



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOI



PÕLEVKIVITUHKADE OHTLIKKUSE UURING

Aruanne

Uuringu tellija: Keskkonnaministeerium

Uuringu teostajad: Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituut ja
Tartu Ülikooli Geoloogia osakond

Uuringu rahastaja: SA Keskkonnainvesteeringute Keskus



KESKKONNAINVESTEERINGUTE
KESKUS

01. juuli 2019

Tallinn

Töö teostajad:

Tallinna Tehnikaülikooli poolt on uuringugruppi kaasatud järgmised isikud:

Andres Siirde, PhD, professor ja Energiatehnoloogia instituudi direktor

Tõnu Pihu, PhD, professor ja Põlemisprotsesside teadusuuringute keskuse juht

Alar Konist, professor ja Kütuse ja õhuemissioonide analüüsi teadus- ja katselabori juht

Oliver Järvik, PhD, vanemteadur

Dmitri Nešumajev, PhD, vanemteadur

Birgit Maaten, PhD, vanemteadur

Rivo Rannaveski, PhD, nooremteadur

Mari Sulg, doktorant, ettevõtlusspetsialist

Tartu Ülikooli poolt on uuringugruppi kaasatud järgmised isikud:

Kalle Kirsimäe, PhD, professor

Kärt Paiste, PhD, geoloogia spetsialist

Martin Liira, PhD, teadur

Riho Mõtsep, PhD, teadur

Peeter Somelar, PhD, teadur

Kristjan Leben, doktorant-nooremteadur

Peeter Paaver, doktorant-nooremteadur

Põlevkivituhkade ohtlikkuse uuring

Sisukord

Kasutatud lühendid.....	6
Uuringu kokkuvõte.....	8
Tabelite nimekiri	11
Jooniste nimekiri.....	17
1 Sissejuhatus ja uuringu eesmärk.....	19
2 Põlevkivi, põlevkivi kasutamine ja olemasolev tuha ohtlikkuse käsitlemise olukord	23
2.1 Põlevkivi	23
2.2 Põlevkivi kasutamine.....	24
2.3 Põlevkivituha ohtlikkuse käsitlemise käesolev olukord	26
3 Põlevkivituhkade liigid ja tekkimine	30
3.1 Auvere 300 MW _{el} CFBC katlaga Alstom/GE elektrijaam	33
3.1.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	33
3.1.2 Tuhavood	34
3.2 Eesti Elektriijaama (EEJ) ja Balti Elektriijaama (BEJ) CFBC katlad	36
3.2.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	36
3.2.2 Tuhavood	37
3.3 Tolmpõletustehnoloogia – NID-ga varustatud 185 MW _{el} tolmpõletus energiaplokid 40	
3.3.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	40
3.3.2 Tuhavood	41
3.4 Tolmpõletustehnoloogia – 185 MW _{el} tolmpõletus energiaplokk.....	43
3.4.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	43
3.4.2 Tuhavood	44
3.5 Enefit280	46
3.5.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	46
3.5.2 Tuhavood	47
3.6 Enefit140	48
3.6.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	48
3.6.2 Tuhavood	50
3.7 Petroter	51
3.7.1 Tehnoloogia kirjeldus.....	51

3.7.2	Tuhavood	52
4	Põlevkivituha koostis ja omadused.....	53
4.1	Elektrijaamade tuhad	55
4.1.1	Elektrijaamade tühkade keemiline koostis.....	55
4.1.2	Elektrijaamade tühkade mineraalne koostis	56
4.2	Põlevkiviõlitööstuse tuhajäätmete keemiline ja mineraalne koostis	60
4.3	Orgaanilised komponendid põlevkivituhkades.....	62
4.4	Raskmetallid ja nende leostumine	63
4.5	Põlevkivituhkade ja poolkoksi toksilisus: kirjanduse ülevaade.....	64
4.6	Põlevkivituhkade kasutamine	65
5	Süsi ja söetuhad	66
5.1	Söe klassifikatsioon	67
5.2	Söe kasutamine	68
5.3	Söetuhkade kasutamine.....	70
5.4	Söetuhkade füüsikalised-keemilised omadused.....	76
5.5	Söetuhkade ökotoksikoloogia	83
6	Söe- ja põlevkivituhkade võrdlus	88
6.1	Söe ja põlevkivi koostise võrdlus.....	88
6.2	Tuhkade koostise võrdlus.....	89
6.3	Leostustuvate ühendite kontsentratsioonid põlevkivituha ja kivisöetuha leovees ..	93
6.4	Ökotoksikoloogiliste omaduste võrdlus.....	95
7	Põlevkivituha kui jäätme klassifitseerimise alused ja reguleeriv seadusandlus.....	96
7.1	Jäätmete klassifitseerimise meetodid.....	99
7.2	Ohuklassid	102
7.2.1	Plahvatusohtlik HP 1	102
7.2.2	Oksüdeeriv HP 2.....	103
7.2.3	Tuleohtlik HP 3	104
7.2.4	Ärritav — nahka ärritav ja silmi kahjustav HP 4.....	105
7.2.5	Mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav mürgisus HP 5	107
7.2.6	Äge mürgisus HP 6	107
7.2.7	Kantserogeenne HP 7.....	108
7.2.8	Söövitav HP 8	109
7.2.9	Nakkust tekitav HP 9	109
7.2.10	Reproduktiivtoksiline HP 10.....	109
7.2.11	Mutageenne HP 11	110

7.2.12	Eraldab väga mürgiseid gaase HP 12	111
7.2.13	Sensibiliseeriv HP 13	111
7.2.14	Keskkonnaohtlik HP 14	112
7.2.15	Jäätmed, millel võivad ilmnedä ülalnimetatud ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jätmetes otseselt HP 15.....	116
8	Eesti põlevkivituhkade võrdlus liigiti HP-dega.....	118
8.1	Plahvatusohtlik HP 1.....	118
8.2	Oksüdeeriv HP 2	118
8.3	Tuleohtlik HP 3	118
8.4	Ärritav — nahka ärritav ja silmi kahjustav HP 4.....	119
8.5	Mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav mürgisus HP 5.....	121
8.6	Äge mürgisus HP 6.....	123
8.7	Kantserogeenne HP 7	124
8.8	Söövitav HP 8.....	126
8.9	Nakkust tekitav HP 9	128
8.10	Reproduktiivtoksiline HP 10	129
8.11	Mutageenne HP 11	129
8.12	Väga mürgiseid gaase eraldav HP 12.....	131
8.13	Sensibiliseeriv HP 13.....	132
8.14	Keskkonnaohtlik HP 14	132
8.15	Jäätmed, millel võivad ilmnedä ülalnimetatud ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jätmetes otseselt – HP 15.....	137
9	Põlevkivituhkade potentsiaalselt ohtlike omaduste olemus ja jäätme ohtlikkuse hinnang võrreldes söetuhkadega.....	138
9.1	CaO ja Ca(OH) ₂	138
9.2	Kristallilise kvartsitolmu ohtlikkus.....	143
10	Järeldused	146
11	Kirjandus	154
12	Lisa 1. Mineraalne koostis.....	168
13	Lisa 2. Keemiline koostis	171
14	Lisa 3. Jälgelemendid	174
15	Lisa 4. Leostumine.....	180
16	Lisa 5. HP 14 arvutustulemused.....	182

Kasutatud lühendid

ANH – kindlasti tavajääde (ingl k *Absolute Non-Hazardous*)

ar – tarbimisaine

BEJ – Balti Elektriijaam

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

CCP – söe põletamisel tekkiv produkt (ingl k *Coal Combustion Product*)

daf – tuhavaba kuivaine

db – kuivaine põhine

EEJ – Eesti Elektriijaam

EF – elektrifilter

EK – Euroopa Komisjon

EL – Euroopa Liit

EMÜ – Euroopa Majandusühendus

EÜ – Euroopa Ühendus

FBC – keevkihtpõletus (ingl k *fluidized bed combustion*)

FGD – suitsugaaside väävlitustamine (ingl k *Flue Gas Desulphurization*)

HP – ohtlik omadus

KF – kottfilter

LOQ – määramispiir

LT – lendtuhk

N/A – pole teada

NID – integreeritud väävlirastus (ingl k *Novel Integrated Desulphurisation*)

KT – koldetuhk

PC – tolmpõetetus (ingl k *Pulverized Combustion*)

SDA – (Väävli) märgärastus (ingl k *Spray Dryer Absorber*)

SKK – sadestatud kaltsiumkarbonaat

STOT – mürgisus sihtelundi suhtes

SV - soojusvaheti

TSK – tahke soojuskandja

TU – toksilisuse ühik (ingl k *Toxicity Unit*)

VT – vedeltuhk (šlakk)

ÕES – õhuelsoojendi

ÖKO – ökonomaiser

WHB – jääsoojuskatel (ingl k *Waste Heat Boiler*)

XRD – röntgendifraktsioonanalüüs

Uuringu kokkuvõte

Käesolev uuring annab ülevaate Eestis kasutatavast põlevkivist (peatükk 2), põlevkivielektrijaamades ja õlitööstuses rakendatavatest tehnoloogiatest ning tekkivatest jäätmete/tuhkade kogustest (peatükk 3), nende koostisest ja omadustest (peatükk 4), põlevkivituha/jäätmete ohtlikkuse hindamise alustest (peatükk 7) ning ohtlikkuse hinnangust (peatükk 8). Põlevkivituhkade potentsiaalse ohtlikkuse võrdlevaks analüüsiks on uuringus kirjeldatud analoogse fossiilse kütuse – söe – kasutamiskäitikat ja tehnoloogiaid ning söe omadusi, samuti söe põletamisel tekkivate söetuhkade koguseid, omadusi, jäätmete klassifikatsiooni ja taaskasutust (peatükk 5).

Uuringu peamised järeldused:

- Põlevkivi põletamisel ja tahke soojuskandja tehnoloogiates tekkivate tuhkade koostis ning omadused sõltuvad otseselt põletamistehnoloogiast ja temperatuurist.
- Tänu põlevkivi karbonaatsusele on põlevkivituhkades kõrge vaba CaO (lubja) ja selle hüdratiseerumisel tekkiva Ca(OH)₂ sisaldus (kuni 35%), mis põhjustab tuha kõrge aluselisuse.
- Keevkihis põletuse (CFBC) tehnoloogia korral ei ole karbonaatide lagunemine täielik ning võrreldes tolmpõletuse (PC) tuhaga on tuhavoogude vaba lubja sisaldus madalam.
- Vaba lubja sisaldus CFBC tuhkades sõltub kütuse kvaliteedist ning selle sisaldus on madalam kõrgema kütteväärtusega põlevkivi põletamisel.
- Jälgelementide, sh raskmetallide, sisaldused on põlevkivituhas madalad ja ei ületa reeglina teenindus- ja/või elamumaale seatud sihtarve.
- Lähtuvalt EL määrusest nr 1357/2014 hinnatud jäätmete ohtlikele omadustele (HP 1 - HP 15) liigituvad põlevkivituhad ohtlikuks koodiga HP 4 ja/või HP 8 tulenevalt põlevkivituhkade kõrgest lubja (vaba CaO) sisaldusest.
- Põlevkivituhad liigituvad vastavalt määrusele ohtlikuks samuti koodidega HP 5, HP 6, HP 7, HP 11 ja HP 13. See tuleneb sisse hingatava kristallilise kvartsi või sisse hingatava kristallilise kvartsi ja lubja (vaba CaO) sisaldusest.
- Ohtliku omaduse HP 14 hindamise tulemused sõltuvad kasutatavast meetodikast. Ökotoksilisuse bioloogiliste katsete põhjal on põlevkivituhad liigitatavad ohtlikeks. Määruses ja selle lisades soovitatud arvutusmeetodite kohaselt on põlevkivituhad mitteohtlikud.
- Kuna EL-s puudub ühtne meetodika HP14 hindamiseks ja lähtudes Euroopa Komisjoni soovistest ning arvestades lähiriikide praktikast (nt. Soome), on otstarbekas lähtuda ohtliku omaduse HP 14 hindamisel arvutusmeetoditest.

- Põlevkivituhad on koostiselt ja omadustelt võrreldavad ligniidi ja sub-bituminoosse söe põletamisel tekkivate nn klass C tuhkadega, kus lubja sisaldus on >5% ning võib ületada 20% piiri.
- Põlevkivituhad ei eristu söetuhkadest keskkonnaohtlikkuse (HP 14) poolest, mis sarnaselt põlevkivituhkadele liigituvad (peamiselt vesilahuste kõrge aluselisuse ja mineraalsuse tõttu) ökotoksikoloogilistes katsetes toksilisteks.
- Söe põletamisel tekkivaid tuhkasid (sõltumata nende täpsemast koostisest, sh ligniit ja sub-bituminoosne süsi) liigitatakse EL jäätmenimistus koodidega: 10 01 01 – Koldetuhk, räbu ja katlatuhk v.a koodinumbriga 10 01 04 nimetatud katlatuhk (koodiga 10 01 04* on selles nimestus õlilendtuhk ja -katlatuhk); 10 01 02 – kivisöelendtuhk; 10 01 24 – keevkihikatelde liiv ja 10 01 05 – Protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmed. Kõik nimetatud jäätmed on tähistatud kui kindlasti tavajäätmed (ANH) ning nende ohtlike omaduste edasine hindamine ei ole vastavalt määrusele vajalik.

Tulenevalt sellest, et Eesti põlevkivituhad vastavad oma keemiliselt ja mineraalselt koostiselt ning omadustelt Euroopas energeetikas väga laialdaselt kasutatava söe alaliigi ligniidi (vt peatükk 5) põletamisel tekkivatele klass C tuhkadele, on antud töö peamine järeldus, et põlevkivi põletamisel tekkivaid kolde- ja lendtuhkasid tuleks käsitleda sarnaselt söe põletamisel tekkivate kolde- ja lendtuhkadega.

Käesoleva praktika kohaselt on Eesti põlevkivi kolde- ja lendtuhale määratud eraldi jäätmekoodid ja neid käsitletakse ohtlike jäätmetena. Tavajäätmeks klassifitseerub ainult väävlirastusseadmetest (NID) pärit tuhk, millele ei ole Eesti siseselt määratud eraldi jäätmekoodi.

Lähtuvalt söetuhkade ja põlevkivituhkade üheselt võrreldavatest omadustest ja ohtlikkuse hinnangutest ning EL praktikast selliste jäätmete klassifitseerimisel ei ole põlevkivituhkade liigitamine eraldiseisva koodiga põhjendatud. Siinjuures on tähtis asjaolu, et EL-s on otsustatud, et söetuhad, kuigi need omavad teatavaid ohtlikke omadusi jäätme raamdirektiivi ohtlikkuse hinnangu alusel, on käsitletavad kindlasti tavajäätmetena.

Eeltoodust tulenevalt on õigustatud:

- Põlevkivi koldetuhkadele jäätmekoodi 10 01 01 määramine.
- Põlevkivi lendtuhkadele jäätmekoodi 10 01 02 määramine.

Kuna peenkristallilise kvartsi liigitumine ohtlikuks HP 5, HP 6, HP 7, HP 11 ja HP 13 mõistes ei sõltu ainult kristallilise kvartsi enese olemasolust vaid paljudest lisateguritest (sh keemilised ja füüsikalised omadused, kaasnevad ained ja ühendid jne), siis tuleb enne kaalutletud otsuse tegemist ja nende

tuhkade ohtlikeks liigitamist viia läbi spetsiaalsed *in vitro* uuringud põlevkivi lendtuhkade võimalike kahjulike mürgiste/mutageensete/kantserogeensete omaduste selgitamiseks.

Tabelite nimekiri

Tabel 1. Euroopa Komisjoni otsusega 2000/532/EÜ kehtestatud jäätmenimistu jäätmekoodid jõujaamades tekkinud jäätmetele.	20
Tabel 2. Põlevkivi lendtuha (FW CFBC) osakeste suurused (μm).....	55
Tabel 3. Süte erinevate klassidesse liigitamine vastavalt ASTM D388-12 standardile	68
Tabel 4. Ameerika Ühendriikide olulisemate söemaardlate süte põletamisel tekkivate tuhade keemiline koostis	70
Tabel 5. REACH-regulatsiooni raames registreeritud söe põletamisel tekkivad tooted [64]	71
Tabel 6. Söe põletamisel tekkinud tuhade taaskasutamine (tuha liikide kaupa) [short tonnes, 1 short tonne = 0,91 tonni] Ameerika Ühendriikides aastal 2017 [65]	74
Tabel 7. Bituminoosse söe ja/või antratsiidi (koos)põletamisel keevkihtkatlas tekkivate tuhade keemilise koostise piirid (mass%)	77
Tabel 8. Poolkuiva meetodiga suitsugaaside väävliärastuses tekkiva produkti keemilise koostise piirid (mass%)	78
Tabel 9. Söe lendtuha keemilise koostise varieeruvus sõltuvalt kasutatud söe liigist [mass %]	78
Tabel 10. Söe koldetuha keskmine keemiline koostis sõltuvalt söe liigitusest [mass %]	79
Tabel 11. Lendtuhkade koostis (väljendatuna oksiidides), niiskussialdus ning LOI (põletuskadu) (mass %)	80
Tabel 12. Jälgelementide sisaldus lendtuhkades (mg/kg)	80
Tabel 13. Lendtuha proovide mineraalne koostis (mass %)	81
Tabel 14. Tuhkade leostustestide tulemusena saadud leostusvee parameetrid	82
Tabel 15. Söe lendtuha osakeste suuruse jaotus (mass%)	83
Tabel 16. Tuhaosakeste suuruse jaotus (mass%).....	83
Tabel 17. Ülevaade mõningatest kivisöetuha toksilisust käsitlevatest artiklitest ja artiklite põhijäreldused	85
Tabel 18. Erinevate sötetüüpide [59] ja Eesti põlevkivi parameetrid	88
Tabel 19. Primaarsete ja sekundaarsete mineraalide sisaldusete varieeruvus põlevkivituhkades ja sötetuhkades [mass %].....	91

Tabel 20. Põlevkivituhkade ja söetuhkade jälgelementide kontsentratsiooni [mg/kg] varieeruvus (miinimum - maksimum) põlevkivi- ja söetuhkades Tabel 12, Tabel 83 ja Tabel 84 andmete põhjal..	91
Tabel 21. Põlevkivituhkade ja söetuhkade (eraldi välja toodud ligniit) keemilise koostise varieeruvus [mass %].....	92
Tabel 22. Keskmised põlevkivituhkade ja söetuhkade leostusvetes (Tabel 85 alusel) mõõdetud jälgelementide sisaldused [µg/l], keskmised kloriid- ja sulfaationide sisaldused [mg/l], keskmine juhtivus [µS/cm] ja leostusvee keskmine pH.....	94
Tabel 23. Kivisöe- ja põlevkivituha (öko)toksikoloogiliste omaduste võrdlus vastavalt Euroopa Kemikaaliameti (ECHA) andmebaasile.....	95
Tabel 24. Jäätmete omadused(ohuklassid), millel alusel loetakse jäätmeid ohtlikeks jäätmeteks	98
Tabel 25. POS-määruses loetletud ained ja nende piirväärtused.....	99
Tabel 26. Põlevkivituhas esinevate mineraalide ohulaised	100
Tabel 27. Ohulaised summaarse sisalduse jaoks.....	100
Tabel 28. Ohulaised üksikaine jaoks	100
Tabel 29. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 1 (plahvatusohtlik).....	103
Tabel 30. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 2 (oksideeriv).....	103
Tabel 31. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 3 (tuleohtlik)	105
Tabel 32. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 4.....	106
Tabel 33. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 5.....	107
Tabel 34. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 6.....	108
Tabel 35. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 7.....	108
Tabel 36. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 8.....	109

Tabel 37. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 10.....	110
Tabel 38. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 11 (mutageenne).....	110
Tabel 39. Jäätmete koostisosade ohulaised ja täiendava ohuteabe koodid jäätmete klassifitseerimiseks ohtlikeks koodiga HP 12 (eraldab väga mürgiseid gaase).....	111
Tabel 40. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 13 (sensibiliseeriv).....	111
Tabel 41. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning iga ohulause koodiga liigitatud aine vastav sisalduse piirnorm jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 14 (keskkonnaohtlik).....	113
Tabel 42. HP 14 hindamiseks kasutatavad summeerimise meetodid [114].....	114
Tabel 43. Erinevate EL-i liikmesriikide poolt ohtliku omaduse HP 14 hindamiseks sätestatud Daphnia magna testi piirväärtused [115].....	115
Tabel 44. Mõndades EL-i liikmesriikides ohtliku omaduse HP 14 hindamiseks kasutatavad biotestid [115].....	116
Tabel 45. Jäätmete koostisosade ohulaised ja täiendava ohuteabe koodid jäätmete klassifitseerimiseks ohtlikeks koodiga HP 15.....	117
Tabel 46. Vaba CaO sisaldus ligniidi põletamisel tekkivates tuhkades.....	120
Tabel 47. Ohulause koodi H314 (Skin Corr. 1A) omavate ühendite kontsentratsioon elektriijaamade tuhkades.....	120
Tabel 48. Ohulause koodi H314 (Skin Corr. 1A ja Skin corr. 1B) omavate ühendite kontsentratsioon elektriijaamade tuhkades ja tuhkade klassifikatsioon: HP 4 - ■ , HP 8 - ■ , MITTEOHTLIK - ■ .	121
Tabel 49. Ohulause koodi H314 (Skin Corr. 1A), H315, H318 ja H319 omavate ühendite kontsentratsioon õlitööstuse tuhkades ja tuhkade klassifikatsioon: HP 4 - ■ , VAJAB TÄIENDAVID UURINGUID - ■ , MITTEOHTLIK - ■	121
Tabel 50. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv hinnang võrdlustuhkadele: HP 4 - ■ , HP 8 - ■	121
Tabel 51. Ohulause koodi H370 või H372 omavate üksikainete põhine elektriijaamade tuhkade HP 5 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	122

Tabel 52. Ohulause koodi H370 või H372 omavate üksikainete põhine elektriyaamade tuhkade HP 5 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	122
Tabel 53. Elektriyaamade tuhkade ohtliku omaduse HP 6 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	124
Tabel 54. Õlitööstuse tuhkade ohtliku omaduse HP 6 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■ , VAJAB TÄIENDAVAID UURINGUID - ■	124
Tabel 55. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv HP 6 klassifikatsioon võrdlustuhkadele: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	124
Tabel 56. Elektriyaamade tuhkade ohtliku omaduse HP 7 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	126
Tabel 57. Õlitööstuse tuhkade ohtliku omaduse HP 7 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	126
Tabel 58. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv HP 7 klassifikatsioon võrdlustuhkadele: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	126
Tabel 59. Elektriyaamade tuhkade ohtliku omaduse HP 8 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	127
Tabel 60. Õlitööstuse tuhkade ohtliku omaduse HP 8 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	127
Tabel 61. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv hinnang võrdlustuhkadele ja ohulause koodiga H314 ainete summaarne sisaldus nendes tühkades: HP 4 - ■ , HP 8 - ■	127
Tabel 62. Elektriyaamade tuhkade ohtliku omaduse HP 11 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	130
Tabel 63. Õlitööstuse tuhkade ohtliku omaduse HP 11 klassifikatsioon: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	131
Tabel 64. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv HP 11 klassifikatsioon võrdlustuhkadele: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	131
Tabel 65. Täiendava ohu koodid	131
Tabel 66. Erinevate põlevkivitööstuse tuhkade toksilisuse hindamise tulemused*	134
Tabel 67. Vaba CaO sisaldus ligniidi põletamisel tekkivates tühkades	142

Tabel 68. Tuhkade koostisest tingitud hindamist mittevajavad ohtlikud omadused ja potentsiaalselt ohtlikud omadused	146
Tabel 69. Tuhaliikide ohtlikkuse hinnangud: OHTLIK - ■ , MITTEOHTLIK - ■	153
Tabel 70. Auvere elektriijaama tuhkade keskmine mineraloogiline koostis (mass %)	168
Tabel 71. FW CFBC tuhkade keskmine mineraloogiline koostis (mass %)	168
Tabel 72. NID-ga varustatud 185 MW _{el} tolmpöletus energiablokkide tuhkade keskmine mineraloogiline koostis (mass %).....	169
Tabel 73. Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade mineraloogiline koostis (mass %)	169
Tabel 74. Näiteid söe (Hispaania) põletamisel tekkivate lendtuhkade mineraalse koostise kohta [124]	170
Tabel 75. Auvere CFBC katla tuhkade keemiline koostis (keskmised väärtused, mass %)	171
Tabel 76. FW CFBC katla tuhkade keemiline koostis (EEJ 8. ploki tuhkade analüüsi tulemused)	172
Tabel 77. PC-NID katla tuhkade keemiline koostis	172
Tabel 78. Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade keemiline koostis (mass %).....	173
Tabel 79. Jälgelementide sisaldused Auvere elektriijaama tuhkades (ppm ehk mg/kg).....	174
Tabel 80. Jälgelementide sisaldused EEJ ja BEJ CFBC katelde tuhkades (ppm ehk mg/kg)	175
Tabel 81. NID-ga varustatud 185 MW _{el} tolmpöletus energiablokkide tuhkade keskmine jälgelementide sisaldus (ppm ehk mg/kg)	176
Tabel 82. Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade jälgelementide sisaldus (ppm ehk mg/kg).....	177
Tabel 83. Näiteid jälgelementide sisalduste [mg/kg] kohta kivisöe elektriijaamade katelde koldetuhkades.....	178
Tabel 84. Näiteid jälgelementide sisalduste [mg/kg] kohta kivisöe elektriijaamade katelde lendtuhkades (LT) ja elektrifiltrite (EF) tuhkades.....	179
Tabel 85. Vastavalt standardile EVS-EN 12457-4:2002 (L/S=10; 24 tundi) saadud põlevkivituhkade leostusvete jälgelementide sisaldused [µg/l] ja tulemuste suhteline standardhälve [%]	180
Tabel 86. Näiteid jälgelementide sisaldusest [mg/kg] söetuhkade leostusvees	181
Tabel 87. HP 14 arvutamisel kasutatud M-tegurite väärtused	182

Tabel 88. Jälgelementide protsentuaalsed sisaldused Auvere elektrijaama tuhkades ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused.....	182
Tabel 89. Jälgelementide protsentuaalsed sisaldused EEJ ja BEJ tuhkades ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused.....	183
Tabel 90. NID-ga varustatud 185 MWel toimpõletus energiablokkide tuhkade keskmine jälgelementide protsentuaalne sisaldus ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused	183
Tabel 91. Enefit 280 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade jälgelementide protsentuaalne sisaldus ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused	184

Jooniste nimekiri

Joonis 1. Euroopa Liidus põletusseadmetes 2016. aastal tekkinud jäätmete kogused.....	21
Joonis 2. Jäätmete liigitamise iteratiivse protsessi vooskeem.....	28
Joonis 3. 300 MW _{el} power unit with Alstom/GE CFBC (ENEFIT ENERGIATOOTMINE AS, Auvère).....	33
Joonis 4. Auvère plokki CFB katla suhteline tuhabilanss ainult põlevkivi põletamisel	35
Joonis 5. Auvère elektrijaamas tekkivate tuhavoogude jaotus	35
Joonis 6. 215 MW _{el} plokki koos 2x FW CFBC (ENEFIT ENERGIATOOTMINE AS, EEJ ja BEJ)	36
Joonis 7. Koldetuhaproovide granulomeetiline koostis erineva kütteväärtusega põlevkivi põletamisel [37]. Siin H1, H2-H7 tähistavad erinevaid katseid, mille detailne kirjeldus on toodud [37].....	37
Joonis 8. Lendtuha fraktsioonkoostis erinevatel põlevkivi kütteväärtustel [37]	38
Joonis 9. FW CFB katla suhteline tuhabilanss ainult põlevkivi põletamisel	39
Joonis 10. Absoluutsed tuhavood plokki kohta nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras põlevkivi kütteväärtusega ca 8,3 MJ/kg.....	39
Joonis 11. EEJ-8. plokki tekkivate tuhavoogude jaotus.....	40
Joonis 12. BEJ-11. plokki tekkivate tuhavoogude jaotus.....	40
Joonis 13. 185 MW _{el} plokki koos 2x tolmpõletuskateldega (TP-101) + NID	42
Joonis 14. TP-101 katla suhteline tuhabilanss nominaalkoormusel	42
Joonis 15. NID-iga varustatud tolmpõletus plokkides tekkinud aastased kogused (plokki kohta) lähtudes aastasest töötundide arvust – 8760 h – nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi põletamisel.....	43
Joonis 16. Keerispõletuse skeem tolmpõletuskatla koldes	44
Joonis 17. TP-67 katla põhimõtteline skeem. Sinise noolega on näidatud tuhaärastuse kohad.....	44
Joonis 18. TP-67 keerispõletamisega katla suhteline tuhabilanss nominaalkoormusel.....	45
Joonis 19. TP-67 kateltega plokil tekkinud aastased tuhakogused lähtudes aastasest töötundide arvust 8760 h/aastas nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi põletamisel.....	45
Joonis 20. Enefit280 tehnoloogia põhimõtteline skeem	47
Joonis 21. Tuhavoogude jaotus Enefit280 tehnoloogias	48

Joonis 22. Enefit280 tehnoloogias ühes aastas tekkivad tuhjade kogused	48
Joonis 23. Enefit140 3D skeem [38].....	49
Joonis 24. Enefit140 põhimõtteline skeem. Siniste nooltega on näidatud tuhaärastuse punktid	50
Joonis 25. Tuhavoogude jaotus Enefit140 tehnoloogias	50
Joonis 26. Enefit140 tehnoloogias ühes aastas tekkivad tuhjade kogused	51
Joonis 27. Petroter tehnoloogia põhimõtteline skeem	52
Joonis 28. Tuhavoogude jaotus Petroter tehnoloogias	53
Joonis 29. Petroter tehnoloogias ühes aastas tekkivad tuhjade kogused	53
Joonis 30. FW CFBC katla tuhavoogude vaba CaO sisalduse sõltuvus kasutatud põlevkivi kütteväärtusest	57
Joonis 31. Auvere elektrijaama CFBC katla tuhavoogude mineraalne koostis: koldetuhk - KT (1), ökonomaiser - ÖKO (2), õhu eelsoojendi - ÕES (3), elektrifilter 1. väli - EF1 (4), elektrifilter 2. väli - EF2 (5), elektrifilter 3. väli - EF3 (6), elektrifilter 4. väli - EF4 (7), elektrifilter 5. väli - EF5 (8), kottfilter - KF (9).....	58
Joonis 32. Aastatel 2013 kuni 2017 Eestis tekkinud ja taaskasutatud põlevkivituhjade kogused [31]	66
Joonis 33. Söetüüpide iseloomustus ja peamised kasutusvaldkonnad [60].....	67
Joonis 34. Söe (kivisüsi ja ligniit) tootmine Euroopas ja Euroopasse imporditavad kogused.....	69
Joonis 35. Lendtuha teke ja selle kasutamine Ameerika Ühendriikides [65]	72
Joonis 36. Koldetuha teke ja selle kasutamine Ameerika Ühendriikides [65]	72
Joonis 37. Söe ja põlevkivituhjade põhikomponentide varieeruvus. Söetuhjade väljad [98] järgi.....	90
Joonis 38. Erinevates EL riikides kasutatav HP 14 hindamise meetodid [115]	115

1 Sissejuhatus ja uuringu eesmärk

Vastavalt püstitatud ülesandele on käesoleva uuringu eesmärgiks **hinnata Eestis tekkivate põlevkivituhkade ohtlike omadusi ja välja selgitada, kas põlevkivituhad tuleb vastavuses Euroopa Liidu regulatsioonidega liigitada ohtlikeks jäätmeteks.**

Eesti seadusandluse kohaselt liigitatakse jäätmeid vastavalt 14. detsembri 2015. aasta keskkonnaministri määrusele nr 70 „Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu“ (edaspidi liigitamise määrus). Liigitamise määrusega on Eesti õigusesse ülevõetud Euroopa Komisjoni otsus 2000/532/EÜ, millega asendatakse otsus 94/3/EÜ (millega kehtestatakse jäätmeid käsitleva nõukogu direktiivi 75/442/EMÜ artikli 1 punkti a kohaselt jäätmete nimistu) ja nõukogu otsus 94/904/EÜ (millega kehtestatakse ohtlike jäätmeid käsitleva nõukogu direktiivi 91/689/EMÜ artikli 1 lõike 4 kohaselt ohtlike jäätmete nimistu).

Jäätmed liigitatakse jäätmenimistu alusel:

- a) ohtlikeks
- b) tavajäätmeteks.

