS Ökosil, 5177218, [anti@ecosil.ee](mailto:anti@ecosil.ee).

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Jäätmekäitluses ringmajanduse põhimõtete järgimise vajalikkusest ja kasulikkusest OÜ NPM SILMET haruldaste metallide vabriku näitel

(inglise keeles) The necessity and utility of compliance with the principles of circular economy in waste management on the example of rare metals factory OÜ NPM Silmet

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade Eestis tootmises tekkivate ohtlike jäätmete käitlemise eripäradest, ka olemasolevast situatsioonist jäätmemajanduses ringmajanduse põhimõtete rakendamiseks.
2. OÜ NPM Silmet vabriku näitel läbi vaadata võimalikke alternatiive tootmisjääkide käitlemiseks.
3. Selgitada ringmajanduse põhimõtete jälgimise vajalikkust keskkonnaohtude vältimiseks, ka selle vajalikkust ettevõttele edasiviivaks tegutsemiseks.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Jäätmekäitlust reguleeritava seadusandluse, statistikaandmete, ringmajanduse põhimõtete ülevaate koostamine.	02.2021
2.	OÜ NPM Silmet olemasoleva tehnoloogia kirjeldus, võimalikke ohtlike jäätmete käitlusviiside uurimine, ringmajanduse põhimõtete seisukohalt parima lahenduse valik, arvutuste vormistamine. Kokkuvõtete kirjutamine.	03.2021
3.	Lõputöö viimistlemine (eesti ja inglise keelsed kokkuvõtted, vormistus)	04.2021

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:**

"25" mai 2021.a

**Üliõpilane:** Žanna Ross

.....  
/allkiri/

"16" veebruar 2021.a

**Juhendaja:** Antonina Zguro

.....  
/allkiri/

"20" veebruar 2021.a

**Programmijuht:** Antonina Zguro

.....  
/allkiri/

"20" veebruar 2021.a

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. EESTI JÄÄTMEKÄITLUSE ÜLEVAADE, RINGMAJANDUSE PÕHIMÕTTED .....	11
1.1 Jäätmekäitlust reguleeriv seadusandlus.....	11
1.2 Jäätmekäitluse ülevaade ja statistika .....	12
1.3 Ringmajanduse põhimõtted .....	15
2 OÜ NPM SILMET TOOTMISTEGEVUSES RINGMAJANDUSE PÕHIMÕTETE VAJALIKKUS JA KASULIKKUS .....	17
2.1 Sillamäe tootmistsooni tuhahoidla ja neutraliseerimissõlm .....	17
2.2 OÜ NPM Silmet tegevuse lühikirjeldus ja HMV tehnoloogia .....	19
2.3 Haruldaste metallide vabriku jäätmekäitlus.....	23
2.4 Euroopa keemiatööstuse ringmajanduse tehnoloogiad.....	25
2.4.1 Washington Steel protsess.....	26
2.4.2 Pyromars protsess (pürohüdrolüüs) .....	27
2.4.3 Outokumpu protsess.....	30
3 JÄÄTMEKÄITLUSE VÕIMALIKE ALTERNATIIVIDE KESKKONNA- JA MAJANDUSASPEKTID .....	31
3.1 Null alternatiivi keskkonna- ja majanduspektid .....	31
3.2 Alternatiiv 1 ehk ohtlike jäätmete utiliseerimise või taaskasutamise aspektid tahke neutraalse jäätmena .....	31
3.2.1 Ohtlike jäätmete põlevkivituhaga neutraliseerimise aspektid .....	32
3.2.2 Ohtlike jäätmete kustutamata lubjaga neutraliseerimise aspektid .....	36
3.2.3 CO <sub>2</sub> kasutamise võimalused neutraliseerimisprotsessi kiirendamiseks .....	38
3.3 Alternatiiv 2 ehk maailma uute tehnoloogiate kasutamise aspektid .....	40
KOKKUVÕTE .....	41
SUMMARY.....	43
KASUTATUD KIRJANDUS .....	45
LISAD .....	49
LISA 1. ANDMED OÜ-S NPM SILMET TEKINUD RAFINAATIDE JA NENDE KOOSTISE KOHTA.....	50
LISA 2. TUHKADE KEEMILINE KOOSTIS.....	51

## EESSÕNA

OÜ NPM Silmet on suur Ida-Virumaal asuv tööstusettevõte, kelle tegevuskava põhieesmärk on kasutada tekkivaid jäätmeid ressursina ja vähendada prügilasse saadetavate jäätmete kogust.

Lõputöö eesmärgid sõnastati OÜ NPM Silmet tootmisdirektori Andrei Litvinjuk algatusel, kes juhendas autorit töö koostamisel.

Lõputöö teema on aktuaalne, kuna vaatab läbi ohtlike jäätmete võimalikud taaskasutusmeetodid, uurib tootmisjääkide paremast käitlemisest tõusvat võimalikku kasu. Igal tootjal tekib jäätmeid – see on tootmise lahutamatu osa. Samuti on iga tootja silmitsi probleemiga, mida jäätmetega edasi teha. Jäätmete taaskasutamine võimalikult suures ulatuses on üks jäätmemajanduse esmaseid prioriteete jäätmetekke vältimise kõrval. Jäätmetekke vältimine ja ringlussevõtt on ringmajanduse lahutamatud osad.

Sooviksin avaldada oma siirast tänu Eesti Energia Energiakaubanduse töötajale Lauri Laanemäe ja Vaivara prügikeskuse töötajatele koostöö eest, AS Ökosil juhatajale Anti Siinmaa esitatud abimaterjalide eest, erilised tänuavaldused lõputöö juhendajale TalTech Virumaa Kolledži lektorile Antonina Zguro jooksvate küsimuste lahendamisel abi eest.

Võtmesõnad: keemiatööstus, jäätmekäitlus, ringmajandus, põlevkivituha kasutamine, neutraliseerimissõlm, hapete regenerereerimine, diplomitöö.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

PVT – parim võimalik tehnika (inglise keeles: best available technology või technique(s), lühendatult BAT) on käitajale kättesaadav nüüdisaegne tehnika, mille kasutamine on majanduslikult tootjale vastuvõetav, tagades ühtlasi keskkonnanõuete parima täitmise.

ED – elektrodialüüs on eraldamise protsess, mille käigus lahustunud aine ioonid juhitakse läbi ioonselektiivset membraani elektrilise potentsiaali olemasolul.

EDBM – bipolaarne elektrodialüüs – elektrodialüüs bipolaarse membraanidega. Bipolaarne membraan on erilise tüübi membraan, mis sisaldab kaks polümeerkihti, üks neist laseb läbi ainult anioone, aga teine kiht – ainult katioone.

Reduktsioon – redoksreaktsioonis toimuv protsess (elektroni liitmine)

HMMV - haruldaste muldmetallide vabrik

HMV - haruldaste metallide vabrik

MV – metallurgiavabrik

Rafinaat – aine lahus vesifaasis pärast ekstraktsiooni. Tekstis: väävelhappe ( $H_2SO_4$ ) ja vesinikfluoriidhappe (HF) vesilahus, mis sisaldab ka raskmetalle jm komponente.

CFBC – tsirkuleeriv keevkihtpõletus (ingl k Circulating Fluidized Bed Combustion)

PC – tolmipõletus (ingl k Pulverized Combustion)

SEJ – soojuselektrijaam



## SISSEJUHATUS

Tootmisprotsessi üheks oluliseks osaks on tootmisjäägid/jäätmed. Ettevõtted tegelevad juba täna tõsiselt tootmisjääkide vähendamisega – neid tekib tänu oskuslikule planeerimisele vähem ja ettevõtted otsivad ise lahendusi, kuidas oma tootmise jäägid suunata tagasi tootmisesse või kasutada teiste toodete tootmiseks.[1] Jäätmehooldus ja -käitlus jääb säästva arengu poole püüdlevas maailmas erilise tähelepanu alla veel pikka aega.

Pidevalt kasvav jäätmete hulk tekitab kõikjal probleeme. Prügimäele jõuavad ka esemed, mida saaks taaskasutada või ümber töötada. Ohtlike jäätmete ladestumine mõjutab pinnase, joogivee ja õhu kvaliteeti. [7]

Jäätmetekke vältimise potentsiaalne kasu on tohutu. Pealegi aitab see EL-l liikuda ringmajanduse poole. Jäätmehierarhias kõrgemale liikumisega kaasneb keskkonnaalane kasu – isegi riikides, kus ringlussevõtu- ja taaskasutusmäärad on kõrged.

Eesti tööstuses on ringmajanduse ärimudeli põhjal tegutsevaid ettevõtteid veel vähe. Eksperdid on aga veendunud, et ringmajanduses olevatel ettevõtetel saab tulevikus olema selge eelis lineaarsete tootmiste ees.[1]

Eesti Keskkonnaministeeriumi ja Eesti Ringmajandusettevõtete Liidu esindajate sõnul ringselt majandav ühiskond võiks olla Eesti jaoks pikem strateegiline eesmärk ja selle saavutamine on täiesti reaalne. Samas pole nii oluline, kas Eesti üleminek ringmajandusele on täielik või osaline, vaid see, et Eesti majandusele tõuseks ringmajandusest reaalne kasu ja juba lähiaastatel. [1]

Lõputöö eesmärgiks on OÜ NPM Silmet näitel uurida tootmisprotsessis tekkivate ohtlike tootmisjäätmete võimalikke käitlemisviise, pakkuda parimat lahendust ning selle alusel näidata ringmajanduse põhimõtete vajalikkust ja kasulikkust ettevõttele.

Ressursitõhususe ja jäätmetekke vähendamise saavutamisele aitab kaasa uute tehnoloogiate kasutuselevõtt, mis võimaldab neid materjale, mida varem käideldi jäätmetena, käsitleda kõrvalsaadusena, ehk töötlemisjäätmete suurem taaskasutamine.[30]

Lõputöö koosneb kolmest peatükist. Esimene peatükk põhineb Eestis tekkivate tootmisjäätmete ja nende taaskasutuse võimaluste statistikaandmetel ja annab ülevaate Eestis ja EL-s tegutsevatest jäätmekäitlusega seotud seadusandlusest ja põhimõtetest.

Teine peatükk iseloomustab OÜ NPM Silmet olukorda: kirjeldatakse ettevõtte struktuuri, tegevuse korraldust, jäätmeteket ja olemasolevat jäätmemajanduse olukorda

neutraliseerimissõlme tehnoloogiaga, antakse ülevaate Euroopas väljatöötatud tehnoloogiatest happejääkide taaskasutamiseks.

Kolmas peatükk kajastab tehase happejääkide taaskasutuse erinevate võimalike alternatiivide analüüsi tulemusi, ka majandusaspekte. Välja toodud järeldused on tehtud analüüsi tulemustest lähtuvalt. Võrreldakse tootmisjääkide tavalist üleandmist prügilasse utiliseerimiseks, nende neutraliseerimist lubja ja põlevkivituhaga inertse tahke materjali saamiseks ja edasise taaskasutamise võimalusi, pakutakse ka lahendus toorme hoidmiseks piiratud tootmisterritooriumi tingimustel, nimetatakse maailma tehnoloogiaid, mis võimaldavad vältida tulevikus jäätmete tekkimist: ümber töödelda tootmisjääkmeid niimoodi, et oleks võimalik suunata neid tagasi protsessi. Kaasaegsete uuringute alusel [26,29] läbi vaadatakse CO<sub>2</sub> kasutamise võimalus protsessis jäätmete neutraliseerimise kiirendamise eesmärgil, ka kohaliku SEJ õhuheitmete vähendamiseks.

Selle peatüki eesmärgiks on näidata OÜ NPM Silmet näitel, et ringmajanduse poole liikumine on kasulik mitmes mõttes: lisaks keskkonnamõju vähendamisele saab ettevõtte ringmajanduse põhimõtet efektiivselt rakendades vähendada kulusid, suurendada kasvupotentsiaali ja edendada ka oma mainet. Kindlasti on vaja panustada nii raha kui ka aega. Tuleb arvestada, et tõsisemate muudatuste tegemine vajab raha ja tulemusi näeb alles aastate pärast. Kuid kaasaegsete tehnoloogiate ja uusimate uuringute kasutuselevõtt aitavad viia ettevõtte uuele tasemele. [1]

Antud lõputöös esitatud andmed võiksid olla kasutatud materjalidena magistritöö kirjutamisel.

# **1. EESTI JÄÄTMEKÄITLUSE ÜLEVAADE, RINGMAJANDUSE PÕHIMÕTTED**

## **1.1 Jäätmekäitlust reguleeriv seadusandlus**

Tootmisettevõtete tegevus on vähemal või suuremal määral seotud jäätmete käitlemisega. OÜ NPM Silmet tootmistegevuses tekkivad tava-, ohtlikud ja radioaktiivsed jäätmed.

Ohtlikud jäätmed on Komisjoni määruse (EL) nr 1357/2014 kohaselt jäätmed, mis vähemalt ühe ohtliku omaduse tõttu võivad olla ohtlikud inimese tervisele, varale või keskkonnale ning jäätmed, millel võivad ilmneda ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jäätmetes otseselt.[2]

Radioaktiivsete jäätmetena käsitletakse radionukliide sisaldavaid või nendega saastunud aineid, materjale või esemeid, mille aktiivsus on suurem kiirgusseaduse alusel sätestatud tasemetest ning mida tulevikus ei kavatseta kasutada. Eesti radioaktiivsed jäätmevood on väikesed ning sobivate käitlusmeetodite valik suhteliselt piiratud.[2]

Ohtlikud jäätmed peavad olema kogutud kokku ja käideldud moel, mis avaldab kõige väiksemat mõju keskkonnale ja inimesele. Eelkõige peaks ohtlike jäämete teket vältima või vähendama. Kui see ei ole võimalik, tuleb need jäätmed ohutult käidelda: võtta uuesti ringlusse, taaskasutada energia saamiseks või täitematerjalina või ladestada.[3]

Iga kompleksloa omav ettevõtte oma tegevuses jälgib parima võimaliku tehnika nõudeid, ka jäätmetega tegeledes. PVT mõiste antakse EV Tööstusheite seaduses (RT I, 16.05.2013, 1): see on tegevusala ja selles rakendatavate tövõtete kõige tõhusam ja arenenum aste, kus mingit tehnikat võib pidada põhimõtteliselt sobivaks heite piirväärtuse aluse määramisel, et vältida või (kui see ei ole võimalik) vähendada heidet ja selle mõju keskkonnale.[12]

„Parim“ tähendab kõige mõjusamat ja tõhusamat viisi kogu keskkonna kõrgetasemeliseks kaitsmiseks. „Tehnika“ hõlmab nii käitises kasutatavat tehnoloogiat kui ka käitise kavandamist, ehitust, hooldamist, käitust ja tegevuse lõpetamist. „Võimalik tehnika“ tähendab niisugusel arengutasemel olevat tehnikat, mille kasutamine vastavas tööstusharus on nii kulusid kui eeliseid arvestades majanduslikult ja tehniliselt ettevõtjale vastuvõetav ja mõistlikul moel kättesaadav.[4]

Energiasääst, jäätmevaba tootmine ja CO<sub>2</sub>-neutraalne majandus on eesmärgid, mille poole Eesti keemiatööstuse ettevõtted püüdleavad, et jääda rahvusvahelisel turul konkurentsivõimelisteks.[5]

Ressursse on vaja hallata efektiivselt kogu nende olelusringi vältel, alates tootmisest ja tarbimisest kuni jäätmekäitluse ja taaskasutuseni. Seetõttu on konkurentsivõime ja jätkusuutliku majanduskasvu huvides tähtis üleminek ressursitõhusale ringmajandusele, kus peatähelepanu suunatakse olemasolevate materjalide ja toodete korduskasutusele, parandamisele, uuendamisele ning ringlusesse võtmisele.[6]

Ohtlike jäätmete käitlemine on rangelt reguleeritud, kuna nendega kokkupuutumine ja nende käitlemine nõuetele mittevastavalt võib põhjustada tugevaid tervisekahjustusi ning saastada õhku, vett ja pinnast. Eestis on peamiseks jäätmete käitlemist reguleerivaks seaduseks Jäätmeseadus (RT I 2004, 9, 52), radioaktiivsete jäätmete käitlemiseks on Kiirgusseadus (RT I, 28.06.2016, 2). Jäätmete ohtlikeks jäätmeteks liigitamine toimub keskkonnaministri määruse „Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu“ (RT I, 18.12.2015, 14) alusel. Koordineerib ja korraldab ohtlike jäätmete käitlemist Keskkonnaministeerium valdkonna õigusaktide ja riigi jäätmekavade alusel. Alates 2021 uut riiklikku jäätmekava ei koostata ning Keskkonnaministeerium on kavandanud käsitleda (ohtlike) jäätmete käitluse eesmärgi ja arengusuundi koostatavas ringmajanduse arengukavas. Keskkonnaamet annab ohtlike jäätmete tekitamiseks ja käitlemiseks keskkonnaloa. Ettevõtjad, kellel on jäätme- või kompleksluba, peavad vähemalt üks kord aastas esitama Keskkonnaametile aruande tekkinud, kogutud, vaheladustatud, töödeldud, taaskasutatud või kõrvaldatud jäätmete liigi, hulga, päritolu ja omaduste kohta. Ettevõtte edastab aruande jäätmearuandluse infosüsteemi. Keskkonnaamet teeb aruannete esmast kontrolli. Keskkonnaameti kontrollitud jäätmearuandeid töötleb Keskkonnaagentuur, kes täidab koos Keskkonnaministeeriumi ja Statistikaametiga riigisisest ning rahvusvahelist aruandluskohustust. Keskkonnainspeksioon teeb järelevalvet keskkonnaloobades seatud nõuete täitmise üle. Inspeksioon kontrollib jäätmearuannete esitamist ja neis toodud andmete vastavust loale; ohtlike jäätmete saatekirjade ja käitluslitsentside olemasolu ning nende nõuete täitmist. Samuti kontrollitakse ettevõtteid, kellel loa- ja aruandluskohustus puudub, kuid ohtlike jäätmeid siiski tekib.[3]

## **1.2 Jäätmekäitluse ülevaade ja statistika**

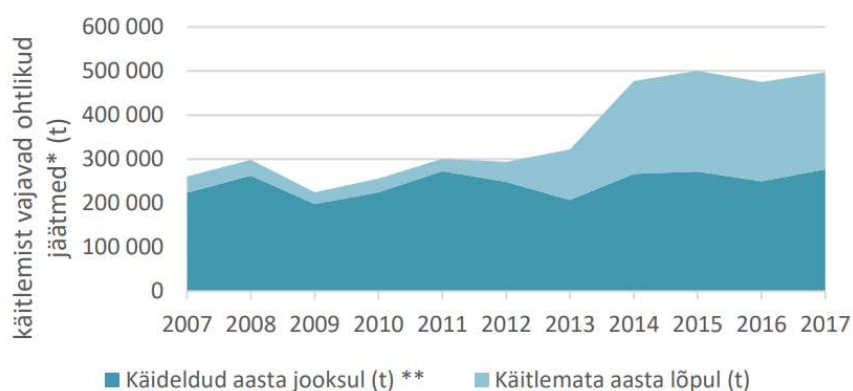
Jäätmestatistika andmeid on vaja jäätmekäitluse korraldamiseks ja jäätmekäitluse arendamiseks riigis. Ülevaade jäätmete kasutamisest aitab tõsta keskkonnateadlikkust.[7]

2017. aastal tekkis Eestis ohtlike jäätmeid üle 11 miljoni tonni, 2019. aastal 8,18 miljoni tonni. Sellest enamiku moodustasid põlevkivitööstuse ohtlikud jäätmed. [3,7]

Aastatel 2014.–2017. on oluliselt kasvanud nende ohtlike jäätmete hulk, mis aasta lõpuks on jäänud käitlemata.[17] Ohtlike jäätmete taaskasutuse määr seisuga 2019 oli ainult 10,2%. [7]

On lubatav, et ettevõtetel jääb aasta lõpus ladudesse jäätmeid, mida käideldakse järgnevatel aastatel. Jäätmeseaduse kohaselt tuleb jäätmed, mida ei ole võimalik taaskasutada, ladestada ühe aasta jooksul. Taaskasutusse suunatavad jäätmed võivad laos seista kuni kolm aastat.[3]

Valdav osa jäätmeist, mis käitlusele on jõudnud (2017. a 56% kõigist aasta jooksul käitlemist vajavatest jäätmetest, vt joonis 1.1), on võetud materjalina/ainena ringlusse (nt metallid), käideldud enne taaskasutusse võtmist (nt sortimine, mehaaniline ja bioloogiline eeltöötlus) või taaskasutatud põletades või pinnast täites (vt joonis 1.2).[3]



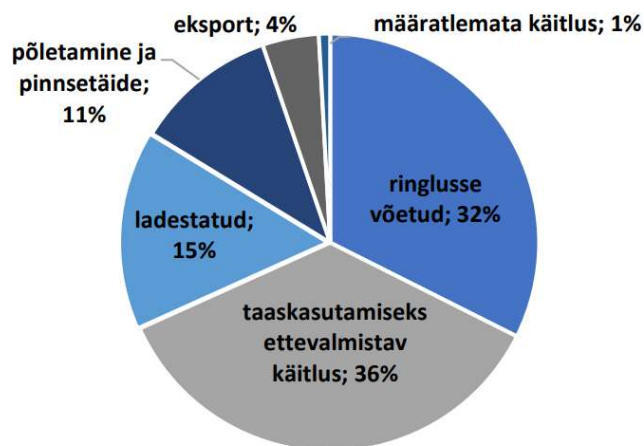
\* Käitlemist vajavad jäätmed = laoseis aasta algul + teke + import.

\*\* Käideldud aasta jooksul = taaskasutatud + ladestatud + kõrvaldatud + määratlemata käitlus + eksport.

Joonis 1.1. Käitlemist vajavate ja käitlusele suunatud ohtlike jäätmete (v.a põlevkivijäätmete) kogused aastatel 2007–2017.[3]

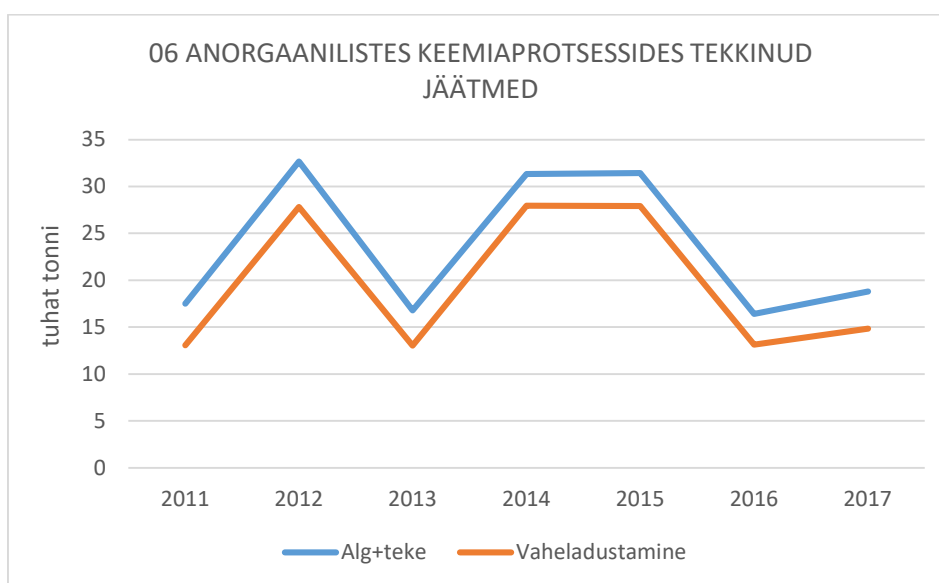
Ajavahemikul 2014–2017 moodustasid valdava osa (70%) aasta lõpul käitlemata ohtlikest jäätmetest need, mis tekivad peamiselt elektri- ja soojatootmisel tekkiva põlevkivituha ja metallitööstuse happejääkide segamisel ning mida on plaanis kasutada pinnasetäitematerjalina.[3] Käitlemata jäätmete järsu kasvu alates 2013. aastast ongi põhjustanud peamiselt nende setete korrektne arvele võtmine ja täies mahus mittetaaskasutamine järgnevatel aastatel jooksul.[3]

Keskkonnaministeeriumi selgitusel on ohtlike jäätmete ringlussevõtu ja taaskasutamise võimalused piiratud, need sõltuvad jäätmete omadustest ning tihti ei leidu neile sobivat taaskasutusmoodust. Sageli on ainus võimalik lahendus just nende ladestumine.[3]



Joonis 1.2. Ohtlike jäätmete (v.a põlevkivijäätmed) käitlemistoimingud aastal 2017. [3]

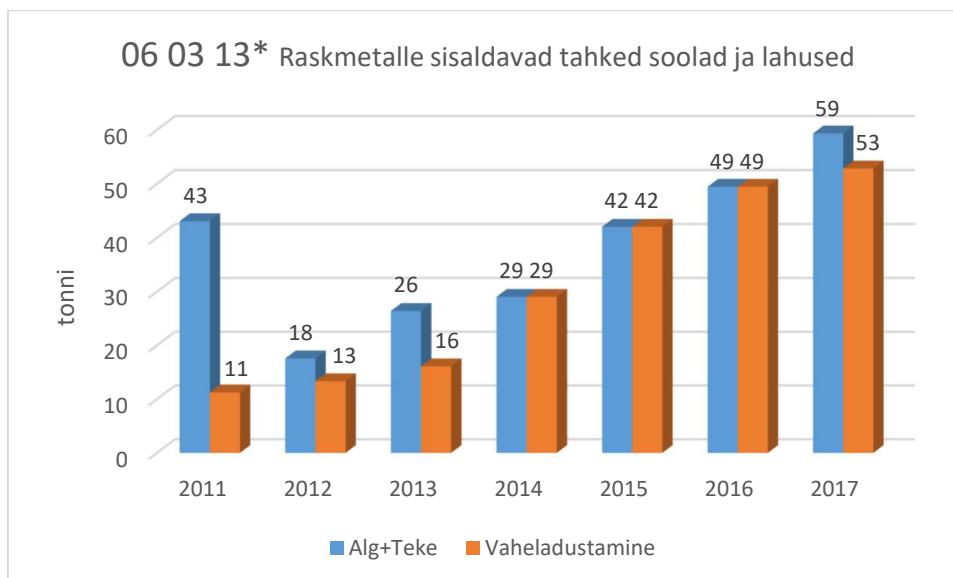
Keskonnaagentuuri andmete alusel perioodil 2011 – 2017 anorgaanilistes keemiaprotsessides (ka OÜ NPM Silmet tootmisprotsessid) tekkinud jäätmete kogused on järgmised (joonis 1.3):



Joonis 1.3. Anorgaanilistes keemiaprotsessides tekkinud jäätmete kogused aastatel 2011-2017.[8]

Aastased käideldavad jäätmekogused on aastatel 2011-2017 olnud keskmiselt 23,6 tuh. tonni, vaheladustatud kogused on järginud aastaste käideldavate koguste trendi. 2017. aastal moodustasid vaheladustatud kogused 79 % aastases käideldavast kogusest.[8]

Jäätmed, mis vaheladudes kuhjuvad (joonis 1.4):



Joonis 1.4. Tekkinud ja vaheladustatud raskemetalle sisaldavate jäätmete koguste võrdlus[8]

2017. a vaheladustati 14 785,327 tonni aluste valmistamisel, kokkusegamisel, jaotamisel ja kasutamisel tekkinud jäätmeid, 52,840 tonni soolade ja soolalahuste ning metallioksiidide valmistamisel, kokkusegamisel, jaotamisel ja kasutamisel tekkinud jäätmeid, 7,716 tonni muid jäätmeid.[8]

### 1.3 Ringmajanduse põhimõtted

Euroopa Liidus tekib igal aastal üle 2,5 miljardi tonni jäätmeid. EL jäätmekäitluse õigusakte praegu ajakohastatakse, et võtta kasutusele kestlikum mudel, mida nimetatakse ringmajanduseks.[8]

Ringmajandus põhineb uutel innovaativsetel tehnoloogiatel ja ärimudelitel, mille aluseks on ressursside ja energia tõhusam kasutamine, toodete korduskasutamine ja jagamine ning materjalide ringlussevõtt. [9] Praktikas tähendab see, et jäätmeid vähendatakse nii palju kui võimalik.

Ringmajanduse edendamisel tuleb eraldi tähelepanu pöörata tööstusettevõtetele sh ressursimahukatele ettevõtetele, kuna ringmajanduse põhimõtete laiem rakendamine aitab kõige enam kaasa süsinikuneutraalse, ressursitõhusa ja konkurentsivõimelise majandusmudeli arendamisele.[10]

Tootmisprotsessi üheks oluliseks osaks on ka tootmisjäädid/jäätmed. Ettevõtted tegelevad juba täna tõsiselt tootmisjääkide vähendamisega – neid tekib tänu oskuslikule

planeerimisele vähem ja ettevõtted otsivad ise lahendusi, kuidas oma tootmise jäägid suunata tagasi tootmisesse või kasutada teiste toodete tootmiseks. [1]

OÜ NPM Silmeti haruldaste metallide vabrik saab oma tootmisprotsessi tagajärjel tootmisjääke, mis sisaldavad kasutatud HF ja H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Hetkel kasutatava tehnoloogia – neutraliseerimissõlm tuhaladestul – on tegutsev ringmajanduse näide.

Antud lõputöös uuritakse ka teisi alternatiive tootmises tekkivate ohtlike jäätmete ohutu kõrvaldamiseks ja/või vähendamiseks, k.a. ka uued maailmatehnoloogiad HF ja H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> taastamiseks tagasi tootmisprotsessi suunamiseks. Ringmajanduse seisukohalt ressursitõhusus on üks peamisi tootmisettevõtete konkurentsivõime tõstmise meetodeid.



## **2 OÜ NPM SILMET TOOTMISTEGEVUSES RINGMAJANDUSE PÕHIMÕTETE VAJALIKKUS JA KASULIKKUS**

### **2.1 Sillamäe tootmistsooni tuhahoidla ja neutraliseerimissõlm**

AS Ökosil, OÜ NPM Silmet ja AS Silpower, kelle tegevus on omavahelises sõltuvuses, paiknevad Sillamäe linna tööstustsoonis Ida-Virumaal, mis võtab enda alla ca 750 ha Sõtke jõe vasakust kaldast Tallinn-Narva maanteest Narva laheni. AS Ökosil on keskkonnakaitse valdkonnas tegutsev ettevõtte, mis on loodud suurte keskkonnaprojektide juhtimiseks ning keskkonnakorralduse- ja seirega seonduvate teenuste osutamiseks.[11] AS Silpower varustab Sillamäe linna ja tööstusala ettevõtteid soojuse ja elektrienergiaga. OÜ NPM Silmet on üks Euroopa suurimate haruldaste metallide ja haruldaste muldmetallide tootjate hulgast.[12]

AS Ökosil keskkonnaprojektiks on Sillamäe Vabatsooni territooriumil asuv ja AS-ile Silpower kuuluv tuhahoidla. AS Ökosil opereerib tuhahoidlat ning tuha vastuvõtt, hapete neutraliseerimine ja tuha taaskasutus on AS-i Ökosil jäätmekäitlustegevus.

Tuhaväli on projekteeritud ja ehitatud basseinide süsteemina, kus asub ka neutraliseerimissõlm. Käitlemise protsess seisneb selles, et NPM Silmet OÜ-lt vastu võetud happelised jäätmed (peamiselt väävel- ja vesinikfluoriidhappe jäägid, pH-ga 3-4) suunatakse Aktsiaseltsi ÖKOSIL neutraliseerimissõlme, kus toimub neutraliseerimisprotsess, mille käigus segatakse hulka AS Silpower tootmisprotsessis tekkinud põlevkivituhk (pH 12). NPM Silmet OÜ-lt vastu võetud happelised jäätmed ja AS Silpower põlevkivituhapulp saavad neutraliseerimissõlme eraldi kinniste torustike kaudu. Jäätmed segatakse kokku neutraliseerimissõlme süvendis. Neutraliseerimisprotsessis tekkivad stabiliseeritud pH-ga 6-9 jäätmed, mis edasi taaskasutatakse täitematerjalina Sillamäe sadama laiendustöödel. [11] Niimoodi hetkel kehtiv tuhahoidla neutraliseerimissõlmega on nii parima võimaliku tehnika kui ka ringmajanduse näide.