Ohtlikeks jäätmeteks liigitatakse kõik jäätmenimistus tärniga tähistatud jäätmed¹. Kui jäätmenimistust saab valida jäätmetele nii tava- kui ohtlike jäätmete koodi (peegelkoodid), siis tuleb hinnata jäätmete ohtlike omadusi (HP 1-HP 15) vastavalt määrusele (EL) nr 1357/2014 [1], millega asendatakse Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2008/98/EÜ (mis käsitleb jäätmeid ja millega tunnistatakse kehtetuks teatud direktiivid) III lisa (edaspidi komisjoni määrus (EL) 1357/2014).

Euroopa Komisjoni (EK) otsusega 2000/532/EÜ [2] kehtestatud jäätmenimistus (edaspidi EL jäätmenimistu) spetsiifiliselt põlevkivituhale eraldi jäätmekoodi ei ole.

Samas on EK nimistus jäätmekoodid jõujaamades tekkinud jäätmetele (Tabel 1). Kehtestatud EL jäätmenimistu kohaselt on valdav enamus erinevatest jõujaamades tekkivatest tuhatüüpidest liigitatud tavajäätmeteks ning ainult (prügi) koospõletamisel tekkinud tuhkade puhul peab hindama, kas tegemist on tava- või ohtlike jäätmetega.

¹<http://data.europa.eu/eli/dec/2000/532/2015-06-01>

Tabel 1. Euroopa Komisjoni otsusega 2000/532/EÜ kehtestatud jäätmenimistu jäätmekoodid jõujaamades tekkinud jäätmetele.

Jäätmekood	Jäätmed
10 01 01	Koldetuhk, räbu ja katlatuhk (v.a koodinumbriga 10 01 04 nimetatud katlatuhk)
10 01 02	Kivisöelendtuhk
10 01 03	Turba ja töötlemata puidu põletamisel tekkinud lendtuhk
10 01 04*	Õlilendtuhk ja -katlatuhk
10 01 14*	Koospõletamisel tekkinud ohtlike aineid sisaldav koldetuhk, räbu ja katlatuhk
10 01 15	Koospõletamisel tekkinud koldetuhk, räbu ja katlatuhk, mida ei ole nimetatud koodinumbriga 10 01 14
10 01 16*	Koospõletamisel tekkinud ohtlike aineid sisaldav lendtuhk
10 01 17	Koospõletamisel tekkinud lendtuhk, mida ei ole nimetatud koodinumbriga 10 01 16

Eesti on riigisiselt kehtestanud täiendavad jäätmekoodid teatud jäätmeliikidele, sh põlevkivi lend- ja koldetuhale, ning tähistanud need jäätmenimistus ohtlikeks jäätmeteks. Seega on **Eestis kehtiva jäätmenimistu alusel põlevkivi lend- ja koldetuhk käesoleval ajal liigitatud ohtlikeks jäätmeteks (vt peatükk 2).**

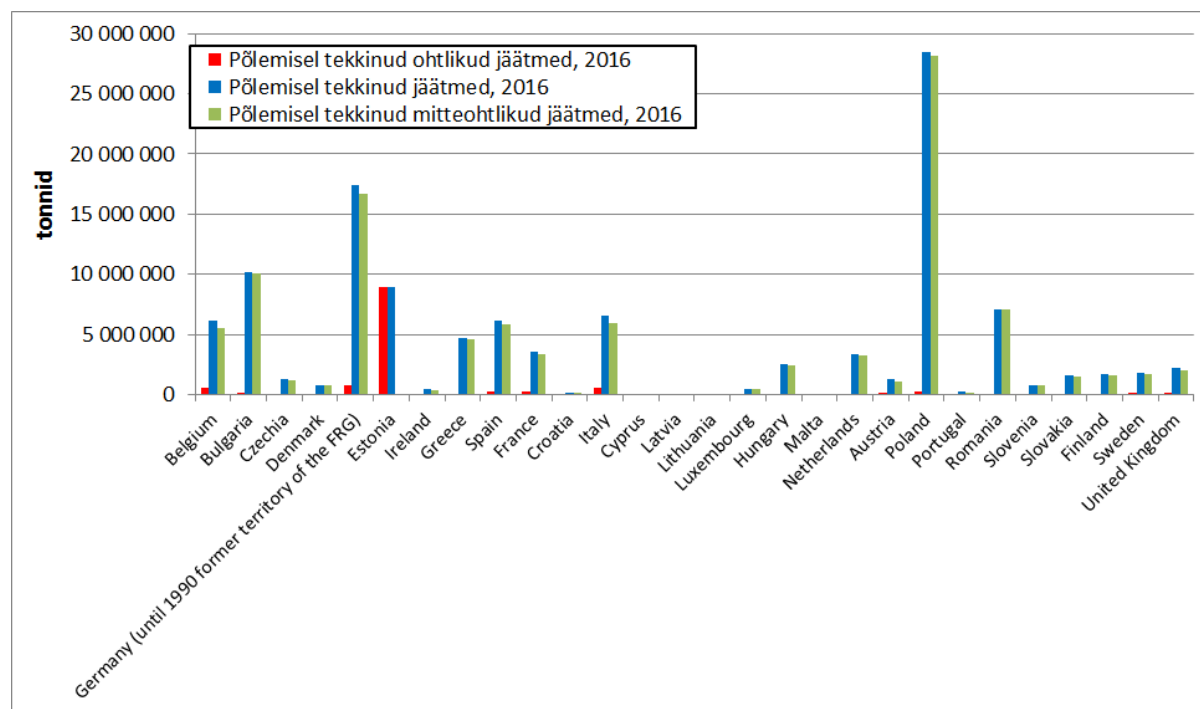
Alates 2015. aastast muutus ülalnimetatud Euroopa Liidu regulatsioonide rakendamisega jäätmete liigitamise kord, mis klassi HP 14 „keskkonnaohtlik“ osas jõustus alates 5. juulist 2018. **Eesti energeetikatööstuses tekkivaid põlevkivituhkasid ei ole siiani hinnatud uue 2018. aastal kehtima hakanud jäätmete liigitamise korra alusel**, mistõttu ei ole selge, kas tegemist on uute regulatsioonide mõistes ohtlike või tavajäätmetega.

Vastavalt Euroopa Liidu regulatsioonidele hinnatakse jäätmete ohtlike omadusi juhul kui jäätmetel on jäätmenimistus peegelkoodid. Koldetuhhal (v.a. õlikatlatuhk 10 01 04*), söelendtuhal ning turba- ja puidulendtuhal on jäätmenimistus ainult tavajäätmete kood, mis tähendab, et nende jäätmeliikide puhul ei loeta neid ohtlikeks ning vastavaid omadusi pole täiendavalt vaja hinnata.

Seejuures on oluline rõhutada, et söetuhkadel võivad esineda uue regulatsiooni mõistes ohtlikud omadused (nt. HP 6 – ärritav; HP 8 – söövitav), kuid kuna jäätmenimistus puuduvad nendel jäätmetel vastavad peegelkoodid, siis ei loeta selliseid jäätmeid ohtlikeks ning ohtlike omadusi eraldi ei hinnata.

Põlevkivituhkasid tekib praeguse põlevkivitööstuse kaevandus ja töötlemismahtude juures 8-9 miljonit tonni aastas (Joonis 1), millest enamus ehk umbes 98%, ladestatakse prügilasse. Põlevkivituha taaskasutus on minimaalne. **Üheks laialdast tuha taaskasutust takistavaks teguriks on põlevkivituhkade Eestisisene liigitamine ohtlikuks jäätmeks.** Ohtlikele jäätmete käitlemisele ja taaskasutusele kehtivad kitsendused ning nende taaskasutuse võimaluste leidmine on võrreldes

tavajäätmetega oluliselt keerulisem. Seetõttu on äärmiselt oluline täpselt hinnata Eestis tekkivate põlevkivituhkade ohtlike omadusi ja võrrelda neid omadusi samaaegselt ka sötuhkadega.



Joonis 1. Euroopa Liidus põletusseadmetes 2016. aastal tekkinud jäätmete kogused

Teades põlevkivituha võimalikke ohtlike omadusi, nende olemust ja pika-ajalist käitumist on võimalus seda jäadet efektiivsemalt taaskasutada ja luua uusi tooteid, vähendades samal ajal tuhkade mõju keskkonnale ja inimeste tervisele.

Käesoleva uuringuga:

1. Kaardistatakse Eestis tekkivad põlevkivituhad. Kirjeldatakse erinevaid tuhkasid ja nende päritolu. Vastavalt lähteülesandele käsitleb uuring järgmisi tuhaliike:
 - Tolmpõletuskatelde tuhad (PC koos NID seadmega koldetuhk, PC koos NID seadmega lendtuhk)
 - Keevkihtkatelde tuhad (CFBC koldetuhk, CFBC lendtuhk) sh Auvere elektrijaama koldetuhk ja lendtuhk;
 - Põlevkiviõlitööstuse tuhad.
2. Hinnatakse avaldatud uurimisandmete põhjal, millised jäätmete ohtlikud omadused vastavalt klassifikatsioonile (HP 1-HP 15) ei ole Eestis tekkivate põlevkivituhkade puhul asjakohased ning mida ei ole vaja põlevkivituhkade ohtlikkuse hindamise juures arvesse võtta.
3. Vastavalt olemasolevatele hinnangutele selgitatakse vajadus põlevkivituhkade ohtlike omaduste (HP klasside määratluse alusel) täiendavateks uuringuteks.

4. Määratakse Eestis tekkivate põlevkivituhkade HP 14 (Keskkonnaohtlik) omadused nii EL Nõukogu määruse (EL) 2017/997 [3], millega muudetakse Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2008/98/EÜ III lisa ohtliku omaduse HP 14 „keskkonnaohtlik“ osas, kui ka katsete põhjal.
5. Hinnatakse põlevkivituhkade ohtlike omadusi võrreldes söetuha (kivisüsi, ligniit, jt.) võimalike ohtlike omadustega.

2 Põlevkivi, põlevkivi kasutamine ja olemasolev tuha ohtlikkuse käsitlemise olukord

2.1 Põlevkivi

Eesti põlevkivi geoloogiat, põlevkivi põletustehnoloogiaid, õlitootmist, tekkivaid jäätmeid ja nende võimalikku taaskasutust ning keskkonnaohtlikkust on uuritud enam kui 50 aastat. Uuringute tulemused on realiseerunud enam kui 200 teaduspublikatsioonina (sh mitu monograafiat) ja paljude uuringuaruannete, bakalaureuse-, magistri- ning doktoritöödena. Näiteks, väga paljude hulgas – Aarna & Lippmaa, 1955; Dilaktorski, 1962 [4]; Vingisaar et al., 1984 [5]; Koel, 1999; Kattai et al., 2000 [6]; Paat., 2002 [7]; Veiderma, 2003 [8]; Lille, 2003 [9]; Golubev, 2003 [10]; Soone & Doilov, 2003 [11]; Loo et al. [12]; Hotta et al., 2005 [13]; Kaljuvee et al. [14]; Ots, 2006 [15]; Pihu et al. [16]; Uibu et al., 2008 [17]; Mõtsep et al., 2007 [18]; Trikkel et al., 2010 [19]; Velts et al., 2010 [20]; Maaten et al. [21]; Blinova et al., 2012 [22]; Konist et al. [23–25]; Reinik et al., 2014 [26]; Hotta et al., 2005 [27]; Siirde et al. [28] jpt.

Eesti põlevkivi – kukersiit – on settekim, mis sisaldab orgaanilist ainet kerogeeni. Kukersiidi orgaaniline aine on merelist päritolu ja on tekkinud valdavalt tsüanobakteri *Gloeocapsomorpha prisca* jäänustest. Põhiline osa kukersiidist esineb Eestis Ülem-Ordoviitsiumi Kukruse lademes, kus asuvad Tapa ja Eesti leiukohtade tööstuslikud kihid. Kukersiit esineb lubjakivi vahekihtidena ning sisaldab lisaks orgaanilisele ainele ka karbonaatset ja savikas -terrigeenset mineraalset osa. Kukruse lademe paksus on 18-22 m ja selle moodustavad põhiosas dolomiidistunud ja savikad lubjakivid, milles esineb 18-20 kukersiidikihti [6]. Lisaks leidub kukersiidi kihtides muguljaid lubjakivi läätsi. Kukersiidis leiduv karbonaatne mineraal on peamiselt kaltsiit koos terrigeense lisandiga, kuid vähesel määral võib esineda ka dolomiiti.

Orgaanilise aine sisaldus kukersiidis jääb vahemikku 10-65% ja karbonaatse materjali sisaldus vahemikku 15-70% (sh karbonaatide sisaldus 20-45%-ni ja purdmaterjali sisaldus 20-40%). Karbonaatse materjali hulga suurenedes väheneb kerogeeni sisaldus (Kattai et al., 2000). Kukersiitse kerogeeni iseloomulikuks omaduseks on suur hapniku sisaldus. Lämmastiku sisaldus kerogeenis on madal, samas esineb märgatavalt kloori. Kukersiidi mineraalse osa keemilis-mineraloogiline koostis on suhteliselt püsiv, sõltumata kihindist ja selle asukohast. Siiski, orgaanilise aine ja mineraalse osa omavaheline vahekord sõltub peale geoloogiliste tegurite ka põlevkivi kaevandamise tehnoloogiast, rikastamisest jne, mistõttu võib kaevandatud põlevkivi koostis varieeruda üsnagi suurtes piirides.

Kukersiidilasundid moodustavad ulatusliku Balti põlevkivibasseini, mille tööstuslikult olulise osa piir kulgeb lääne-ida suunas umbes Rakvere linnast kuni Luuga linnani Leningradi Oblastis (200 km) ja

põhja-lõuna suunas Soome lahega paralleelselt kulgevast avamusjoonest kuni Peipsi järve põhjakaldani (30 km). Nimetatud piirides on basseini pindala umbes 6000 km². Geoloogilised varud mainitud alal on ligikaudu 20 miljardit tonni. Balti põlevkivilevila (basseini) üldpindala on aga ligi 50 tuhat km² [6].

Suurim põlevkivivaru on Eesti põlevkivimaardlas – ligikaudu 4700 mln t, millest aktiivne tarbevaru moodustab 970 mln t, aktiivne reservvaru 303 mln t (6%) ja passiivne tarbevaru ning reservvaru ca 3400 mln t. Suur osa maardla varust paikneb looduskaitsest ja asustusest tingitud piirangute vööndis. Kaitstavad alad moodustavad 29% Eesti põlevkivimaardla pindalast, seejuures seni kaevandamata alast 38%.

Põlevkivikihindi lasumissügavus on muutlik. Basseini põhjapiiril avanevad need Kvaternaari, idaosas ka Kesk Devoni setendite all, kuna lõunapiiril ulatub lasumissügavus isegi 100 kuni 150 m-ni. Tööstusliku kihindi all ja peal lasuvad kohati dolomiidistunud, kohati bituuminoossed, harva õhukesi põlevkivikihte sisaldavad lubjakivid. Ordoviitsiumi lubjakive, sealhulgas ka Kukruse lademe kivimeid läbistavad vertikaalsed lõhed, mis enamasti on täidetud savikas-liivaka ainega. Kirdesuunaliste lõhedega on kohati seotud karstinähted, mis ulatuvad ka põlevkivikihindini. Karstirikete vööndid on 10 kuni 200 m laiused ja 100 m kuni paari-km pikkused.

Eesti põlevkivimaardla jaotatakse kokkuleppeliselt Purtse, Vasavere ja Narva jõgede orgude poolt kolmeks: lääne-, kesk- ja idarajooniks. Läänerajoonis, Purtse jõest lääne pool, lasub põlevkivi-kihind üldiselt maapinna läheduses, põhjapiiril 5-10 m, lõunapiiril 50 m sügavuses. Üle poole läänerajoonis uuritud varudest sobib pealmaakaevandamiseks. Keskrajooni (Purtse ja Vasavere jõeorgude vahel) põhjapiiril põlevkivikihind paljandub, rajooni lõunaosas ulatub aga maksimaalselt 80 meetrini. Idarajoonis, Vasavere ja Narva jõeorgude vahel, lasub põlevkivikihind 3 kuni 55 m sügavuses.

Maapinnale lähemal on põlevkivi põhjapoolsetel kaevandusaladel, kus põlevkivi kaevandatakse lahtistes karjäärides (nt Narva, Sirgala, Ojamaa, Põhja-Kiviõli, Kohala). Põlevkivikiht paikneb lõuna pool järjest sügavamal – Estonia kaevanduses on põlevkivi kiht juba 50–70 meetri sügavusel. Kaevandatav põlevkivikiht on 2,7 kuni 2,9 meetri paksune. Kihhi paksus väheneb pidevalt lõuna suunas 2,1 meetrini ja lääne suunas 1,6 meetrini.

2.2 Põlevkivi kasutamine

Põlevkivi kui maavara kasutatakse alates 1916. aastast kui rajati esimesed katsekaevandused. Pidev kaevandamine algas 1918. aastal. Algusaastakümnete peamine kasutusala oli põlevkiviõli tootmine, vähem tsemenditööstus ja alates 1920ndatest aastatest otsepõletamine.

Põlevkivienergeetika on olnud ajalooliselt suurim põlevkivi tarbija. Kolm suurimat soojuselektrijaama on 1959. aastal käivitatud Balti Elektriijaam, 1969. aastal rajatud Eesti Elektriijaam ning 2016. aastal

valminud Auvere Elektriyaam. Balti ja Eesti Elektriyaamad rakendasid algselt tolmpõletustehnoloogiat, kuid alates 2004. aastast alustati põlevkivi põletamist katelseadmetes mis kasutavad tsirkuleerivat keevkihttehnoloogiat. Tehnoloogia muutus tõi põlevkivi katelde kasuteguris kaasa suuri muutuseid. Kui tolmpõletuskatelde kasutegurid on olnud TP-101 katelde puhul 85-86 % [16,25] piirimaal, siis keevkihtkateldel on kasutegurid ligikaudu 5 % võrra paremad ehk 90-91 % [29,30] juures. Keevkihtkatelde kasutusele võtt on toonud suurima muutuse õhuemissioonide osas, kus mõningate heitmete väärtused on vähenenud võrrelduna tolmpõletustehnoloogiaga mõnel juhul isegi 3000 kordselt. Näiteks SO₂ emissioon tolmpõletusekateldel oli sõltuvana kasutatava põlevkivi omadustest 2000-3000 mg/Nm³, siis keevkihtkateldel on vastav näitaja 0-30 mg/Nm³ (kuivad gaasid, taandatud 6 % O₂ juurde) [24,25]. Muutused on ka tekkivate tuhjade keemilises ja mineraloogilises koostises. Selle üheks suuremaks põhjuseks on erinevad temperatuurid, kuid oma rolli mängivad siiski ka kiirused ja kütuse granulomeetria. Tsirkuleeriva keevkihiga katlas on koldetemperatuurid 800-900 °C, võrreldes tolmpõletustehnoloogial töötava katlaga, kus temperatuurid on 1300-1400 °C. Kuna keevkihtkateldega saavutati peaaegu täielik väävli sidumine koldes, siis katsetati 2008-2010 aastatel tolmpõletuskatlal TP-67 keerispõletustehnoloogiat, mis pidi lisaks väävli emissioonide vähendamisele tõstma ka katla kasutegurit 2-3% võrra. Lubatud kasuteguri suurenemine pidi saavutatama tänu madalamale temperatuurile koldes, tänu millele on ka lahkuvgaaside temperatuur madalam. Paraku keerispõletustehnoloogiaga ei saavutatud oodatud tulemusi väävliemissioonide vähenemise osas. Pigem oli efekt vastupidine ja koldetuhka jäi põlemata süsinik, mis pole põlevkivi põletusele omane [16]. Seega tolmpõletustehnoloogia arendusse enam ei panustata ja arendatakse tsirkuleerivat keevkihtpõletustehnoloogiat. Täna on Eestis kolm ettevõtet, mille viies soojuselektriyaamas põletatakse põlevkivi ja/või põlevkiviõli tootmisel tekkivat uttegaasi elektri- ja soojusenergia tootmiseks. Põlevkiviõlitööstuse moodustavad Viru Keemia Grupp, Eesti Energia AS ja Kiviõli Keemiatööstuse OÜ. Põlevkiviõli utmiseks kasutatakse kahte põhimõttelist meetodit, kus põlevkivi termiliseks lagundamiseks (utmiseks) vajalik soojus saadakse utmisel moodustunud gaasi põletamisel (nn Kiviter protsess) või tahke soojuskandja (tuhk) vahendusel (tuntud ajalooliselt kui Galoter protsess).

Põlevkivi tarbimise tippaastatel 1980ndate keskpaigas, kaevandati Eestis ca 30 miljonit tonni põlevkivi aastas. Tänapäeval on põlevkivi kaevandamine Eestis stabiliseerunud tasemele 15–18 miljonit tonni aastas. Kaevandatava põlevkivi kütteväärtus jääb vahemikku 7,0-10,9 MJ/kg ning seda väljastatakse jämedama fraktsioonilise tükipõlevkivina ehk tükikivina (25-125 mm) ning peene fraktsioonilise põlevkivina ehk peenkivina (0-25 mm).

Põlevkivitööstus moodustab enam kui 70% Eesti energiasektorist ja ligikaudu 80% kavandatavast põlevkivist tarbitakse otsepõletusel soojuselektriyaamades ning 19% põlevkivist kasutatakse

põlevkiviõli utmiseks. Peaaegu 99% kogu Eesti põlevkivist kasutatakse ära elektri- ja soojusenergia ning põlevkiviõli tootmiseks. Lisaks kasutatakse paari protsendi ulatuses kaevandatud põlevkivi tsemendi tootmises AS Kunda Nordic Tsement poolt.

Madala kütteväärtuse ja mineraalosa suure sisalduse tõttu ei ole põlevkivil ekspordipotentsiaali energeetilise maavarana ning selle majanduslik otstarbekus piirdub kasutamisega kaevanduste ja karjääride lähedusse rajatud tööstuse toormena. Samas on hea ekspordipotentsiaal põlevkivi töötlemisel saadud põlevkiviõlil, elektrienergial ja keemiatoodetel. Kaupade ekspordist andis põlevkiviõli ja elekter Eesti majanduses 2014. aastal 5,9% ja 2015. aastal 3,8%.

Eesti põlevkivi kõrge mineraalse osa sisalduse tõttu tekib, sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast, 43-57% tahkeid jäätmeid – poolkoksi ja/või tuhka. Võrreldes kivisöe- ja ligniidielektrijaamadega on põlevkivienergeetikas tekkiv tuhakogus ühe toodetud energiaühiku kohta vähemalt 1,5 kuni 5 korda suurem. Samas on tuha taaskasutus äärmiselt piiratud ja tänases majandusolukorras leiab taaskasutust umbes 2% tekkivast tuhast [31]. Valdav osa tuhast ladestatakse elektrijaamade läheduses paiknevatele tuhaladestusaladele – tuhaväljadele. Tänapäevaste tootmismahude juures tekib põlevkivitööstuses 7-8 miljonit tonni tuha- ja poolkoksijäätmeid aastas, millele lisandub ca 1 miljon tonni poolkoksi Kiviter tüüpi õliretortidest. Arvestades Eesti rahvaarvuga, ladestatakse igal aastal Eestis ühe inimese kohta enam kui 5 tonni tuhajäätmeid aastas. Kuna tekkivat tuhka taaskasutatakse äärmiselt vähe, teeb see Eestist jäätmete tekitamise osas inimese kohta kahetsusväärset liidri kogu maailmas.

Põlevkivi energeetilisel kasutamisel tekkivaid jäätmeid saab kasutada ehitusmaterjalide tootmises, teedehituses ja pinnaste stabiliseerimisel, happeliste muldade neutraliseerimisel ning põlevkivikeemia toodete valmistamiseks. Põlevkivituhkade taaskasutust on uuritud juba alates suurte põlevkivielektrijaamade rajamisest 1950ndatel kuni tänase päevani (sh käimasolevad riiklikud teadusarendustöö programmid), kuid suuremahulistest taaskasutusviisidest on senini rakendunud ainult põlevkivituhk-tsemendi tootmine, põldude lupjamine, vähemal määral ehitusplokkide tootmine ja teedehitus. Katseuringute tasemel on põlevkivituhka kasutatud kaevanduste tagasitaitmiseks.

2.3 Põlevkivituha ohtlikkuse käsitlemise käesolev olukord

Jäätmete liigitamise tehnilise juhendi [32] järgi sobivate jäätmenimistu kirjade valimine on oma olemuselt iteratiivne protsess, mis on jagatud kolmeks etapiks (Joonis 2). Esimesel iteratsioonil (Etapp A1) määratletakse jäätme tekitanud konkreetse protsessi või tegevuse jaotis, millele vastab kahekohaline kood jaotiste (vaadeldakse jaotiseid 01 kuni 12 ja 17 kuni 20; jäätmenimistu koosneb 20 jäätmeallikaga seotud jaotisest). Seejärel tuvastatakse vastavale protsessile või tegevusele alajaotiste pealkiri, mille tulemusena saadakse neljakohaline kood, ja otsitakse sellest alajaotisest kirje, mis

vastaks selgelt konkreetsele jäätmeliigile (kuuekohaline kood). Esimesel iteratsioonil ei tohiks kasutada üldkirjet „mujal nimetamata jäätmed“ koodiga „XX XX 99“.

Juhul kui esimeses etapis (esimesel iteratsioonil) sobivat kirjet ei olnud võimalik määratleda, liigutakse teise etappi, mille käigus püütakse identifitseerida jäätme tekitanud protsess või tegevus jaotistest 13 kuni 15. Analoogselt esimese etapiga, kui vastav jäätmeliigi jaotis on leitud, püütakse leida ka alajaotise pealkiri ja seejärel ka kirje, mis vastaks selgelt konkreetsele jäätmeliigile. Siin aga on vajadusel võimalik kasutada üldkirjet „mujal nimetamata jäätmed“ koodiga „XX XX 99“.

Kui ka teise etapi käigus ei leitud jäätme kuuluvust, jätkatakse 3. etapiga, mille käigus kontrollitakse jäätme vastavust 16. jaotises „nimistus mujal nimetamata jäätmed“ alajaotise pealkirjadele ja alajaotise kirjele. Juhul kui sobivat kirjet (või kirjeid) ei leita, alustatakse liigitamise protsessi uuesti esimesest etapist, mille käigus määratakse jäätme tekitanud protsessi või tegevuse jaotisest ja alajaotisest üldkirje „XX XX 99“.

Kasutades antud algoritmi ja jäätmete liigitamist võib elektrijaamades tekkivad tuhad (arvesse mitte võttes koospõletamist ohtlike või mitteohtlike jäätmetega) jagada järgmisteks kirjeteks:

Koldetuhk (põhjatuhk) – 10 01 01 – Koldetuhk, räbu ja katlatuhk (v.a koodinumbriga 10 01 04 nimetatud katlatuhk). Siin koodi esimesed kaks numbrit ehk „10“ näitavad jäätmeallika kuuluvust terminiliste protsesside tekkinud jäätmete hulka. Koos järgmise kahe numbri „10 01“ - jõujaamades ja muudes põletusseadmetes tekkinud jäätmed (v.a jaotises 19 nimetatud jäätmed, nagu jäätmete põletamisel või pürolüüsil tekkinud jäätmed jt).

Lendtuhk – sõltuvalt kasutatavast kütusest, vastab mitmele alajaotise kirjele, mis kirjeldavad selgelt konkreetset jäätmeliiki. Peamised nendest, kui arvesse mitte võtta koospõletamist, õli põletamist ja jäätmete põletamist, on:

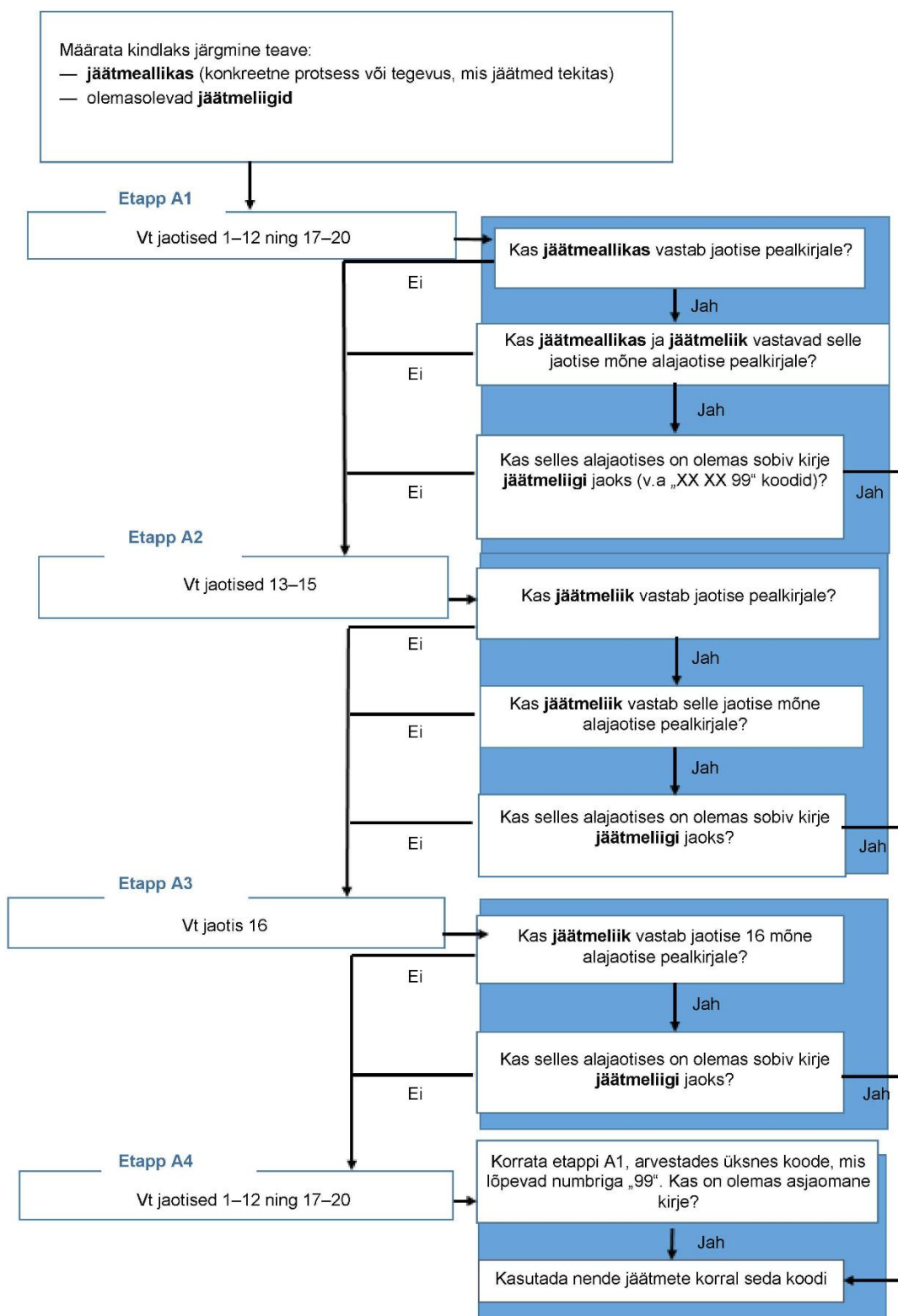
10 01 02 – Kivisöölenndtuhk (inglise keeles kasutatakse *coal fly ash* ehk söe lendtuhk);

10 01 03 – Turba ja töötlemata puidu põletamisel tekkinud lendtuhk;

10 01 99 – Mujal nimetamata jäätmed.

DFGD tuhk – 10 01 05 – Protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmed.

Loetletud jäätmed on määratud nn „Kindlasti tavajäätmete (ANH) kirje“ alla, mis põhimõtteliselt vastavalt tehnilisele juhendile [32] tähendab, et need tuleks ilma täiendava hindamiseta liigitada tavajäätmeteks isegi juhul kui mõne näitaja (näiteks $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) „sisaldus on üle jäätmete raamdirektiivi III lisas esitatud piirnormi“.



Joonis 2. Jäätmete liigitamise iteratiivse protsessi vooskeem

Eesti Vabariigi seadusandluses on põlevkivituhka loetud ohtlike jäätmete hulka. Ohtlike jäätmete nimistus asub põlevkivituhk „Termilistes protsessides tekkinud jäätmete“ all (Kood 10, põlevkivikoldetuhk on koodiga 10 01 97* ja põlevkivilendtuhk 10 01 98*). **Senises jäätmete, sealhulgas ohtlike jäätmete nimistus, on põlevkivituhk ohtlike jäätmete kategoorias tänu tuha**

nõrgvee kõrgele aluselisusele. Tuhaladestustele rakenduvad jäätmeseaduse põhimõtted/nõuded. Nende nõuete alusel peab vältima jäätmete paigutamisest tulenevat negatiivset mõju keskkonnale võimalikult pika aja, kuid mitte vähem kui 25 aasta jooksul. Samuti tuleb jäätmete ladustamiseks maa-alustesse ladustamiskohtadesse koostada ohutushinnang ning pärast ladustamist ei tohi toimuda soovimatuid füüsikalisi, keemilisi või bioloogilisi muutuseid.