Protsessis tekkivad raskmetallid ja happejäägid (väävelhape ja väävlishape, kood 06 01 01\* ja vesinikfluoriidhape, kood 06 01 03\*) kuuluvad ohtlike ainete hulka. Kuid neutraliseerimissõlmes tekivad vees raskesti lahustuvad soolad ning tootmisjääk muutub praktiliselt inertseks. Stabiliseerunud tuhk ja rafinaatide neutraliseerimisprodukt oma olemuselt ohtlike jäätmete klassi ei kuulu.

Käideldav põlevkivituhk ise ei ole keskkonnaohtlik, kuid probleem on tuhaarastussüsteemis ringlevas vees. Vette leostuvad tuhas sisalduvad ohtlikud ained.

Tuhaga kokkupuutunud vesi on kõrge pH-ga, mis omakorda soodustab ohtlike ainete väljaleostumist tuhast.[11]

Tuhaväljade keskkonnaohtlikkus on eelkõige seotud leeliselisest veest, mis tekib põlevkivituhas sisalduva lubja (CaO) kustutamise tuha märgärastuse käigus. SEJ tuha hüdroärastuse protsessis tekkinud liigvesi neutraliseeritakse ning see on pidevas ringluses ja põhjaveeuuringud ei ole tõendanud selle vee filtratsiooni kompaktselt tuhavälja aluselt põhjavette. Tuhaväljal karboniseerinud põlevkivituhk on inertne materjal, mis ei kujuta ohtu keskkonnale.[11]

Tuhaväljade keskkonnamõju hindamiseks tehtud arvukad uuringud ja nende alusel keskkonnamõtjude hindajate ekspertarvamused ei näita ega kinnita tuhaväljadelt levivat ohtlikku keskkonnamõju. Et elektrijaamatuhk ise loodusele mürgine ei ole, on tõestanud arvukad uurimused ja näidanud tuhaväljade iseeneslik kattumine taimestikuga.[25]

Praegu toimub endisel Sillamäe soojuselektrijaama põlevkivituha suletud prügila alal põlevkivituha ja teiste ohtlike jäätmete – hapete – segamine, mille saadus viiakse Sillamäe sadama pinnasetäiteks (joonis 2.1). Kuna prügilaalal jäätmeid ladestada ei tohi, tuleb kogu tekkiv sete (mida tekib aastas keskmiselt 42 000 t) pärast selle tahenemist prügila territooriumilt ära viia. Keskkonnainspeksioon on oma kontrollides toonud välja, et jäätmeid tekib rohkem, kui on siiani jooksvalt sadamaalal kasutatud. 2017. aasta lõpuks on Sillamäe tuhaväljale kogunenud 147 200 t kasutamata setet (ohtlike jäätmeid).[3] 2020. aasta lõpuks kasutamata setete kogus on vähenenud.[14] Keskkonnaamet ja Keskkonnainspeksioon on suurte vaheladude analüüsis leidnud, et hetkel tuhaväli täiendavat kontrollimist laoseisu poolest ei vaja, kuna pikemas perspektiivis on ettevõtte lubanud jäätmed sadamaalale viia.

Keskkonnaameti andmetel on sadamaala täitematerjali hinnanguliselt vaja 2 miljonit tonni, seega peaks kõik seni ära viimata ja tekkivad jäätmed olema võimalik ära kasutada. See peab toimuma 2024. aastaks, mil algab prügila korrastamine. Keskkonnaameti siseauditi järelduste kohaselt peab enne prügila korrastamistöödega alustamist Keskkonnaamet nõudma ettevõttelt nii keskkonnamõtjude hindamist kui ka sulgemisprojekti.[3]

Tuhaladestu töötab alates 1989. aastast ning tema ressurss on praktiliselt ammendanud. 2009. aastal lõpetati tuhaladestu kasutamine prügilana, see korrastati ja võeti kasutusele Sillamäe sadama ehitamisel kasutatava tuha ladustamiseks ja kivistamiseks. [11]



Joonis 2.1. Sillamäe suletud prügilaalal paiknev tuhakäitlusseade (all paremal) ja jäätmetega täidetud sadamaala.[3]

Ehitusprojekti hinnangul hetkel toimiva tuhakäitlusseadme planeeritud kasutusaeg on piiratud. [15] Väheneb ka Silpower AS põlevkivituha kogus, kuna SEJ ehitab uusi katlaid, mis töötavad maagaasil ja biokütusel (freesturvas ja hakkepuul).

Seoses eeltooduga OÜ NPM Silmet uurib teisi võimalusi oma tootmisprotsessis tekkivate happeliste jääkide käitlemiseks, kas taaskasutamiseks, tagasi protsessi suunamiseks või lõppladestumiseks.

## **2.2 OÜ NPM Silmet tegevuse lühikirjeldus ja HMV tehnoloogia**

Vaatame põhjalikumalt OÜ NPM Silmet väheradioaktiivse toorme töötlemise protsessi, mille tagajärjel tekkivad happelised jäägid.

NPM Silmet OÜ koosseisu kuulub kolm vabrikut – haruldaste muldmetallide vabrik (HMMV), haruldaste metallide vabrik (HMV) ja metallurgiavabrik (MV).[12]

Haruldaste muldmetallide vabrik toodab ekspordiks nii lahutamata kui ka lahutatud haruldaste muldmetallide karbonaate, oksiide, kloriide ja fluoriide, kaasa arvatud kõrge puhtusastmega (>99%) tseeriumi ja neodüümi ühendeid. 2001. a alustati kohalikule turule mõeldud vedelate lämmastikväetiste tootmist. Haruldaste metallide vabrik

toodab ekspordiks nioobiumpentoksiidi, tantaalhüdroksiidi ja tantaalpentoksiidi. Lisaks katab vabrik täielikult metallurgiavabriku toorme vajaduse: nioobium- ja tantaalpentoksiidist toodetakse seal metallilist nioobiumi ja tantaali.[12]

Väheradioaktiivne Fe-Nb on toore OÜ NPM Silmet valmistoodangu - tantaali ja nioobiumi ühendite ning metalliliste tantaali ja nioobiumi - saamiseks. Antud toorme töötlemiseks on ettevõttel välja töötatud vastav tehnoloogia.

Toorme töötlemine toimub hüdrometallurgilisel meetodil. Kõik pulbid ja lahused liiguvad hoonete sees ja erinevate hoonete vahel mööda kinnist torustikku.

Tootmishoones toimub toorme peenestamine lõugpurustites ning seejärel koonus-inertspurustites. Peenestatud Fe-Nb klassifitseeritakse vibrosõelas. Jämefraktsioon tagastatakse lisapurustamiseks, peenfraktsioon laetakse metallkonteineritesse.

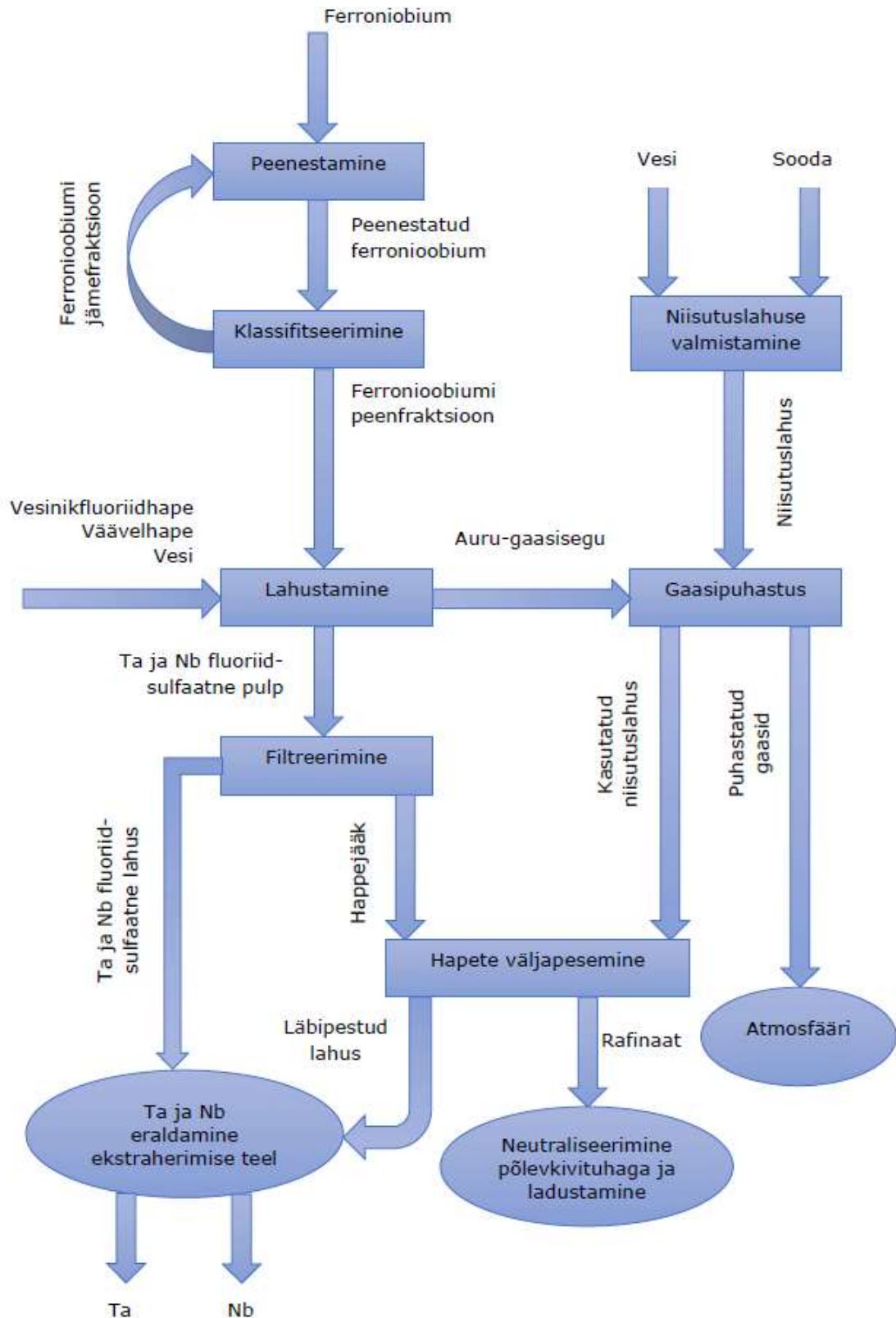
Metallkonteineritest puistatakse peenestatud Fe-Nb spetsiaalsetesse automaatdosaatoritesse. Lahustamis-reaktorisse antakse ettemääratud kogustes vesinikfluoriidhapet, ringlevat vett ja tooret. Seejärel pulp jahutatakse ning töödeldakse väävelhappega. Pulbi lahustamine toimub reaktorites – segistitega paakides. Kõik reaktorid on varustatud sundtõmbeventilatsiooniga. Nii toimub toorme lahustamine.

Pärast lahustamist suunatakse pulp filtreerimiseks filterpressidele. Filtraadis on tantaal ja nioobium. Filtraat kogutakse ja suunatakse teise tootmishoonesse tantaali ja nioobiumi ekstraktsiooniliseks lahutamiseks. Pärast filtreerimist suunatakse hapete jäägid läbipesemiseks.

Hapete jäägid suunatakse pärast toorme lahustamist ja pulbi filtreerimist läbipesemiseks, mis viiakse läbi väävel- ja vesinikfluoriidhapete protsessi tagastamise eesmärgil. Läbipesemine toimub repulpatsiooni teel segistitega reaktor-paakides.

Läbipeetud hapete jäägid suunatakse neutraliseerimisele ja koosladustamisele põlevkivituhaga (tuhaväljal). Hapete läbipesemise pesuvesi lisatakse filtraatidele, mis suunatakse tantaali ja nioobiumi ekstraktsioonilisele lahutamisele.

Ohtlikest jäätmetest olulisemad on nioobiumi ja tantaali tootmisjääd **ehk rafinaadid**: väävelhappe ( $H_2SO_4$ ) ja vesinikfluoriidhappe (HF) vesilahus, mis sisaldab HF ca 40 g/l ja  $H_2SO_4$  ca 350 g/l, samuti raskmetalle jm komponente (tabel 1). Rafinaadid kogutakse happekindla voodriga terasmahutisse, torustiku mööda nad suunatakse neutraliseerimissõlme tuhaväljal, kus toimub nende neutraliseerumine. Tootmisprotsessi plokk-skeem on näidatud joonisel 2.2.[12]



Joonis 2.2. Silmeti väheradioaktiivse toorme töötlemise plokk-skeem [16]

Maailmapraktikas toimub rafinaatide neutraliseerimine lubjaga. Kuna põlevkivituhas sisaldub CaO sobib selleks sama hästi, siis on OÜ NPM Silmet põhjalikult uurinud rafinaatide põlevkivituhasga neutraliseerimise ja tuhaväljadele ladestumise võimalusi kui

ühete majanduslikult soodsat ja jäätmeseaduse mõistes PVT nõuetele vastavat varianti, kuna võimaldab põlevkivituha kui jäätmete taaskasutamist. Keskkonnakaitseliselt on esmajärjekorras tähtsad uuringutulemused mis näitavad rafinaatide mõju tuhaväljade ringlusvee ja ka tekkiva sademe koostisele.[12]

Tuhaväljale ladestunud produkt ei ole oma esialgse koostisega ega ohtlikkuse astmega. Hüdrotranspordi vee ja õhu CO<sub>2</sub> toimel muutub tuha esialgne koosseis. SEJ kateldest väljuv tuhk sisaldab kustutamata lubja (CaO), mille kustutamine toimub tuha hüdrotranspordisüsteemis ringleva vee toimel. Kustutatud lubja Ca(OH)<sub>2</sub> toimel sadestuvad tuhas sisalduvad komponendid püsivate, lahustumatute Ca-ühenditena.[12]

Põlevkivituha laagerdumisel toimub tuha edasine stabiliseerumine, kuna Ca(OH)<sub>2</sub> reageerimisel õhus sisalduva CO<sub>2</sub>-ga tekivad vees praktiliselt lahustumatud karbonaadid (toimub tsementeerumise protsess) ning tuhk muutub praktiliselt inertseks. Uuringud on näidanud, et prügilakehandis (tuhaladestul) säilib Ca(OH)<sub>2</sub> toimel leeliselise liigvee keskkond, mis tagab sademe stabiilsuse, kuna selles keskkonnas ei toimu sademes olevate komponentide lahustumist ega väljaleostumist. Praktiliselt toimub kogu sadestamisprotsess põlevkivituhas sisalduva lubja toimel (CaO sisaldus 30-40 %), mille juures esmajärjekorras toimub lubja kustutamine. [12]

Rafinaatide põhjalik koosseis komponentide kaupa on esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Hajutamisele suunatavate rafinaatide koostis ja kogused (tootmismahu juures 2000 tonni tooret aastas)[17]

<b>Komponent</b>	<b>Keskmine sisaldus rafinaatides, g/l</b>	<b>Kogus , t/a</b>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	373	3980
F <sup>-</sup>	60	750
Fe <sup>3+</sup>	8,40	96
Ti <sup>4+</sup>	6,30	65
Na <sup>2</sup>	0,72	55
Si <sup>4+</sup>	2,66	30
Al <sup>3+</sup>	1,32	20
K <sup>+</sup>	0,53	10
Nb <sup>5+</sup>	0,17	6
U <sup>4+*</sup>	0,0624	0,0624
Th <sup>4+*</sup>	0,0624	0,0624
Lahuste kogused, m <sup>3</sup>	~10000	
Komponentide kogused, t/a		~5000

\* U ja Th kogused on arvatud kolumbiidi / tantaliidi maksimaalsest aastakogusest 480 t/a (U, Th sisaldus 0,13 massi% kummagi elemendi järgi).