Põlevkivituha segamist teiste materjalidega taaskasutamise eesmärgil reguleerivad Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2008/98/EÜ [33] ja Eesti Vabariigi jäätmeseadus. Mõlemad sätestavad, et ohtlike jäätmete segamine on lubatud ainult juhul, kui ei suurendata või vähendatakse jäätmetest tekkivat ohtu keskkonnale, inimeste tervisele ja varale. Põlevkivituha taaskasutamise koos teiste materjalidega peab „Jäätmete taaskasutamise- ja kõrvaldamistoimingute nimistus“ lugema R12x alla, mis tähendab taaskasutamisele eelnevat jäätmesegude koostamist või jäätmete segamist. Jäätmeseaduses on nõutud, et segamine oleks tehniliselt ja majanduslikult põhjendatud, samas kui Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2008/98 EÜ [33] nõuab, et jäätmete segamine toimub parima võimaliku tehnikaga (PVT) ja jäätmeid tohib segada vaid asutus või ettevõtja, kes on selleks loa saanud.

Põlevkivituha transportimisel tuleb arvestada Jäätmeseaduse [34] § 38-ga (jäätmeveo üldnõuded) ja § 63-ga (ohtlike jäätmete vedu). Vastavalt nendele paragrahvidele peab jäätmeid vedama kinnises veovahendis pakitult või muul viisil nõnda, et nad ei satuks laadimise ega vedamise ajal keskkonda. Samuti peab nende vedu olema kooskõlas ohtlike veoseid käsitlevate õigusaktidega ning rahvusvahelistes lepingutes sätestatud korraga.

Põlevkivituha kasutamine on võrreldes eelmise sajandi lõpuga vähenenud mitmekordselt ning taaskasutamine on püsinud viimastel aastatel stabiilselt madal. **Asjaolu, et põlevkivituha peab käsitlema ohtliku jäätmena, raskendab oluliselt selle taaskasutamist võrreldes tavajäätmetega.** Seadusandluses on põlevkivituha taaskasutamisega seotud nõuded tihti üldised ohtlikele jäätmetele kehtivad nõuded.

3 Põlevkivituhkade liigid ja tekkimine

Eesti põlevkivielektriijaamades kasutatakse kahte erinevat põletustehnoloogiat: tolmpõletamise (*pulverized combustion* – PC) ja tsirkuleeriva keevkihiga katlas põletamise (*circulating fluidized-bed combustion* – CFBC) tehnoloogiat. PC tehnoloogia oli 2018. aasta seisuga kasutusel Eesti EJ plokkides nr 3, 4, 5 ja 6, kus on moderniseeritud (väävlipüüduritega varustatud) nn kõrgrõhu katlad TP-101. Väävlipüüduriteta PC katelde kasutamine lõpetatakse 2019. aastal ja seetõttu neid käesolevas aruandes ei kajastata. Ploki nr 8 PC katlad on asendatud CFBC kateldegaga. Balti EJ 11. ploki kasutatakse samuti CFBC katlaid. CFBC tüüpi tehnoloogiat kasutatakse ka hiljuti avatud Auvere elektriijaamas ja ka Enefit 280 õlitehases.

Valdav enamus tuhajäätmetest tekib põlevkivielektriijaamade kateldes, kus osa põlemise käigus tekkinud tuhast kandub gaasivooluga kaasa ja ülejäänud sadestub kolde põhja. **Kolde põhja sadestunud tuhka nimetatakse koldetuhaks. Gaasivoo gaasist kaasa kanduvat tuhka nimetatakse lendtuhaks** ja selle moodustavad tuhaosakesed, mis gravitatsiooni mõjul sadenevad gaasivoolust. Tuhk kogutakse katlaagregaadi sõlmedest (kolle, ülekuumendi, ökonomaiser, õhuelsoojendi) ja suitsugaaside puhastusseadmetest (tsüklonid, elektrostaatilisid sadestid ehk elektrifiltrid, kottfiltrid). Sõltuvalt tehnoloogiast on tuhaväljutustsoonid erinevad – nt tolmpõletusel on kuus erinevat tuha väljasadenemise tsooni: kolde, ülekuumendi, ökonomaiser, õhuelsoojendi, tsükloni ja elektrifiltri või kottfiltri tuhapüüdurid. Kuni aastani 2023 tööle jäävatel PC katelidel on kottfiltrid, mis on integreeritud poolkuiva väävlisidumistehnoloogiaga (NID).

CFBC tehnoloogia korral sadestatakse lendtuhka ülekuumendi, ökonomaiser ja õhuelsoojendi pöördkambrites ning elektrifiltris [30]. Auvere CFBC tehnoloogial töötaval katlal on veel lisaks täiendav kottfilter, kust sadeneb välja kõige peenem lendtuha fraktsioon. Lendtuha emissioonid olid peamiseks põhjuseks, miks Auvere elektriijaama vastuvõtt nii kaua hilines ja kottfiltri kasutamine suitsugaaside puhastusprotsessi lõppetapina oli see, mis aitas lõpuks saavutada tahkete heitmete sätestatud piirnormid (10 mg/Nm^3).

Tuhaärastuseks on 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. Kuivtuhaärastust kasutab Eestis eduka näitena VKG AS.

Põlemisel tekkivate tahkete osakeste jaotumine sõltub põletustehnoloogiast, kütuse ettevalmistusüsteemist, kasutatavast kütusest ja selle omadustest, põlemisprotsessist (temperatuurid ja kiirused) ning tuhapüüdeseadmete konstruktsioonist ja nende efektiivsusest.

Katlas põlevkivi põletamiseks kütus eelnevalt peenendatakse, et kütuse fraktsioonkoostis jääks põletustehnoloogias ette antud piiridesse. Tolmpõletamisel kasutatakse jahvatatud põlevkivi, mille keskmine terasuurus on alla 0,01 mm. CFBC tehnoloogia kateldes kasutatakse peenpõlevkivi terasuurusega kuni 25 mm, kuigi Auvere elektrijaama puhul on vastav väärtus ~10 mm ja Enefit-280 õlitehases alla 6 mm. Põlevkivi osakeses sisalduva kerogeeni põlemine on mitmeastmeline protsess, kus toimub esialgu kiire lendosa põlemine, millele järgneb tekkinud koksi põlemine [35]. Sõltuvalt tingimustest võivad need kaks protsessi toimuda ka samaaegselt. Kuna põlevkivis on kerogeen põimunud mineraalse osaga, siis moodustub põlevkivi osakese põlemisel poorne mineraalne struktuur, mille mehhaaniline tugevus on väike. Tuhaosakeste hõõrdumisel toimub osakeste purunemine, mille tõttu peenema fraktsiooni osakaal (võrreldes kütusega) suureneb. Sõltuvalt tekkinud osakeste suuruselt ja hüdrodünaamilisest takistusest, tekib vastavalt koldetuha või lendtuha voog. Tuha jagunemine nimetatud voogude vahel sõltub seega kütuse granulomeetriast, kütuse koostise jagunemisest osakeste mõõtmete järgi ja gaasi pindkiirusest koldes [36]. **Koldetuhk moodustab põlevkivielektrijaamade (sh TSK tüüpi õliretortide) tuhavoost 30-40(45)% ning lendtuhk moodustab 60-70% tuhavoo massist.**

Koldetuhk (KT), tekib koldekambris ja eemaldatakse kolde põhjast. Selle tuha koostisesse lähevad ka tuhasadestised, mis eemaldatakse koldest puhastustsükli ajal nt. mehhaaniliselt veejoaga (PC tehnoloogia puhul). Koldetuha materjal on varieeruva terasuurusega ning osakeste suurus sõltub konkreetsest tehnoloogiast, ulatudes näiteks CFBC tehnoloogia korral paarikümne millimeetriteni. Koldetuha taaskasutus hetkel puudub ja see suunatakse täies mahus tuhaväljadele.

Lendtuhk (LT) eraldatakse gaasivoost mitmeastmeliselt ja see toimub, sõltuvalt süsteemi ülesehitusest, erinevates gaasikäigu osades. Peamine osa lendtuhast eraldatakse elektrifiltrites, sh valdav osa elektrifiltri esimeses väljas, kus eraldatava tuha osakaal on sõltuvalt seadmest ja tehnoloogiast vahemikus 40-50% üldisest tuhavoost. **Elektrifilter (EF)** on efektiivne meetod lendtuha eemaldamiseks, seejuures võimaldab meetod efektiivselt eemaldada 1 µm suurusjärgus ja väiksemaid osakesi. Elektrifiltri tööpõhimõte on tahketele osakestele elektrilaengu andmine ja eraldamine gaasivoost elektrivälja toimel. Tahkete osakeste kontsentratsioon elektrifiltrist väljuvas gaasis on sõltuvalt konstruktsioonist ja töörežiimist 20–150 mg/Nm³. Eesti põlevkivielektrijaamades kasutatakse elektrifiltreid tsirkuleeriva keevkihiga kateldel, iseseisva gaasipuhastusseadmena või kombineerituna kottfiltriga (Auvere Elektrijaam). Põlevkivi puhul on elektrifiltris väljasadestatud tuha mediaanmõõt I väljas 8–12 µm, II väljas 7–10 µm, III väljas 6–8 µm ning IV väljas 5–6 µm [35].

Osa lendtuhaast eraldatakse suitsugaasidest tsüklonitega (tsükklontuha osakaal sõltub seadmetest, näiteks TP-101 puhul 10-15% kogu tuhavoost). Tsükonis rakendatakse tahkete osakeste eemaldamiseks nende osakeste inertsit. Tangentsiaalselt tsüklonisse suunatud suitsugaasile antakse pöörlev liikumine ja see liigub silindrilise korpuse seinte sisepinnal. Tsentrifugaaljõu mõjul liiguvad osakesed silindri seintele, mille lähedal suitsugaas hõõrdejõudude mõjul pidurdub. Tahked osakesed langevad spiraalselt keereldes alla ning puhastatud suitsugaas väljub tsentraalsest avast silindri alaosas. Tsükloniga saab efektiivselt eraldada osakesi diameetriga üle 10 µm. Väljasadestatud tsüklonituha mediaanmõõde on põlevkivikateldes keskmiselt 50–60 µm [35]. Eestis kasutusel olevatel TP-101 tüüpi katelde järele on suitsugaasi puhastamise esimese astmena paigaldatud tsüklonid lendtuha püüdmiseks. Tsükloni keskmine puhastusefektiivsus jääb vahemikku 53–73%, seetõttu kasutatakse suitsugaaside lõplikuks puhastamiseks kas elektrifiltreid või kottfiltreid.

Kottfiltreid (KF) kasutatakse EEJ 3. - 6. plokkide suitsugaaside osakestest puhastamise viimase astmena NID seadmes. Antud lahendus tagab 99%-lise tahkete osakeste eemaldamise efektiivsuse. Kottfilter on kasutusel ka elektrifiltri järel Auvere elektrijaamas viimase puhastusastmena.

Põlevkivi tolm põletamise lendtuha jäme fraktsioon 30–150 µm on oma omadustelt sobiv kasutamiseks happeliste muldade lupjamil ja autoklaav-mullbetoonis. PC lendtuha peenfraktsioon 10–30 µm sobib kasutamiseks portlandtsemendi (margiga 550–600) ja kukersiitsemendi (margiga 200–300) tootmiseks. Põlevkivi põletamisel CFBC tehnoloogiaga tekkiv lendtuhk tsemendi valmistamiseks ei sobi ning suunatakse tuhaväljale.

Kõrvuti põletamisel tekkivate tuhkadega, moodustuvad Eesti elektrijaamades (tolmpõletuskatlad ja õlitööstuse tehnoloogiad) suitsugaaside väävlipuhastusseadmete (NID) jäätmed. Väävliärastuse tagajärjel seguneb kustutatud lubjast (või põlevkivituhast) tekkinud kaltsiumhüdroksiidi põhine jääk põlevkivituhaga. Väävliärastuse taseme tõstmiseks osalevad nii tuhk, kui protsessi lisatav kustutamata lubi ühiselt SO₂ sidumise reaktsioonis. Reaktsiooni tulemusena tekib jääk, millest põlevkivituha eraldamine pole tehniliselt võimalik ja mis määratletakse põlevkivituhana.

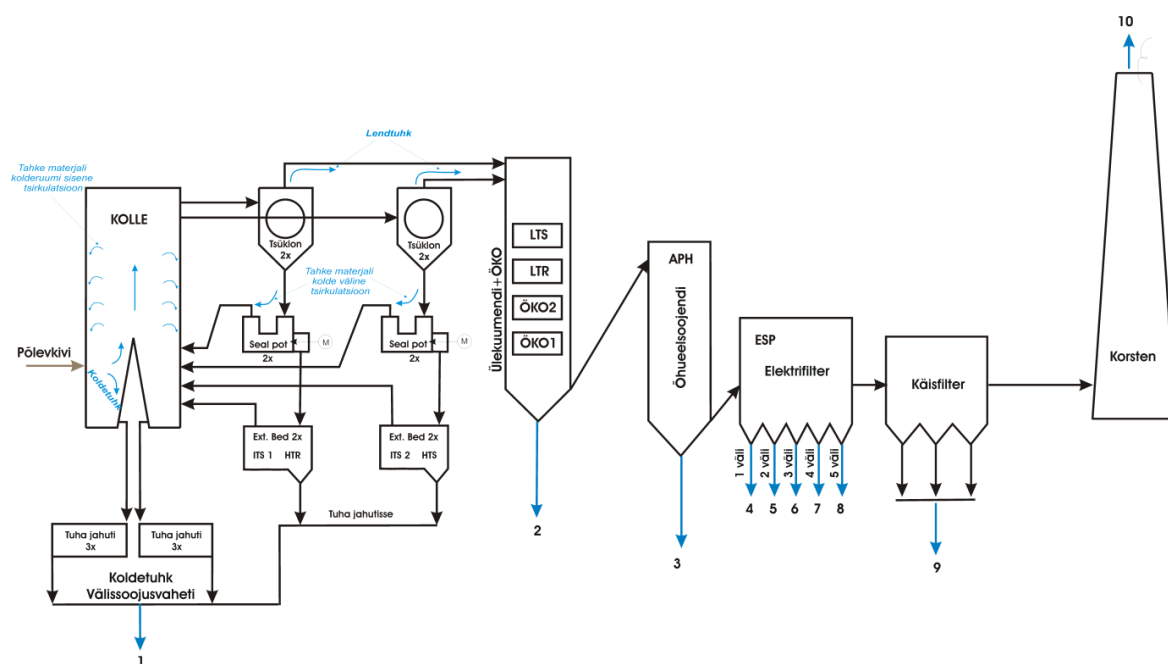
Väävliärastussüsteemidest on Eesti põlevkivienergeetikas kasutusel **NID** (*Novel Integrated Desulfurization system*) tehnoloogia. **NID tehnoloogia** on poolkuiv väävliärastus süsteem/seade, mida kasutatakse elektrijaamas suitsugaasidest happeliste gaaside (peamiselt vääveldioksiidi) ja tahkete osakeste eemaldamiseks. Selleks kasutab NID süsteem tahkekütuste põletamisel tekkinud tuhka ning lisatoimeainena jahvatatud vaba lupja. EEJ PC kateldele paigaldatud NID süsteemidega saavutatakse SO₂ emissiooni 6-8 kordne vähenemine. Kottfiltrite kasutamisega on võimalik tagada tahkete osakeste 99%-line eemaldamise efektiivsus.

Alljärgnevalt kirjeldatakse erinevate otsepõletustehnoloogiate (tolm- ja keevkihtpõletuse) katelde ja tahke soojuskandja meetodil põhinevate õlitootmistehnoloogiate tehnoloogilisi skeme ning tuhavooge.

3.1 Auvere 300 MW_{el} CFBC katlaga Alstom/GE elektrijaam

3.1.1 Tehnoloogia kirjeldus

Auvere Elektriijaam kuulub Eesti Energia AS-le. Auvere energiabloki brutovõimsusega 305 MW_{el} ehitust alustati 2012. aastal, auruturbiini käivitamine toimus aprillis 2015, sünkroniseerimine elektrisüsteemiga toimus 2015. a. mais. Vastuvõtukatsed teostati 2018. a. algul ja üleandmine tellijale (Eesti Energia AS-le) toimus 2018. a. septembri alguses. Antud energiablokk on oma konstruktsioonilt nn. monoplokk – turbiini toidetakse auruga ühest katlast. Katel on CFBC tehnoloogial töötav aurugeneraator auru põhiparameetritega: aururõhk 172/39 bar, temperatuur 540/565 °C, aurukulu 228/207 kg/s. Põhikütuseks on põlevkivi kütteväärtusega 7-11 MJ/kg ja projekti järgi on võimalik samas katlas põlevkiviga koos põletada ka hakkepuitu 50%, turvast 20%, uttegaasi 10 % ulatuses (eralduva soojuse järgi koldes). Antud katel on momendil kõige suurem CFBC tehnoloogial põlevkivi põletav seade maailmas. Vastuvõtukatsete järgi on ploki netokasutegur nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras põlevkivi kütteväärtusega 8,3 MJ/kg põletamisel üle 40%. Katla kasutegur on üle 90%. Ploki põlevkivikulu nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras ja põlevkivi kütteväärtusel 8,3 MJ/kg on 82 kg/s. Temperatuur koldes on 850°C lähedal, mis omakorda määrab põlevkivi mineraalosa käitumise (karbonaatmineraalide lagunemisastme). Katla põhimõtteline skeem on näidatud Joonis 3.



Joonis 3. 300 MW_{el} power unit with Alstom/GE CFBC (ENEFIT ENERGIATOOTMINE AS, Auvere)

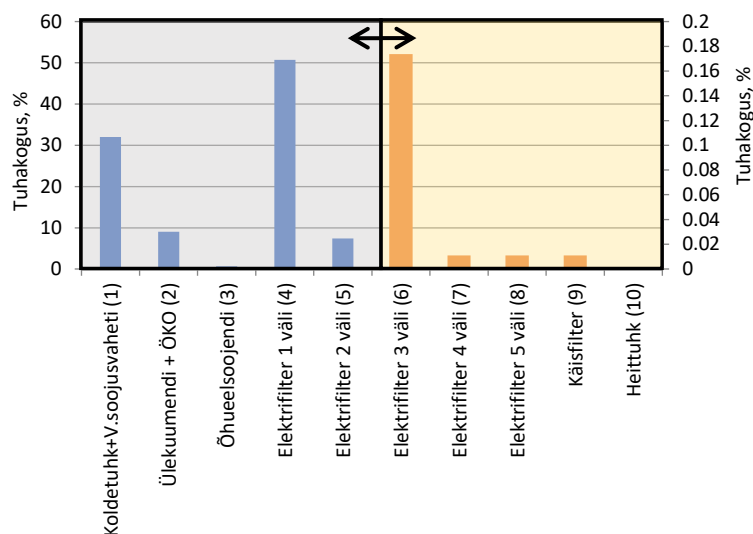
3.1.2 Tuhavood

Tekkiv tuhavoog jaotub kümne erineva tsooni vahel (Joonis 3): koldetuhk – KT (1), ülekuumendi ja ökonomaiser – ÜK+ÖKO (2), õhuelsoojendi (ÕES) – (3), elektrifiltri 1. väli – EF1 (4), elektrifiltri 2. väli – EF2 (5), elektrifiltri 3. väli – EF3 (6), elektrifiltri 4. väli – EF4 (7), elektrifiltri 5. väli – EF5 (8), kottfilter – KF (9), heittuhk atmosfääri (10).

Jaama aastane bruto elektritoodang on kuni 2,6 TWh. 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, millest ligikaudu 30% moodustab koldetuhk ning ca. 70% lendtuhk. Lendtuhest (tsoonid 2 kuni 10) suurim osa eraldatakse elektrifiltrite esimeses väljas (ca. 50% kogutuhavoost) ülejäänud tuhaseparaatorite osakaal üldises tuhavoos on alla 20% ning hinnanguliselt suurem osa tuleb ülekuumendi-ökonomaiseris tsükklontuhana (ca. 9%) ja elektrifiltri 2. väljast (ca. 7%).

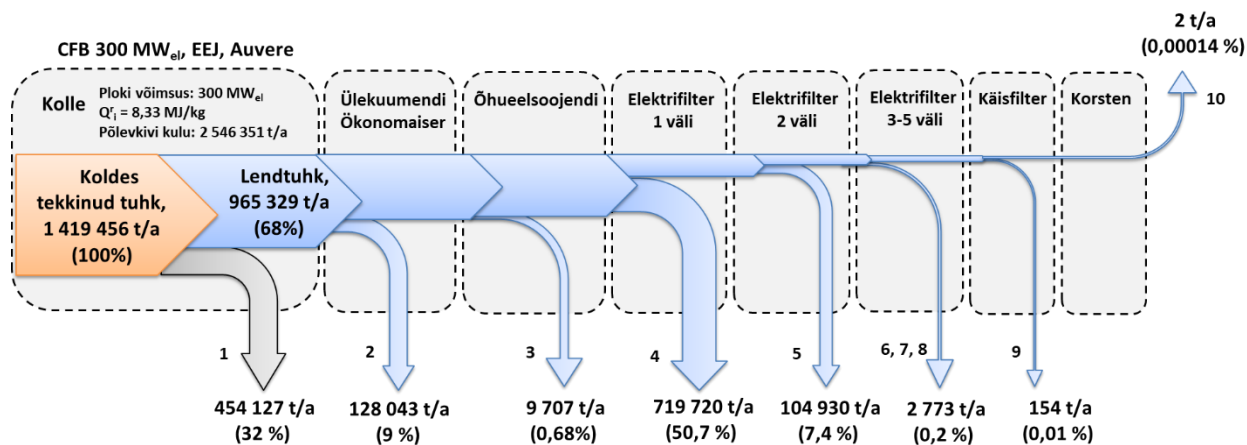
Koldes tekkiva tuha saab jagada kolme gruppi: koldetuhk, tsirkuleeriv tuhk ja lendtuhk (vood 2 kuni 9 Joonis 3). Suitsugaasidega tsüklonitest väljuv lendtuhk sadeneb enne atmosfääri emiteerimist inertsjõudude toimel kahes konvektiivses gaasikäigus (esimesse on paigaldatud ülekuumendite ja ökonomaiserite küttepinnad ning teise toru tüüpi põlemisõhu eelsoojendi). Konvektiivsete gaasikäikude järel on kuiv elektrifilter, kus enamuse gaasivoolus sisaldavatest lendtuha osakesest püütakse kinni. Antud katlal koosneb elektrifilter viiest väljast. Peale elektrifiltrit, gaasivoolu liikumise suunas, on täiendavalt paigaldatud kottfilter, mis võimaldab märgatavalt suurendada suitsugaasist lendtuha osakestest eraldamise efektiivsust. Heittuha (tuhaosakesed, mis väljuvad korstnast) osakaal on väga väike ja maksimaalne lubatud kontsentratsioon kehtiva tööstusheite seaduse järgi 10 mg/Nm^3 . Erinevate laboratooriumide poolt teostatud mõõtmised näitasid välisõhku emiteeritavas suitsugaasis osakeste sisaldust umbes $0,2 \text{ mg/Nm}^3$, mis on kõige madalam lendtuha emissiooni näit põlevkivitööstuses üldse.

Erinevate tuhavoogude jagunemist Auvere plokil kõikide tuhaarastuspunktide ja korstna vahel otseselt katseliselt määratud ei ole. Seega lähtuti tuhabilansi koostamisel järgmistest näitajatest: (a) koldetuha kogus (osakaal) määrati kolde all asuvate tuhajahutite soojusmassibilansist; (b) ülejäänud tuhavoogude jaotus on määratud võrdeliselt BEJ-11. ploki FW CFB katlaga. Saadud tuhavoogude bilanss olukorras, kus kütusena kasutatakse 100% põlevkivi on kajastatud Joonis 4. Võib eeldada, et teiste kütuste koospõletamisel Auvere CFBC katlas jääb tuhavoogude suhteline bilanss samasuguseks, kuid tekkivad absoluutsed tuhakogused vähenevad, kuna teised kütused, mida projekti järgi on võimalik katlas koospõletada, sisaldavad vähem tuhka.



Joonis 4. Auvere plokki CFB katla suhteline tuhabilanss ainult põlevkivi põletamisel

Auvere plokis tekkivad aastased tuhakogused, lähtudes aastasest töötundide arvust – 8760 h/aastas – nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi, kütteväärtusega 8,3 MJ/kg, põletamisel, on kajastatud Sankey diagrammil (vt Joonis 5). Kuigi Auvere plokk anti tellijale üle 2018. a. on võimalik, et reaalsed aastased tuhakogused on väiksemad ja hakkavad sõltuma nii plokki opereerimise töötundidest (peamiselt sõltuvad plokki, katla ja teiste seadmete töökindlusest) kui ka Eesti Energia sisestrategiast. Näiteks, kas põletada 100% põlevkivi ja millise kütteväärtusega, kas koospõletada teisi kütuseid, millises mahus jne.



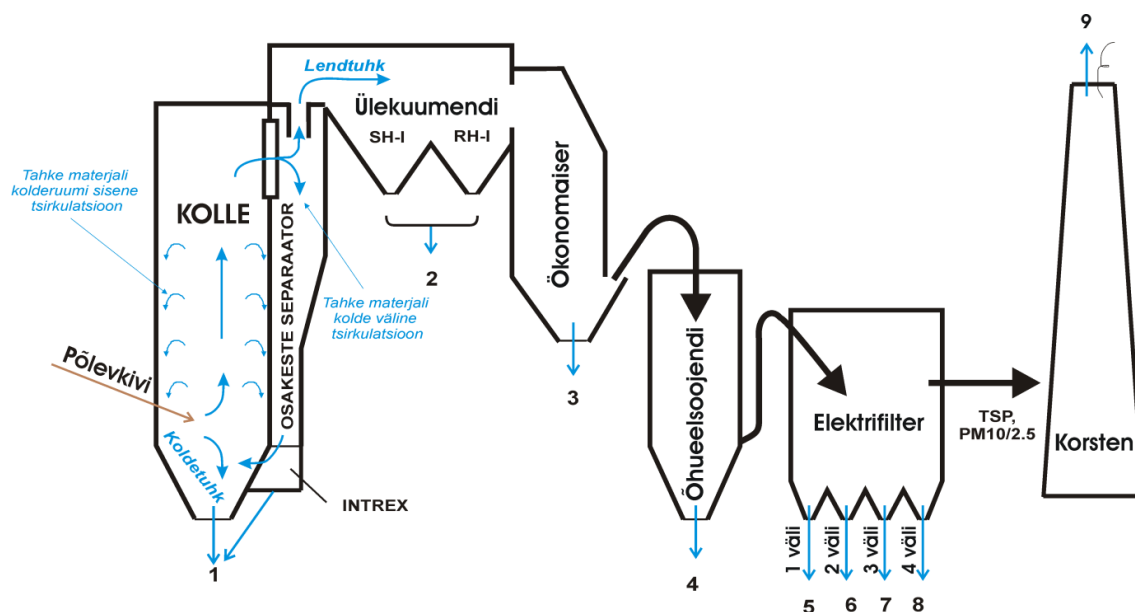
Joonis 5. Auvere elektrijaamas tekkivate tuhavoogude jaotus

3.2 Eesti Elektriijaama (EEJ) ja Balti Elektriijaama (BEJ) CFBC katlad

3.2.1 Tehnoloogia kirjeldus

215 MW_{el} duubelplokk Eesti Elektriijaamas anti käiku 2004. a. [27]. Energiaplokk ehitati EEJ-8. tolm põletusploki asemele ja koosneb eelkäija moderniseeritud auruturbiinist ja kahest tsirkuleeriva keevkihi tehnoloogial töötavast katlast. Katelde tarnija ja peatöövõtja oli Foster Wheeler Energia Oy (Sumitomo SHI FW). Ühe katla kasulik soojusvõimsus on umbes 250 MW_{th} ja auru põhiparameetrid on järgmised: rõhk 12,74/2,4 MPa, temperatuur 535/535 °C. Ploki netokasutegur on ligikaudu 36%, sealjuures katelde kasutegur on 88-90%. See on tingitud asjaolust, et antud juhtudel on otsustatud turbiine rekonstrueerida, mistõttu auru parameetritele on teatavd piirnormid. EEJ-8. duubelplokkiga praktiliselt identne 215 MW_{el} duubelplokk Balti Elektriijaamas (elektriijaamasisese numeratsiooni järgi – 11. plokk) anti käiku 2005. aastal. Üheks põhiliseks erinevuseks EEJ ja BEJ paigaldatud CFBC kateldel on see, et BEJ katlas on võimalus koospõletada biomassi koguses kuni 50% kogu kolde ruumis eralduvast soojuse hulgast. Teiseks suureks erinevuseks võrreldes EEJ plokkiga seisneb selles, et BEJ 11. ploki soojusskeemi on integreeritud võimalus kasutada osa turbiini aurust (kuni 160 MW_{th}) soojusallikana kaugkütteevee soojendamiseks (Narva linna kaugküte).

EEJ-8. ploki ja BEJ-11. ploki CFBC katelde põhikütuseks on põlevkivi osakeste fraktsiooniga kuni 15-20 mm. Kasutatava põlevkivi keskmine kütteväärtus on 8,4 MJ/kg, kuid on võimalik kasutada põlevkivi nii madalama kütteväärtusega, alates 7 MJ/kg, kui ka kõrgema kütteväärtusega 11,5 MJ/kg – 12 MJ/kg. Põlevkivi kulu statsionaarses olukorras nominaalvõimsusel ja põlevkivi kütteväärtusel 8,4 MJ/kg on umbes 216 t/h (60 kg/s) ploki kohta.



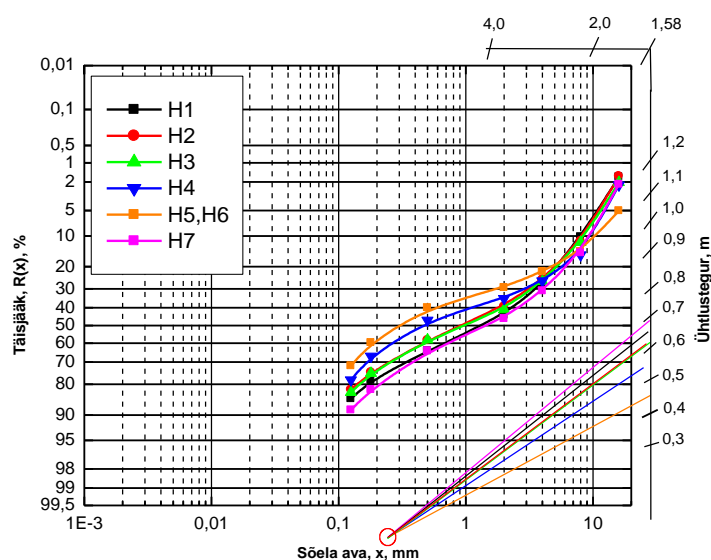
Joonis 6. 215 MW_{el} plokk koos 2x FW CFBC (ENEFIT ENERGIATOOTMINE AS, EEJ ja BEJ)

3.2.2 Tuhavood

Tuha jaotumine erinevates tsoonides (Joonis 6): koldetuhk – KT (1), ülekuumendi – ÜK (2), ökonomaiser – ÖKO (3), õhuelsoojendi – ÕES (4), elektrifiltri 1. väli – EF1 (5), elektrifiltri 2. väli – EF2 (6), elektrifiltri 3. väli – EF3 (7), elektrifiltri 4. väli – EF4 (8), heittuhk atmosfääri (9).