Keskonnakompleksloa alusel lubatav jääkide kogus on ca 5000 tonni aastas.

Neutraliseerimisel toimuvad põhilised reaktsioonid on esitatud tabelis 2.2 [17].

Aastased kogused on saadud stöhhioomeetria alusel, arvutuste aluseks on võetud andmed tabelist 1.

Tabel 2.2. Happejääkide põlevkivituhaga neutraliseerimise käigus toimuvad keemilised reaktsioonid

<b>Reaktsioon</b>	<b>Stöhhioomeetria alusel saadud aastased kogused</b>
$2F^- + Ca^{2+} = CaF_2$	38 t F <sup>-</sup> - tekib 78 tonni CaF <sub>2</sub> 750 t F <sup>-</sup> - tekib 1540 t CaF <sub>2</sub>
$SO_4^{2-} + Ca^{2+} + 2H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O$	96 t SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - 172 t kipsi 3980 t SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - tekib 7130 t kipsi
$U^{4+} + 4OH^- = U(OH)_4$ (sade)	0,238 t U <sup>4+</sup> - tekib 0,306 t U(OH) <sub>4</sub> 0,624 t U <sup>4+</sup> - tekib 0,802 t U(OH) <sub>4</sub>
$Th^{4+} + 4OH^- = Th(OH)_4$ (sade)	0,232 t Th <sup>4+</sup> - 0,300 t Th(OH) <sub>4</sub> 0,624 t Th <sup>4+</sup> - tekib 0,807 t Th(OH) <sub>4</sub>
$Fe^{3+} + 3OH^- = Fe(OH)_3$ (sade)	56 t Fe <sup>3+</sup> - tekib 107 t Fe(OH) <sub>3</sub> 96 t Fe <sup>3+</sup> - tekib 183 t Fe(OH) <sub>3</sub>
$Al^{3+} + 3OH^- = Al(OH)_3$ (sade)	27 t Al <sup>3+</sup> - tekib 78 t Al(OH) <sub>3</sub> 20 t Al <sup>3+</sup> - tekib 58 t Al(OH) <sub>3</sub>
$Si^{4+} + 4OH^- = SiO_2$ (sade) + 2H <sub>2</sub> O	28 t Si <sup>4+</sup> - tekib 60 t SiO <sub>2</sub> 30 t Si <sup>4+</sup> - tekib 64 t SiO <sub>2</sub>
$Nb^{5+} + 5OH^- = Nb(OH)_5$ (sade)	93 t Nb <sup>5+</sup> - tekib 178 t Nb(OH) <sub>5</sub> 6 t Nb <sup>5+</sup> - tekib 12 t Nb(OH) <sub>5</sub>
$Ti^{4+} + 4OH^- = Ti(OH)_4$ (sade)	48 t Ti <sup>4+</sup> - tekib 116 t Ti(OH) <sub>4</sub> 65 t Ti <sup>4+</sup> - tekib 157 t Ti(OH) <sub>4</sub>

## 2.3 Haruldaste metallide vabriku jäätmekäitlus

Olemasolev situatsioon: täiskoormusega töötamisel Silmet annab Ökosilile üle rafinaate kuivaines ca 2800...3000 tonni (tabel 2.3), s.t. vedelaid jäätmeid ca 5000...5500 tonni aastas. Arvutuslikult kulus selle rafinaatide koguse neutraliseerimiseks ca 1650 tonni

põlevkivituhka. Vedela faasi täpse koguse osas Ökosil arvestust ei pea, arvestus käib kuiv-osise järgi.

Tabel 2.3. Rafinaatide kogused aastate lõikes. [14]

<b>Aasta</b>	<b>Tekkinud happelised jäägid, tonni</b>
2017	2374,278
2018	3327,259
2019	2777,645
2020	2538,906

Ohtlike jäätmete nõuetekohase käitlemise eeldus on käitlusvõimaluste olemasolu. Üldjuhul käitlevad ohtlikke jäätmeid eraettevõtted, kellel on selleks vastav taristu. Riigi omandis on aga 2000.aastal rajatud Vaivara ohtlike jäätmete käitluskeskus, mis on ainuke koht Eestis, kus saab ladestada ohtlikke jäätmeid.[3]

Null alternatiiviks võiks läbi vaadata happeliste jääkide üleandmine teistele ohtlike jäätmete käitlemisega tegelevate ettevõtetele. Jäätmete käitlemine vedelate anorgaaniliste hapete jääkidenä oleks võimalik AS EcoPro Vaivara keskuses. Alternatiivi kasutuse tõenäosus sõltub jäätmekäitluse- ja transpordikuludest, mis võivad olla liiga suured. Ringmajanduse seisukohalt antud alternatiiv ei saa olla hea variandina, kuna suurendab jäätmete kogust.

Alternatiiv 1 - happeliste jääkide neutraliseeriva ainetega segamine järgmiseks utiliseerimiseks tahke neutraalse jäätmena. Ringmajanduse seisukohalt antud alternatiiv annab võimalusi tekkivate jäätmete taaskasutamiseks.

Vedelad happejäägid saaks neutraliseerida ka tehase territooriumil, selleks tuleb rajada neutraliseerimissõlm. Uues neutraliseerimissõlmes on võimalik kasutada nii põlevkivituhka kui ka lupja, mis kuluks selleks ca 2...4 korda vähem (ca 700 tonni/aastas). Sel juhul võiks läbi vaadata Rakke tehase kustutamata lubja kasutamine.

Saadud segu ei saaks enam lasta looduslikult kuivada nagu täna tuhahoidlas – selleks pole territooriumil arvatavasti piisavalt vaba ruumi.

Neutraliseeritud segu võiks ka filtreerida ja moodustunud 3,5...4000 tonni neutraliseerimisjääki üle anda Vaivara keskusele. Sel juhul kulud sisaldavad neutraliseerimissõlme ehituse, neutraliseeruva aine ostmise kulud, transpordikulud, Vaivara ladestustasu ka saastetasud. Filtreeritud lahus tuleks heita mere-väljalasku, see sisaldab veel ca 100 mg/l fluoriide, kuna neutraliseerimise käigus ei saa nad 100% seotud.



Eesti Energia viib läbi uuringuid põlevkivituha ja aheraine kasutamisest täitematerjalina.[18] Sama protsess hetkel teostatakse Sillamäel. Eesti Energia huvi olemasolul on võimalik alustada läbirääkimisi Silmeti tehase happeliste jääkide neutraliseerimiseks Eesti Energia põlevkivituha nende territooriumil ja ka edasiseks kasutamiseks täitematerjalina teede ehitamisel. Sel juhul kulud sisaldavad vajalikud uuringud, transpordikulud, ladestustasu.

Metalltöötlemise tootmises kasutavad ettevõtted tehnoloogiaid hapete taastamiseks happejääkidest ning tagasi tootmisprotsessi suunamiseks. See võiks olla ka alternatiiviks. Siin ettevõtte võib teha oma valikut mitme erinevate tehnoloogiate hulgast. Kulud sisaldavad uue tsehhi ehitamiskulusid. Majanduslikust seisukohast see on parim variant, kuna see on investeeringud oma tootmisse, mis võimaldavad vähendada jäätmete kogusid, happe ostmise kulusid ja saastetasusid.

Majanduse ja keskkonna seisukohalt alternatiive uuritakse lõputöö kolmandas peatükis.

## **2.4 Euroopa keemiatööstuse ringmajanduse tehnoloogiad**

Euroopa keemiatööstus arendab pidevalt uusi tehnoloogiaid, mis aitavad hoida ressursse liikumas suletud ringides kõikide suuremate majandussektorite lõikes. Keemiatööstusel on know-how ja võimekus, et muuta Euroopa majandus aja jooksul ringmajanduseks.

Silmeti tehas kasutab haruldaste metallide kontsentratsioonide ja haruldaste muldmetallide lähteainete leostamisel ja töötlemisel suures koguses kontsentreeritud happeid. Segahappelahustest hapete eraldamiseks on välja töötatud mitu tehnoloogilist protsessi, kuid enamik HF kasutamist on välja töötatud roostevabast terasest hapendamise (hapetega töötlemise) protsessides ja sisaldavad pigem HNO<sub>3</sub> kui Silmetis kasutatavat H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Mõnda neist protsessidest võiks siiski kohandada Silmeti segahapetega. HF/HNO<sub>3</sub> segude ringlussevõtu jaoks väljatöötatud protsesse saaks sama hästi kohandada ka HF-happe protsessi tagasi suunamiseks. Hapete täielik taastumine fluoriide sisaldavatest segahappelitest protsessilahustest tähendab nii vaba kui seotud happe taastumist. Happe täieliku taaskasutamise meetodid erinevad maailma erinevates osades peamiselt nendes kasutatud protseduuride poolest.

Silmetis tuleb kavandatavas süsteemis loputus- ja pesuvett töödelda või taaskasutada. Tehnilisest vaatepunktist ja Silmeti tehases rakendamiseks on vaja keskenduda peamiselt happe taastamisele, teise sammuga metallide taastamisele.

Erinevalt roostevabast terasest hapendamise rakendustest, kus lahusest on võimalik eraldada märkimisväärne kogus väärtuslikku niklit, on Silmeti ainus happelahusest eraldatav väärtuslik metall titaan, mida Lopariidi kontsentraadist HF-happega ei leostatud. Praegu on metallfluoriidikomplekside vajalikuks lagundamiseks enne HF-i sisaldava segahappe või ainult HF-happe eraldamist kolm väljakujunenud kommertstehnoloogiat [19]:

- Washington Steel protsess;
- Pyromars protsess; ja
- Outokumpu protsess.

### 2.4.1 Washington Steel protsess

**Washington Steel** on rakendanud regeneratsiooni süsteemi, mis baseerub bipolaarsel elektrodialüüsil (EDBM), tarnija on Allied-Signal Corp. [20]

Esimesel etapil segatakse kasutatud hape KOH-ga, et lahust neutraliseerida ja seondunud happest eraldada fluori. Seega moodustuvad metallhüdrosiidid, mis sadestuvad, aga KF lahustub (vt tabel 2.4). Pärast hüdrosiidi osakeste eraldamist juhitakse neutraliseeritud lahus 3-kambrilisse EDBM-i, mida töötab perioodiliselt kõrge efektiivsuse saavutamiseks.

EDBM-i torus jagatakse KF-i sisaldav lahus KOH-ks ja segahappeks, samal ajal kui esialgne lahus lahjendatakse. Tekkinud hapete segu juhitakse tagasi hapendamislainile, samal ajal kui tekkinud KOH taaskasutatakse kasutatud happe neutraliseerimiseks. Lahustatud EDBM-i töödeldakse seejärel tavapärasel ED-s, et saada kõrgema kontsentraadisisaldusega KF-lahus, mis ka antakse koos EDBM-i toorainega. ED-lahjendit kasutatakse filtreeritud hüdrosiidmuda läbipesemiseks. Kogu protsess on suunatud vastavate lahenduste suletud tsükli saamiseks (ainering). Aastatel 1989-1990 oli kasutatud hapendamise protsessis umbes 1,5 miljoni gallonit hapet ja nendest umbes 90% oli võimalik taastada. [20]

Sellel meetodil on mitmeid tehnilisi puudusi, mis tulenevad süsteemi keerukusest. Peamised tootmisprobleemid tulenevad bipolaarse membraani piiratud elueast. Selle tulemuseks on nii kõrged tootmiskulud kui ka märkimisväärsed seisakuid hoolduses.

Tabel 2.4. Washington Steel protsessi põhireaktsioonid [20]

Protsessi etapp	Operatsioon	Reaktsioonid
Kasutatud happe neutraliseerimine	Keemiline muundumine	$2KOH + HF + HNO_3 \rightarrow KF + KNO_3 + H_2O$ $FeF_3 + 3KOH \rightarrow Fe(OH)_3 \downarrow + 3KF$ $CrF_3 + 3KOH \rightarrow Cr(OH)_3 \downarrow + 3KF$ $NiF_2 + 2KOH \rightarrow Ni(OH)_2 \downarrow + 2KF$
Neutraliseeritud lahuse EDBM	Elektrokeemiline muundumine	$KF + H_2O \rightarrow KOH + HF$ $KNO_3 + H_2O \rightarrow KOH + HNO_3$
EDBM lahjendi tavapärane ED	Kontsentreerumine / lahjendamine	

## 2.4.2 Pyromars protsess (pürohüdrolüüs)

Paigaldatud seadmete seisukohast kõige olulisemad täielikud regenererimise protsessid põhinevad termilistel protsessidel, nimelt pürohüdrolüüsil, mis põhineb mitmel kõrgel temperatuuril toimuvatel keemilistel reaktsioonidel.

Kõrgtemperatuurilises reaktoris muudetakse metallisoolad tahketeks metallioksiidideks ja vastavad happed viiakse gaasifaasi. Vastavalt sellele tuleb happeid eemaldada reaktori suitsugaasidest absorptsioonkolonnis.

Pürohüdrolüüsi puuduseks on lämmastikhappe osaline lagunemine, mis põhjustab NO<sub>x</sub> moodustumist. Oksüdatsioonikolonnis, mis on paigutatud voolu allpool, muudetakse need NO<sub>x</sub> gaasid HNO<sub>3</sub>-ks. See võimaldab taastamise üldkiirust märkamisväärselt suurendada. Heitgaasidesse jäänud NO<sub>x</sub> eemaldakse katalüüstõotlemise meetodil (denitrifikatsioon), mille tulemusena tekib kahjutu N<sub>2</sub> (tabel 2.5).

HNO<sub>3</sub> ja HF sisaldavate neutraliseerimise protsesside kasutatud lahuste pürohüdrolüütiliseks regenererimiseks kasutatakse kahte tüüpi reaktoreid: aerosoolpihustiga põletusahi ja keevkihtreaktor.

Austria ettevõtte Andritz pakub aerosoolpihustiga põletusahja (Pyromars) kontseptsiooni. Saksa ettevõtte Steuler pakub väljalaskes integreeritud nanofiltreerimisega keevkihttehnoloogiat, et saavutada HNO<sub>3</sub> suurema taastumise (STAR-protsess).

CMI UVK pakub nii põletus- kui ka keevkihtreaktoreid. Pihustiga põletusahjud ja keevkihtreaktorid on moodustuvate oksiidide koguse ja kvaliteedi poolest eriti erinevad. Kui enne termilisi protsesse rakendatakse nanofiltreerimist, taastuvad termilise taaskasutamise protsessid kuni 99% HF ja kuni 90% HNO<sub>3</sub>. Kuni 99% Fe, Cr ja Ni

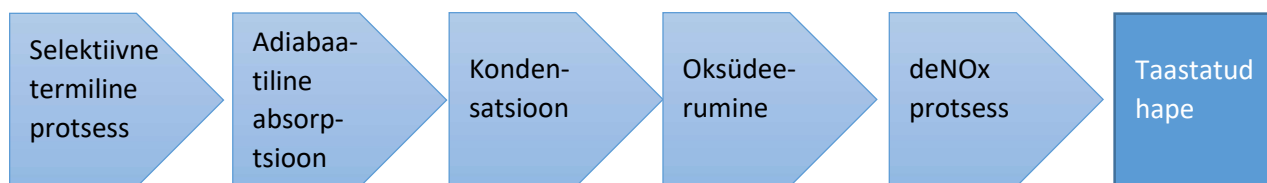
redutseeritakse moodustunud oksiidiks, mida saab terase valmistamise protsessis uuesti kasutada.