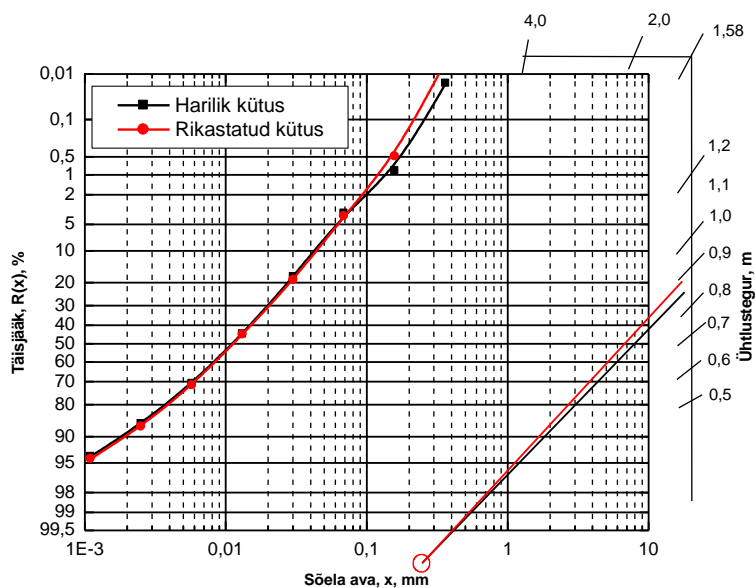
Põlevkivi põletamisel mineraalosast võib koldes tekkinud tuha jagada tinglikult kolmeks (vt Joonis 6). Esimene osa – koldetuhk – on jämedamad tuha osakesed, millised antud kolde tingimuste juures sadenevad kolde põhja kust need hiljem ärastatakse. Teine osa – tsirkuleeriv tuhk – on peenema fraktsioonkoostisega osakesed, millised lendavad koldest välja koos põlemisgaasiga, kuid püütakse kinni kolde järel asuvas tsüklonis (separaatoris) ja suunatakse tagasi koldesse läbi integreeritud soojusvaheti (INTREX™). Tehnoloogilistel põhjustel, et tagada vajalik tsirkuleeriva materjali kogus, viiakse osa tsirkuleerivast tuhast katlast välja ja see seguneb koldetuhaga. Kolmas osa – lendtuhk – on peendisperse tuha materjal, mis lendab läbi koldetsükloni gaasivooluga kaasa (vt Joonis 6).

Tüüpiline koldetuhkade granulomeetiline koostis on toodud Joonis 7, mis näitab², et masskeskmine koldetuha osakeste läbimõõt võib olla vahemikus 0,3-1,5 mm sõltuvalt põlevkivist (põhiliselt selle algsest granulomeetriast). Tsirkuleeriva tuha masskeskmine osakeste läbimõõt on ligikaudu 110 µm. Lendtuha granulomeetiline koostis on toodud Joonis 8. Masskeskmine lendtuha osakeste läbimõõt on vahemikus 12 (Joonis 8) kuni 20 µm [35].



Joonis 7. Koldetuhaproovide granulomeetiline koostis erineva kütteväärtusega põlevkivi põletamisel [37]. Siin H1, H2-H7 tähistavad erinevaid katseid, mille detailne kirjeldus on toodud [37]

² Põletuskatsed teostati BEJ FW katelde peal. Kuna BEJ ja EEJ katlad on indentsed, siis saadud tulemused kehtivad ka EEJ kateldele samadel tingimustel, nagu kütuse omadused, põletavad kütused jne.



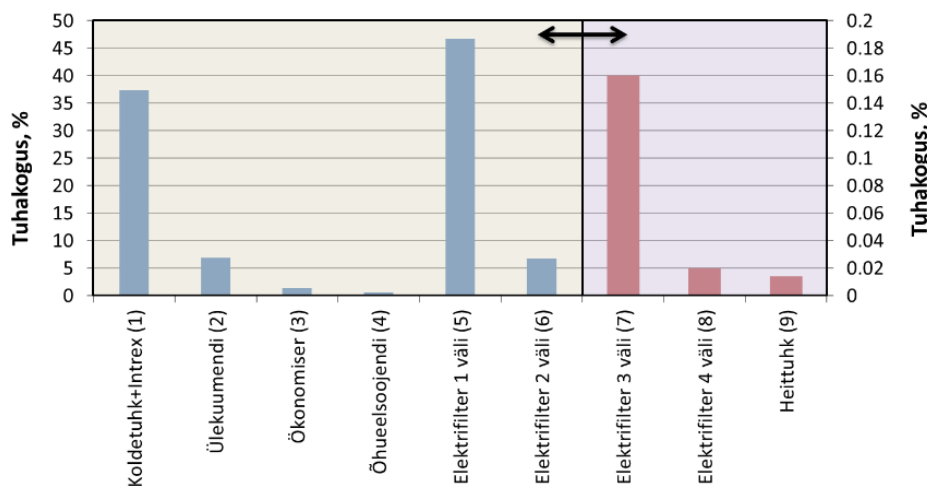
Joonis 8. Lentuha fraktsioonkoostis erinevatel põlevkivi kütteväärtustel [37]

Peale kolde tsüklonitest väljumist liiguvad lentuha osakesed mööda suitsugaaside kanalit ja sadenevad enne elektrifiltrit gaasivoolust inerts- ja gravitatsioonjõudude toimetel. Lentuha sadenemise ja eraldamise punktid (tuhaarastuspunktid) on järgmised: konvektiivsed ülekuumendid, ökonomaiser ja õhueelsoojendi. Edasise gaasivoolu puhastamine lentuha osakestest toimub elektrifiltris. Elektrifilter koosneb neljast järjest asetsevad kambrit (neli elektrivälja), kus igast kambrit toimub tuhaseparatsioon. Elektrifiltris püüdmata jäänud lentuha osakesed emiteeritakse korstnast välisõhku heittuhana.

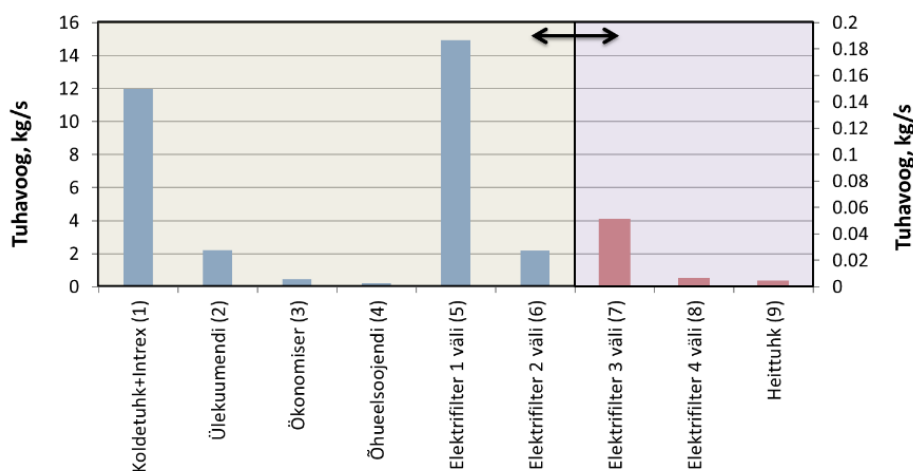
Põlemisel tekkinud tuhavoogude jagunemist kõikide tuhaarastuspunktide ja korstna vahel näitab katla tuhabilanss. Nominaalkoormusel katseliselt määratud [37] FW CFBC katla suhteline tuhabilanss põlevkivi kütteväärtusel ca. 8,4 MJ/kg põletamisel statsionaarses olukorras on näidatud Joonis 9. Jooniselt on näha, et koldest koldetuhana (sisaldab samuti tsirkuleerivat tuhka ehk nn INTREX-i tuhka) tuleb ca 37% põlemisel tekkinud kogu tuhast. Suurem osa lentuhast eemaldatakse katlast elektrifiltri 1. väljas mis moodustab ca. 46% kogu põlemisel tekkinud tuhast. Täiemahuliste tööstuskatsete käigus näidati [37], et põlevkivi ülemise kütteväärtusega ca. 11,5 MJ/kg põletamisel väheneb koldetuha osakaal 37%-lt ca. 30%-ni. Samas, elektrifiltri 1. välja osakaal tuhabilansis tõuseb kuni ca. 49%-ni. Korstnast väljuva lentuha kogused moodustavad ca. 0,014% kogu põlemisel tekkinud tuhast, mis vastab osakeste sisaldusele kuivades suitsugaasides ca. 20 mg/Nm³ 6% O₂ juures. Absoluutsed tuhavood ploki kohta nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras põlevkivi kütteväärtusega umbes 8,3 MJ/kg põletamisel on näidatud Joonis 10. Siin toodud absoluutsed tuhavood arvatati, võttes arvesse karbonaatmineraalide mittetäielikku (peamiselt kaltsiidi, CaCO₃) lagunemist. Põlevkivi põletamisel CFBC protsessi tingimustes jääb ca. 27% karbonaat mineraalidest lagunemata. See tähendab seda, et võrreldes olukorraga, kus karbonaadid lagunevad täielikult (näiteks labori

tingimustel tuhastamisega või tolm põletamisega suhteliselt kõrgel temperatuuril), suureneb tegelik tuha kogus võrdeliselt lendumata CO₂-ga.

Uttegaasi koospõletamisel EEJ-8. plokis, mis võib ühel moderniseeritud katlal moodustada kuni 50% koldes eralduvast soojushulgast, väheneb põlemisel tekkiva tuha üldkogus. Tuhavoogude jagunemist kõikide tuhaarastuspunktide ja korstna vahel sellistel režiimidel ei ole uuritud.



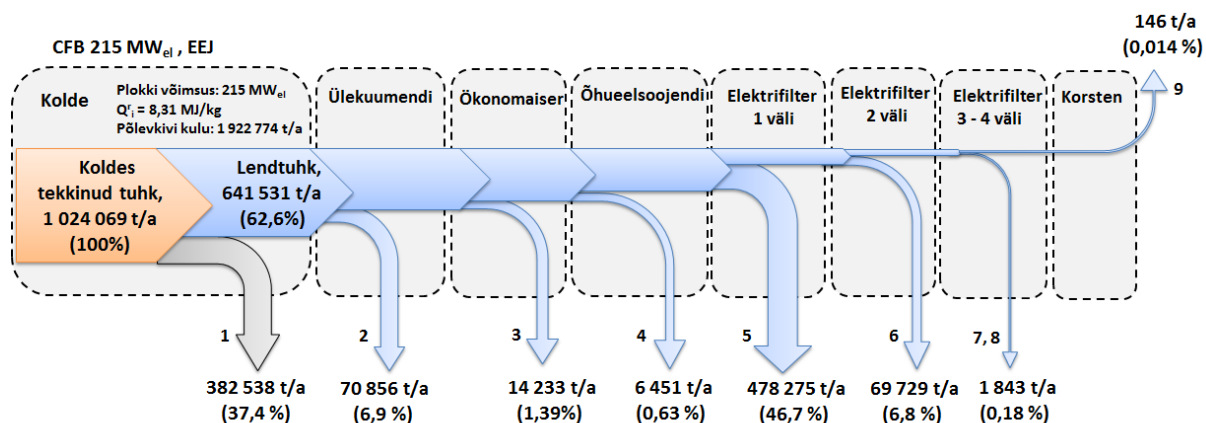
Joonis 9. FW CFB katla suhteline tuhabilans ainult põlevkivi põletamisel



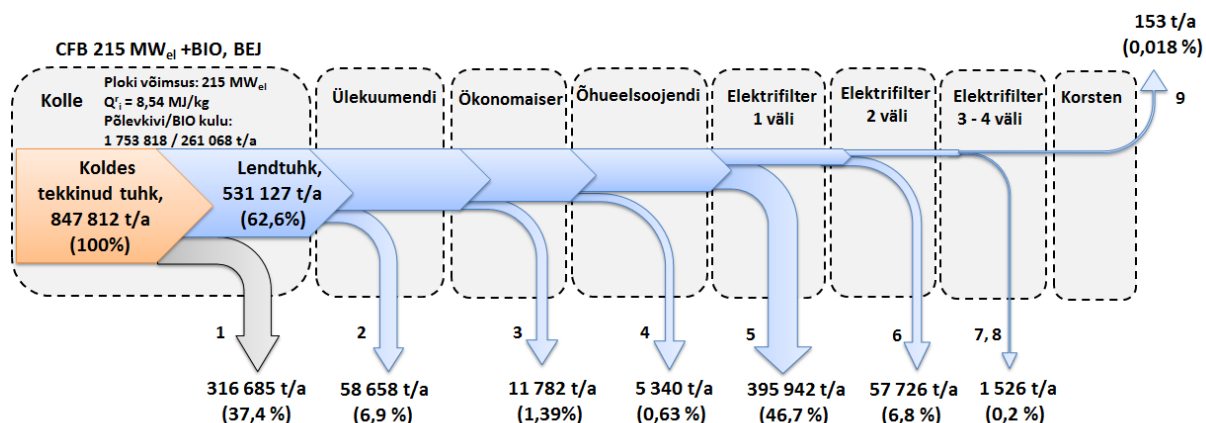
Joonis 10. Absoluutsed tuhavood ploki kohta nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras põlevkivi kütteväärtusega ca 8,3 MJ/kg

Põlevkivi põletamisel EEJ-8. CFBC plokis tekkinud aastased tuhakogused lähtudes töötundide arvust 8760 h aastas nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi, kütteväärtusega 8,3 MJ/kg, põletamisel, on kajastatud Sankey diagrammil (Joonis 11). BEJ-11. plokis põlevkivi ja biomassi koospõletamisel vähenevad absoluutsed tuhavood katlas biomassi väiksema tuhasalduse tõttu võrreldes puhta põlevkivi põletamisega samal võimsusel ja põlevkivi kütteväärtusel (Joonis 12). Uuringud näitavad, et biomassi lisamisel tõuseb elektrifiltrite efektiivsus suitsugaaside niiskusesisalduse suurenemise tõttu, mis omakorda vähendab tahkete osakeste atmosfääriheitmeid.

Siinkohal tuleb märkida, et realselt on nii põletatav põlevkivikogus ja järelkult ka vastavalt tekkivad tuhakogused väiksemad, kuna sõltuvalt erinevatest teguritest, on aastane töötundide arv väiksem. Näiteks oli Enefit Energiatootmine AS andmetel EEJ-8. plokki töötundide arv 2017. a. umbes 6000 tundi ja tarbitud põlevkivi kogus (keskmise kütteväärtusega 8,0 MJ/kg) oli 1 097 266 tonni. BEJ-11 plokki töötundide arv oli 2017. a. ligikaudu 7 600 tundi ja tarbitud põlevkivi, keskmise kütteväärtusega 8,5 MJ/kg, kogus 1 496 988 tonni. Samal aastal koospõletati 117 610 tonni biomassi kütteväärtusega 10,75 MJ/kg.



Joonis 11. EEJ-8. plokis tekkivate tuhavoogude jaotus



Joonis 12. BEJ-11. plokis tekkivate tuhavoogude jaotus

3.3 Tolmpõletustehnoloogia – NID-ga varustatud 185 MW_{el} tolmpõletus energiaplokkid

3.3.1 Tehnoloogia kirjeldus

Elektrienergia genereerimine Eestis toimub praegu veel ka tolmpõletusplokkidel (PC). Kokku on PC energiaplokke EEJ-s seitse ja üks BEJ-s. EEJ energiaplokkide 1, 2 ja 7 ning BEJ-12 plokki kasutamine lõpetatakse 2019. aastal. Täitunud on ka turbiinide arvutuslik ressurs (220 000 tundi), kuna turbiinid

on töötanud 315-330 tuhat tundi. PC energiablokke on võimalik jagada kahte gruppi sõltuvalt sellest, kas plokk on varustatud vääveldioksiidi puhastusseadmetega (nn. NID) või mitte. NID seadmega on varustatud kokku neli EEJ plokki (energiablokid 3-6 elektrijaama sisemise tähistuse järgi). Käesolevaks ajaks on plokid 3 ja 4 konserveeritud. Antud alapunktis käsitletakse esmalt NID-iga plokkide kuigi EEJ tolmpõletusplokkide katlad on ehituselt identsed. BEJ-12. plokki tolmpõletuskatlad erinevad konstruktsioonilt, kusjuures üks katel on kohandatud külmekeeris põletustehnoloogiale.

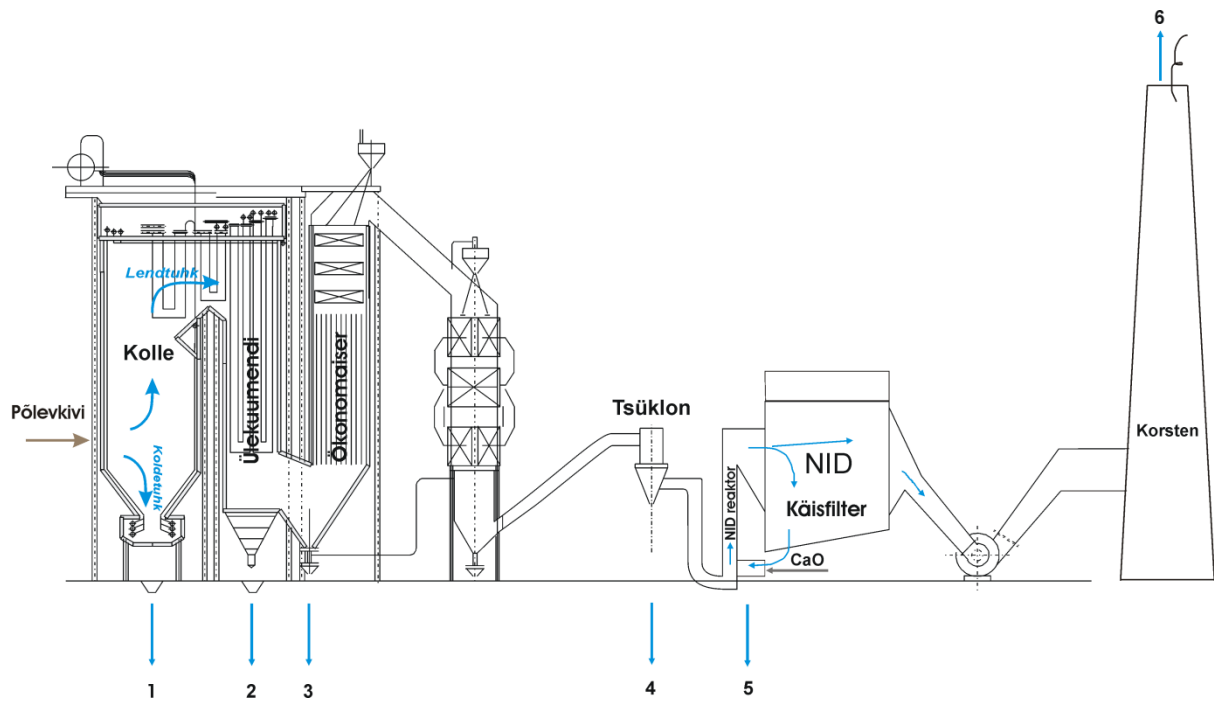
EEJ-s asuvad plokid anti käiku 1969-1973 aastal. Energiablokki moodustab turbogeneraator ja kaks TP-101 tüüpi tolmpõletuskatelt, mille lõige on näidatud Joonis 13. Katla TP-101 auru põhiparameetrid on järgmised: aurutootlikkus on 320 t/h, põhi- ja vaheülekuumendatud auru rõhk katla järel on vastavalt 13,2/2,2 MPa, auru temperatuur 520/525 °C. Ploki nominaalne brutovõimsus on 185 MW_{el} ja plokki kasutegur on alla 30%. Katla kasutegur nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras on 86-88% [25]. Tolmustatud põlevkivi, mis sisestatakse koldesse läbi põletite, osakeste mediaanmõõt on vahemikus 45-55 µm ja kütuseosakeste põlemine toimub koldetemperatuuril ca. 1400 °C.

3.3.2 Tuhavood

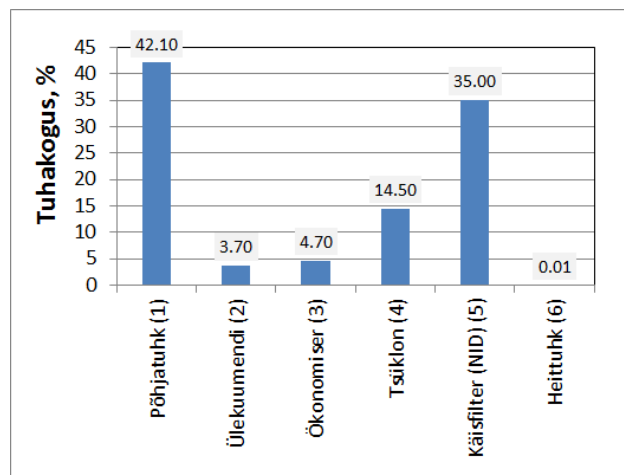
Põlevkivi põlemisel koldes tekkiv tuhk jaguneb kaheks: koldetuhk ja lendtuhk. Koldetuhk koosneb põhiliselt tuha raskematest osakestest, mis sadenevad gaasi voolusest koldekambri põhja nn. külmeletrisse. Lendtuhk moodustub vastavalt peenematest osakestest, mis haaratakse koldekambri gaasi põhivooluga kaasa ja väljuvad kolde ülaosast. Koldest väljuv lendtuhk sadeneb osaliselt gaasi voolust inerts- ja raskusjõudude toimel laskuvas (paigaldatud sirmülekuumendid) ja tõusvas (ökonomaiseri küttepinnad) gaasikäigus. Osa lendtuhast püütakse kinni tsüklonis. Katla järele on paigaldatud poolkuiv vääveldioksiidi püüdmise seade NID, kus enamus lendtuhast püütakse kinni kottfiltris. NID reaktoris kõrgema SO₂ sidumise efektiivsuse saavutamiseks teostatakse püütud lendtuha osaline retsirkulatsioon tagasi reaktoris (tõusev gaasikäik). Lisaks doseeritakse reaktoris ka vaba lupja (CaO), sõltuvalt plokki töötundidest, koguses kuni 8000 tonni/aastas plokki kohta (kaks katelt). Antud tüüpi katlal teostatud tuhabilansi mõõtmised [25] näitasid, et koldetuhk moodustab umbes 42% kogu koldes tekkinud tuha kogusest (vt Joonis 14). Koldekambri väljuv lendtuhk jaguneb teiste tuhaarastuskohtade vahel järgmiselt: laskuva gaasikäigu ülekuumendi küttepindade alt ca 3,7%, ökonomaiseri alt (tõusev gaasikäik) 4,7%, tsükloni alt 14,5%, NID seadme alt 35% ja korstnast umbes 0,02%. Siin tuleb märkida, et kuigi tuhabilansi katsed teostati enne NID seadme integreerimist elektrifiltrite asemele, siis NID seadme integreerimine ei muuda tuhabilansi koldes ja gaasikäikudes enne NID-i. NID seade sisaldab lendtuha püüdmiseks kottfiltrit mille osakeste püüdmise efektiivsus on suurem võrreldes elektrifiltritega. Mõõtmistulemuste järgi on korstnast väljuvas suitsugaasis lendtuha kontsentratsioon alla 20 mg/Nm³, mis omakorda annab võimaluse arvutada NID seadme alt tuleva

tuhakoguse osakaalu. Joonis 15 on toodud NID-iga tolmpõletuskateldega varustatud plokkides aastas nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi põletamisel tekkinud tuhakogused (ploki kohta), lähtudes töötundide arvust 8760 h.

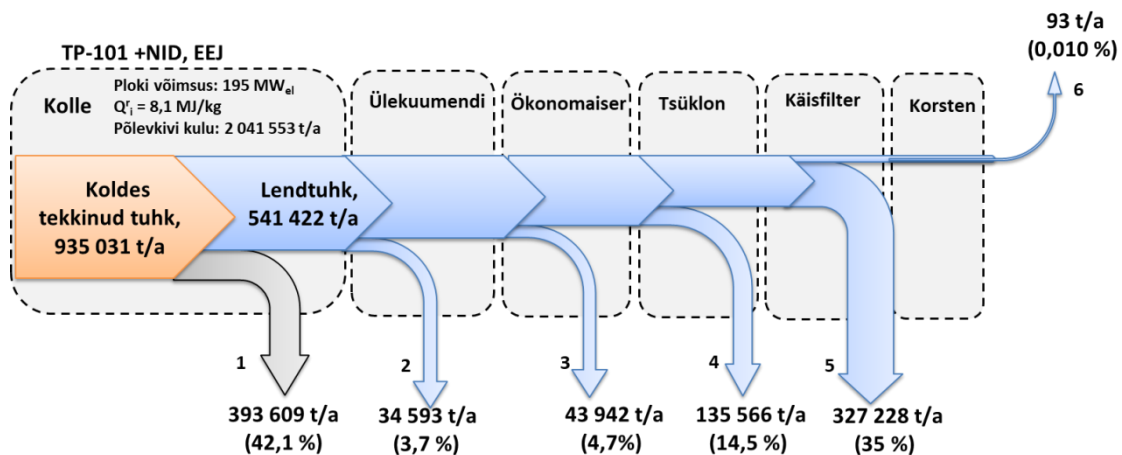
Antud plokkidel on põhikütuseks põlevkivi, kuid koospõletatakse ka uttegaasi mahus kuni 12% (aasta keskmine, andmed 2017. aastast) primaarenergia soojuse ekvivalendis. Plokkide sissekütmise ajal põletatakse ka põlevkiviõli.



Joonis 13. 185 MW_{el} plokkid koos 2x tolmpõletuskateldega (TP-101) + NID



Joonis 14. TP-101 katla suhteline tühabilanss nominaalkoormusel



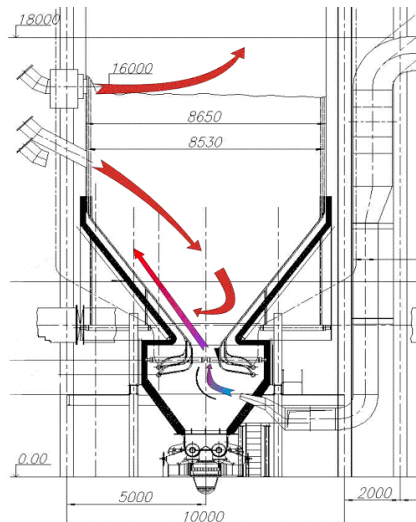
Joonis 15. NID-iga varustatud tolmpõletus plokkides tekkinud aastased kogused (ploki kohta) lähtudes aastasest töötundide arvust – 8760 h – nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi põletamisel

3.4 Tolmpõletustehnoloogia – 185 MW_{el} tolmpõletus energiablokk

3.4.1 Tehnoloogia kirjeldus

Balti elektrijaamas on vajadusel kasutatav tolmpõletustehnoloogial töötav energiablokk nominaalse brutovõimsusega 185 MW_{el} (12. plokk, elektrijaama sisemise numeratsiooni järgi). Energiablokk anti käiku 1963-1965 aastatel ja koosneb kahest TP-67 tüüpi katlast. Aastatel 2008 – 2009 kohandati üks energiabloki kateldest (26. katel elektrijaama sisemise numeratsiooni järgi) nn. keerispõletustehnoloogiale (Joonis 16). Antud tehnoloogia põhiidee seisnes põlevkivi põletamises madaltemperatuurises pidevalt ringlevas horisontaalses keerises. Keerise tekitamiseks asendati katla koldekambri alumises reas olevad keerispõletid otsevoolupõletitega paigutades need kaldega allapoole (Joonis 16). Keerise tekitamiseks suurendati alumise rea põletite kaudu koldeesse söödetava kütuse osakeste suurust.

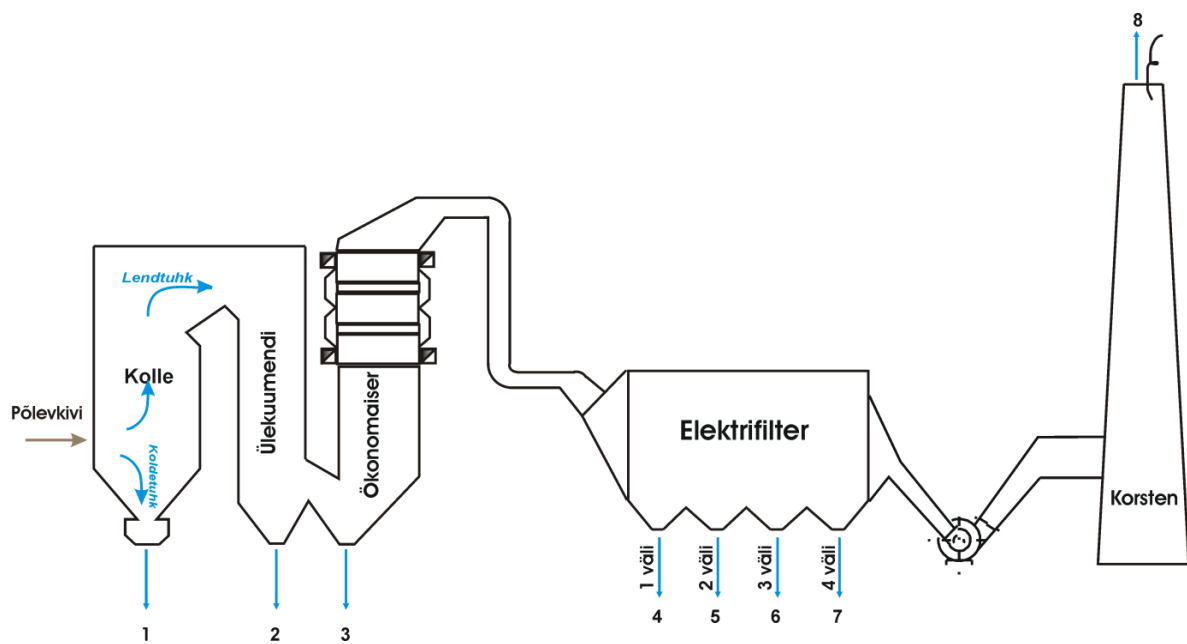
Katla TP-67 auru põhiparameetrid on järgmised: aurutootlikkus on 280 t/h ja 320 t/h keerispõletuse korral, põhi ja vaheülekuumendatud auru rõhk katla järel on 13,8/2,2 MPa vastavalt, auru temperatuur 515/525 °C. Ploki kasutegur on alla 30%. Katla kasutegur nominaalvõimsusel statsionaarses olukorras on 86-88% [16]. Antud ploki on põhikütuseks põlevkivi.



Joonis 16. Keerispõletuse skeem tolmpõletuskatla koldes

3.4.2 Tuhavood

Põlevkivi põletamisel jaguneb koldes tekkinud tuhk analoogselt TP-101 tolmpõletuse kateldega, kaheks - koldetuhaks ja lendtuhaks. Üldised tuhavood on näidatud Joonis 17.

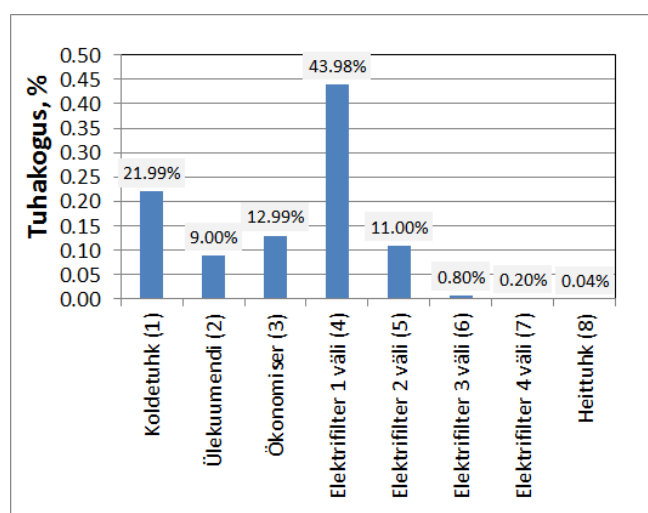


Joonis 17. TP-67 katla põhimõtteline skeem. Sinise noolega on näidatud tuhaarastuse kohad

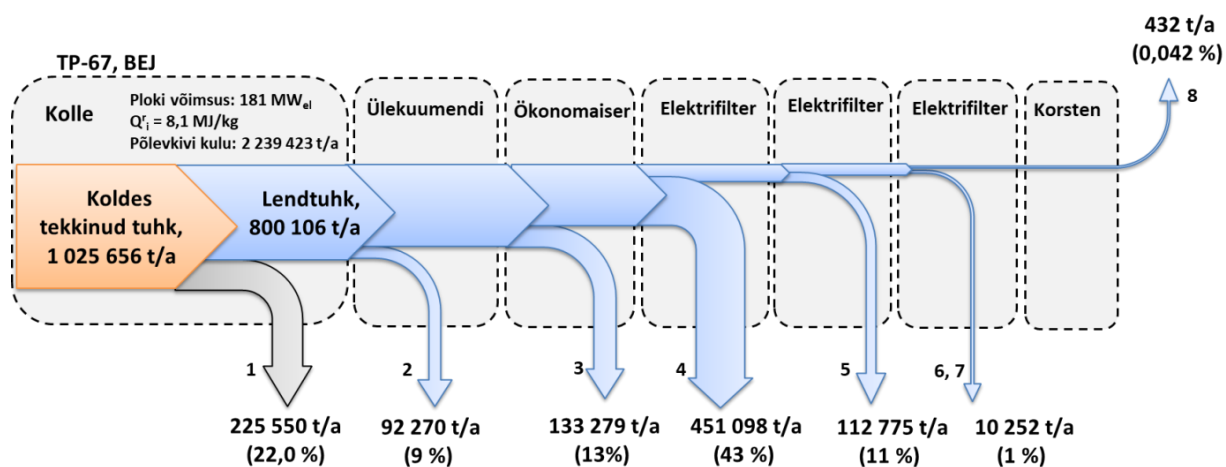
Keerispõletamisega katlal teostatud tuhabilansi mõõtmised [16] näitasid, et nominaalkoormusel moodustab koldetuht (1) ca. 22% kogu koldes tekkinud tuha kogusest (vt Joonis 18). See on peaaegu kaks korda väiksem võrreldes klassikalise tolmpõletusega (vt punkt 3.3.2), mis on tingitud jämedama kütuse kasutamisest ja primaar-põlemisõhu osalisest suunamisest otseselt läbi koldekambri külmletri. Koldekambrist väljuv lendtuht jaguneb teiste tuhaarastuskohtade vahel järgmiselt: laskuva gaasikäigu ülekuumendi küttepindade alt (2) ligikaudu 9%, ökonomaiser ja õhuelsoojendi alt (3)

(tõusev gaasikäik) 13%, elektrifiltri 1. väljast (4) 44%, elektrifiltri 2. väljast (5) 11%, elektrifiltri ülejäänud väljad kokku (6 ja 7) 1% ja korstnast (8) ligikaudu 0,04%, mis vastab atmosfääri emiteeritavate osakeste kontsentratsioonile 50 mg/Nm³ (kahe katla aasta keskmine).