Tabel 2.5. Pyromars protsessi põhireaktsioonid [20]

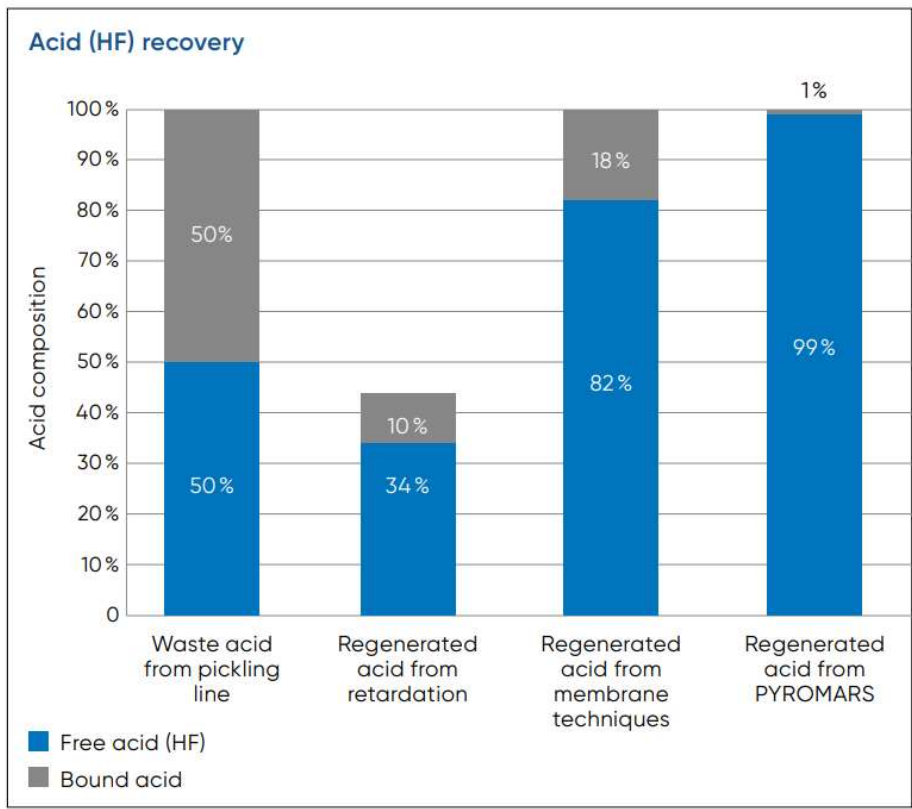
Protsessi etapp	Operatsioon	Reaktsioonid
Reaktor	Aurustamine	$H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$ $HNO_3(aq) \rightarrow HNO_3(g)$ $HF(aq) \rightarrow HF(g)$
	Keemiline muundumine	$FeF_3 + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 6HF$ $CrF_3 + 3H_2O \rightarrow Cr_2O_3 + 6HF$ $3NiF_2 + 3H_2O \rightarrow 3NiO + 6HF$ $2HNO_3 \rightarrow NO_2 + NO + O_2 + H_2O$ $NO_2 \leftrightarrow NO + 1/2O_2$
Hapete adsorber	Absorptsioon	$HNO_3(g) \rightarrow HNO_3(aq)$ $HF(g) \rightarrow HF(aq)$
Oksüdatsioonikolonn	Keemiline muundumine	$NO + 1/2O_2 \leftrightarrow NO_2$
Katalüütiline denitrifikatsioon (DeNOx)	Keemiline muundumine	$2NO_2(g) + O_2 + 4NH_3(g) \leftrightarrow 3N_2(g) + 6H_2O(g)$ $4NO(g) + O_2 + 4NH_3(g) \leftrightarrow 4N_2(g) + 6H_2O(g)$

Kallihinnalise vesinikfluoriidhappe suurema taastumistase tõttu võib olla pürohüdrolüüs majanduslikult parimaks variantiks võrreldes reduktsiooniga. Termiliste protsesside puuduseks on paigaldamise ja käitamise märkimisväärsed tehnilised ja finantskulud. Seega on pürohüdrolüüsi kulu tõhus toimimine võimalik ainult kasutatud happe mahu voolukiirusel  $> 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  või nõutaval metalli tarbimisel umbes  $100 \text{ kg/h}$ . [20]

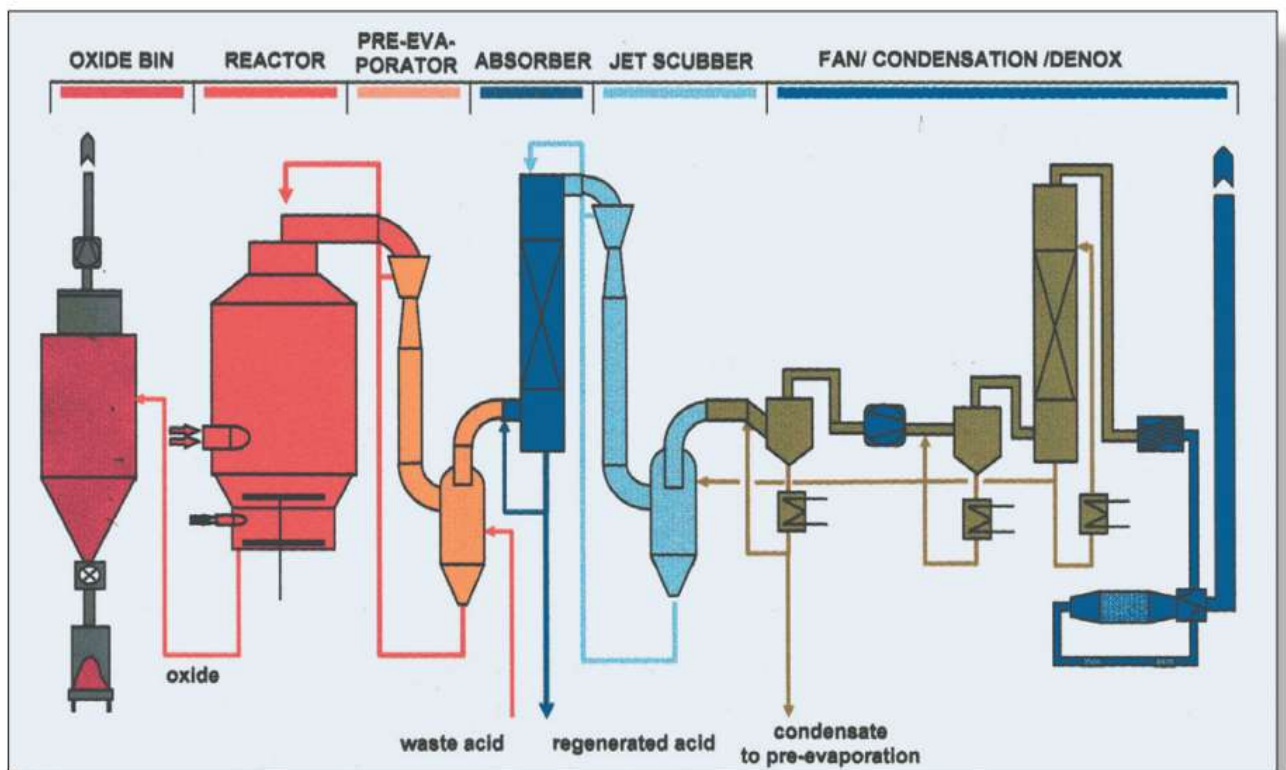
Kasutatud hape pole ainus happeline reovesi, mis tekib hapendamise protsessi käigus. Hapendamiseks happe edasikandumise tõttu hapendamislainide järgnevatele pesemise aladele väheneb pesuvee kvaliteet. Andritz leiutas ZEMAP protsessi kasutatud pesuvee töötlemiseks täienduseks PYROMARS-protsessile. Kasutatud pesuvesi neutraliseeritakse ammoniumiga rooste tekke staadiumis, mille tulemusel moodustuvad ammoniumi lahustuvad soolad nagu  $NH_4F$  и  $NH_4NO_3$ . Neutraliseeritud lahus ka antakse pürohüdrolüüsi reaktorisse. Ammooniumi soolad lagunevad etteantud protsessi parameetritega, aga metallide soolad moodustavad metalloksiide.



Joonis 2.3. Pyromars protsessi plokk-skeem.



Joonis 2.4. HF taastamine. Erinevate protsesside võrdlus. [21]



Joonis 2.5. Pyromarsi protsessi tootmisskeem.[19]

Pyromarsi protsessis muundatakse metallfluoriidid oksiidideks, mis sobivad uuesti sulatamiseks. Oksiidide füüsikalised ja keemilised omadused on olulised selles mõttes, et liiga madal oksiidide tihedus või suur fluoriidide sisaldus kompleksides tekitab probleeme metalli taastamisel sulatamise teel.

Pyromarsi protsess töötab oluliselt kõrgema rõhu ja temperatuuri juures kui Outokumpu protsess. Seetõttu on protsessi rõhukõvera nõuded kõrgemad ja ehitusmaterjalid on pigem erimetallid kui kiududega tugevdatud plastid. Need kõrgemad rõhud ja temperatuurid on vajalikud Outokumpu protsessis metallide sulfaatide asemel hõlpsamini redutseeritavate metallide tootmiseks oksiidide kujul. Kuigi Silmeti peaeesmärk on happe ringlussevõtt, käsitleb see protsess ka sekundaarset väljakutset, milleks on titaani fluoriidide taastamine happelistes lahustes pärast lopariidi lagunemist.

### **2.4.3 Outokumpu protsess**

Outokumpu happe taastamise protsess (OPAR - Outokumpu's acid recovery process) on välja töötanud tootlikkusele 1,4m<sup>3</sup>/h kasutatud hapet ning on võtnud kasutusele ettevõttes Tornio linnas (Soomes) 1985. aastal.

Esimesel tootmisetapil kasutatud hapete segule lisatakse kontsentreeritud väävelhapet (80-85%) kõrgendatud temperatuuril 160-180 °C. Selle tulemusel metalli sulfaadid sadestuvad. Lahus antakse vakuumaurustisse, kus HF ja HNO<sub>3</sub> eraldatakse jäänud lahustist. Seejärel metallide soolad eemaldatakse fraktsiooniva sadestumisega. Lämmastik- ja vesinikfluoriidhappe ekstraheerimine on vastavalt 95% ja 99%.

Aurustamine on tehniliselt tõestatud ja stabiilne protsess; selle puuduseks on aga see, et metallid muundatakse sulfaatideks, mis ei ole otseselt sobivad metallide uuesti sulatamiseks. Kui see on sisse viidud, saab seda protsessi muuta, töödeldes metallisulfaadi lahust või kristalle termilise lagundamise reaktoris, millele järgneb järgnevas protsessis H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> vabanemine. See võimaldaks titaandioksiidi tootena taastada ja väävelhapet täiendavalt ringlusse võtta. Selle protsessi uurimine ja arendamine võib osutuda vajalikuks tulevikus.

Outokumpu protsessil on oluliselt madalam töö rõhk ja temperatuur kui Pyromarsi protsessil. Odavamad ehitusmaterjalid ja soodustavad töötingimused on Outokumpu tehnoloogia valiku olulised positiivsed aspektid.

### **3 JÄÄTMEKÄITLUSE VÕIMALIKE ALTERNATIIVIDE KESKKONNA- JA MAJANDUSASPEKTID**

Keskkonna- ja majanduslike aspektide seisukohalt võib olla läbivaadatud järgmised OÜ NPM Silmet HMV tootmisprotsessi käigus tekkivate happejääkide käitlemise alternatiivid:

- 1) Null alternatiiv ehk ohtlike jäätmete üleandmine prügilasse ilma taaskasutamise võimaluseta;
- 2) Alternatiiv 1 ehk ohtlike jäätmete neutraliseerimine edasiseks utiliseerimiseks või taaskasutamiseks tahke neutraalse jäätmena. Neutraliseerimine on võimalik nii põlevkivituha kui ka kustutamata lubjaga;
- 3) Alternatiiv 2 ehk ohtlike jäätmete töötlemine maailma tehnoloogia abil hapete taastamiseks ja tagasi protsessi suunamiseks.

#### **3.1 Null alternatiivi keskkonna- ja majandusaspektid**

Null alternatiiv seisneb selles, et ohtlikud jäätmed üle antakse Vaivara keskusse nende olemasoleval kujul: vedelad happejäägid vaatides. Vaivara keskuse andmetel happejääkide vastuvõtumaksumus on alates 380 eurot tonni eest. Üldkogusel ca 5000 tonni (vedelal kujul) happejääkide utiliseerimiskulud on alates 2 miljonit eurot aastas, millele lisanduvad ka transpordikulud. See on lihtsam variant ettevõttele. Ringmajanduse seisukohalt ohtlike jäätmete ladustamine prügilasse on keskkonnale halvem variant, mis mõjub ka ettevõtte mainele turul. Parim variant on ikkagi taaskasutus.

**Alternatiivi kokkuvõte** – ohtlikud jäätmed ladustatakse prügilasse töötlemata kujul, suured utiliseerimis- ja transpordikulud, saastetasud, regiooni keskkonnaseisundi halvenemine, negatiivse mainega ettevõtte. Lihtsam variant ettevõttele, kuid halvem variant ringmajanduse seisukohalt.

#### **3.2 Alternatiiv 1 ehk ohtlike jäätmete utiliseerimise või taaskasutamise aspektid tahke neutraalse jäätmena**

Happejääkide neutraliseerimine on võimalik teostada kas põlevkivituha või kustutamata lubjaga.

Tahked neutraalsed jäätmed on võimalik üle anda Vaivara keskusse. Sel juhul neutraliseeritud jäätmeid ladustatakse Vaivara jäätmehooldal vastuvõtu ja saastetasu eest, mis on madalam (alates 30 eurot/tonn), kui ohtlike happejääkide vastuvõtutasu, kuid Vaivara keskuse ressursid on piiratud, tegevusluba hetkel kehtib ainult 2021. aasta lõpuni.

Aga juba selle alternatiivi näitel näeme ringmajanduse põhimõtete kasutamise plussid ettevõttele. Ohtlike jäätmete neutraliseerimine vähendab keskkonnanariske ning ka majanduskulusid ettevõttele. Happejäätmete utiliseerimise kulud summas ca 2 miljonit eurot ettevõtte võib kasutada ühekordselt neutraliseerimissõlme ehitamiseks, mille kasutuse tähtaeg võiks olla kümneid aastaid.

Ohtlike jäätmete neutraliseerimiseks on olemas ka mitu varianti: uue neutraliseerimissõlme ehitamine oma tootmisterritooriumil, või koostöös Eesti Energia AS-iga neutraliseerimine nende territooriumil taaskasutamiseks, näiteks teede ehitamisel.

Lähtudes eeltoodust parim variant ettevõttele nii keskkonnakaitselt kui ka majanduslikult seisukohalt ikkagi happejääkide neutraliseerimine kas Eesti Energia AS elektrijaamade põlevkivituhaga või kustutamata lubjaga (näiteks, Rakke tehast) jäätmete taaskasutamiseks.

### **3.2.1 Ohtlike jäätmete põlevkivituhaga neutraliseerimise aspektid**

2019. aastal Tallinna Tehnikaülikooli poolt oli läbi viidud Eesti põlevkivituhkade ohtlikkuse uuring, mis annab ka ülevaade Eesti Energia AS-ile ja VKG AS-ile kuuluvate soojus- ja elektrijaamade põlevkivituhkade koostisest ja omadustest.

Uuring näitas, et tuha taaskasutus äärmiselt piiratud ja tänases majandusolukorras leiab taaskasutust umbes 2% tekkivast tuhast. [22] Valdav osa tuhast ladestatakse elektrijaamade läheduses paiknevatele tuhaladestusaladele – tuhaväljadele. Tänapäevaste tootmismahtude juures tekib põlevkivitööstuses 7-8 miljonit tonni tuha- ja poolkoksijäätmeid aastas.[22]

Ringmajanduse seisukohalt põlevkivi energeetilisel kasutamisel tekkivaid jäätmeid saab kasutada ehitusmaterjalide tootmises, teedehituses ja pinnaste stabiliseerimisel, happeliste muldade neutraliseerimisel ning põlevkivikeemia toodete valmistamiseks. [22] Eesti Energia AS vaatab üle võimalusi põlevkivituhka kasutamisele teede ehitamisel.



Eesti Energia AS-ile kuuluvad Auvere elektrijaam ja Balti ja Eesti Elektriyaamad. Vaatame põhjalikumalt antud elektriyaamade tuhkasid OÜ NPM Silmet rafinaatide neutraliseerimise võimaluse eesmärgil.

Põlevkivituhkade keemiline koostis sõltub ennekõike põlevkivi orgaanilise ja mineraalosa koostisest, tekkivate tuhkade koostis ning omadused sõltuvad otseselt põletamistehnoloogiast ja temperatuurist. Eesti põlevkivielektriyaamades kasutatakse kahte erinevat põletustehnoloogiat: tolmpõletamise (pulverized combustion – PC) ja tsirkuleeriva keevkihiga katlas põletamise (circulating fluidized-bed combustion – CFBC) tehnoloogiat. Tuhaärastuseks on ka kaks võimalust: kuivtuhaärastus ja märgtuhaärastus. Märgtuhaärastus vähendab tuha taaskasutusvõimalusi oluliselt, kuna muudab tuha keemilist ja mineraalset koostist ning tuha reaktiivseid omadusi. Siiski rakendatakse tuha märgärastust täna veel suuremas mahus, kuna kuivale tuhaärastusele üleminek nõuab investeerimisotsuseid, mida tänaseks tehtud veel ei ole.[22]

Keevkihis põletuse (CFBC) tehnoloogia korral ei ole karbonaatide lagunemine täielik ning võrreldes tolmpõletuse (PC) tuhaga on tuhavoogude vaba lubja sisaldus madalam.

Auvere Elektriyaam kasutab keevkihtkatlaid, töötab alates 2016. Aastane tekkiv tuhakogus sõltub jaama toodangumahust ja kasutatavatest kütustest ning tuleneb otseselt tarbimisest ja avatud elektriturust. Hinnanguline keskmine tuhavoo suurus on 1,4 kuni 1,5 miljonit tonni aastas.[22]

Balti ja Eesti Elektriyaamad rakendasid algselt tolmpõletustehnoloogiat, kuid alates 2004. aastast alustati põlevkivi põletamist katelseadmetes mis kasutavad tsirkuleerivat keevkihttehnoloogiat. [22]

CFBC tehnoloogias on karbonaatide lagunemisaste ainult 60-75%. Seetõttu on PC tuhas ka kõrge vaba CaO (kustutamata lubi) sisaldus. Sõltuvalt tuha eemaldamise punktist erinevates tehnoloogiates, muutub nii CFBC tehnoloogia kui ka PC tehnoloogia tuhas CaO sisaldus. [22]

Uuringu käigus saadud andmete alusel (vt Lisa 2), CFBC tehnoloogia tuhades vaba CaO sisaldus varieerub vahemikus 8,23 – 31,76%, arvutuste tegemiseks võtame keskmine väärtus 17-18%.

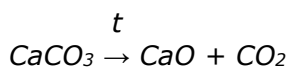
Sillamäe soojuselektriyaamas põlevkivi põletamine toimub tolmpõletustehnoloogia kasutamisega. PC tehnoloogia tuhas vaba CaO sisaldus on ca 30-40%.[15,17]

Põletatav põlevkivi sisaldab suurtes kogustes lubjakivi ehk kaltsiumkarbonaati ( $\text{CaCO}_3$ ), mis laguneb kuumutamisel kustutamata lubjaks ( $\text{CaO}$ ), ja süsinikdioksiidiks ( $\text{CO}_2$ ), millest on tingitud ka põlevkivielektri tootmise suur  $\text{CO}_2$ -heide. Veega reageerimise teel

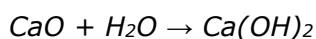
kustutatud lubi,  $\text{Ca(OH)}_2$ , reageerib süsinikdioksiidiga, moodustades kaltsiumkarbonaadi ( $\text{CaCO}_3$ ) ja vee ( $\text{H}_2\text{O}$ ).[26]

Keemilised reaktsioonid:

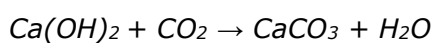
Lubjakivi põletamine:



Lubja kustutamine:



Lubja kivistumine:



Neutraliseeritud jäätmete kogused ja selleks kasutatud Sillamäe SEJ tuha kogused määratakse AS Ökosil poolt 15.10.2002.a kinnitatud metoodika järgi [23]:

1. Neutraliseeritud inertsete jäätmete kogus määratakse järgmise valemi järgi:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

- 1.1.  $Q_1 = M[\text{F}^-] \cdot 2,05$ , (2)

kus:

$M[\text{F}^-]$  -  $\text{F}^-$  kogus jääkides, , mis on üleantud põlevkivituhaga neutraliseerimiseks;

2,05 – neutraliseeritud inertsete jäätmete väljumise koefitsient  $\text{F}^-$  neutraliseerimisel.

- 1.2.  $Q_2 = M[\text{SO}_4^{2-}] \cdot 1,42$ , (3)

kus:

$M[\text{SO}_4^{2-}]$  -  $\text{SO}_4^{2-}$  kogus jääkides, mis on üleantud põlevkivituhaga neutraliseerimiseks;

1,42 – neutraliseeritud inertsete jäätmete väljumise koefitsient  $\text{SO}_4^{2-}$  neutraliseerimisel.

- 1.3.  $Q_3$  – metallide kogus hapete jääkides, mis on üleantud põlevkivituhaga neutraliseerimiseks.

2. Põlevkivituha kogus arvutatakse valemi järgi:

$$Z = Q - (M[\text{F}^-] + M[\text{SO}_4^{2-}] + Q_3) \quad (4)$$

kus:

$Z$  – Sillamäe SEJ tuha kogus, mis kasutatakse üleantud jääkide neutraliseerimiseks.

Lisa 1 andmete alusel (2020.aastal tekkinud jäätmete kogused) saame:

$$Q_1 = M[F^-] \cdot 2,05 = 918,210 \cdot 2,05 = 1882,3305 \approx 1883 \text{ tonni}$$

$$Q_2 = M[SO_4^{2-}] \cdot 1,42 = 1456,390 \cdot 1,42 = 2068,0738 \approx 2068 \text{ tonni}$$

$$Q_3 = 163,373 + 0,124 + 0,443 + 0,366 = 164,306 \approx 164 \text{ tonni}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1883 + 2068 + 164 = 4115 \text{ tonni}$$

$$\begin{aligned} Z &= Q - (M[F^-] + M[SO_4^{2-}] + Q_3) = 4115 - (918,210 + 1456,390 + 164,306) \\ &= 4115 - 2538,906 = 1576,094 \approx 1576 \text{ tonni tuhka} \end{aligned}$$

2 539 tonni jäätmete neutraliseerimiseks tuleb kasutada 1 576 tonni põlevkivituhka.

Kuna uuringu [22] andmete alusel Narva Elektriijaamade vaba CaO sisaldus tuhkades on peaaegu kaks korda vähem (17-18%), kui Sillamäe SEJ tuhkades, siis Narva Elektriijaamade tuhkade kasutamisel sama jäätmete koguse neutraliseerimiseks tuleb kasutada ca 2781 tonni tuhka aastas.

$$\frac{1576 \cdot 0,3}{0,17} = 2781,176 \approx 2781 \text{ tonni}$$

Aga kui tarnitakse elektrifiltrite põlevkivituhk suurema vaba CaO sisaldusega (näiteks, 30%, vt Lisa 1), siis nõutav kogus on küll kaks korda vähem.

Balti Elektriijaama, Eesti Elektriijaama ja Auvere Elektriijaama tekkival tuhakogusel ca 1,5 miljoni tonni aastas see variant on väga tõenäoline ja kauakestev. Sillamäe SEJ aastane tuhakogus on 118 210 t/a.

Majandusaspektid põlevkivituha kasutamisel on järgmised:

Eesti Energia AS poolt esitatud andmete alusel on Auvere põlevkivituha ostmisel ca 3000 tonni põlevkivituhka aastas kulud ettevõttele järgmised: tuha hind on 5,90 eurot/tonn. Selle juurde lisatakse transpordikulud, mis on tavaliselt standardse tsemendiveokiga vedades 3,70 eurot/tonn (veoõlal Auvere – Sillamäe). Tsemendiveokisse mahub ligikaudu 27 tonni põlevkivituhka.

Siis põlevkivi hinnale 17 700 eurot lisatakse transpordikulud ca 100 eurot reisi eest. Reaside arv aastas on ca 111 reisi, lähtudes sellest on transpordikulud kokku 11 100 eurot. Üldkulud tuha kasutamisel on ca 28 800 eurot aastas. Võrreldes null-alternatiivi kuludega - 2 miljonit eurot happejääkide üleandmise eest - näeme neutraliseerimise alternatiivi plussid ettevõttele.

Metoodika järgi tehtud arvutused näitavad põlevkivituha kogused, mida nõutakse happejääke neutraliseerimiseks. Massiivi tsemenditeerimiseks vajatakse 2-4 korda suurem tuhakogust. Sel juhul üldkulud sõltuvad kasutatava põlevkivituha omadustest ja lõplikult võivad koostada alates 28 800 kuni 100 000 eurot.

### 3.2.2 Ohtlike jäätmete kustutamata lubjaga neutraliseerimise aspektid

Eestis kustutamata lubja pakub Nordkalk AS tehas.

Ettevõtte teabelehe [24] andmetel on aktiivse CaO sisaldus produktis  $\geq 80\%$ .

Kui võtame arvesse, et Sillamäe SEJ tuhk sisaldab 30% CaO, siis kustutamata lubja nõutav kogus:

$$\frac{1576 \cdot 0,3}{0,8 \cdot 0,8} = 738,75 \approx 739 \text{ tonni}$$

Võrreldes Eesti Energia AS tuhkadega (vaba CaO sisaldus on 17%): kustutamata lubja nõutav kogus on ca 4 korda vähem.

Nordkalk AS asub Rakke alevikus Lääne-Virumaal. Sel juhul transpordikulud on kõrgem, kui põlevkivituha ostmisel Narvast, aga reiseid arv on väiksem. Veoautokasutusele (mahutavusega kuni 30 tonni) 45 eurot/tund lisatakse sõidukulud 0,18 eurot/tonni/km. Silmeti tehase kaugusega Lääne-Virumaalt ca 135 km on transpordikulud ca 300 eurot reisi eest. Ca 500 tonni lubja ostmisel teostatakse 25 reisi aastas, ning võimalikud transpordikulud kokku on 5 700 eurot/aastas. Valik sõltub lubja maksumusest, mis võib olla otsustavaks teguriks lahenduste otsimisel.

Kustutamata lubja pakuvad ka Venemaa ja Ukraina tootjad, sel juhul võib kasutada raudteetransport ja Sillamäe sadama võimalusi.

Lubja hinnaga, näiteks, ca 100 eurot tonni eest on aastakulud 50 000 eurot, millele lisanduvad ka transpordikulud. Võrreldes tuhaga, lubja ostukulud on kaks korda suurem.

Oma tuhasõlme ehitamisel neutraliseerimisprotsessis on mõistlikum kasutada lubja, kuna nõutav kustutamata lubja kogus on väiksem ning ladustamisele nõutakse väiksem ala. Kuid otsustavat rolli mängivad tarnetingimused ja -kulud. Ka sel juhul arvatud kogus kasutatakse ainult neutraliseerimiseks, massiivi tsementeerimiseks vajame 2 korda rohkem lubja.

Lubja kasutamisel neutraliseerimisainena võib ka läbi vaadata neutraliseeritud jäätmete taaskasutus poorbetooni plokkide valmistamisel. Poorbetooni valmistamisel kasutatakse tavabetooni lähteaineid nagu liiv, tsement ja vesi, ning lisaaineid: lubi, kips ja väheses koguses alumiinium, mille omavahelise reageerimise tulemusena eraldub betoonisegus väikeste gaasimullidena vesinik, mis annabki materjalile omase poorse struktuuri. Kuna tehase jäätmed sisaldavad vett ca 55%, poorbetooni plokkide valmistamisel on mõistlikum kasutada valutehnoloogiat autoklaavides, mis näeb ette toodete valamise

reeglina eraldi vormides voolavatest segudest, mis sisaldavad kuni 55–70 massiprotsenti vett kuiva komponendi massist. [27]

Lubja hoidmiseks on võimalik kasutada silod. Silod on üks levinumaid ladustamiseseadmeid puistematerjalide ladustamiseks tootmises. Tänu oma konstruktsioonile silohoidla võimaldab kiiresti läbi viia nii täitmist kui ka väljalaadimist.

Terasest silode vaieldamatult suurim eelis on nende mahtuvus. Silohoidla kujutab ennast vertikaalne konteiner puistematerjalide suure mahtuvusega, samal ajal kasutatud silohoidla alune pindala on ainult mitu ruutmeetrit. Näiteks terasest silohoidla mahtuvusega 100 m<sup>3</sup> alune pindala on 9 m<sup>2</sup>.

Puistematerjalide hoiustamiseks ettenähtud ladude ehk silode arvutused tehakse alltoodud metoodika alusel. [27]

Võtame aluseks, et neutraliseerimiseks kasutatav lubja keskmine kogus kuus on ca 62 tonni.

Siis valemi järgi lubja vajalikud varud kaheks kuuks on:

$$V_{lubj} = \frac{P_{lubj}^{kuu} \cdot T_{varu}}{K \cdot \rho_{lubj}} = \frac{62 \text{ tonni/kuus} \cdot 2 \text{ kuud}}{0,9 \cdot 0,9 \text{ t/m}^3} = 153 \text{ m}^3 \quad (5)$$

kus

$P_{lubj}^{kuu}$  – lubja kulud kuus, tonni

$T_{varu}$  – lubja vajalikud varud toimetamisel autotranspordiga, kuudes

$K$  – silo täitmise koefitsient, mis on 0,9

$\rho_{lubj}$  – lubja puistetuhedus, mis on 0,9 t/m<sup>3</sup>

Kuna saadud kogus kasutatakse ainult tootmisjääkide neutraliseerimiseks, aga massiivi kivistumiseks vajame kaks korda lubja rohkem, siis lubja vajalikud varud kaheks kuuks on ca 306 m<sup>3</sup>. Ühe silo vajalik maht arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$V_s = \frac{V_{lubj}}{N_s} = \frac{306 \text{ m}^3}{1} = 306 \text{ m}^3 \quad (6)$$

kus

$V_{lubj}$  – lubja vajalikud varud, m<sup>3</sup>,

$N_s$  – silo kogus

Ühe silo tegelik maht on järgmine:

$$V_s^t = \pi \cdot r^2 \cdot H = 3,14 \cdot 3,5^2 \cdot 10 = 385 \text{ m}^3 \quad (7)$$

kus

$\pi$  – matemaatiline konstant – 3,14

$r$  – silo raadius, m

$H$  – silo kõrgus, m

Lubja kahekuulise varude tagamiseks võtame kasutusele üks silo kõrgusega 10 m ja raadiusega 3,5 m, mille mahtuvus on 385 m<sup>3</sup>.

Põlevkivituha hoidmiseks on võimalik ka kasutada tuhasilod erinevate mahtuvustega, näiteks, kuni 2000 m<sup>3</sup> tuhka (kahekuulised varud neutraliseerimiseks ja massiivi kivistumiseks).

### **3.2.3 CO<sub>2</sub> kasutamise võimalused neutraliseerimisprotsessi kiirendamiseks**

Arvestades asjaolu, et ettevõtte tootmisala on piiratud ning ei ole piisavalt ruumi mahulise tuhahoidla ehitamiseks koos neutraliseerimissõlmega, neutraliseerimise protsessi ja segu kivistumise kiirendamiseks võime läbi vaadata ka Sillamäe SEJ heitgaasidest CO<sub>2</sub> eraldamise ja protsessi suunamise võimalust. CO<sub>2</sub> protsessi suunamisel kivistumise protsess tuleb mitme korda kiirem. Sel juhul neutraliseerimissõlmeks kasutatakse väiksem ala, kuid nõutakse lisatorujuhtme ehitamine CO<sub>2</sub> suunamiseks protsessi, ning ka süsinikdioksiidi SEJ suitsugaasidest eraldamise tehnoloogia väljatöötamine.

Sillamäe SEJ kasutab nii põlevkivi, kui ka biokütust. Ka biokütuse kasutamist kütusena ei väldita süsinikdioksiidi heidet atmosfääri, vaid hoitakse see heide süsinikuneutraalsena. Antud tehnoloogia realiseerimisel on oma keskkonnaplussid nii tehasele ohtlike jäätmete käitlemiseks, kui ka SEJ-le CO<sub>2</sub> heitmete vähendamiseks. On ka majanduslikud plussid ettevõtetele – kulude vähendamine.