Plokis tekkivad aastased tuhakogused nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi, kütteväärtusega 8,1 MJ/kg põletamisel, lähtudes töötundide arvust 8760 h/aastas on kajastatud Sankey diagrammil (vt Joonis 19). Tegelikult on tekkivad aastased tuhakogused tunduvalt väiksemad ja sõltuvad peamiselt ploki tegelikest töötundidest ja koormusest. Siin tuleb ka märkida, et BEJ-12. energiaplokk on piiratud tööajaga, mille kohaselt kohustub käitaja mitte kasutama seda rohkem kui 17 500 töötundi ajavahemikus 01.01.2016- 31.12.2023. 2017 aastal oli BEJ-12. energiaploki töötundide arv 2507 h, millele vastav põlevkivi, keskmise kütteväärtusega 8,32 MJ/kg, põletamisel tekkinud tuhakogus oli 177 621 tonni.



Joonis 18. TP-67 keerispõletamisega katla suhteline tuhabilanss nominaalkoormusel



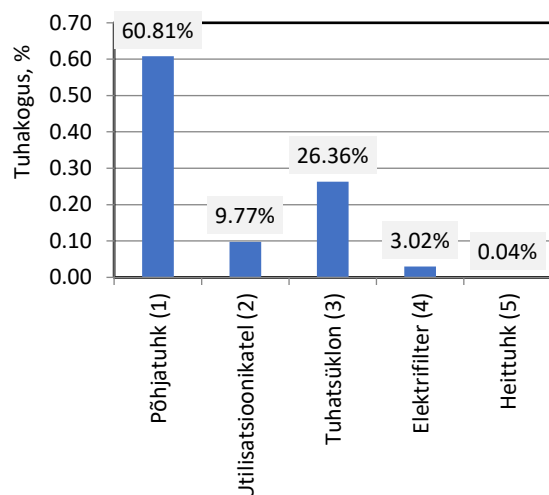
Joonis 19. TP-67 kateltega plokil tekkinud aastased tuhakogused lähtudes aastasest töötundide arvust 8760 h/aastas nominaalkoormusel ja statsionaarses olukorras 100% põlevkivi põletamisel

3.5 Enefit280

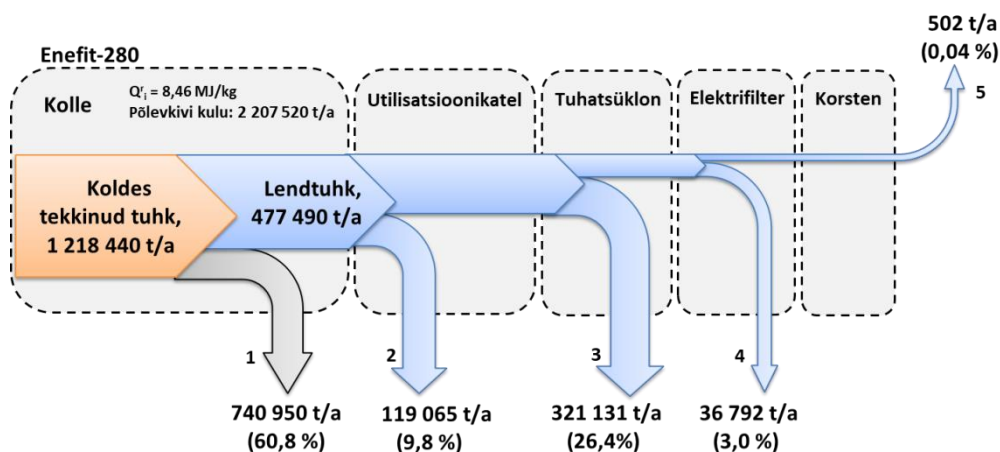
3.5.1 Tehnoloogia kirjeldus

Enefit280 tehnoloogial põhineva põlevkiviõli tootmiseseadme ehitust alustati 2012 aastal. Enefit280 tehnoloogia põhineb tahke soojuskandja (TSK) meetodil, mille hulka kuuluvad ka Enefit140 (endine nimetus TSK-3000 või ka UTT-3000), Petroter I-III ja TSK-500. Enefit280 projektvõimsus on 280 t/h põlevkivi tükisuurusega kuni 6 mm. Projektvõimsus on kaks korda suurem kui Enefit140 ja Petroter tehnoloogiates. Põhiline Enefit280 tehnoloogia iseärasus võrreldes teiste TSK meetodil põhinevate tehnoloogiatega seisneb selles, et pürolüüsi protsessi käigus retordis tekkiva poolkoksi utiliseerimiseks on protsessi integreeritud CFBC tehnoloogia. Enefit280 tehnoloogilise protsessi skeem on toodud Joonis 20. Tehnoloogiline protsess koosneb järgmistest osadest. Põlevkivi söödetakse tigutoitjaga Venturi kuivatisse, kus põlevkivi kuivatamiseks kasutatakse protsessis tekkinud suitsugaaside soojust. Kuivatatud põlevkivi jääniiskusega umbes 0,1% eraldatakse tsüklonis gaasivoolust ja suunatakse pürolüüsiks retorti. Suitsugaas läbib mitmeväljalise elektrifiltri, kus püütakse kinni nii peenpõlevkivi kui ka lendtuha osakesed. Enamus elektrifiltris püütud tahkest materjalist, milles on suhteliselt kõrge orgaaniliste ainete sisaldus, suunatakse utiliseerimiseks tagasi tsirkuleeriva keevkihiga koldesse. Pürolüüsi protsessi käigus retordis tekkinud poolkoks suunatakse põletamiseks CFBC koldesse. Poolkoksi põlemine koldekambris toimub adiabaatilistes tingimustes oksüdeerivas keskkonnas, kusjuures temperatuuri koldes hoitakse alla 800 °C põhieesmärgiga vähendada karbonaatmineraalide lagunemist.

Poolkoksi põletamisel koldes eraldunud soojust kasutatakse retordi tahke materjali (tahke soojuskandja) kuumutamiseks. Teist osa eraldunud soojusest kasutatakse põlevkivi kuivatamiseks. Ülejäänud saadavast soojusest, kaasa arvatud koldetuha ja koldest väljuvate gaaside jahutamisel saadud soojus, kasutatakse elektrienergia genereerimiseks Rankini ringprotsessil põhinevas aurutsüklis. Auruparameetrid on suhteliselt madalad võrreldes kõrval asuvas elektrijaamas kasutatavate parameetritega: auru rõhk on 41 bar ja temperatuur 450 °C. Sellest on tingitud ka Enefit280 õlitehase madal ligikaudu 26%-line elektritootmise kasutegur.



Joonis 21. Tuhavoogude jaotus Enefit280 tehnoloogias



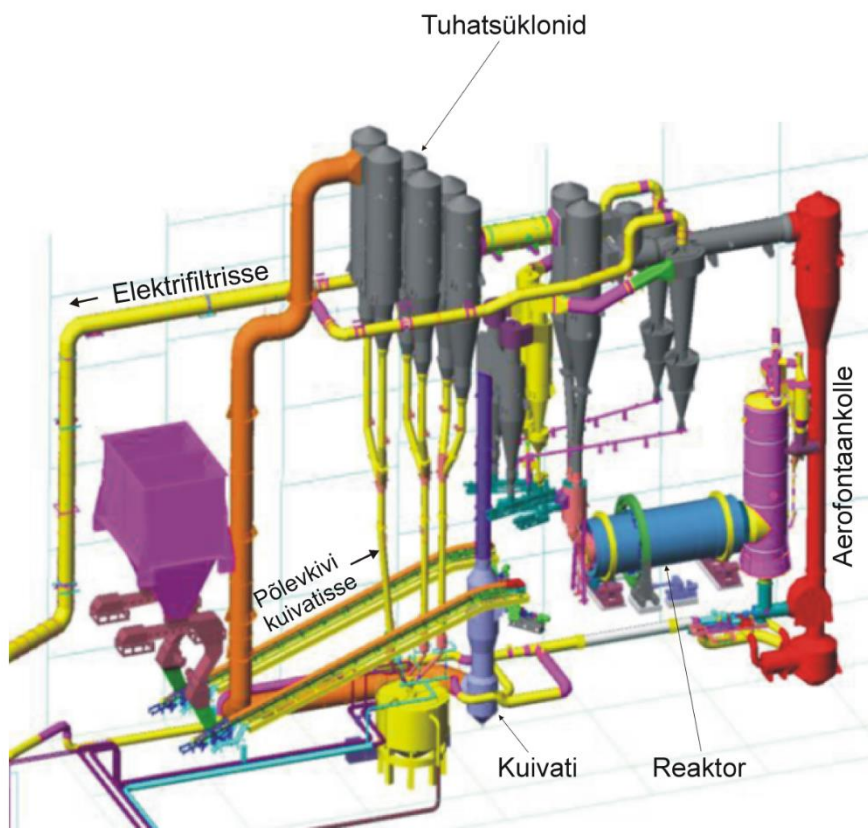
Joonis 22. Enefit280 tehnoloogias ühes aastas tekkivad tuhade kogused

3.6 Enefit140

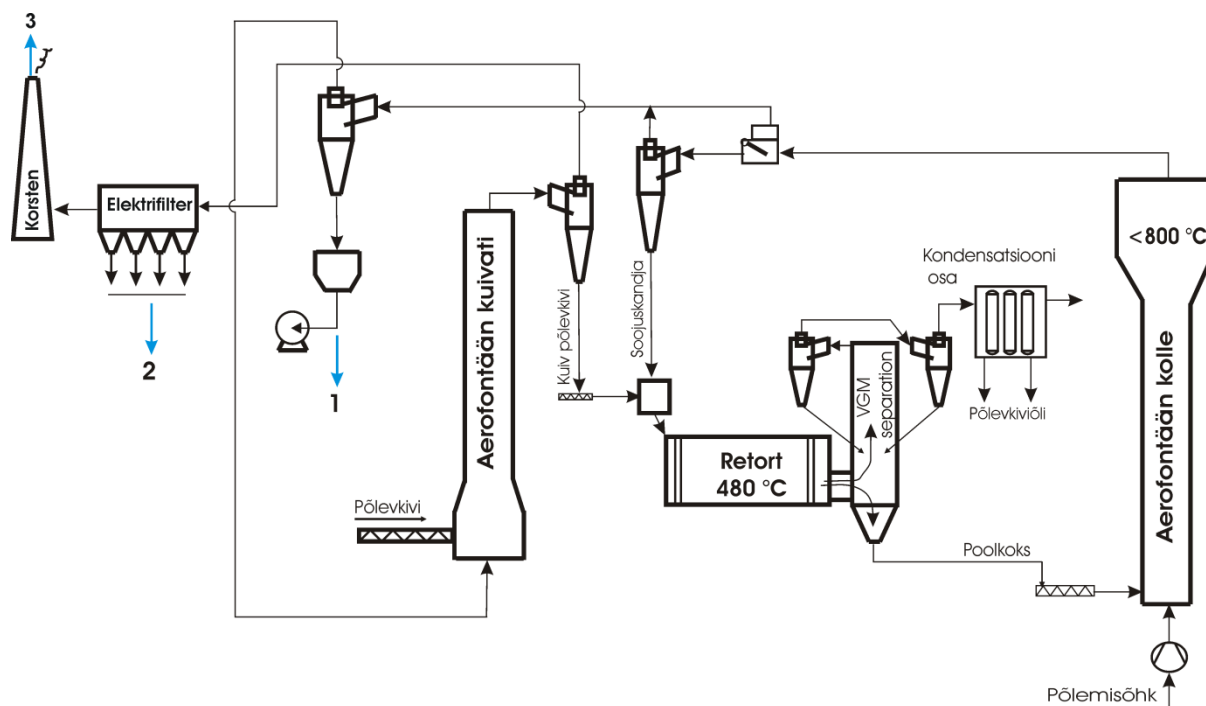
3.6.1 Tehnoloogia kirjeldus

Enefit140 (endise nimetusega TSK-3000; nimetus muudeti 2010. aastal) tehnoloogial põhinev põlevkiviõli tootmise seade ehitati 1980. aastal, kuid peale ehitamist on esialgset tehnoloogiat oluliselt muudetud ja täiendatud. Enefit Energiatootmine AS-is on pidevalt töös kaks praktiliselt identset Enefit140 tehnoloogial põhinevat seadet. Enefit140 seadme tööprintsip põhineb tahke soojuskandja meetodil ja on edasiarendus seitsmekümnendate aastate lõpus eksisteerinud kõige suurema võimsusega põlevkiviõli tootmise seadmest - TSK-500. Projektvõimsus on 140 tonni põlevkivi tunnis tükisuurusega kuni 25 mm (ca 3000 t/päevas). Seadme kolmemõõtmeline põhimõtteline skeem on esitatud Joonis 23 ja skeem Joonis 24.

Protsessi sisenev põlevkivi kuivatatakse aerofontäänkuivatis, kus kuivatamiseks kasutatakse aerofontäänkoldes tekkinud põlemisgaase. Saadud kuivatatud põlevkivi eraldatakse gaasivoost aerofontäänkolde järel asuvates põlevkivitsüklonites ja suunatakse retorti pürolüüsi. Retordist väljunud poolkoks ja tahke soojuskandja separeeritakse gaasilistest komponentidest ja suunatakse aerofontäänkoldesse. Aerofontäänkoldes põletatakse poolkoksi jäänud orgaanilised komponendid ja eraldunud soojust kasutatakse tahke soojuskandja kuumutamiseks. Poolkoksi põletamine toimub taandavas keskkonnas (hapniku puudusel) temperatuuril ca 760-810 °C. Madal põlemistemperatuur, hapniku puudus ja osakeste suhteliselt lühikene viibimisaeg koldes määravad tekkiva tuha omadused. Kolde järel jagatakse kuuma tuha ja gaasi segu kaheks vooks. Üks voogudest suunatakse soojuskandja tsüklonitesse, kus tuhk eraldatakse gaasist ja suunatakse retorti kui tahke soojuskandja. Teine voog suunatakse kolmeastmelisse tuhatsüklonisse, kus toimub tuha eraldamine gaasi voolu puhastamiseks tahkest materjalist. Tuhatsükloni läbinud gaasi jahutatakse veega temperatuurini, mis võimaldab toorpõlevkivi kuivatada ilma selle termilise lagunemiseta. Kuivati ja seejärel kuiva põlevkivi tsükloni läbinud gaas puhastatakse tahketest osakestest elektrifiltris.



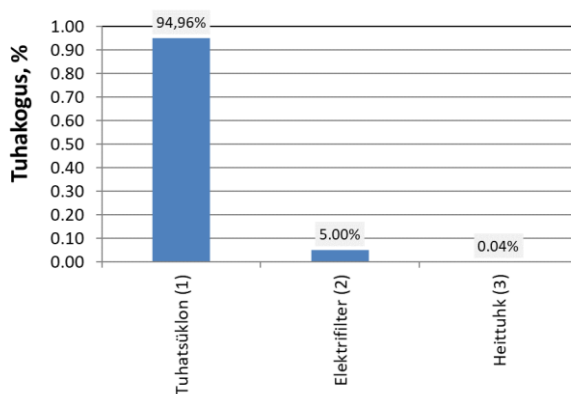
Joonis 23. Enefit140 3D skeem [38]



Joonis 24. Enefit140 põhimõtteline skeem. Siniste nooltega on näidatud tuhaärestuse punktid

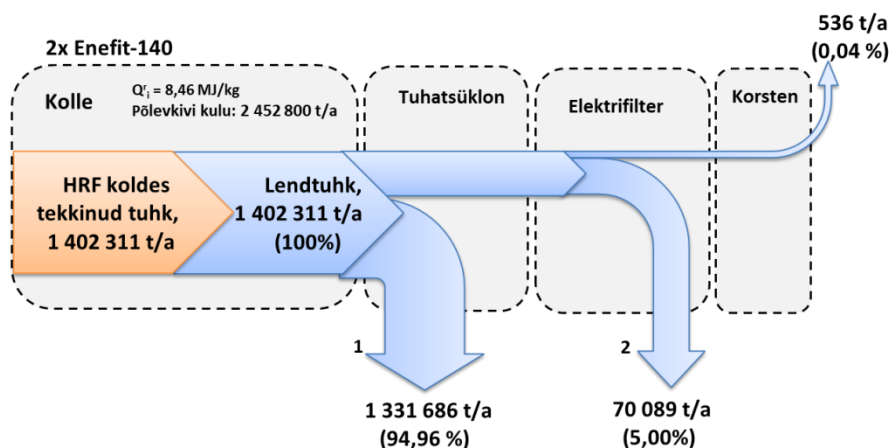
3.6.2 Tuhavood

Poolkoksi põlemisel tekkinud tuhk eraldatakse tehnoloogilisest protsessist enamasti kahes ärestuskohas: tuhatsüklonites (1) umbes 95% ja elektrifiltris (2) ca 5% (vt Joonis 25). Väike osa tekkinud tuhast, ca. 8,5 g/s, väljub atmosfääri heittuhana (3). Protsessist eraldatud tuhavood segatakse ja suunatakse koos EEJ tuhkadega hüdrotuhaärestusega tuhaväljale.



Joonis 25. Tuhavoogude jaotus Enefit140 tehnoloogias

Enefit140 tootmiseseadmetel (summaarsed kahe seadme peale kokku) tekivad aastased tuhakogused, lähtudes töötundide arvust 8760 h/aastas, nominaalkoormusest, statsionaarsest olukorrast ja põlevkivi kütteväärtusega 8,46 MJ/kg kasutamisest, on kajastatud Sankey diagrammil (vt Joonis 26). Tuleb aga märkida, et tegelikud aastased tuhakogused on tingituna seadmete eksploatatsioonivalmidusest ja koormusest, väiksemad.



Joonis 26. Enefit140 tehnoloogias ühes aastas tekkivad tuhade kogused

3.7 Petroter

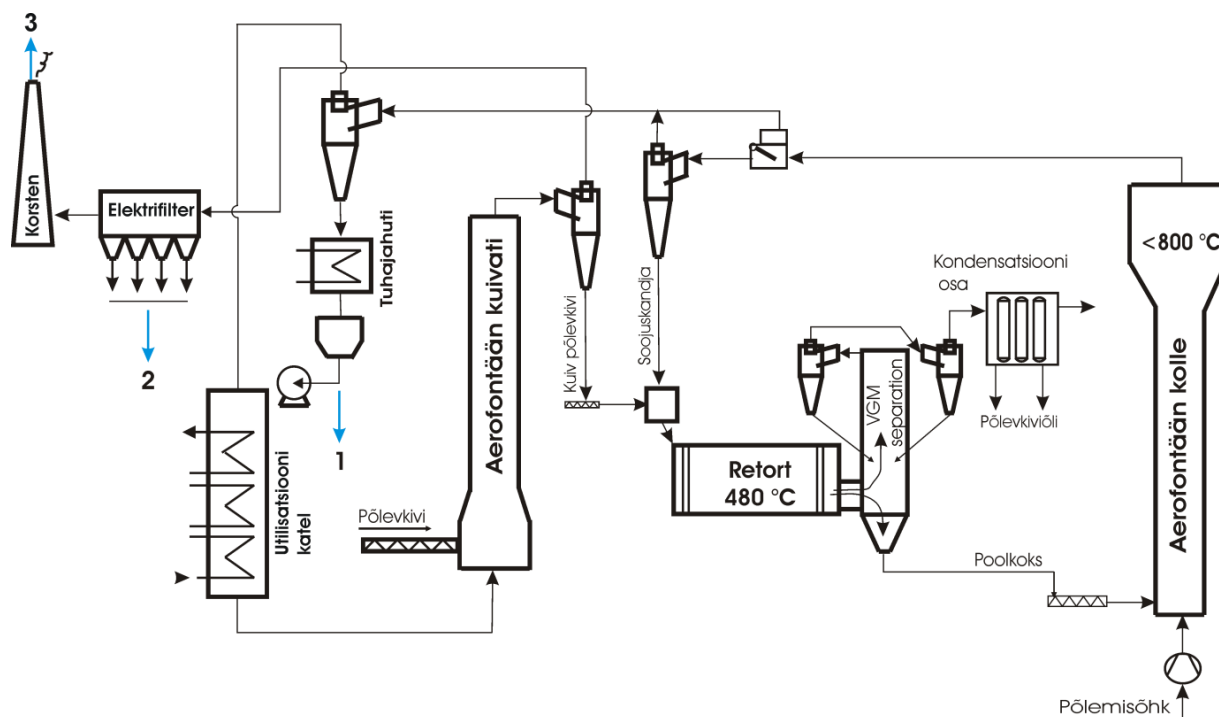
3.7.1 Tehnoloogia kirjeldus

Petroter tehnoloogias rakendatakse põlevkiviõli tootmiseks tahke soojuskandja meetodit. Projektvõimsus on 140 tonni toorpõlevkivi, tükisuurusega kuni 25 mm, tunnis (ca 3000 t/päevas). Viru Keemia Grupp (VKG) AS-is on pidevalt töös kolm praktiliselt identset Petroter tehnoloogial põhinevad seadet. Nendest esimene, Petroter I, anti käiku 2009. aastal, Petroter II 2014. aastal ja Petroter III 2015. aastal. Seadme põhimõtteline skeem on esitatud Joonis 27 (kondensatsiooniosa antud joonisel ei ole näidatud).

Seadme tehnoloogilise protsessi tööpõhimõtte on üldiselt sarnane eelnevalt käsitletud Enefit140 tehnoloogiaga, mida on täiustatud suurema efektiivsuse saavutamiseks. Üheks nendest on tuhatsükloni järel (gaasi poolses osas) pandud utilisatsioonikatel kus toimub gaasivoogu jäänud põlemata orgaaniliste komponentide (H_2S , CO, VOC-id jt) järelpõletamine ja gaasivoo jahutamine temperatuurini, mis võimaldaks põlevkivi kuivatada ilma selle termilise lagunemiseta. Utilisatsioonikatlas orgaaniliste komponentide põletamisel ja gaasi jahutamisel eraldunud soojust kasutatakse auru genereerimiseks. Saadud aur suunatakse kõrval asuvasse elektrijaama Kohtla-Järve linna kaugkütte vee soojendamiseks.

Protsessi sisenev toorpõlevkivi kuivatatakse aerofontäänkuivatis, kus kuivatamiseks kasutatakse aerofontäänkoldes tekkinud põlemisgaase. Saadud kuivatatud põlevkivi eraldatakse gaasivoost aerofontäänkolde järel asuvas põlevkivitsüklonites ja suunatakse retorti pürolüüsi protsessi. Retordist väljunud poolkoks ja tahke soojuskandja separeeritakse gaasilistest komponentidest ja suunatakse aerofontäänkoldesse. Aerofontäänkoldes põletatakse poolkoksi jäänud orgaanilised

komponendid ja eraldunud soojust kasutatakse tahke soojuskandja kuumutamiseks. Poolkoksi põletamine toimub taandavas keskkonnas (hapniku puudusel) temperatuuril umbes 760-810 °C.



Joonis 27. Petroter tehnoloogia põhimõtteline skeem

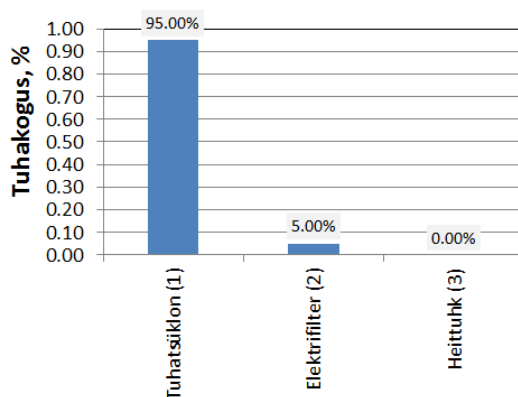
3.7.2 Tuhavood

Madal põlemistemperatuur aerofontäänkoldes, hapnikuvaegus ja osakeste suhteliselt lühikene viibimisaeg määravad tekkiva tuha omadused. Kolde järel jagatakse seal tekkinud kuuma tuha ja gaasi segu kaheks vooks. Üks voogudest suunatakse soojuskandja tsüklonitesse, kus tuhk eraldatakse gaasist ja suunatakse retorti kui tahke soojuskandja. Teine voog suunatakse tuhatsüklonisse, kus toimub gaasivoo puhastamine tahkest materjalist (Joonis 27, voog 1). Tuhatsükloni järel (gaasi poolse osas) asuvas utilisatsioonikatlas toimub gaasivoogu jäänud põlemata orgaaniliste komponentide (H₂S, CO, VOC-id jt) järelpõletamine ja gaasivoo jahutamine temperatuurini. Tuhatsüklonis püütud tuhk jahutatakse tuhajahuti enne tuhaärastust.

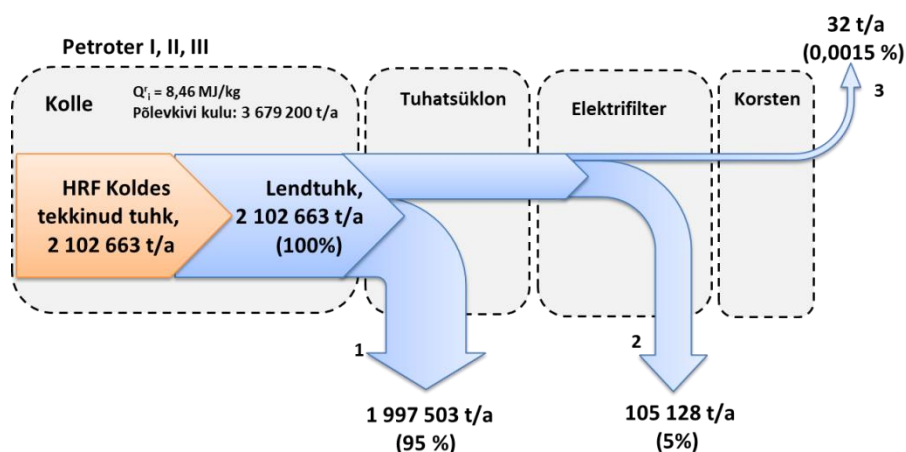
Poolkoksi põlemisel tekkinud tuhk eraldatakse tehnoloogilisest protsessist suures osas kahes ärastuskohas: tuhatsüklonites (Joonis 28, voog 1) umbes 95% ja elektrifiltris (Joonis 28, voog 2) ca 5%. Väike osa tekkinud tuhast väljub heittuhana atmosfääri. Heittuha heitkogused on järgmised: Petroter I 0,426 g/s, Petroter II 0,256 g/s ja Petroter III 0,323 g/s. Protsessist väljunud tuhavood 1 ja 2 (Joonis 27) segatakse kokku, niisutakse ja suunatakse ladestamisele.

Petroter tootmiseseadmetel (summaarsed kolme seadme peale kokku) tekkivad aastased tuhakogused, lähtudes töötundide arvust 8760 h/aastas, nominaalkoormusest, statsionaarsest

olukorrast ja põlevkivi kütteväärtusega 8,46 MJ/kg kasutamisest, on kajastatud Sankey diagrammil (vt Joonis 29). Tuleb aga märkida, et tegelikud aastas tekkivad tuhakogused on tingituna seadmete eksploatatsioonivalmidusest ja koormusest väiksemad.



Joonis 28. Tuhavoogude jaotus Petroter tehnoloogias



Joonis 29. Petroter tehnoloogias ühes aastas tekkivad tuhade kogused

4 Põlevkivituha koostis ja omadused

Põlevkivituhkade keemiline koostis sõltub ennekõike põlevkivi orgaanilise ja mineraalosa koostisest, samas kui põlevkivituha mineraalne koostis on tundlik põletustehnoloogiate (peamiselt põletustemperatuuri) suhtes. Eesti põlevkivi mineraalne koostis on üldiselt stabiilne ning selles domineerivad tüüpilised settekivimite mineraalfaasid – kvarts, päevakivid, savimineraalid ning karbonaatmineraalid (kaltsiit ja dolomiit), millele lisanduvad autigeensetest faasidest ka püriit jt. jälgedena esinevad mineraalid. Orgaanilise ja mineraalse osa vahekord ning samuti kaltsiidi-dolomiidi osakaal karbonaatmineraalide hulgas on geoloogilises läbilõikes varieeruv üsna suurtes piirides, mistõttu vajab põlevkivi kasutamiseks rikastamist. Kaevandatud põlevkivi rikastatamisel saadakse olenevalt kaevandamisviisist ja rikastamisest 1,1–1,4 tonnist kaevandatud põlevkivist üks tonn

kaubapõlevkivi. Rikastamise tulemusena on elektriyaamades ja õlitööstuses kasutatava põlevkivi koostis kontrollitult ühtlane. Tüüpiliselt on elektriyaamades kasutatava kaubapõlevkivi niiskussisaldus 9 - 14%, kütteväärtus 7,0 - 8,5 MJ/kg ja tuhasus 43 kuni 57% [39].

Põletamisel ja/või utmisel tekkivad tuhad on sõltuvalt põletamistehnoloogiatest oma mineraalselt koostiselt ja ka tuhaosiste terasuuruse ja morfoloogia poolest märgatavalt erinevad. Põhiline erinevus tuleneb põletustemperatuuridest. PC tehnoloogia rakendamisel põletatakse tolmuks peenestatud põlevkivi temperatuuridel 1250-1450 °C. CFBC tehnoloogia rakendamisel põletatakse 750-850 °C juures olulisemalt jämedamat kütust, mis võib sisaldada isegi 10 millimeetrist suuremaid tükke. Orgaanilise aine lagunemine ja intensiivne osakeste lendumine algab suhteliselt madalal temperatuuril (350-400 °C). Lenduvate osakeste põlemisaeg on 0,15-0,2 sekundit, peale seda põleb juba koksistunud tuhk edasi 0,5-0,8 sekundit. Koos orgaanilise aine põlemisega muutuvad ka mittepõlevad osad (mineraalid), mis teevad läbi erinevaid keemilisi lagunemisreaktsioone ja transformatsioone ning toimub nende amorfiseerumine (klaasistumine).

Kui PC tehnoloogia korral toimub valdav osa silikaatide mineraalseid muutusi väga kõrge temperatuuri juures (>1200 °C), siis CFBC põletusel on see osa reaktsioonides pärsitud ning silikaatse osa muutumine on vähene ja transformatsioonid ei saavuta keemilist tasakaalu. Karbonaatide käitumisel ei ole erinevused sedavõrd suured, sest karbonaatide (kaltsiidi ja dolomiidi) lagunemine toimub temperatuuridel 700-1000 °C (kaltsiit 895 °C, dolomiit 750 °C). Karbonaatide lagunemisel tekivad CaO ja MgO. Need lagunemisreaktsioonid on endotermilised ning vähendavad oluliselt põlevkivi põletamise soojuslikku efekti. PC tehnoloogia tuhas on reeglina 60-70% tekkinud CaO-st seotud erinevatesse mineraalidesse ja amorfsetesse faasidesse. Umbes 25-35% pole keemiliselt seotud ja 5-10% jääb seotuks lagunemata karbonaatidesse. Praktiliselt muutumatutena säilivad vaid kvarts ja K-päevakivi, mis nendel temperatuuridel oluliselt ei lagune ega osale ka laguproduktide vahelistes reaktsioonides. Siiski peab arvestama, et osa kvartsist võib osaleda reaktsioonides CaO-ga. Peamisteks sekundaarseteks faasideks põletamisprotsessis on põlevkivis leiduva mineraalse Ca ning mineraalides (püriidis) ja orgaanilises aines leiduva väevli arvelt tekkivad väga erinevad kaltsiumit ja väevlit sisaldavad oksiidid-silikaadid ja sulfaatsed komponendid.