AS Sillamäe SEJ paiskab välisõhku kuni 680 t/a saasteaineid, neid moodustavad tahked osakesed (põlevkivituhk), SO<sub>2</sub>, CO ja NO<sub>2</sub>, alifaatsed süsivesinikud. Paisatakse välisõhku ka raskmetalle (Hg, Cd, Pb, Cu, Zn, As, Cr, Ni, V).[28]

2020.aasta välisõhu saastamisega seotud aruande andmetel [28] AS Silpower CO<sub>2</sub> osa on 98-99% heitmete üldkogusest. CO<sub>2</sub> aastane heitkogus (2020. aasta andmed) nii biokütuste kui ka põlevkivi põletamisel on ca 129 000 tonni, millest 2/3 on süsinikuneutraalne.

Võime suunata neutraliseerimisprotsessi nii eraldatud CO<sub>2</sub>, kui ka SEJ torust paisatavad heitmed. Viimasel juhul neutraliseerimise meetodika vajab täpsustamist. Vääveldioksiidi aastane heitkogus on ca 244 tonni, lämmastikdioksiidi – 87 tonni ja tahkete osakeste summaarselt – 73 tonni. [28] Lämmastikdioksiid ja vääveldioksiid reageerivad veega, mille tulemusel tekkivad happed, nende neutraliseerimiseks kasutatakse alused ehk hüdroksiidid. Põlevkivituhk, mis kasutatakse happejääkide neutraliseerimiseks, võimaldab neutraliseerida antud happed. Raskemetallide jäägid tulevad ka lahustumatu sademesse.

CO<sub>2</sub> eraldamiseks suitsugaasidest on erinevaid tehnoloogiad, levinuim ja kindlasti ka üks efektiivsemaid on keemiline absorptsioon. Keemilise absorptsiooni puhul pestakse suitsugaasidest välja happelised gaasid, peamiselt süsinikdioksiid. Selleks suunatakse suitsugaasid korstna asemel absorptsioonikoloni, kus suitsugaasides olev CO<sub>2</sub> seotakse absorbendiga ning juhitakse koloni põhjast välja. Keemilise absorptsiooni puhul on tuntuimateks absorbentideks monoetanoolamiin (MEA), diglükoolamiin (DGA), dietanoolamiin (DEA), trietanoolamiin (TEA), metüüldietanoolamiin (MDEA) ja piperasiin (PZ). Ent amiinid pole ainukesed ained, mille abil saab süsinikdioksiidi suitsugaasidest eraldada.[26]

Peale keemilise absorptsiooni on võimalik süsinik suitsugaasidest eraldada ka absorptsiooniga füüsilistesse lahustesse, adsorptsiooniga, membraanidega jne.[26]

Suitsugaasidest CO<sub>2</sub> eraldamise tehnoloogiad koos arvutustega on põhjalikumalt läbi vaadatud teistes lõputöodes, mis võiks kasutada alusena antud alternatiivi elluviimisel.

Koostisest tulenevalt seob ka põlevkivituhk märkimisväärselt CO<sub>2</sub>-de. [29] Tuha CO<sub>2</sub> sidumise võime sõltub tuha koostisest, eelkõige vaba kaltsium- (CaO) ja magneesiumoksiidi (MgO) sisaldusest. Näiteks seob 4,1-protsendise CaO sisaldusega kiviõetuhk ühe tonni kohta kuni 26 kilogrammi süsihappegaasi. Eesti põlevkivituhkades on vaba CaO sisaldus kuni 30 protsenti ning sidumispotentsiaal selle võrra oluliselt kõrgem.[29]

Uuringute käigus selgus, et Eesti tuhaplatoodes seob üks tonn tuhasetteid keskmiselt 51 kilogrammi CO<sub>2</sub>-te, seda just väliskihide tsementeerumise tõttu. Tuhasette CO<sub>2</sub> sidumist on võimalik tõsta 5-6 korda, kui juhtida elektri jaamade, teiste tööstuste suitsugaase või CO<sub>2</sub> heitmeid läbi tuhahoidlate. Nii on võimalik tõsta tuha seotud süsihappegaasi mahtu keskmiselt 150 kilogrammi võrra tonni kohta, mis tõstaks süsiniku sidumise mahu 200 kilogrammini ühe tonni tuhasette kohta. [29]

Arvestades eeltoodut, kasutamisel neutraliseerimisprotsessis ca 3000 tonni põlevkivituhka võime siduda kuni 600 tonni CO<sub>2</sub>-de SEJ heitmetest ja välisõhust.

### **Alternatiivi kokkuvõte:**

Põlevkivituha või kustutamata lubja valik OÜ NPM Silmet jäätmete neutraliseerimiseks sõltub mitmest faktorist: toorme hinnast, transpordikuludest, kas otsustakse ehitada oma neutraliseerimissõlm või üle anda jäätmeid Eesti Energia AS-ile kuuluvatele SEJ-le neutraliseerimiseks. On vaja ka arvestada suure tootmisalade puudust.

Põlevkivi põletamisel tekib suurtes kogustes tuhka, mis on seni valdavas osas ladestatud töötlemiskomplekside lähedusse. Aastakümnete jooksul on Ida-Virumaale niiviisi kerkinud suured tuhaladestusalad, millele ei ole leitud rakendust. Loomaks väärtust ka energia tootmisel kõrvalproduktina tekkivale tuhale, on tehtud mitmeid uuringuid, et selgitada välja perspektiivikad kasutusvaldkonnad ja rakendamise võimalikkus. [26]

Uued võimalused CO<sub>2</sub> kasutamiseks toodete ja teenuste arendamisel köidavad nii valitsuste, tööstussektori kui ka investorite tähelepanu. CO<sub>2</sub> kasutamises nähakse võimalust kliimamuutuste leevendamiseks, aga ka muudel eesmärkidel, sealhulgas tehnoloogia juhtpositsiooni hõivamine ja ringmajanduse toetamine. [26]

Põlevkivituha kasutamisel ja CO<sub>2</sub> protsessi suunamisel tsementeerimise kiirendamiseks põlevkivituha alternatiivil on valdav roll, arvestades ka toorme vahetuses läheduses paiknemine.

## **3.3 Alternatiiv 2 ehk maailma uute tehnoloogiate kasutamise aspektid**

Nii ringmajanduse põhimõtete arvestades, kui ka ettevõtte jaoks alternatiiv hapete taastamiseks happejääkidest ja nende tagasi protsessi suunamiseks on parim variant, kuid nõuab suuri investeeringuid teadusuuringutesse ja seadmetesse. Esimeseks sammuks on vaja valida sobivat tehnoloogiat (nende ülevaade antakse teises peatükis), teha investeeringuid seadmete ostmiseks. Tulemuseks saime ringmajanduse tehnoloogiat, mis annab võimalust taastada happeid ning suunata neid tagasi protsessi ja vähendada tooraine kulusid, ka vähendada või isegi vältida ohtlike jäätmete teket ja tänu sellele vähendada ka ettevõtte saastetasukulusid. Ettevõtte teadusosakond viib läbi vajalikud katsed ja uuringud selle teema osas.

**Alternatiivi kokkuvõte:** vajab nii raha kui ka aja panust, tulemused on nähtavad alles aastate pärast. Ringmajanduse seisukohalt see alternatiiv on parim variant, kuna kõik ettevõtte jäätmeid taaskasutatakse, keskkonnamõju on minimaalne, investeeringud lähevad jätkuvalt oma tootmisse, mille tagajärjel ettevõtte saab suurem tulu.



## KOKKUVÕTE

Euroopa keemiatööstus käsitleb ringmajandust ühe osana strateegiast, mille eesmärk on muuta Euroopa ressursitõhusaks. Keskkonnakaitselised põhjused ja ärilised argumendid veenavad, et seda tuleks teha.

Järjest enam tuleb tähelepanu pöörata jäätmete ja mitmesuguste materjalide õigele sorteerimisele, koguste vähendamisele ning korduvale kasutamisele, et säästa loodusvarasid ja keskkonda.[7]

Ringmajanduse kaugem eesmärk peaks seisnema liikumises jäätmehoolduselt ressursside juhtimisele. Oma olemuselt ei ole ringmajandus kohustus, vaid ennekõike ettenägeliku ettevõtte valik.

Ohtlike jäätmete probleem on juba praegu üleval, kuna Eestis käitlusvõimsust pole, aga ohtlike jäätmete kogus hakkas kasvama. Ringmajanduse seisukohalt on nende ladustamine prügilasse halvim variant, see mõjub ka ettevõtte mainele turul. Taaskasutus on parim variant.

OÜ NPM Silmet näitel on läbi vaadatud erinevaid alternatiive nende tootmisprotsessis tekkivate ohtlike jäätmete käitlemiseks.

Tehtud uurimuse tulemusel võime kinnitada, et tavaline ladustamine prügilasse on halvim variant, nii keskkonnaohutuse jaoks, kui ka majanduslikult seisukohalt.

Kolmandas peatükis on läbi vaadatud mitu varianti happejääkide taaskasutamiseks, neutraliseerides need kas põlevkivituha või lubjaga, ehitades oma neutraliseerimissõlm. Arvutuste alusel võib öelda, et võrreldes põlevkivituha on kustutamata lubja nõutav kogus 2-4 korda väiksem, mis on positiivne moment piisava ruumi puudumisel. Valikut mõjutavad suures osas ostukulud, ka transpordikulud ja taristu tingimused.

Kuna ettevõtte tootmisala on piiratud, võib võtta kasutusele ka tehnoloogiaid SEJ heitmetest CO<sub>2</sub> eraldamiseks või isegi heitmete oma esialgsel kujul suunamiseks neutraliseerimisprotsessi, selle kiirendamise eesmärgiga. See võimaldab suure tõenäosusega võtta kasutusele Narva Elektriijaamade tuhkasid, vähendades samal ajal ka Sillamäe SEJ õhuheitmete negatiivset mõju.

Tuhasette CO<sub>2</sub> sidumist on võimalik tõsta 5-6 korda, kui juhtida elektriijaamade, teiste tööstuste suitsugaase või CO<sub>2</sub> heitmeid läbi tuhahoidlate.[29]

Kokkuvõtlikult võime selle alternatiivi valimisel öelda, et põlevkivienergeetika tootmisprotsessi kõrvalprodukti kasutamine võimaldab oluliselt säästa loodust ja praktiseerida ringmajandust.

Euroopa keemiatööstus arendab pidevalt uusi tehnoloogiaid, mis aitavad hoida ressursse liikumas suletud ringides kõikide suuremate majandussektorite lõikes. Keemiatööstusel on know-how ja võimekus, et muuta Euroopa majandus aja jooksul ringmajanduseks. Euroopas on kasutusel kolm protsessi - Outokumpu happe taastamise protsess, pürohüdrolüüsi kasutatav Pyromars protsess ning bipolaarsel elektrodialüüsil baseeruv Washington Steel regeneratsiooni süsteem hapete tootmisjääkide taastamiseks. Antud tehnoloogiad võimaldavad vähendada või isegi vältida ohtlike jäätmete teket ja tänu sellele vähendada ettevõtte tootmis- ja saastetasukulusid tulevikus, annavad ettevõttele ka võimaluse saavutada majanduslikku iseseisvust.

See on keemiatööstuse tulevik, mis tänapäeval konkreetse ettevõtte näitel veel uuritakse ja katsetakse. Ringmajandus nõuab suuri investeeringuid, kuid rahavoog tuleb tagasi oma tootmistehnoloogiasse ja majandusarengusse. Selles on ringmajanduse põhimõtete järgimise kasulikkus tootmisettevõtte jaoks. See, kas jäätmed kujutavad endast probleemi või ressursi, sõltub lõppkokkuvõttes sellest, kuidas me neid käitleme.

## SUMMARY

The European chemical industry considers the circular economy as part of the strategy of making the resource - efficient Europe. Environmental reasons and commercial arguments suggest that this should be done.

Increasing attention must be paid to the correct sorting, reduction and reuse of waste and various materials in order to save natural resources and the environment.[7]

The long-term goal of the circular economy must be transformation from waste to resource management. By its very nature, the circular economy is not an obligation, but above all a choice of a prudent company.

The problem of hazardous waste is already up, because there is no treatment capacity in Estonia, but the amount of hazardous waste started to grow. From the point of view of the circular economy, storing them in a landfill is the worst option, it also affects the company's reputation in the market. Recycling is the best option.

Õ NPM Silmet is taken as an example for various alternatives of handling hazardous waste generated in the production process.

As a result of research, we can confirm that conventional landfilling is the worst option, both from an environmental and an economic point of view.

Chapter 3 examines several variants of reusing acid residues by neutralizing them with either oil shale ash or lime during the construction of their neutralization units. Based on calculations, we can say that compared to oil shale ash, the required amount of quicklime is 2-4 times smaller, which is a positive moment in the absence of sufficient space. The choice is largely influenced by purchasing costs, including transport costs and infrastructure conditions.

Due to the limited production area of the company, technologies can also be introduced to capture CO<sub>2</sub> from the TPP emissions or even to divert the emissions in their original form to the neutralization process in order to accelerate it. This will most likely allow the ashes of Narva Power Plants to be used, while also reducing the negative impact of air emissions from Sillamäe TPP.

The CO<sub>2</sub> sequestration of ash sludge can be increased 5-6 times by passing flue gases or CO<sub>2</sub> emissions from power plants or other industries through ash storages. [29]

In summary, by choosing this alternative, we can say that utilizing the by-product of the oil shale energy production process allows to significantly save nature and practice the circular economy.

The European chemical industry is constantly developing new technologies to help keep resources moving in closed circles across all major economic sectors. The chemical industry has the know-how and capacity to transform the European economy into a circular economy over time. There are three processes in use in Europe - the Outokumpu acid recovery process, the Pyromars process for pyrohydrolysis and the Washington Steel regeneration system based on bipolar electro dialysis to recover acid production residues. These technologies make it possible to reduce or even prevent the generation of hazardous waste and, as a result, reduce the company's production and pollution charges in the future, and also enable the company to achieve economic independence.