Üldjoontes, kuna PC tehnoloogias toimub põlemine kõrgemal temperatuuril ja kütuse granulomeetria on oluliselt väikse, on selles karbonaatide (kaltsiit, dolomiit) lagunemisaste peaaegu 100%. CFBC tehnoloogias on karbonaatide lagunemisaste 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. Üldtrendina langeb CaO sisaldus ja kasvab lagunematu jäägi (peamiselt kvartsi) sisaldus järk-järgult alates koldetuhast kuni elektrifiltersüsteemideni (vt lähemalt allpool).

CFBC tehnoloogia eeliseks on efektiivse gaasilise SO₂ sidumise tagamine, mis väljendub selgelt kõrgemas tuha sulfaatide sisalduses. CFBC tuhas on peamiseks silikaatseks faasiks kvarts ja K-päevakivi, samas kui PC tuhk sisaldab märkimisväärselt rohkem sekundaarseid silikaate beliiti (C2S) ja merviniiti.

Oluline erinevus on ka tuha osakeste suurus, mis varieerub CFBC tehnoloogia tuhas laias ulatuses (vahemikus 0,045 mm kuni ca 10 mm). Sealjuures peaaegu pooltel osakestel on suurus üle 0,63 mm. CFBC lendtuha suurusjaotus on esitatud Tabel 2. PC tehnoloogia tuhas on osakeste suurus homogeensem. Morfoloogiliselt on CFBC tuha osakesed ebaregulaarse kujuga, poorsed ning ebatasase pinnaga. Samas PC tehnoloogiast pärit tuhaosakesed on sfäärilise kuju ja tasase pinnaga. Samuti sisaldab PC tehnoloogia tuhk suures koguse amorfiseerunud klaasjaid faase. Koos morfoloogiliste erinevustega on osakeste eripind CFBC tehnoloogia tuhal kuni kümme korda suurem kui PC tehnoloogia tuhal.

Tabel 2. Põlevkivi lendtuha (FW CFBC) osakeste suurused (µm)

Täisjääk, %	d[0,1]	d[0,5]	d[0,9]
ÜK	2,6	20,7	67,5
EF1	1,9	11,2	39,3
EF2	1,5	8,7	40,4
EF3	1,1	4,9	23,3
EF4	0,8	2,8	6,6

4.1 Elektriijaamade tuhad

4.1.1 Elektriijaamade tuhade keemiline koostis

Kasutatavate põlevkivi põletustehnoloogiate tuhafraktsioonide keemilises koostises domineerib Ca (väljendatuna oksiidsel kujul, so CaO), mille sisaldus varieerub PC tehnoloogia tuhkades vahemikus 26-55% ja CFBC tehnoloogia tuhkades vahemikus 26-50% (vt Lisa 2. Keemiline koostis). Nagu eelnevalt kirjeldatud, väheneb Ca sisaldus nii PC kui ka CFBC kateldes katla gaasikäigus keskmiselt 50%-lt koldetuhast kuni 30%-ni elektrifiltrite viimastel väljadel. Ca esineb tuhkades jääkfaasides kaltsiidina, vaba CaO ja sekundaarsete Ca-silikaatide koostises (vt. mineraalne koostis alapunktis 4.1.2). Mg sisaldus on oksiidses vormis keskmiselt 4-5%, kuid varieerub üsnagi suurtes piirides. Mg esineb tuhas nii vaba MgO-na kui ka sekundaarsete Ca-Mg silikaatidena (vt. mineraalne koostis alapunktis 4.1.2). Mg on enamasti dolomiidi [CaMg(CO₃)₂] termilise lagunemise produkt ja suur varieeruvus tuleneb ilmselt dolomiidi looduslikust varieeruvusest põlevkivi geoloogilises läbilõikes. Räni sisaldused (SiO₂ vormis) varieeruvad tüüpiliselt 25-34% piires kõigis tuhatüüpides, väljaarvatud koldetuhad, kus SiO₂ sisaldus on madalam (reeglina alla 20%). Si esineb valdavalt kvartsina ja teiste primaarsete (inertsete)

silikaatidena, aga ka väga olulisel määral reaktiivsete sekundaarsete Ca(Mg)-silikaatidena ja amorfse klaasina (vt. mineraalne koostis alapunktis 4.1.2). PC ja CFBC tehnoloogiate tuhkade Al sisaldus jääb oksiidse vormis vahemikku 2-11%, aga sisaldused kasvavad elektrifiltrite viimaste väljade suunas tuhaosakeste suuruse vähenemisega ning on seotud alumosilikaatsete mineraalsete faasidega ning amorfse klaasifaasiga. Fe sisaldus (väljendatud Fe_2O_3 -na) on märkimisväärselt kõrge kõikides tuhavoogudes (keskmiselt 4%). Raud esineb kas vaba oksiidina (hematiit) või vähemal määral Ca-Al-ferridina. PC-tuhkades on Fe sisaldus erinevates tuhafraktsioonides üsna stabiilne, jäädes enamasti vahemikku 4 kuni 5%. CFBC tuhkades suureneb Fe sisaldus järk-järgult vähem kui 3%-lt koldetuhkades rohkem kui 5%-le elektrifiltrites. Väävlisisalduse varieerumine on oodatult suur ning kõrgeimad väävlisisaldused on CFBC katelde INTREX tuhkades, mis on spetsiaalselt kavandatud SO_2 eraldamiseks suitsugaasidest. Väävlisisaldused PC tehnoloogia tuhkades näitavad järkjärgulist suurenemist tuhkade peenemates fraktsioonides ning väävle on valdavalt seotud kas Ca-sulfaadina PC ja CFB tuhkades või CaS vormina õlitööstuse (Enefit140 ja Petroter tehnoloogia) tuhkades. Titaani sisaldused (TiO_2 vormis) jäävad põlevkivituhkades stabiilselt 0,3-0,5(6)% piiresse ning Ti esineb kas Fe-oksiidi struktuuri koostises või vilguliste mineraalide struktuuris ning piiratud hulgal (<0,2%) iseseisva Ti-oksiidina (anataas).

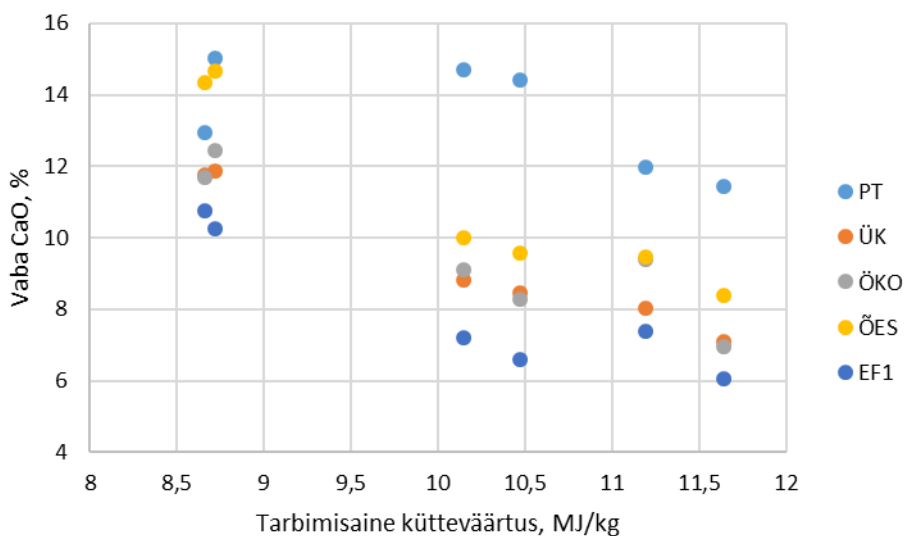
Jälgelementide, sh raskmetallide, sisaldused on põlevkivituhas madalad ja ei ületa reeglina normatiive, mis on seotud teenindus ja/või elamumaadele (vt Lisa 3. Jälgelemendid). Nende käitumine erinevates tuhafraktsioonides näitab nii PC kui ka CFBC tehnoloogia korral ühesugust trendi. Põhimõtteliselt kasvavad kõigi raskmetallide ja teiste jälgelementide sisaldused kolde(põhja)tuhast lendtuha peenemate fraktsioonide suunas (vt Lisa 3. Jälgelemendid). Kõige kõrgemad jälgelementide (sh raskmetallide) sisaldused on mõõdetud elektrifiltrite viimastes väljades. Näiteks, Pb sisaldused varieeruvad koldetuhas 15-20 ppm-st kuni 60-140 ppm-ni elektrifiltrite viimastes väljades. Cr sisaldused varieeruvad sarnaselt 10-20 ppm-st koldetuhas kuni 50-60 ppm-ni elektrifiltrite viimastes väljades. Samuti varieeruvad Hg (<0.02 ppm kuni 0.04-0.05 ppm), Ni (10-12 kuni 30-40 ppm), Zn (40-60 ppm kuni 150 pm), Cu (4-8 kuni 11-12 ppm), Ba (tõuseb kuni 180-200 ppm), U (1-2 ppm kuni 4-5 ppm) ning Th (2 ppm kuni 5-6 ppm).

4.1.2 Elektri jaamade tuhkade mineraalne koostis

Põlevkivi mineraalse osaga toimub põletamisel rida protsesse: termiline lagunemine ja osaline lendumine, uusmineraalide tekkimine ja faasiolekute muutumine [35]. Nende muutuste ulatust mõjutavad mitmed põletustehnoloogiast sõltuvad parameetrid, millest olulisim on temperatuur.

Tuhafraktsioonide mineraalses koostises (vt Lisa 1. Mineraalne koostis) on iseloomulikuks komponendiks kustutamata lubi (vaba CaO), mille sisaldus varieerub vahemikus 8% kuni 18% CFBC

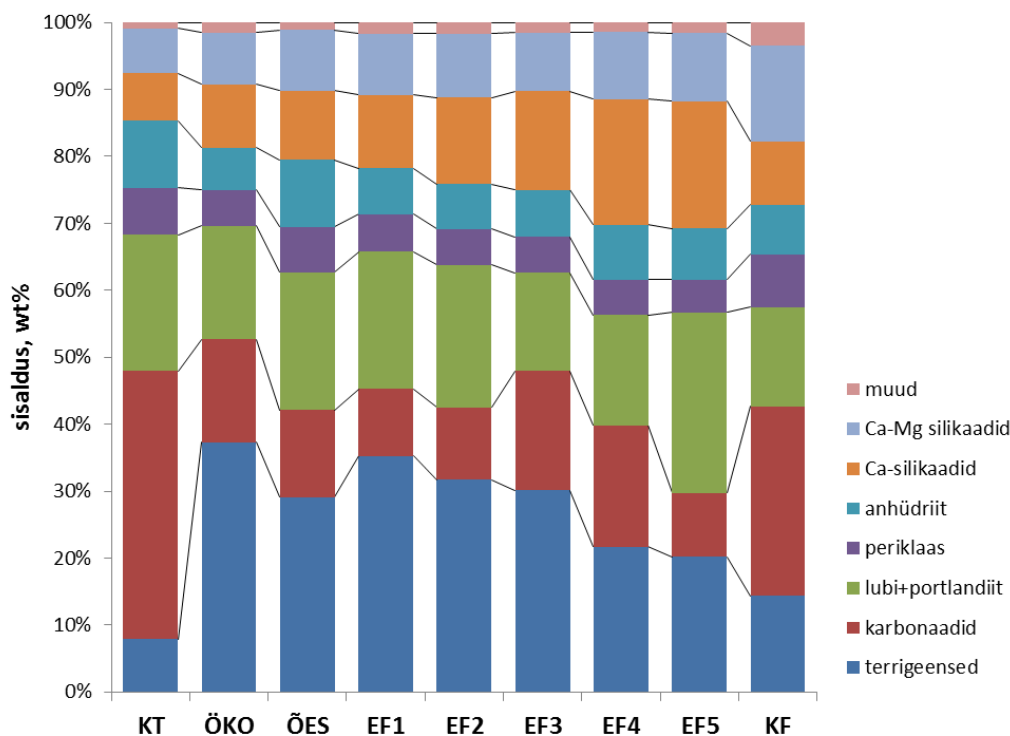
koldetuhas kuni peaegu 30-35%-ni PC tuhkades. Kooskõlas keemilise koostisega näitavad elektrijaamade PC-katelde tuhkade lubja sisaldused järk-järgulist vähenemist koldetuhast kuni elektrifiltriteni. Lubja sisaldus CFBC katelde tuhkades on PC-kateldega võrreldes üldiselt madalam. Seejuures sõltub vaba CaO sisaldus CFBC tuhkades olulisel määral kasutatava põlevkivi kütteväärtusest (Joonis 30). Üldine trend näitab, et suurema orgaanika sisaldusega põlevkivi kasutamisel väheneb lubja sisaldus kõikides tuhavoogudes. Seega, põlevkivi rikastamine võimaldab vähendada lubja sisaldust põlevkivituhas.



Joonis 30. FW CFBC katla tuhavoogude vaba CaO sisalduse sõltuvus kasutatud põlevkivi kütteväärtusest

Erinevalt lubjast suureneb anhidriidi (CaSO_4) sisaldus PC-kateltes umbes 5%-lt koldetuhast kuni maksimaalselt umbes 13% kuni 27%-ni elektrifiltrite viimastes tsoonides. Nagu keemiliste analüüside põhjal oodata, on anhidriidi sisaldus kõrgeim CFBC katelde INTREX-tsoonis, aga suureneb ka elektrifiltrite viimaste väljade suunas.

Ca-silikaatsete faaside jaotus EJ tuhkades sõltub ennekõike tehnoloogiast ja põletustemperatuurist. PC-kateltes väheneb Ca-silikaatfaaside sisaldus tuhavoos ühtlaselt järjest peenemate fraktsioonide suunas. Selle vastandina CFBC kateldes on Ca-silikaatfaaside sisaldus jämedamates tuhafraktsioonides üsna ühtlane ja suureneb elektrifiltrites (Joonis 31; Lisa 1. Mineraalne koostis).



Joonis 31. Auvere elektrijaama CFBC katla tuhavoogude mineraalne koostis: koldetuhk - KT (1), ökonomaiser - ÖKO (2), õhu eelsoojendi - ÕES (3), elektrifilter 1. väli - EF1 (4), elektrifilter 2. väli - EF2 (5), elektrifilter 3. väli - EF3 (6), elektrifilter 4. väli - EF4 (7), elektrifilter 5. väli - EF5 (8), kottfilter - KF (9).

Tuhkade inertne (põlemata) terrigeenne fraktsioon (peamiselt koldetuhas) koosneb enamuses kvartsist, K-päevakivist, hematiidist ja väheses osas termiliselt mittelagunenud kaltsiidist PC-kateldes, millele lisanduvad dehüdroksüülitud savimineraalide, kaltsiidi ja dolomiidi jäljed CFBC kateldes. Mittekarbonaatsete terrigeensete mineraalide sisaldus (väljendatuna kvarts-, K-päevakivi, hematiidi ja savimineraalide summana) tõuseb PC-tuhkades monotoonselt peenemate tuhafraktsioonide suunas. CFBC tuhkades suureneb mittekarbonaatsete terrigeensete mineraalide sisaldus koldetuhast elektrifiltrite esimese (osaliselt ka teise) väljani ja seejärel väheneb viimaste väljade suunas. Karbonaadifaaside (peamiselt kaltsiidi) osakaal on kõrgem CFBC tuhkades, kus selle sisaldus koldetuhas võib ulatuda 40-50%-ni, mis aga väheneb järsult järgmistes tuhafraktsioonides.

Tuhafraktsioonide mikromorfoloogia näitab tehnoloogiast sõltuvalt märkimisväärsed erinevusi. PC-tuhka iseloomustab enamasti sfääriliste klaasjate- ja/ või hematiidi osakeste suur osakaal, samuti osaliselt kokkusulanud klaasjad agregaadid. Sfääriliste osakeste suhteline osakaal suureneb koldetuhast elektrifiltrite välimiste tsoonide suunas. CFBC tuhkades sisalduvad tuhaosakesed on harva sfäärilise-klaasja morfoloogiaga ja tuhk koosneb peamiselt ebakorrapärastest osakestest ja nendest moodustunud poorsetest agregaatidest, mille terasuurus väheneb järk-järgult tuhavoo peenemate fraktsioonide suunas.

PC ja CFBC tuhkade koostise põhimõttelise erinevuse määravad temperatuurierinevused põletustehnoloogiates ja kasutatava kütuse terasuuruse erinevused. PC tehnoloogia kasutab kõrgetemperatuurilist põlemist, kus põlemiskambri sisetemperatuur on 1250-1400 °C (kuni 1500 °C), samas kui CFBC tehnoloogia puhul on optimaalne temperatuur koldes umbes 800 °C. PC tehnoloogia kõrge temperatuur tingib karbonaatsete mineraalsete faaside (dolomiit, kaltsiit) olulise lagunemise ja savimineraalide sulamise, mis moodustavad nii reaktiivse ränidioksiidi kui ka alumiiniumi allika. Need omakorda kontrollivad sekundaarsete Ca-(Mg)-silikaatide ja Ca-Al-silikaatide moodustumist.

Põlemistemperatuur CFBC kateldes on piisav küll praktiliselt täielikuks dolomiidi termiliseks lagunemiseks, kuid kaltsiidi ja savimineraalide lagunemine on vaid osaline. Temperatuuride erinevusest tingituna rikastub PC tuhk vaba CaO ja sekundaarsete Ca-silikaatfaasidega, samas kui CFBC tuhk sisaldab rohkem terrigeensete mineraalide fraktsiooni. CFBC tuha spetsiifiline omadus on oluliselt kõrgem väevli kontsentratsioon, mis esineb peamiselt anhüdriidi (CaSO₄) kujul.

Faaside jagunemine tuhavoos on samuti seotud põletustehnoloogiaga – sekundaarsed Ca-silikaadid, mis moodustuvad kõrgel temperatuuril PC-katlas, tekitavad suuri (osaliselt sulanud) agregate, mis kontsentreeruvad tuha jämedates fraktsioonides ja eemaldatakse koos nendega. Seevastu, CFBC kateldes on sekundaarsed Ca-silikaadi faasid madalatest põlemistemperatuuridest tingituna diskreetsete ja peeneteraliste osakeste kujul, mis eemaldatakse eelistatult elektrifiltrites. Samas on PC-tuhkades olevad anhüdriidiosakesed peenema terasuurusega ja esinevad peamiselt elektrifiltrituhkades. CFBC kateldes moodustub anhüdriiti enamasti koorikutena osaliselt reageerimata CaO tuumadele, moodustades seega suhteliselt suuri osakesi. Selle tulemusena esineb anhüdriit enamasti tuhavoo jämedamates fraktsioonides ja mõnevõrra vähem peenemates tuhavoogudes.

Elektrijaamade tuhkade faasilised erinevused, mis avalduvad peamiselt erinevate Ca-silikaatide esinemise ja sisalduste muutustes, on arvatavasti seotud kateldes kasutatava põlevkivikütuse koostise ja/või kvaliteedi varieerumisega ja ei tulene tehnoloogilistest erinevustest. EEJ-s ja Auvere EJ-s kasutatakse põlevkivi, mis on peamiselt saadud Eesti põlevkivimaardla maa-alusest kaevandusest põlevkivibasseini keskosas. BEJ kasutab aga põlevkivi, mis on põhiliselt kaevandatud Narva karjäärist basseini idaosas. Varasemad geoloogilised uuringud (nt [5]) näitavad, et põlevkivi karbonaatse fraktsiooni dolomiitsus on maardla keskvälja põhjaosas ja ka idapiirkonnas mõnevõrra kõrgem. MgO keskmine sisaldus Eesti maardla lääneosa põlevkivilasundis on 1-2,6% ning maardla idapoolses osas keskmiselt 2,5-3,9%. Dolomiidi termiline dissotsiatsioon toimub võrreldes kaltsiidiga madalamal temperatuuril ja selle mineraali suurem osakaal põlevkivis katalüüsib reaktsioonivõimelise CaO juuresolekul lubja ja silikaadifaaside vaheliste reaktsioonide toimumist. See võib omakorda selgitada Ca-silikaatide ja Ca-silikaat-aluminaadi faaside koostise erinevust Eesti ja Auvere EJ ning BEJ vahel.

4.2 Põlevkiviõlilitööstuse tuhajäätmete keemiline ja mineraalne koostis

Põlevkiviõlilitööstuses kasutakse põlevkivi utmiseks/pürolüüsiks kahte põhimõttelist meetodit, kus põlevkivi termiliseks lagundamiseks (utmiseks) vajalik soojus saadakse kas (1) utmisel moodustunud gaasi põletamisel (nn Kiviter protsess ehk GSK) või (2) tahke soojuskandja (tuhk) vahendusel (Galoter protsess ehk TSK). Nendes protsessides tekkivad jäätmed on suuresti erineva koostise ja füüsikaliste omadustega.

Tahke soojuskandja (TSK) meetod ehk Galoter protsess. Sõltuvalt erinevates tehnoloogilistest arendustest on TSK tuhad kahte alatüüpi – (1) tuhad, mis pärinevad Petroter ja Enefit140 tehnoloogiast ja (2) tuhad Enefit280 tehnoloogiast, mis on morfoloogiliselt ja osaliselt ka koostisel sarnane CFBC tuhkadega ning madala orgaanilise (põlemata) osa sisaldusega.

Petroter ja Enefit140 tehnoloogias tekkiv tuhk, mida nimetatakse mõnikord ka mustaks tuhaks, on suhteliselt hästi sorteeritud materjal, milles domineerivad aleuriidifraktsiooni osakesed. Tuha keemiline koostis on homogeenne ning selles domineerivad Si ja Ca, mis moodustavad keskmiselt vastavalt umbes 10% ja 27% tuha keemilisest koostisest. Mg, Al ja Fe keskmine sisaldus on vastavalt 4-5, 2-3 ja 2-3%. Väevli sisaldus on keskmiselt 2-3%. Orgaanilise jääksüsiniku C_{org} sisaldus varieerub vahemikus 1-2,5%. Jälgelementide sisaldused TSK tuhas vastavad põlevkivi ja põlevkivituha koostisele ning ühegi raskmetalli sisaldus ei ole võrreldes põlevkivituha oluliselt kõrgem, jäädes kõikidel juhtudel tüüpilise põlevkivituha koostise piiridesse.

TSK tuha mineraalses koostises (vt Tabel 73) on valdavateks termilisel töötlemisel säilinud faasideks kaltsiit ja dolomiit, mille sisaldus keskmisena on vastavalt 31% ja 7% ning kvarts ja K-päevakivi, mõlema keskmine sisaldus ligikaudu 15%. Sekundaarsetes faasides on olulisimad periklaas sisaldusega ligi 9% ja sekundaarsed Ca-silikaadid, mille sisaldus on vahemikus 8-12%. Samuti on tuvastatav vaba lubi keskmise sisaldusega 3,5% ning spetsiifilise mineraalse faasina oldhamiit (CaS), mille sisaldus on ligikaudu 4%. Piiratud termilisest mineraalse koostise transformeerumisest annab tunnistust dehüdroksüülitud savimineraalid väike sisaldus, mis on samuti iseloomulik värskel/kuival TSK tuha koostisele.

Enefit280 tehnoloogia on oma olemuselt täiustatud Galoteri (TSK) protsess, kus utmise ajal kuumutatakse põlevkivi hapniku juurdepääsuta temperatuurini, mille käigus põlevkivi orgaaniline osa – kerogeen – lagundatakse. Peamised produktid on gaas ja kondenseeruv õli. Tekkiva tahke jäägi, poolkoksi, põletamisel saadakse nn tahke soojuskandja, mis juhitakse tagasi retorti. Enefit280 tehnoloogia peamine erinevus tüüpilisest Galoteri (nt Petroteri) protsessist seisneb tahke poolkoksi põletamises CFBC põletusseadmes. Selle tulemusena on põlemine temperatuuril ligi 800 °C praktiliselt

täielik. Saadav tuhk, mis on värvuselt hele (pruunikas), ei sisalda või sisaldab väga vähe põlemata orgaanilist ainet ning on omadustelt sarnane elektriijaamade CFBC katelde tuhkedele.

Enefit280 tuha keemiline koostis vastab suuremas osas nii elektriijaamade kui ka Petroter ja Enefit140 tehnoloogia tuhade koostisele. Selles domineerivad Si ja Ca, mis moodustavad vastavalt 10-15% ja 20-25% tuha massist. Mg, Al ja Fe sisaldus Enefit280 tuhas on keskmiselt vastavalt 2-5%, 3-6% ja 2-4%. Väevli sisaldused on varieeruvad, aga üldiselt madalad, keskmiselt 1-3%. Jälgelementide sisaldused Enefit280 tuhades on sisuliselt eristamatud teistest tuhaliikidest ning näitavad samasuguseid sisalduste vahemikke nagu elektriijaamade tuhades.

Enefit280 tuha kristalliliste faaside keskmises mineraalses koostises domineerivad kaltsiit (30-60%), kvarts (4-15%) ja K-päevakivi (2-16%). Dolomiidi sisaldus on 1-7%, mis ilmselgelt näitab, et termiline lagunemine on Enefit280 süsteemis üsna piiratud ja tuha koostis on sisuliselt sarnane põlevkivi mineraalosalale. Lisaks loetletutele sisaldab Enefit280 tuhk sekundaarseid faase nagu autigeensed Ca-silikaadid (kokku kuni 10%) ja periklaas (1-2%), mis tekivad põlevkivi termilise töötlemise käigus. Samas on vaba lubja ja /või portlandiidi sisaldus väga madal (<2%).

Võrreldes Enefit280 tuhka Petroter ja Enefit140 tuhaga on kõige sisulisem erinevus mineraalses koostises CaS-faasi puudumine Enefit280 tuhas. Oldhamiit on CaS-faas, mis on eriti iseloomulik TSK tuhale ja seda ei teki elektriijaamade tuhades. Oldhamiit moodustub hapniku puudumisel CaO ja SO₂ vahelises reaktsioonis.

Enefit280 tuhade mineraalne koostis näitab, et mitmete sekundaarsete reaktiivsete faaside (nt lubi, belliiit-C2S) sisaldused on väga madalad. Sarnaselt teiste TSK tehnoloogiate tuhkadega sisaldab Enefit280 tuhk eriti vähesel määral (<5%) lubja (CaO) ja/või portlandiidi [Ca(OH)₂] faase, mis on otseselt tingitud karbonaatsete mineraalide vähesest lagunemist integreeritud CFBC osas.

Väevliärastusseadmete ehk nn. NIDi tuhk – vanematel tolmipõletuskateldel ja õlitööstuse retortidel kasutatakse väevlipüüduid suitsugaaside puhastamiseks väeveldioksiidist. Nendes juhitakse katelde suitsugaase läbi puhastuseadmete, kus SO₂ seotakse Ca-sulfaadi/sulfiti vormi reaktsioonil CaO/Ca(OH)₂-ga. Sõltuvalt süsteemist ja tehnoloogiast kasutatakse kas lubjakivi põletamisel tekkinud lupja või ka vaba CaO rikast põlevkivituhka koos vaba lubja lisamisega.

Tekkiv tuhalaadne materjal on reeglina helehall kuni valge peeneteraline sõmer materjal, milles domineerivad osakesed suurusega 20-100 µm ning suuremate kui 100-200 µm osakeste osakaal on ligikaudu 10-20% (harvem esinevad osakesed mille suurus ületab 1 mm).

Väevliärastusseadmete jääkide keemilises koostises domineerivad kaltsiumi- ja väevliühendid – oksiididel kujul vastavalt CaO keskmised sisaldused 56-61% ja SO₃ sisaldused 5-23%. Sõltuvalt

fraktsioonist võib SO₃ sisaldus varieeruda 2-4 korda. Teistest põhielementidest on oluline MgO (2-4%). Eriti madal on võrreldes tüüpiliste põlevkivituhkadega SiO₂ ja Al₂O₃ sisaldus. Jälgelementide sisaldused on reeglina madalad, va Sr ja Ba, mille sisaldused on vastavalt 200-300 ppm (0,02-0,03%) ja 500-1600 ppm (0,05-0,16%) – mõlemad elemendid on tüüpilised lisandelemendid lubjakivides ja pärinevad seadmetes kasutatud lubjast. Raskmetallide sisaldused on reeglina väga madalad <10-50 ppm. Mõned tüüpiliselt lubjakivide püriidistumisega seotud kaasnevate elementide (Pb, Zn, Ni ja Cu) sisaldused on kõrgemad, aga jäävad enamasti alla 100 ppm (0,01%).

Mineraalses koostises domineerivad Ca-faasidest kaltsiit ja karboniseerumata portlandiit ning S-faasidest hannebahiit (Ca-sulfit), mille sisaldus varieerub 10-20% vahel. Kaltsiidi sisaldused on erinevates proovides suuresti varieeruvad (vahemikus 10-40%). Portlandiidi [Ca(OH)₂] sisaldused on üsna stabiilselt sarnased (40-50%). Teiste faaside (sh teiste S-ühendite - bassaniidi ja kipsi) sisaldused jäävad reeglina alla 5%. Hannebahiidi domineeriv moodustumine näitab, et SO₂ eemaldamise protsess toimub väävlipüüdurites hapnikuvaeguses, sest vastasel korral tekiks kips ja/või bassaniit.

4.3 Orgaanilised komponendid põlevkivituhkades

Põlevkivitööstuse tahked jäätmed moodustuvad põlevkivi orgaanilise aine põletamisel ja/või termilisel töötlemisel. Sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast võib jääda nende protsesside tulemusena jäätmetesse vähesel määral orgaaniliste ühendite jääke, mis on moodustunud kerogeeni osalisel termilisel lagunemisel/oksüdeerumisel või reageerimisel.

Elektrihaamades toimub nii CFBC kui ka PC tehnoloogial põhinevates kateldes põlevkivi põletamine õhuhapniku liias temperatuuridel >700 °C, mis tagab põlevkivi orgaanilise osa täieliku oksüdeerumise. Orgaaniliste komponentide sisaldused tuhavoo erinevates tsoonides on summaarse orgaanilise süsiniku (C_{org}) vormis kõikides erinevates tuhaliikides madalamad kui 1%, reeglina alla 0,1%. Põlevkivi otsepõletamisel orgaaniline süsinik lendtuhas praktiliselt puudub tänu koksi kõrgele aktiivsusele ja seda nii tolmu- kui ka keevkihtpõletuse puhul. Siiski, tänu kineetilistele nähtustele ei pruugi põlemine olla alati täielik (madalatel temperatuuridel ja hapnikuvaeguses) ning põlevkivituhad võivad sellisel juhul sisaldada potentsiaalselt ohtlike orgaanilisi ühendeid.

Enefit280 seadme tuhade orgaanilise süsiniku sisaldus CFBC koldetuhas ja lendtuhkades ei erine olulisel määral põlevkivi PC ja CFBC otsepõletuse tuhkadest, jäädes alla 1%. Seevastu Enefit140 tuhades on orgaanilise süsiniku sisaldus kordades kõrgem (2-6%), kusjuures elektrifiltri tuhas on sisaldus kõrgeim (6%). Selle põhjuseks on tehnoloogiline eripära: aerofontäänkuivatis eraldub jämedamast põlevkivi fraktsioonist põlevkivi peenfraktsioon, mis juhitakse koos aerofontäänkolde tuha peenfraktsiooniga elektrifiltrisse.

Kuigi varasemad uuringud [40–43] on tuvastanud põlevkivituhkades vähesel määral erinevaid orgaanilisi ühendeid, ennekõike polütsüklilisi aroomaatseid ühendeid (PAH), siis on nende ainete kogusisaldused põlevkivituhkades nii madalad, et pakuvad huvi vaid teaduslikust vaatevinklist. CFBC tuhkades on PAH-de sisaldus maksimaalselt kuni 50 µg/kg ja PC tuhkades kuni 110 µg/kg. Kirso et al. [43] andmetel oli kantserogeense benso(a)püreeeni sisaldus tolm-põletustuhas vahemikus 8-15 µg/kg. Need sisaldused on vähemalt suurusjärgu võrra madalamad kui PAH-de koguhulga lubatud piirnorm 20 mg/kg ja benso(a) püreeeni piirsisaldus 1 mg/kg elutsooni pinnases. Samuti on Roots ja Sweetman [44] andmetel kloor-orgaanilised polütsüklilised saasteainete dioksiinide, PAHde ja naftaleeni emissioonid Eesti põlevkivitööstuse regioonis (Narva ja Kunda regioonis) väga madalad. Elektriyaamade dioksiiniheitmete tase on mõõtmispiiri lähedal – alla 4 pg/m³.

Erinevalt elektriyaamade põlevkivituhkadest sisaldab TSK tuhk (Petroter) rohkem jääkorgaanilist ainet ja eeldatavasti ka rohkem erinevaid toksilisi ja/või potentsiaalselt kantserogeenseid ühendeid. Seejuures on Petroter tehnoloogias tekkiv tuhk umbes 2 korda madalama jääkorgaanilise aine sisaldusega kui Enefit140 tehnoloogias tekkiv tuhk, mis sisaldab kuni ligikaudu 7% orgaanilisi komponente (vt Tabel 78, Lisa 2. Keemiline koostis).

Süsteemaatilise tuha toksikoloogia uuringud [40,41,43] näitavad, et PAH sisaldused on TSK (Enefit 140) tuhas vähemalt kaks suurusjärku kõrgemad kui elektriyaamade tuhkades ning PAH summaarne sisaldus TSK tuhas ulatub kuni 1-2 mg/kg. Benseeni sisaldused TSK tuhas on keskmiselt 2,65 mg/kg. Keskmise TSK tuha summaarne BTEX (benseen, toluen, etüülbenseen, ksüleen) sisaldused on 2,73 mg/kg. Seejuures ei sisalda TSK tuhk määratavas koguses n-alkaane (C10–C40).

4.4 Raskmetallid ja nende leostumine

Põlevkivituhkade jälgelementide (sh raskemetallid) sisaldus on madal (Lisa 3. Jälgelemendid). Enamiku elementide osas on raskmetallide sisaldus tunduvalt madalamad elutsooni pinnase piirarvust (välja arvatud As, mis mõningate tuhafraksioonide korral ületab nimetatud piirarvu kuni kahekordselt) ja seega ei ole käsitletav keskkonnaohu allikana [45].

Erinevate Eesti elektriyaamade põlevkivituhkade varasemad leostuskatsete tulemused [45,46] on näidanud, et mitte ühegi raskmetalli või ionide (kloriid, sulfaat) leostuvus tuhast ei ületa tavajäätmeprügilasse ladestatavate jäätmete leostuvusele kehtestatud keskkonnanõudeid [47], mis on sätestatud Euroopa Nõukogu otsusega 2003/33/EÜ kehtestatud prügilaid käsitleva direktiivi 1999/31/EÜ artikli 16 ja lisa II [47]. Sõltuvalt tuhast, võib ületada üksikute raskmetallide ning kloriidioonide ja/või sulfaatioonide leostuvus püsijäätmeprügilasse ladestatavate jäätmete leostumise piirväärtuseid, kuid üldiselt on aga raskmetallide sisaldus leostusvees põlevkivituhale omaselt madal, jäädes tihti ka alla määramispiiri [46]. Täpsemad põlevkivituhkade leostusvee parameetrid on esitatud

punktis 6.3 Leostustuvate ühendite kontsentratsioonid põlevkivituhha ja kivisöetuhha leovees ning Lisa 4. Leostumine.

4.5 Põlevkivituhkade ja poolkoksi toksilisus: kirjanduse ülevaade

Ühes aastas tekkiva põlevkivituhha kogus võib olla kuni ligi 9 Mt (lähtuvalt alapunktides 3.1 kuni 3.7 toodud tuhavoogudest, sealhulgas ei ole arvestatud 185 MW_{el} tolm põletus energiaploki tuhavoogusid). Vastavalt Keskkonnaameti andmetele ladestati 2017 aastal BEJ ja EEJ tuhaväljadele 7,51 Mt põlevkivituhka ning ning Kohtla-Järve poolkoksi ladestus- ja tuhaväljale 2,77 Mt põlevkivituhka ja poolkoksi³. Seega on põlevkivituhad üks olulisem jäätmeliik Eestis, moodustades umbes 37% Eestis tekkivast summaarsest jäätmete kogusest.

Varasemad uuringud põlevkivituhkade toksilisuse kohta on lünklikud. Blinova et al. [22] on analüüsinud CFBC ja PC-katelde elektifiltrite viimaste väljade tuhkasid, mis moodustavad 0,2 kuni 1% summaarsest kateldes tekkivast tuhast. Nende tulemused näitasid, et leostusveed (tuha ja vee suhe 1:10) on toksilised (eriti PC tuhad) erinevatele veeorganismidele (vesikirp – *Daphnia magna*, vetikas – *Pseudokirchneriella subcapitata* ja bakter – *Vibrio fischeri*) eelkõige kõrge pH ja arvatavasti ka kõrge soolsuse tõttu ning mullaga kokkupuutel vähenes toksilisus oluliselt. Leostusvee pH neutraliseerimisel olid CFBC tuha leostusveed toksilised ainult *Daphnia magna*le (kõrge soolsuse tõttu). Kahru ja Põllumaa [48] uurisid BEJ elektrifiltri tuha toksilisust (tuhamaterjal võetud 2002 aastal) ning jõudsid järeldusele, et tuhade leostusvee toksilisus on tingitud eelkõige kõrge aluselisusest. Kahru jt [48] analüüsisid BEJ tolm põletusploki filtrituhka ja tsüklonituhka ning jõudsid samale järeldusele. Samuti näitas Kahru jt [48], et nn MicroTox testis vähenes olenevalt tuhast peale leostusvee neutraliseerimist tema toksilisus bakterile *V. fischer* 63-160 korda.

Võrdluseks, Orupõld et al. [49], Kahru et al. [50] ja Raave et al. [51] on näidanud värske Kohtla-Järve ja Kiviõli poolkoksi akuutset toksilisust vesikeskkonnas või selle taimekasvu inhibeerivat mõju. Seevastu näitab viimane õlitööstuse (Petroter tehnoloogia) tuha analüüs [52], et värsked poolkoksi vesilahused ei ole alglahusena (pH>11) toksilised, kuid lahuse pH langemisel alla 9 muutuvad vesilahused akuutselt toksilisteks. Samas olid TSK tuha vesilahused alglahuse ja lahjendatud lahusega akuutselt toksilised testitud organismidest vesikirbule *Daphnia magna*.

Vastuolulised tuha ja poolkoksi ökotoksikoloogilised analüüsid näitavad, et **põlevkivituhkade potentsiaalset toksilisust ei mõjuta mitte ainult lahuse pH vaid ka kõrge lahustunud komponentide sisaldus (lahuste soolsus).**

³ https://jats.keskkonnainfo.ee/failid/2017_3_landfilled.pdf

4.6 Põlevkivituhkade kasutamine

Tolmpõletusel tekkinud tuhkasid kasutati Eestis aastakümneid edukalt erinevates valdkondades. Peamiseks põlevkivituhka kasutavaks valdkonnaks on olnud läbi aegade ehitusmaterjalide tootmine. Esimesed katsetused selles vallas tehti juba 1920-ndail, kui põlevkivituhka lisati ehitusmörtidesse või kasutati autoklaavsete põlevkivituhktelliste tootmiseks [53]. Tolmpõletusel saadud põlevkivi lendtuhk on olnud Eestis tsemenditööstuses üks tsemendi põhiosiseid. Lisaks tolmpõletusel saadud lendtuhale on uuritud ka CFB ning DeSOx tuhade kasutusvõimalusi CEM II tsemendi tootmiseks [54]. Antud uuringus täheldati DeSOx tuhade puhul, et valmistatud tsementmörtide tugevus jäi oluliselt alla nii tolmpõletuse kui CFB tuhkadega valmistatud tsemendi vastavast näitajast, mõnevõrra tõusis kloriidide ja CaCO₃ sisaldus ning suurenes veevajadus. Seega soovitati DeSOx tuhka tsemendile lisada alla 15%. Lisaks laboritasemel uuringutele on tehtud teedele pilootlõigud kasutades põlevkivituhka sideainena, et kihtstabiliseerida olemasolev alus (Narva-Mustjõe maantee km 14-16) ning mass-stabiliseerida pehmeid turbapinnaseid (Simuna-Vaiatu maantee 2,5-5 km) [55].

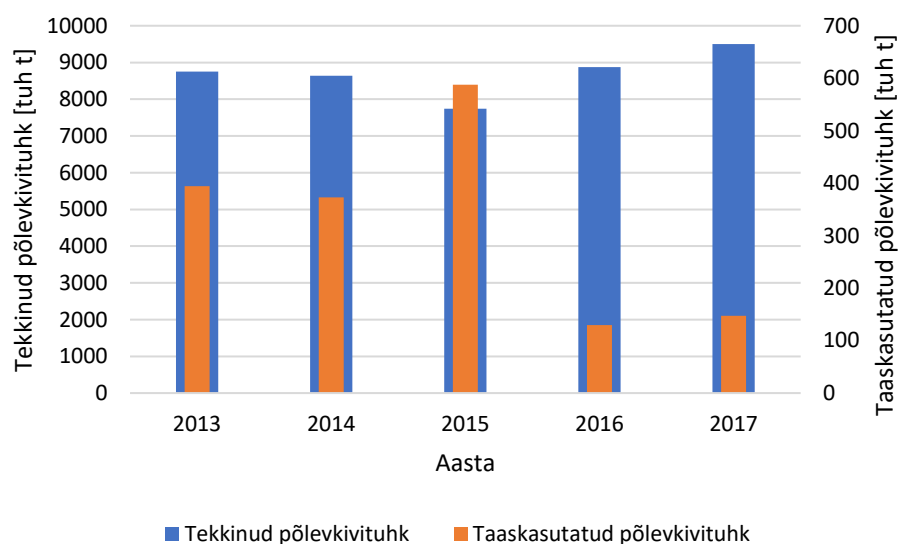
Lisaks tsemendis kasutamisele on leitud, et põlevkivituhk sobib kasutamiseks pinnase stabiliseerimisel teede ja sadamate ehitamisel. Aastakümneid kasutati põlevkivituhka ka põllumajanduses happeliste muldade neutraliseerimiseks ja põldude väetamiseks, kuna ta sisaldab mitmeid taimede kasvuks vajalikke ühendeid.

CFBC katelde tuhade kasutamine tsemenditööstuses on piiratud, kuna see tuhk sisaldab põlemisprotsessi eripärast tingituna rohkem väävlit, mis pikendab betooni tahkumise aega. CFB tuha eeliseks on parem jahvatatavus võrreldes tolmpõletustuhaga, end miinuseks on suurendatud veevajadus [54]. CFBC lendtuha ühe kasutamise võimalusena on välja töötatud standarditele vastav meetodika kasutamaks CFBC tuhkasid pinnase tugevdamiseks mass-stabiliseerimise tehnoloogiaga [56]. IPT Projektijuhtimise koostatud raportis on välja toodud, et EVS 925 ning EVS-EN 13282-2 standarditele ei vasta ainult kaks omadust – survetugevus ning tardumise algus. CFB katelde tuhkadest valmistatud tsemendid vastavad CEM II standardile ning on keskkonnaohutud [57].

Lisaks rakendustele ehitusvaldkonnas on leitud võimalusi põlevkivituhka kasutada ka keemiatööstuses. Nimelt on põlevkivituhka võrdlemisi suure lubja sisalduse tõttu võimalik kasutada seda sadestatud kaltsiumkarbonaadi (SKK) sünteesiks [58]. SKK-d saab omakorda kasutada värvi-, plastiku-, kummi- ja paberitööstuses. Antud rakenduse suureks eeliseks võib lugeda CO₂ emissioonide vähendamist – kui SKK tehas ehitataks põlevkivielektrijaama lähedusse, on võimalik suitsugaasi CO₂ otseselt kasutada SKK tootmisel. Lisaks neutraliseeritakse aluseline heitvesi.

Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016-2030 täitmise 2016. ja 2017. aasta aruande [31] järgi taaskasutatakse tekkinud põlevkivituhast praegusel ajal umbes 2% (ehk umbes 0,15 Mt, Joonis 32).

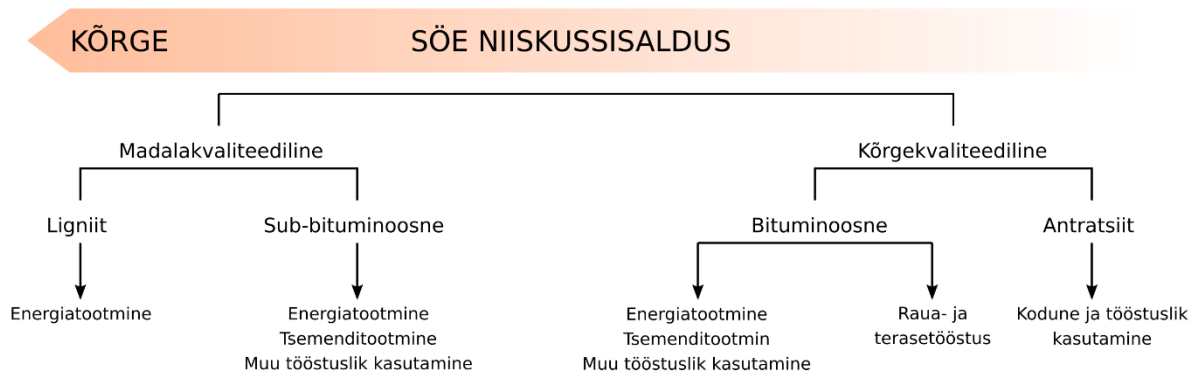
Tuha taaskasutus on ajan pigem langevas trendis, mida põhjustab väike kasutusvaldkondade arv ja seniste oluliste tarbijate toodangu (tsemendi ja väikeplokkide) madal nõudlus turul. Taaskasutuse suurendamisel on olnud takistuseks ka seadusandlik pool, kuna teedehituses kui potentsiaalses tarbimisvaldkonnas puudub põlevkivituha kasutamiseks vajalik standard. Põlevkivituha taaskasutuse märgatavaks suurendamiseks on uuritud võimalusi kasutada seda allmaakaevanduste tagasitäitmiseks, kuid praktilise rakenduseni jõutud ei ole.



Joonis 32. Aastatel 2013 kuni 2017 Eestis tekkinud ja taaskasutatud põlevkivituhkade kogused [31]

5 Süsi ja söetuhad

Selleks, et adekvaatselt hinnata Eesti põlevkivituha omadusi tema liigitamiseks, on otstarbekas juhinduda EL õigusruumi kuuluvates riikides tekkivate analoogsete jäätmete, söetuhkade, klassifikatsioonist, omadustest ja käitluspraktikast. Elektri- ja soojusjaamades söe põletamisel tekkivate söetuhkade koostis on varieeruv küllaltki suurtes piirides [59]. See varieeruvus on suuresti tingitud kasutatava söe tüübist (Joonis 33; ligniit, (sub-)bituminoosne süsi, antratsiit), aga sarnaselt põlevkivituhkadele ka põletustehnoloogiast. Sõltumata spetsiifilisest koostisest klassifitseeritakse söe põletamisel tekkivad tuhad ja selle protsessi teised kõrvalsaadused vastavalt EL jäätmenimistule kindlasti tavajäätmeteks (ANH) jäätmekoodidega 10 01 01 – koldetuhk, räbu ja katlatuhk; 10 01 02 – kivisöelendtuhk; 10 01 05 – protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmed. Sarnaselt EL-ga on söe põletamisel tekkivad tuhavood klassifitseeritud Ameerika Ühendriikide (USA) Keskkonnakaitseagentuuri poolt mitteohtlikeks .



Joonis 33. Söetüüpide iseloomustus ja peamised kasutusvaldkonnad [60]

5.1 Söe klassifikatsioon

Üldmõiste süsi tähendab heterogeenset settekivimit, mis sisaldab peamiselt taimset päritolu fossiilset orgaanilist süsinikku. Algse orgaanilise materjali moodustasid puud, väiksemad taimed, lehed, juured, oksad, õietolm jm. Rahvusvahelise standardi ISO 11760-2018 järgi on süsi defineeritud kui süsinikku sisaldav settekivim, mis on tekkinud peamiselt taimsetest jääkidest ja on seotud mineraalse osaga, mille uhteline sisaldus on väiksem või võrdne 50 % massi järgi kuivaines. Söed on tekkinud üle maailma ja nende keemilised ja füüsikalised omadused on tihti erinevatel põhjustel nii orgaanilise osa kui ka kaasneva mineraalosa poolest olulisel määral erinevad.

Süte liigitamise on pakutud erinevaid meetodeid, millest mõned on ka standartiseeritud. Erinevatel riikidel võib olla kasutusel ka oma klassifikatsioon [59]. Nii on näiteks Ameerika Ühendriikides kasutusel söe klassifikatsioon ASTM D388-12 standard (antud standard on kasutusel ka teistel riikides), mis lähtub süte liigitamisel mitte-lenduvast süsiniku, lenduva osa sisaldusest, kütteväärtusest ja söe paakumise võimekusest. Sõltuvalt loetletud parameetrite väärtustest eristatakse ASTM standardis nelja põhilist söetüüpi ja kokku 14 alamtüüpi (vt Tabel 3). ISO 11760-2018 standardis lähtutakse süte erinevatesse klassidesse liigitamisel vetriniidi peegeldustegurist, selle sisaldusest ja söe tuhasisaldusest.

Põlevkivi on samuti orgaanilist ainet sisaldav settekivim, kuid põhiline erinevus söega võrreldes seisneb orgaanilise osa lähteaine erinevuses. Põlevkivi kerogeen on moodustunud peamiselt ainuraksete organismide, bakterite, vetikate ning füto- ja zooplanktonite orgaanilisest massist [35]. Samas, kui võrrelda kahe kütuse üldist iseloomustust (vt Tabel 18), siis on selgelt näha, et põlevkivi on koostiselt analoogne madala klassi sütega (ligniitidega), mis antud töö seisukohalt on tähtis põlevkivi põletamisel tekkivate jäätmete liigitamisel.

Tabel 3. Süte erinevate klassidesse liigitamine vastavalt ASTM D388-12 standardile

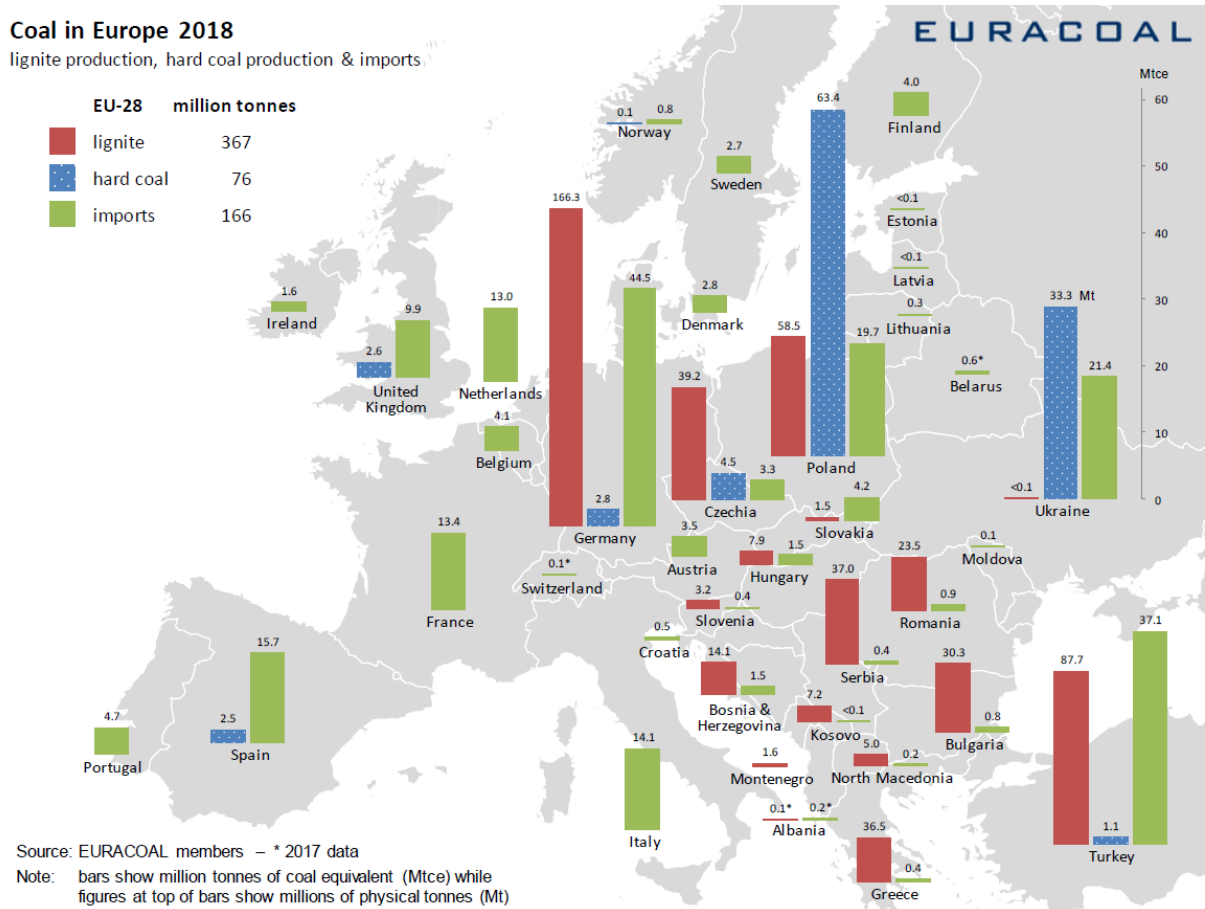
Söeklass		Mittelenduv süsinik % daf*	Lendosa % daf	Ülemine kütteväärtus MJ/kg	Paakumise võimekus
Antratsiit	Meta-antratsiit	≥98%	<2%		Mittepaakuv
	Antratsiit	92-98%	2-8%		
	Poolantratsiit	86-92%	8-14%		
Bituminoosne süsi	Madala lendosa sisaldusega	78-86%	14-22%		Üldiselt paakuv
	Keskmise lendosa sisaldusega	69-78%	22-31%		
	Kõrge lendosa sisaldusega A süsi	<69%	>31%	≥32,557	Paakuv
	Kõrge lendosa sisaldusega B süsi	<69%	>31%	30,232-32,557	
	Kõrge lendosa sisaldusega C süsi	<69%	>31%	26,743-30,232	
Kõrge lendosa sisaldusega C süsi		>31%	24,418-26,743		
Sub-bituminoosne süsi	Sub-bituminoosne süsi A			24,418-26,744	Mittepaakuv
	Sub-bituminoosne süsi B			22,09-24,418	
	Sub-bituminoosne süsi C			19,30-22,09	
Ligniit	Ligniit A			14,65-19,30	
	Ligniit B			<14,65	

*daf – tuhavaba kuivaine

5.2 Söe kasutamine

Süsi on üks olulisemaid fossiilseid kütuseid maailmas. Kuigi EL-i riigid on astunud olulisi samme söe energeetilisest kasutamisest täielikult loobumiseks, siis paljudes riikides väljaspool EL-i aga ka EL-i sees, nähakse söel ka tulevikus olulist rolli turvalise, stabiilse ja odava energia tagamisel. **2016. aastal kasutati elektri ja soojuse tootmiseks maailmas 4920,45 Mt sütt (antratsiit, bituminoosne ja sub-bituminoosne süsi, ligniit). Võrdluseks, 1990. aastal oli vastav kogus 2693,04 Mt. Euroopas (OECD**

riigid) on vastavad numbrid 537,19 Mt ja 766,12 Mt. Sõe tootmist Euroopas iseloomustab ilmekalt Joonis 34, kus on näha ka erinevate söeliikide osakaal.



Joonis 34. Sõe (kivisüsi ja ligniit) tootmine Euroopas ja Euroopasse imporditavad kogused⁴

Globaalselt moodustab umbes 90 % kasutatavast sõest kivisüsi ja 10 % ligniit/pruunsüsi. Suur osa sõest kasutatakse energia tootmise eesmärgil (OECD riikides umbes 82 %), kusjuures suurem osakaal on tolm põletusel. Suurim sõe kasutaja maailmas on Hiina, kellele järgneb USA-st möödunud India [61]. Vastavalt Eurostati andmetele, kasutati 2017 aastal EL-is (EL 28) 236 Mt kivisütt, ligniiti kasutati samas 384 Mt, kusjuures suurim ligniidi kasutaja Euroopas on Saksamaa. Tarbitud kivisõe ja ligniidi kogustest kasutati elektri ja soojuse (koos)tootmiseks vastavalt 127 Mt ja 318 Mt⁵.

Ameerika Ühendriikides toodetakse ligikaudu 30% elektrienergiast söeelektrijaamades, kusjuures enamasti on kasutusel tolm põletustehnoloogia. Kasutatava sõe keemiline koostis varieerub väga

⁴ <https://euracoal.eu/info/euracoal-eu-statistics/>

⁵ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Coal_production_and_consumption_statistics#Consumption_and_production_of_hard_coal

laiades piirides. Esitatud erinevatest Ameerika Ühendriikide maardlatest pärit süte (mis moodustvad umbes 70-80% kogu Ameerika Ühendriikides söe kaevandamise mahust) põletamisel 2012-2013 aastal tekkinud tuhkade põhiandmed on esitatud Tabel 4 [62].

Tabel 4. Ameerika Ühendriikide olulisemate söemaardlate süte põletamisel tekkivate tuhkade keemiline koostis

Plant location	Sample type	Coal source	Natural pH ^a	SiO ₂ % ^b	Al ₂ O ₃ % ^b	Fe ₂ O ₃ % ^b	CaO% ^b	SO ₃ % ^b	C% ^b	As (µg/g) ^c	Se (µg/g) ^c
Kentucky Plant #1	Fly ash (ESP)	Illinois Basin	9.23	45.71	21.17	26.38	1.87	0.34	4.46	123	6
Tennessee Plant #1	Fly ash (ESP)	Appalachian Basin	10.28	56.46	28.77	6.67	1.40	0.02	11.1	44	19
Kentucky Plant #2	Fly ash	Appalachian Basin (Southeastern Kentucky)	8.70	51.84	29.61	10.85	1.24	<0.01	8.33	111	8.7
Missouri Plant #1	Fly ash	Powder River Basin	11.96	29.49	16.56	4.80	31.1	3.93	2.85	8.6	6.0
Kentucky Plant #3	Fly ash (Baghouse)	Wyoming Powder River Basin/western bituminous	11.51	44.94	25.29	5.51	14.1	1.49	4.82	9.26	5.21
New Mexico Plant #1	Fly ash	Powder River Basin	12.24	62.30	23.14	5.64	4.57	0.19	2.71	22.8	5.5
Kentucky Plant #4	Fly ash	Illinois Basin	10.85	49.54	21.78	17.32	5.22	3.10	<0.10	135	17
Kentucky Plant #1	Fly ash+lime	Illinois Basin	12.66	37.45	16.54	23.40	13.01	4.97	6.48	70	44
Kentucky Plant #2	FGD (Dry)	Appalachian Basin (Southeastern Kentucky)	11.93	28.76	15.11	6.74	25.23	22.56	4.93	74	12.9
Kentucky Plant #5	FGD (Wet)	Illinois Basin (Western Kentucky)	8.71	4.34	1.70	0.98	39.21	51.76	0.06	2.5	3.1

^aNatural pH was determined by leaching the ash material at a 1:15 solid:liquid ratio in Milli-Q water for 24h.

^bTotal element content as measured by X-Ray Fluorescence and reported as oxides.

^cMeasured by nitric acid digestion followed by ICP-MS.

ESP, electrostatic precipitator; FGD, flue gas desulfurization; ICP-MS, inductively coupled plasma-mass spectrometry.

Söe põletamisel tekib valdavalt söe mineraalsest osast tuhk. Sõltuvalt söe koostisest tekib 4 kuni 8 tonni söe põletamisel 1 tonn tuhka⁶. Nii nagu eespool nimetatud, liigitatakse söe põletamisel tekkivad tuhad ja teised kõrvalsaadused EL jäätmenimistus tavajäätmeteks.

Samad jäätmed on REACH-regulatsiooni raames klassifitseeritavad kui söe põletamisel tekkivad tooted (CCPs – Coal Combustion Products). Sellise klassifitseerimise erinevus tähendab, et ühe tööstusharu kõrvalsaadust (tavajäädet) kasutatakse teises tööstusharus toormena, mis on kooskõlas tänapäevase tööstusökoloogia kontseptsiooniga [63].

5.3 Söetuhkade kasutamine

REACH-regulatsiooni raames on söe põletamisel tekkivate toodete tootjad ja importijad registreerinud erinevad tooted, mis on välja toodud Tabel 5.

Söe põletamisel tekkiva söe tuha koguse ja tekkivate toodete (CCP – Coal Combustion Products) kasutamise kohta Euroopas kogub infot ja koostab statistilist ülevaadet Euroopa Söepõletuse Toodete Assotsiatsioon (ECOBA – European Coal Combustion Products Association; www.ecoba.com). Vastav infot Suurbritannia kohta on leitav UK Quality Ash Association kaudu (<http://www.ukqaa.org.uk>) ning USA kohta American Coal Ash Association kaudu (<https://www.acaa-usa.org/>). Tuhkade tekkimise ja toodete kasutamise osas täpne statistika kõikide EL-i liikmesriikide (EL 28) osas puudub, seetõttu hinnatakse nimetatud suuruseid kaudselt põletatud kivisöe koguste abil. Selle järgi toodeti 2016 aastal

⁶ <https://cen.acs.org/articles/94/i7/New-Life-Coal-Ash.html>

EL-is (EL 28) üle 105 miljoni tonni CCP-id (EL 15 vastavalt 40,33 miljonit tonni), millest tuhad (suuremas osas lendtuhk) moodustasid üle 88 miljoni tonni ja väävlitustamise tooted üle 21 miljoni tonni. CCP-de hinnanguline jaotus (EL 15 andmete alusel) on esitatud Tabel 5. Tekkinud lendtuhast kasutatakse pisut üle 40% ja koldetuhast umbes 45%⁷. Nende tuhade kasutusvaldkond on küllaltki lai. Peamine kasutusvaldkond on ehitus (tsemendi asendaja, teedehitus). Samuti kasutatakse söetuhka väetisena ja kaevanduste tagasitaitmiseks. Siinjuures on oluline rõhutada, et defineeritud toodete alla mahuvad nii kivsöe kui ka ligniidi põletamisel tekkinud tuhavood.