This is the future of the chemical industry, which is still being studied and tested today on the example of a specific company. The circular economy requires large investments, but the cash flow comes to its production technology and economic development. It benefits the company from following the principles of the circular economy. Whether waste is a problem or a resource ultimately depends on how we handle it.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. TANEL RAIG, oktoober 2019. Ülevaade, Eesti tööstus teeb esimesi samme ringmajanduses. <https://toostusest.ee/uudis/2019/10/07/eesti-toostus-teeb-esimesi-samme-ringmajanduses/> [WWW] (08.02.2021)
2. Keskkonnaministeeriumi infomaterjalid. Ohtlikud jäätmed. Radioaktiivsed jäätmed. <https://www.envir.ee/et/jaatmed> [WWW] (27.01.2021)
3. Riigikontroll. Lehe lisamaterjalid: dokument „Ohtlike ja radioaktiivsete jäätmete käitlemise järelaudit“. <https://www.riigikontroll.ee/Suhtedavalikkusega/Pressiteated/tabid/168/557Ge tPage/1/557Year/1/ItemId/1008/amid/557/language/et-EE/Default.aspx> [WWW] (27.01.2021)
4. Tööstusheite seadus. <https://www.riigiteataja.ee/akt/110072020080> [WWW] (04.02.2021)
5. Gerli Ramler. Keemiatööstuse TOP: Märksõnadeks roheline energia ja puhas õhk. 21. november 2019. <https://www.toostusuudised.ee/uudised/2019/11/21/keemiatööstuse-top-marksonadeks-roheline-energia-ja-puhas-ohk> [WWW] (28.01.2021)
6. Keskkonnaministeerium. Ringmajandus. Ressursitõhusus. <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/ringmajandus/ressursitohusus> [WWW] (05.02.2021)
7. Statistikaamet. Jäätmed ja ringmajandus. <https://www.stat.ee/et/avastatistikat/valdkonnad/keskkond/jaatmed-ja-ringmajandus> [WWW] (08.02.2021)
8. Keskkonnaagentuur. Jäätmete vaheladustamise ülevaade 2011-2017. [https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/jaatmete\\_vaheladustamise\\_2011-2017\\_ulevaade.pdf](https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/jaatmete_vaheladustamise_2011-2017_ulevaade.pdf) [WWW] (28.01.2021)
9. Euroopa Parlamendi uudised. Ringmajanduse tähendus, vajalikkus ja kasulikkus.06.01.2021. <https://www.europarl.europa.eu/news/et/headlines/economy/20151201STO05603/ringmajanduse-tahendus-vajalikkus-ja-kasulikkus> [WWW] (07.02.2021)
10. Eesti keskkonnajuhtimise assotsiatsioon. Ringmajandus. <https://ekja.ee/et/ringmajandus/> [WWW] (07.02.2021)

11. AS ÖKOSIL LÄHTEOLUKORRA ARUANNE, OÜ Hendrikson & Ko, Töö nr 2051/14, Tartu 2016.  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/193788\\_okosil\\_as\\_lahteolukorra\\_aruanne.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/193788_okosil_as_lahteolukorra_aruanne.pdf) [WWW] (15.04.2020)
12. AS Silmet tehnoloogiliste protsesside kompleksse keskkonnamõju ja vastavuse PVT nõuetele hindamise aruanne, E-KONSULT OÜ töö nr 1131, Tallinn, jaanuar 2009.  
<http://www.sillamae.ee/documents/1122926/3557808/silmet+tehnoloogiliste+protsesside+KHM+Aruanne.pdf/24f06581-38a7-46d8-b4ef-d9d998d1c320>  
[WWW] (15.04.2020)
13. MOLYCORP SILMET AS. KESK TN 2 ASUVA KÄITISE LÄHTEOLUKORRA ARUANNE. OÜ Hendrikson & Ko, Töö nr 2359/15, Tartu 2016.  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/molycorp\\_silmet\\_lahteolukorra\\_aruanne.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/molycorp_silmet_lahteolukorra_aruanne.pdf) [WWW] (15.04.2020)
14. AS Ökosil keskkonnaaruanne 2019. [https://ecosil.ee/wp-content/uploads/2021/01/Keskkonnaaruanne-2019\\_OKOSIL.pdf](https://ecosil.ee/wp-content/uploads/2021/01/Keskkonnaaruanne-2019_OKOSIL.pdf) [WWW] (09.02.2021)
15. OÜ Entec Eesti, Tallinn. Töö nr 1022/14 „AS Sillamäe Soojuselektrijaam. Tuhakäitlusseadme ehitusprojekt“ 13.01.2015, 32 lk.
16. OÜ NPM Silmet väheradioaktiivse toorme töötlemiseks kiirgustegevusloa taotluse materjalid, 2017.a
17. AS Silpower keskkonnakompleksluba L.KKL.IV – 197728, 28.12.2020.  
[https://kotkas.envir.ee/permits/public\\_detail\\_view?represented\\_id=&search=1&permit\\_nr=&owner\\_name=silpower&issue\\_date\\_start=&issue\\_date\\_end=&valid\\_start\\_date\\_start=&valid\\_start\\_date\\_end=&search\\_location=&permit\\_status=ISSUED&permit\\_id=117850](https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=&search=1&permit_nr=&owner_name=silpower&issue_date_start=&issue_date_end=&valid_start_date_start=&valid_start_date_end=&search_location=&permit_status=ISSUED&permit_id=117850) [WWW] (17.02.2021)
18. Эрик Гамзеев. Будущие крупные проекты „Eesti Energia“ в области циркулярной экономики и зеленой технологии. Северное побережье. 14 января 2021. стр.5.
19. CONCEPTUAL DESIGN OF THE WASTE MANAGEMENT SYSTEM AT AS SILMET. SILLAMAE, ESTONIA. October 2001, PREPARED BY: Behre Dolbear & Company, Inc. 1050 Seventeenth Street, Suite 650 Denver, Colorado 80265. Project 00-068, 67p.
20. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019, Т.17 №2. 68 стр. Технологии обработки металлов. Rögener

- F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V. Sustainable stainless steel – A review on acid regeneration systems for application in continuous pickling lines, стр 38 – 48.
- [http://vestnik.magtu.ru/images/data\\_base/2019\\_2/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA\\_2019\\_2.pdf](http://vestnik.magtu.ru/images/data_base/2019_2/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA_2019_2.pdf) [WWW] (22.01.2021)
21. ANDRITZ PYROMARS From waste to profit  
<https://www.andritz.com/resource/blob/19298/2385fcc8e286593b4ee9f80026fec80/download-me-pyromars-en-data.pdf> [WWW] (22.01.2021)
22. Põlevkivituhkade ohtlikkuse uuring. Aruanne. 01. juuli 2019, Tallinn. Uuringu tellija: Keskkonnaministeerium. Uuringu teostajad: Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituut ja Tartu Ülikooli Geoloogia osakond. 184 lk.  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/tuhaohtlikkus\\_aruanne.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/tuhaohtlikkus_aruanne.pdf) [WWW] (16.02.2021)
23. „Pärast Sillamäe SEJ tuhaga neutraliseerimist saadud ja tuhaväljale ladestatud jäätmete monitooringu meetodika“. Ökosil AS, kinnitatud 15.10.2002. 3 lk.
24. Nordkalk AS jahvatatud kustutamata lubja teabeleht.  
[https://www.nordkalk.ee/document/6/1409/df64dd3/1f8f\\_upload\\_d609e92\\_nordkalk\\_cl\\_90\\_q\\_jl.pdf](https://www.nordkalk.ee/document/6/1409/df64dd3/1f8f_upload_d609e92_nordkalk_cl_90_q_jl.pdf) [WWW] (22.02.2021)
25. AS ÖkoSil tehnoloogiliste protsesside keskkonnamõju hindamise aruanne. OÜ E-Konsult, Töö nr. E1091, Tallinn 2008, 66 lk.
26. Ida-Viru maakonna CO<sub>2</sub> kasutamise arengustrateegia 2021–2030+. Detsember 2020. Energex Energy Experts OÜ, Sihtasutus Ida-Virumaa Tööstusala Arendus. 149 lk. [https://www.ivia.ee/wp-content/uploads/2021/01/Ida-Viru\\_CO2\\_kasutamise\\_strateegia.pdf](https://www.ivia.ee/wp-content/uploads/2021/01/Ida-Viru_CO2_kasutamise_strateegia.pdf) [WWW] (02.03.2021).
27. Методические указания к выполнению практических работ и курсового проектирования по дисциплине «Технология силикатных ячеистых стеновых материалов автоклавного твердения», направление подготовки «Строительство», профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» (270804.62), Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань 2015. 32 стр. [https://www.kgasu.ru/upload/iblock/e74/6.Kuznezova\\_G\\_V2.pdf](https://www.kgasu.ru/upload/iblock/e74/6.Kuznezova_G_V2.pdf) [WWW] (28.04.2021)
28. AS Silpower 2020.aasta välisõhu saastamisega seotud aastaaruanne. Keskkonnaameti KOTKAS süsteemi andmed.
29. Kristjan Leben, doktoritöö „Long-term diagenetic transformation and carbon

sequestration potential of Ca-rich oil shale ash waste deposit sediments",

Tartu Ülikool, 2021, lk 52-56.

[https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/71480/leben\\_kristjan.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/71480/leben_kristjan.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [WWW] (26.04.2021).

30. Keskkonnaministeerium. Riigi jäätmekava 2014 – 2020.

<http://docplayer.net/53744029-Keskkonnaministeerium-riigi-jaatmekava.html>

[WWW] (03.06.2021).



# **LISAD**

# LISA 1. ANDMED OÜ-S NPM SILMET TEKKINUD RAFINAATIDE JA NENDE KOOSTISE KOHTA.

2020. aasta

OÜ-lt NPM Silmet AS-i Ökosil neutraliseerimissõlme väävelhape- ja vesinikfluoriidhappe jääkide üleandmine											
Jäätmekoodid:			060101* -väävelhape ja väävlishape								
			060103* -vesinikfluoriidhape								
Aja- vahemik	Ohtlike jäätmete saatekirja nr	Kuupäev	Jäätmete kogus	Komponentide kogused						Sum	Akti nr
				F	SO <sub>4</sub>	Fe	K	Na	Ca		
<i>kg</i>											
jaanuar	129018	01.02.20	<b>229785</b>	90280	124290	15094	32	40	49	229785	194
veebruar	131378	01.03.20	<b>224951</b>	88050	119230	17584	12	30	45	224951	195
märts	134000	01.04.20	<b>259097</b>	124210	110710	24081	17	33	46	259097	196
aprill	212637	01.05.20	<b>212637</b>	96130	104860	11583	7	23	34	212637	197
mai	139617	01.06.20	<b>175723</b>	68750	87380	19472	11	70	40	175723	198
juuni	142525	01.07.20	<b>109585</b>	50870	43600	15052	7	32	24	109585	199
juuli	145857	01.08.20	<b>179421</b>	88040	83140	8190	5	24	22	179421	200
august	147932	01.09.20	<b>175721</b>	42100	124780	8799	6	24	12	175721	201
september	151433	01.10.20	<b>183862</b>	53190	124020	6617	2	22	11	183862	202
oktoober	155296	01.11.20	<b>214732</b>	70620	129610	14429	7	47	19	214732	203
november	158817	01.12.20	<b>318764</b>	67040	242340	9323	6	34	21	318764	204
detsember	161085	01.01.21	<b>254628</b>	78930	162430	13149	12	64	43	254628	205
<b>Aastakogus</b>			<b>2538906</b>	<b>918210</b>	<b>1456390</b>	<b>163373</b>	<b>124</b>	<b>443</b>	<b>366</b>	2538906	
<i>t</i>											
I kvartal			<b>713,833</b>	302,540	354,230	56,759	0,061	0,103	0,140	713,833	57,063
II kvartal			<b>497,945</b>	215,750	235,840	46,107	0,025	0,125	0,098	497,945	46,355
III kvartal			<b>539,004</b>	183,330	331,940	23,606	0,013	0,070	0,045	539,004	23,734
IV kvartal			<b>788,124</b>	216,590	534,380	36,901	0,025	0,145	0,083	788,124	37,154
<b>Kokku aastas</b>			<b>2538,906</b>	<b>918,210</b>	<b>1456,390</b>	<b>163,373</b>	<b>0,124</b>	<b>0,443</b>	<b>0,366</b>	<b>2538,906</b>	<b>164,306</b>

Allikas: AS Ökosil 2020. aasta jäätmearuanne

## LISA 2. TUHKADE KEEMILINE KOOSTIS

Tabel 1. Auvere CFBC katla tuhkade keemiline koostis (keskmised väärtused, mass %) [22]

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Tsoon	KT	ÜK+ÖKO	ÕES	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	KF
<b>Ühend</b>										
SiO <sub>2</sub>	8,12	30,58	28,40	29,13	29,98	29,33	26,25	20,52	15,68	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,37	3,12	3,49	3,35	3,76	3,87	3,71	2,90	6,09	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,26	5,81	6,39	6,81	6,55	6,96	6,64	5,12	3,50	
CaO	52,22	38,75	38,65	37,48	38,11	36,34	38,99	47,21	45,97	
MgO	5,00	4,20	4,90	4,43	4,39	4,42	4,44	3,76	3,65	
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,20	0,15	0,16	0,25	0,18	0,24	0,18	0,22	
K <sub>2</sub> O	0,57	3,10	3,19	3,37	3,52	3,66	3,15	2,22	1,70	
Cl	0,21	0,51	0,52	0,58	0,51	0,49	0,59	0,64	0,51	
CO <sub>2</sub>	22,34	7,89	6,56	5,88	5,44	6,33	6,14	5,07	7,91	
CaO <sub>vaba</sub>	13,97	16,05	17,61	18,13	17,42	13,52	14,90	20,08	31,76	
C (CO <sub>2</sub> )	6,09	2,15	1,79	1,60	1,48	1,73	1,67	1,38	2,16	
C <sub>org</sub>	0,51	0,07	0,13	0,14	0,11	0,08	0,10	0,18	0,27	
SO <sub>3</sub> kogu	5,04	4,61	6,16	6,42	4,96	5,54	6,72	5,93	4,25	
S <sub>sulfaat</sub>	1,98	0,69	1,32	1,53	1,39	1,54	1,65	1,76	1,53	
SO <sub>3</sub> sulfaat	4,94	1,73	3,31	3,83	3,48	3,85	4,13	4,41	3,83	
S <sub>sulfiid</sub>	0,16	1,15	1,14	1,04	0,61	0,73	1,10	0,64	0,17	
C <sub>elem</sub>	6,61	2,21	1,92	1,74	1,60	1,80	1,74	1,57	2,37	
N <sub>elem</sub>	0,02	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	

Tekkiv tuhavoog jaotub kümne erineva tsooni vahel: koldetuhk – KT, ülekuumendi ja ökonomaiser – ÜK+ÖKO, õhueelsoojendi (ÕES), elektrifiltri 1. väli – EF1, elektrifiltri 2. väli – EF2, elektrifiltri 3. väli – EF3, elektrifiltri 4. väli – EF4, elektrifiltri 5. väli – EF5, kottfilter – KF, heittuhk atmosfääri.

Tabel 2. FW CFBC katla tuhade keemiline koostis (EEJ 8. plokki tuhade analüüsi tulemused) [22]

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Ühend	Tsoon	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	EF1	EF2	EF3	EF4	Heittuhk
SiO <sub>2</sub>		6,20	31,88	31,91	26,61	32,39	32,85	29,93	25,62	27,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,65	4,10	4,09	3,77	4,31	4,31	4,55	4,60	4,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,12	9,63	9,86	8,30	10,31	10,57	10,26	9,35	9,12
CaO		54,50	31,52	32,33	37,29	32,52	32,01	32,66	34,35	34,19
MgO		4,42	5,72	6,03	7,56	5,62	5,77	6,40	6,71	7,11
Na <sub>2</sub> O		0,03	0,14	0,13	0,12	0,18	0,17	0,15	0,16	0,10
K <sub>2</sub> O		0,52	3,81	3,79	2,89	3,93	3,99	3,53	2,51	2,83
Cl		0,05	0,33	0,36	0,34	0,24	0,26	0,37	0,70	0,62
CO <sub>2</sub>		23,73	3,62	2,98	2,04	2,81	2,74	3,28	3,94	2,80
CaO <sub>vaba</sub>		14,31	14,16	15,64	18,95	16,29	15,29	11,46	8,23	
C (CO <sub>2</sub> )		6,47	0,99	0,81	0,56	0,77	0,75	0,89	1,07	0,90
C <sub>org</sub>		0,61	0,12	0,14	0,16	0,12	0,12	0,07	0,10	
SO <sub>3</sub> kogu		4,12	7,44	6,29	10,69	6,08	6,92	7,25	9,23	9,77
S <sub>sulfaat</sub>		1,77	3,51	3,35	4,53	2,64	2,56	2,81	3,57	
SO <sub>3</sub> sulfaat		4,43	8,77	8,38	11,31	6,59	6,41	7,03	8,93	
S <sub>sulfiid</sub>		0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	0,27	0,11	0,14	
C <sub>elem</sub>		7,08	1,11	0,95	0,71	0,89	0,87	0,96	1,11	
N <sub>elem</sub>		0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	

Tuha jaotumine erinevates tsoonides: koldetuhk – KT , ülekuumendi – ÜK , ökonomaiser – ÖKO, õhuelsoojendi – ÕES, elektrifiltri 1. väli – EF1, elektrifiltri 2. väli – EF2 , elektrifiltri 3. väli – EF3, elektrifiltri 4. väli – EF4 , heittuhk atmosfääri.

Tabel 3. Sillamäe SEJ põlevkivituha koostis [25]

Element	Ladestatud põlevkivituha koostis  [%]
<i>CaO</i>	28,5-53,5
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3,5-5,0
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	4,0-9,5
<i>MgO</i>	4,0-5,0
<i>K<sub>2</sub>O</i>	1,5-5,5
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0,12-0,30
<i>SiO<sub>2</sub></i>	14,5-35,0
<i>CO<sub>3</sub></i>	7,4-19,1