Tabel 5. REACH-regulatsiooni raames registreeritud söe põletamisel tekkivad tooted [64]

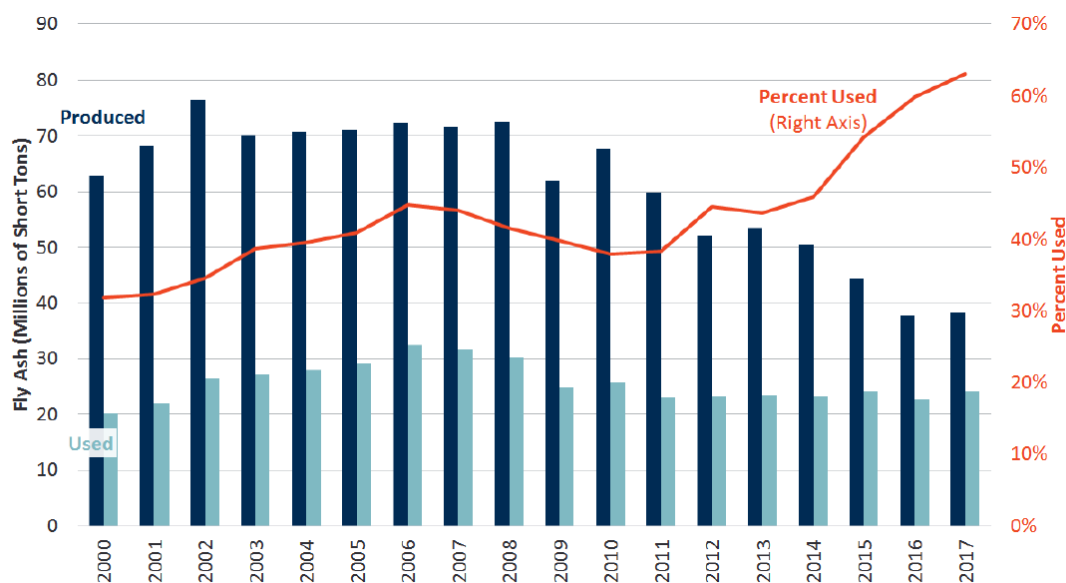
Toode	Osakaal CCP-s [%]	Hinnanguline kogus [Mt]	EÜ nimi	EÜ number	CAS number	Konsortsium
Kips*	23,6	24,8	Kaltsium-sulfaat	231-900-3	7778-18-9	Calcium Sulfate Consortium
SDA-toode**	1,0	1,1	SDA toode	302-652-4	94114-19-9	By-Products Consortium
Räbu	1,2	1,3	Räbu, süsi	270-708-4	68476-96-0	Ash-REACH-Consortium
LT, KT, VT, keevkihttuhk jt	71,7	75,3	Tuhk (jäägid)	268-627-4	68131-74-8	By-Product Consortium ASVEP Consortium
Tuhagraanulid	2,5	2,6	Tuha (jäägi) õönsad graanulid	300-212-6	93924-19-7	Cenospheres Interest Group

*Väävliärastusseadmed; **Märg-väävliärastus

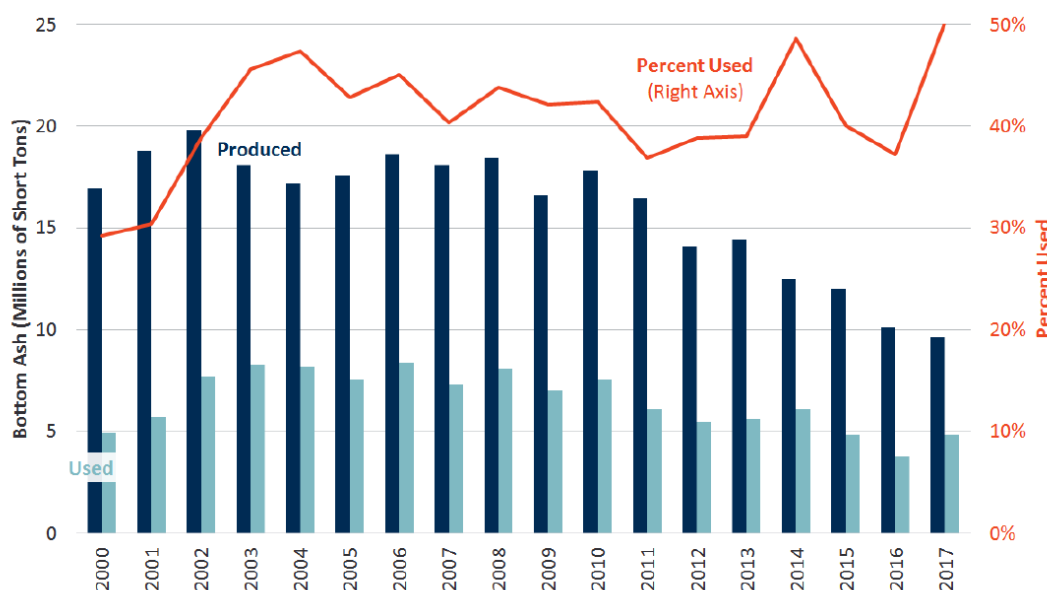
Võrdluseks on Joonis 35 esitatud tekkinud lendtuha kogused ja selle kasutamise osakaal aastatel 2000–2017 Ameerika Ühendriikides [65]. Nagu näha, on lendtuha aastased kogused viimase kümme aasta jooksul kahanenud umbes 63 Mt aastal 2009 35 Mt aastal 2017. Samal joonisel on näha, et lendtuha taaskasutamine perioodil 2009 kuni 2013 võrreldes varasemaga pisut vähenes, mis oli põhjustatud regulatsiooni määratlematusest ja samuti võimalikkusest, et söetuhk klassifitseeritakse ohtlikuks jäätmeks. Selle tõttu piirasid tuha tarbijad tuha kasutamist. 2014. aastal otsustas Ameerika Ühendriikide Keskkonnakaitseagentuur (U.S. Environmental Protection Agency ehk lühidalt EPA), et söetuhk liigitatakse mitteohtlike jäätmete sektiooni alla (Subtitle D) ressurside kasutamist reguleerivates õiguaktides (Resource Conservation and Recovery Act). **See periood tõestas ka seda, et tuha ümberliigitamine ohtlikuks jäätmeks võib tõsiselt mõjutada tuha taaskasutamist.** Aastal 2017 ületas lendtuha taaskasutamine Ameerika Ühendriikides 60 % piiri ja näitab jätkuvat tõusvat

⁷ <http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>

trendi. Joonis 36 on näidatud põhjatuha tekke kogused ja kasutamise osakaal, mis on lendutuha taaskasutusega võrreldes küll natuken väiksem, kuid ületab siiski 50% piiri.



Joonis 35. Lendtuha teke ja selle kasutamine Ameerika Ühendriikides [65]



Joonis 36. Koldetuha teke ja selle kasutamine Ameerika Ühendriikides [65]

CCP-de kasutamise üks alustalasid on nn sekundaarsete toorainete kasutamise soodustamine valitsuste poolt läbi seadusloome ja reeglite. Sõe põletamisel tekkivate materjalide kasutamise peamiseks põhjuseks on saavutatav majanduslik efekt. Samas võimaldavad enamuse rakendustest lisaks otsele majanduslikule tulule säästa ka keskkonda, energiat ja loodusressursse. CCP-sid kasutatakse laialdaselt ehituses, kus leiab ECOBA andmetel rakendust umbes 43% lendtuhast ja 46% koldetuhast. Olulisemad kasutusvaldkonnad on: tsemendi tooraine (5% CCP-de kogusest); tsementide

segud, kus klinker on asendatud CCP-ga (4,7%); betoonilisand (11,2%); kipsplaadid (10 %); maaparandus, kaevandatud alade taastamine (41,5%). Täielik nimekiri erinevates kasutusvaldkondadest on toodud ECOBA lehel⁸.

Tuha taaskasutamise valdkonnad Ameerika Ühendriikides on suhteliselt erinevad. Statistika erinevate söe põletamisel tekkinud tuhade kasutatamise kohta on toodud Tabel 6.

CCP-de kasutamine sõltub nende keemilisest ja mineraloogilisest koostisest ning füüsikalistest omadustest. Nimetatud omadused sõltuvad kütusest ning katla parameetrites. Toote kasutamise eelduseks on tema püsivad omadused. Sellest tulenevalt leiavad laiemat kasutust kivisöe tuhad, samas kui ligniidi koostis on tunduvalt enam varieeruv, mistõttu on sellele tuhale rakenduste leidmine keerukam. Selle tõttu on ligniidi põlemisel tekkiva tuha peamine kasutusvaldkond kaevanduste tagasitäitmine.

⁸ http://www.ecoba.com/evjm,media/ccps/ECO_stat_2016_EU15_tab.pdf

Tabel 6. Söe põletamisel tekkinud tuhkade taaskasutamine (tuha liikide kaupa) [short tonnes, 1 short tonne = 0,91 tonni] Ameerika Ühendriikides aastal 2017 [65]

	Söe põletamisel saadud tuhad	Lendtuhk	Koldetuhk	Kolde- šlakk	FGD kips	FGD märja skraberite materjal	FGD kuiv skraberite materjal	FGD muu	Keevkiht- põletuse tuhk	CCP-de teke / kasutamine kokku
	Summarne erinevate tuha liigi tekke	38 189 790	9 655 931	2 574 673	32 707 136	11 311 344	2 454 818	6 293	14 469 553	111 369 538
	Summarne erinevate tuha liigi kasutamine	24 095 590	4 839 420	1 570 375	22 839 385	3 905 009	382 048	2 407	14 134 477	71 768 711
1	Betoon / betooni produktid / mört	14 035 791	785 527	0	67 009	0	0	0	0	14 888 327
2	Segatud tsement / klinkri lähtematerjal	4 579 724	1 622 612	132 183	2 317 445	0	51	0	0	8 652 015
3	Voolav täidis	86 379	0	0	0	0	0	0	0	86 379
4	Struktuursed täides / muldkehad	465 653	871 875	0	0	0	0	0	0	1 337 528
5	Tee alus/Aluskihid	674 156	159 084	0	2 460	0	11 931	0	0	847 631
6	Mulla modifitseerimine / stabiliseerimine	360 796	48 876	0	0	0	0	0	0	409 672
7	Mineraalne täidis asfaldis (filler)	59 317	0	0	0	0	7 019	0	0	66 336
8	Lumi ja jää haldus	69 192	276 989	4 220	0	0	0	0	0	350 401
9	Liivapritts / katusekivid	0	17 705	1 421 685	44 981	0	0	0	0	1 484 371
10	Kaevanduses rakendamine (tagasitäitmine)	901 181	232 110	0	927 949	3 905 009	202 092	0	14 037 913	20 206 254
11	Kipsplaadid	0	0	0	15 859 606	0	0	0	0	15 859 606
12	Jäätmete stabiliseerimine / tahkumine	1 065 993	48 964	0	3 026	0	114 646	0	96 564	1 329 193
13	Põllumajandus	0	0	0	1 157 877	0	35 121	0	0	1 192 998

14	Agregeerimine	0	10 237	21 287	0	0	0	0	0	31 524
15	Õli / gaasi maardla teenindus	78 716	0	0	0	0	11 188	0	0	89 904
16	Settetiigi sulgemisega seotud tegevused	1 468 203	730 600	0	2 270 326	0	0	0	0	4 469 129
17	Segalaadiline/Muu	220 489	34 840	0	188 705	0	0	2 407	0	446 441
Kasutamise osakaal, %		63,09%	50,12%	60,99%	69,83%	34,52%	15,56%	38,25%	97,68%	64,44%
Söe põletamisel saadud tuhad		Lendtuhk	Koldetuhk	Kolde- šlakk	FGD kips	FGD märja skraberite materjal	FGD kuiv skraberite materjal	FGD muu	Keevkiht- põletuse tuhk	CCP-de teke / kasutamine kokku

5.4 Söetuhkade füüsikalise-keemilised omadused

REACH-regulatsiooni rakendamise protsessi raames on tolmpõletus- ja keevkihtpõletusprotsessidest pärinevate söetuhkadele koostatud identifitseerimisandmete profiilid (nn SIP), kus on määratletud muuhulgas tuhkade keemilise ja mineraalse koostise piirid. Erinevad söe põletamisel tekkivad tuhad on registreeritud EÜ ja CAS numbritega.

- Keevkihtpõletus: EÜ number 931-257-5, CAS number 68131-74-8;
- Tolmpõletus: EÜ number 931-322-8, CAS number 68131-74-8;
- Tuhad üldiselt (mittespetsiifiline): EÜ number 268-627-4, CAS number 68131-74-8.

Söe põletamisel tekkivad tuhad liigituvad UVCB (Unknown or Variable composition, Complex reaction products or Biological materials) ainete alla. Sealjuures hõlmab REACH raames koostatud identifitseerimisandmete profiil ka koospõletusel (primaarne kütus: kivisüsi või ligniit; sekundaarne kütus: tahked biokütused, sh loomakasvatuse jäägid, reoveepuhasti muda, paberitööstuse jäägid, koks, vedelad ja gaasilised kütused) tekkivaid tuhkasid⁹. Sekundaarse kütuse kasutamine koospõletamisel on limiteeritud – põletamisel peavad tekkivad heitmed olema analoogsed puhta söe põletamisel tekkivate heitmetega, samuti tuleb kontrollida tekkivaid tuhkasid ökotoksikoloogilisest aspektist, kuna tuha kui UVCB aine koostis võib oluliselt varieeruda sõltuvalt põletusseadme opereerimistingimustest.

Põletamiseks kasutatav süsi tüüpiliselt peenendatakse. Kütuse osakeste suurus sõltub kasutatavast tehnoloogiast. Söe põletamisel keevkihtkatlas võidakse sinna lisada väävli püüdmiseks ka lisaaineid (nt lupja; nn kuivärastus). Väävli püüdmine toimub sellisel juhul katlas. Keevkihtpõletusprotsess toimub temperatuuridel 800 kuni 950 °C ning moodustub kaks tuhavoogu: koldetuhk ja lendtuhk, mille koostis varieerub sõltuvalt kasutatavast kivisöest ja sekundaarsetest kütustest (Tabel 7¹⁰).

Tolmpõletuse korral varieeruvad temperatuurid söekatlas vahemikus 1100 kuni 1700 °C. Katlas paakunud ja kokku sulanud tuhaosakesed eemaldatakse nn koldetuhana või -rübuna (EÜ number 270-708-4, CAS number 68476-96-0). Katlast kandub välja lendtuhk või ka põlemisprotsessi käigus moodustunud õõnsad klaasistunud graanulid (ingl k *cenospheres*; EÜ number 300-212-6, CAS number 93924-19-7). Tolmpõletuse käigus tekkinud tuhavoogude keemilise koostise piirid on esitatud Tabel 7¹¹. Tolmpõletusprotsessis kivisöe põletamisel tekkiva SO₂ eemaldamiseks suitsugaasidest

⁹ <https://echa.europa.eu/et/brief-profile/-/briefprofile/100.155.484>

¹⁰ http://www.ecoba.com/evjm,media/REACH/SIP_FBC_ash_eng_11.2010.pdf

¹¹ [http://www.ecoba.com/evjm,media/REACH/SIP_ashes_\(residues\)_coal_09.2010.pdf](http://www.ecoba.com/evjm,media/REACH/SIP_ashes_(residues)_coal_09.2010.pdf)

kasutatakse kas märga, poolkuiva või kuiva ärastusmeetodit, mille tulemusena saadakse tahke aine (poolkuivas ärastuses tekkiva produkti EÜ number 931-259-6¹²; märgärastuses tekkiva produkti EÜ number 302-652-4 ja CAS number 94114-19-9).

Märgärastuse (SDA – *Spray Dryer Absorber*) käigus pihustatakse suitsugaasidele aluselise sorbendi (tavaliselt Ca(OH)₂) vesilahust. Selle tulemusena tekib peamise reaktsiooniproduktina CaSO₃, mille edasisel õhuhapnikuga oksüdeerimisel saadakse kips (CaSO₄·2H₂O). Kuivärastuses pihustatakse sõltuvalt tehnoloogiast aluseline sorbent (CaO, Ca(OH)₂ või ka dolomiit) kas katlasse leegi kohale, ökonomaiserisse või suitsugaaside kanalisse pärast õhueelsoojendit. Poolkuiv ärastus võib olla üheastmeline või kaheastmeline. Üheastmeline ärastus on analoogne märgärastusega, kuid kasutatavas vesilahuses on vee sisaldus madalam ja sorbendi (tavaliselt Ca(OH)₂) sisaldus vastavalt kõrgem, et tagada vee aurustumine. Selle tulemusena saadakse kuiv reaktsiooniprodukt. Kaheastmeline ärastus hõlmab endas esmalt kuivärastuse rakendamist, millele järgneb vee pihustamine katlast väljuvatesse suitsugaasidesse [66]. Poolkuiva ärastuse tulemusena saadav reaktsiooniprodukt sisaldab lisaks reaktsioonisaadustele ka reageerimata sorbenti (Ca(OH)₂; koostise piirid esitatud Tabel 8).

Tabel 7. Bituminoosse söe ja/või antratsiidi (koos)põletamisel keevkihtkatlas tekkivate tuhade keemilise koostise piirid (mass%)

Ühend	Keevkihtpõletus		Tolmpõletus	
	Minimaalne sisaldus	Maksimaalne sisaldus	Minimaalne sisaldus	Maksimaalne sisaldus
CaO (summaarne)	0,5	48	0,1	45
CaO (vaba)	N/A	N/A	0,01	9
SO ₃	1	30	0,01	15
CaCO ₃	0	10	N/A	N/A
SiO ₂	10	76	20	76
Al ₂ O ₃	3	38	5	40
Fe ₂ O ₃	0,2	27	0,01	27
TiO ₂	0,2	8	0,01	8
MgO	0	25	0,01	15
Na ₂ O	0,01	4	0,01	8
K ₂ O	0,2	8	0,01	8
P ₂ O ₅	0,1	10,5	0,01	10

¹² <https://echa.europa.eu/et/registration-dossier/-/registered-dossier/15224>

Tabel 8. Poolkuiva meetodiga suitsugaaside väävläarastuses tekkiva produkti keemilise koostise piirid (mass%)

Ühend	Minimaalne sisaldus	Maksimaalne sisaldus
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0	50
Ca(OH) ₂	1	50
CaSO ₄ ·2H ₂ O	0	79
CaCO ₃	1	35
CaSO ₃ ·12H ₂ O	0	70
CaF ₂	0	5

Söetuha keemiline koostis on äärmiselt heterogeenne ning sõltub söe päritolust, põletamise parameetritest ning kasutatavast suitsugaaside puhastuse tehnoloogiast. Tabel 7 esitab kahe erineva põletustehnoloogiaga saadud tuhade keemilise koostise varieeruvuse. Lisaks, sõltuvalt söe koostisest eristatakse kahte tuhade klassi: klass F ja klass C.

Klass F tuhade koostises domineerivad Si ja Al ühendid, mis moodustavad koos rauaga oksiidses vormis >60-70% kogu tuhamassist.

Klass C tuhades on kõrgem Ca sisaldus. Selle tõttu nimetatakse neid mõnikord ka kõrge kaltsiumisisaldusega (lend)tuhadeks (ingl k. *high-calcium fly ashes* ehk HCFA) Reeglina on vaba CaO sisaldus klass C tuhades >20%. Bituminoosse söe ja antratsiidi põletamisel tekkivad jäätmed võivad liigituda nii klass F kui ka klass C tuhad. Klass C tuhad tekivad tavaliselt ligniidi ja subbituminoosse söe põletamisel, aga võivad tekkida ka antratsiidi ja bituminoosse söe põletamisel. **Eesti põlevkivituhad on keemiliselt ja mineraalselt koostiselt üheselt võrreldavad klass C tuhadega.** Põlevkivituhade ja söetuhade täpsem võrdlus on esitatud punktis 6.2 (Tuhade koostise võrdlus).

Sarnaselt põlevkivi põletamisega, moodustab lendtuhk suurema osa söepõletusel tekkivatest tuhavoogudest (60-80%). Peamised (lend)tuhas leiduvad ühendid on seotud räni, alumiiniumi, raua ja kaltsiumiga (Tabel 9 ja Tabel 10). Lisaks on lisandina väävli-, kaaliumi-, naatriumi- ja magneesiumiühendeid.

Tabel 9. Söe lendtuha keemilise koostise varieeruvus sõltuvalt kasutatud söe liigist [mass %]

Ühend	Bituminoosne süsi	Subbituminoosne süsi	Ligniit
SiO ₂	20-60	40-60	15-80
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-20
CaO	1-12	5-30	15-50
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-15
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

Tabel 10. Söe koldetuha keskmine keemiline koostis sõltuvalt söe liigitusest [mass %]

Ühend	Bituminoosne süsi*	Subbituminoosne süsi*
SiO ₂	61,0	46,7
Al ₂ O ₃	25,4	18,8
Fe ₂ O ₃	6,6	5,9
CaO	1,5	17,8
MgO	1,0	4,0
Na ₂ O	0,9	1,3
K ₂ O	0,2	0,3

*Toodud väärtused võivad varieeruda 2 kuni 5%

Euroopa Kemikaaliagentuuri (ECHA) andmebaasis on registreeritud kivisöe tolmpõletusel tekkiva tuha (EÜ number 931-322-8) aktiivseid „tootjaid“ 222¹³. Tekkiva tuha koostise varieeruvust näitlikustavad viie elektriijaama söetuha andmed (Tabel 11 kuni Tabel 14). Lisaks on toodud võrdluseks ühe ligniidi põletamisel tekkinud tuha koostis (Ptolemas, Kreeka; Tabel 11) kohta.

- GAS NATURAL FENOSA GENERACIÓN S.L.U., Avda. San Luis nº 77 28033 Madrid, Hispaania – elektriijaamad; tolmpõletus: **Narcea** – allikas [67]
- ENDESA GENERACIÓN S.A., Avenida de la Borbolla, 5 41004 Sevilla, Hispaania – elektriijaamad; tolmpõletus: **Teruel-Andorra** – allikas [67]
- Iberdrola Generación S.A.U., Tomás Redondo, 1 28033 Madrid, Hispaania – elektriijaam; tolmpõletus: **Soto Ribera** – allikas [67]
- NV EPZ, Zeedijk 32 4454 PM Borssele, Holland – elektriijaam: **Acid** – allikas [67]
- Enel Produzione SpA, Viale Regina Margherita 125 00198 Rooma, Itaalia – elektriijaam: **Fusina** – allikas [67]
- Public Power Corporation S.A., 11-15 Aristotelous Str. 30 Halkokondili Str 10432 Atheena, Kreeka – elektriijaam; tolmpõletus: **Ptelomais** – allikas [68]

Toodud lendtuhkade koostis, mikroelementide sisaldus, mineraalne koostis ning leostumistesti tulemused on toodud järgnevas tabelites (Tabel 11 kuni Tabel 14). Tabelites on toodud ka iga elemendi või komponendi sisalduse vahemik erinevates tuhkaades. Esitatud vahemikud iseloomustavad selgelt eri päritolu söetuhkade koostise varieeruvust. Lisaks on võimalik leida täiendavalt osalist infot söetuhkade (sealhulgas ligniidi põletamisel tekkinud tuhkaade) kohta nt Poolas (allikas [69]; tootjad Tauron Wytwarzanie SA; PGE Polska Grupa Energetyczna S.A. tütarettevõtted PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. ja PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A.; Zespół Elektrowni Pątnów - Adamów - Konin S.A.; Enea Elektrownia Połaniec S.A.) või mujal Euroopas (Bulgaaria, Hispaania, Itaalia, Kreeka, Türgi; allikas [70]).

¹³ <https://echa.europa.eu/et/brief-profile/-/briefprofile/100.151.318>

Tabel 11. Lendtuhkade koostis (väljendatuna oksiidides), niiskussialdus ning LOI (põletuskadu) (mass %)

Allikas	Süsi	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	SO ₃	N	C	Niiskuss	LOI	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Narcea	Antratsiit/bitumiinosne	55,2	23,3	6,9	4	2,5	0,7	3,8	0,3	0,9	0,1	0,4	0,03	1,4	0,03	1,9	2,4
Teruel	Sub-bitumiinosne	48,3	23,9	16	5,4	1	0,2	1,4	0,2	0,8	0,03	0,8	0,02	0,6	0,1	2	2
Soto de Ribera	Bitumiinosne	48,9	30,6	7,2	3	1,6	0,6	3,9	0,1	0,8	0,03	0,3	0,03	1,2	0,2	3	1,6
Acid	Bitumiinosne	51,3	28,9	8,4	1,8	1	0,5	2,5	0,2	1,5	0,03	0,5	0,05	2,7	0,1	3,3	1,8
Fusina	Bitumiinosne	48,2	25,9	8,8	2,3	1,5	0,5	2,6	0,3	1,3	0,1	0,6	0,14	7,6	0,1	7,9	1,9
Ptelomais	Ligniit	39,5	16,3	6,67	22,77	-	-	-	-	-	-	4,3					
Vahemik		39,5 - 55,2	16,3 - 30,6	6,67 - 16	1,8 - 22,77	1 - 2,5	0,2 - 0,7	1,4 - 3,9	0,1 - 0,3	0,8 - 1,5	0,03 - 0,1	0,3 - 4,3	0,02 - 0,14	0,6 - 7,6	0,03 - 0,2	1,9 - 7,9	1,6 - 2,4

Tabel 12. Jälgelementide sisaldus lendtuhkades (mg/kg)

Allikas	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Ge	Hg	Li	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sn	Sr	Th	U	V	Zn
Narcea	98	98	1047	5	2	30	177	86	1	0,3	220	6	82	90	185	7	6	4	235	24	9	173	171
Teruel	79	342	311	12	1	25	107	52	6	<0,01	256	15	85	65	90	4	3	8	523	21	20	206	174
Soto Ribera	80	206	658	6	1	30	139	66	3	0,2	225	7	93	114	199	6	7	7	267	29	8	289	176
Acid	109	68	1757	34	1	72	171	254	25	0,1	268	14	136	102	127	9	0	10	1920	37	17	323	143
Fusina	52	152	1302	12	1	47	172	117	14	0,2	139	13	117	93	149	7	15	8	757	31	13	266	160
Vahemik	52 - 109	68 - 342	311 - 1757	5 - 34	1 - 2	25 - 72	107 - 177	52 - 254	1 - 25	<0,01 - 0,3	139 - 268	6 - 15	82 - 136	65 - 114	90 - 199	4 - 9	0 - 15	4 - 10	235 - 1920	21 - 37	8 - 20	173 - 323	143 - 176

Tabel 13. Lendtuha proovide mineraalne koostis (mass %)

Allikas	Amorfne faas	Mulliit	Kvarts	Opaliin SiO ₂	Anhüüdiit	Kaltsiit	Lubi	Hematiit	Magnetiit	Päevakivi	Ettringiit
Narcea	86	3,8	6,6	<0,3	0,2	<0,3	0,7	<0,3	1,5	0,2	<1,0
Teruel	63	19,4	8,6	<0,3	1,5	<0,3	<1,0	5,9	1,3	<1,0	<1,0
Soto Ribera	74	18,4	5	<0,3	<0,3	<0,3	<1,0	<0,3	1	<1,0	<1,0
Acid	83	9,1	6	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,8	0,6	<1,0
Fusina	72	17,4	6,4	<0,3	<0,3	<0,3	1,1	<0,3	0,1	<0,3	<1,0
Vahemik	63 - 86	3,8 - 19,4	5 - 8,6	<0,3	0,2 – 1,5	<0,3	<0,3 – 1,1	<0,3 - 5,9	0,1 – 1,5	<0,3 – 0,6	<1,0

Tabel 14. Tuhkade leostustestide tulemusena saadud leostusvee parameetrid

	Narcea	Teruel	Soto	Acid	Fusina	Vahemik
pH	11,06	11,43	11,34	8,65	12,45	8,65 - 12,45
$\mu\text{S cm}^{-1}$	1460	2200	1410	650	4800	650 - 4800
$\mu\text{g g}^{-1}$ (ppm)						
Al	38,3	5,2	35,9	26,3	1,8	1,8 - 38,3
Ca	1648,5	3127,9	1660,4	927,6	5680,9	927,6 - 5680,9
Fe	3,1	0,1	3,3	0,3	0,3	0,1 - 3,3
Mg	0,2	0,1	<0,1	90,1	0,7	0,1 - 90,1
Mn	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0 - 0
Mo	3,2	6,7	3,4	3,8	4,6	3,2 - 6,7
Na	127	39,3	92,7	167,8	70,6	39,3 - 167,8
P	1	2,6	1,5	0,9	0,6	0,6 - 2,6
S	880,6	1194,3	821,5	1059,9	583	583 - 1194,3
Si	49	52,7	92,5	23,7	37,9	23,7 - 92,5
ng g^{-1} (ppb)						
As	260	212	304	958	11	11 - 958
B	3796	80860	16789	25345	10083	3796 - 80860
Ba	2992	2094	1747	280	18435	280 - 18435
Be	1	5	2	2	1	1 - 5
Cd	3	13	5	10	5	3 - 13
Co	7	15	8	6	28	6 - 28
Cr	9221	2825	3412	1055	2524	1055 - 9221
Cs	32	6	13	7	12	6 - 32

ng g^{-1} (ppb)	Narcea	Teruel	Soto	Acid	Fusina	Vahemik
Cu	37	44	36	38	42	36 - 44
Ga	292	303	491	296	10	10 - 491
Ge	1	1	4	70	<1	1 - 70
Hf	10	10	9	10	9	9 - 10
Li	11189	18201	9338	17499	12663	9338 - 18201
Mo	2981	6441	3201	3594	4419	2981 - 6441
Nb	12	8	5	4	3	3 - 12
Ni	61	142	76	45	246	45 - 246
Pb	11	6	10	5	9	5 - 11
Rb	378	149	342	177	70	70 - 378
Sb	195	10	50	618	5	5 - 618
Sc	31	50	59	12	31	12 - 59
Se	208	171	534	976	242	171 - 976
Sn	9	8	7	5	5	5 - 9
Sr	7699	36714	8292	7746	169019	7699 - 169019
Th	11	11	9	9	8	8 - 11
Ti	180	243	215	206	184	180 - 243
Tl	2	3	2	23	3	2 - 23
U	2	7	3	7	2	2 - 7
V	1950	1014	2476	489	358	358 - 2476
Zn	724	196	158	105	115	105 - 724

Kuigi söetuhkade keemiline koostis on väljendatud oksiididena, siis enamus ühendeid kivisöe PC tuhas on sarnaselt põlevkivi PC tuhaga alumosilikaatide amorfiseerunud klaasjas faasis. Samas esinevad ühendid (nt räni kvartsina SiO₂ või räni ja alumiinium mulliidiina Al₆Si₂O₁₃) ka kristallilises faasis. Söe põletamisel CFBC tehnoloogiaga saadakse tuhk, mis sisaldab rohkem mitte-klaasjaid alumosilikaatide faase, kaltsiumsulfaati ja kaltsiumoksiidi. Kaltsiumoksiid on tihti ka lisand, mida viiakse protsessi SO₂ püüdmiseks. Söe lendtuha osakesed on tüüpiliselt suurusega 1 kuni 100 µm ja mediaanmööduga 20 kuni 25 µm.

Tabel 15. Söe lendtuha osakeste suuruse jaotus (mass%)

Viide	Suurus, µm			Märkus
	<20	<40	>200	
[71]	n.d	74,3	0,5	
	31,2	50,5	2,5	
	41,2	59,3	0,6	
[72]	39,4	62,1	0,3	
	39,4	57,2	0,5	
[73]	97,2	100	0	
[74]	52	90,5	0	EF tuhk

Tabel 16. Tuhaosakeste suuruse jaotus (mass%)

Kivisüsi	Osakeste suurus, µm								
	>62	31-62	16-31	8 kuni 16	4 kuni 8	2 kuni 4	1 kuni 2	0,5 kuni 1	<0,5
Illinois, tsüklopõletus	11	6	30	23	18	6	4	<1	2
Illinois, tolmpõletus	19	23	17	22	11	4	2	<1	2
Indiana, tolmpõletus	9	12	25	40	9	3	1	<1	1
Indiana, tolmpõletus	10	8	22	33	16	5	7	<1	0
Illinois, tolmpõletus	4	8	38	43	4	<1	3	<1	3
Illinois, tolmpõletus	8	7	13	30	21	9	6	2	4
Illinois, tsüklopõletus	10	23	27	20	11	3	2	<1	5
Illinois, tolmpõletus	8	15	19	29	16	7	4	<1	3
Illinois, tolmpõletus	7	17	21	27	15	9	3	<1	3
Colorado, tolmpõletus	4	16	29	25	15	6	3	<1	2

5.5 Söetuhkade ökotoksikoloogia

Söetuhkade (öko)toksilisuse hindamiseks on tehtud rida uuringuid (vt Tabel 17). Kuna söe koostise varieeruvus on väga suur, siis on ka hinnangud kivisöetuhkade toksilisuse kohta erinevad – kirjanduse andmetel varieerub tuha toksilisus akuutsest väga toksilisest [75–79] kuni mittetoksiliseni [76–81].

Samuti on viiteid kivisöetuhkade genotoksilisusele [82] ja üldisele negatiivsele mõjule inimtervisele [83]. Konsensus valitseb selles osas, et lendtuhk on toksilisem kui koldetuhk [84–86]. Siinkohal on oluline ka välja tuua, et toksilisuse hinnangud sõltuvad nii konkreetsest söetuhast [62] kui ka kasutatud testorganismist. Üldiselt on leitud, et laialt kasutatav testorganism *Daphnia magna* on söetuha leoveele tundlikum kui *Vibrio fischeri* [75,87,88].

Lähtudes erinevast koostisest on varieeruvad ka hinnangud toksilisuse põhjuste kohta. Sarnaselt Eesti põlevkivituhkadele on jõutud ka järeldusteni, et tuhkade toksilisust põhjustab enamasti eelkõige kõrge pH väärtus [80,89,90] ja analüüsitava lahuse suur ioontugevus (lahustunud ainete sisaldus/elektrijuhtivus) [89]. Kolmanda kivisöetuhkade toksilisuse põhjusena tuuakse välja leostuvaid raskmetalle [91,92], mille kontsentratsioon leostusvetes võib kõikuda väga suurtes piirides. Samuti on arvatud, et tuhkade bioloogiline reaktiivsus võib olla tingitud hoopis tuhaosakeste pinnal tekitatud vabade oksüdeerivate radikaalide toimest, mitte raskmetallidest, mis on valdavalt seotud klaasjatesse tuhaosakestesse ning on bioloogiliselt raskesti kättesaadavad/immobiilsed [93].

Tabel 17. Ülevaade mõningatest kivisöetuha toksilisust käsitlevatest artiklitest ja artiklite põhijäreldused

Viide	Söe allikad	Analüüsi tüüp	Artikli põhitulemuste lühikokkuvõte
[75]	Inglismaa, Austria, Itaalia ja Kreeka	Microtox, NEN 7341, EN 12457-2/3	Esimesed leostusastmes esinenud <i>D. magna</i> immobiliseerimine varieerus 85% ja 100% vahel, mis viitab suurele toksilisele toimele. Suurema osa proovide puhul vähenes toksilisus oluliselt leostumise teises etapis. <i>D. magna</i> on tundlik suhteliselt väikeste Cr ja Cu kontsentratsioonide suhtes ning sellega näitab nii nõrgvee kõrget toksilist toimet kui ka tugevat seost raskmetallide kontsentratsioonide ja nõrgvee toksilisuse vahel. V. fischeri puhul ei ületanud nõrgvee toksilisus 10%, mis näitab nõrgvee vähest toksilist toimet antud testorganismidele. Bioluminestsentsi inhibeerimine varieerus 18,3% ja 40,0% vahel, mis näitab suhteliselt madalat toksilisust.
[76]	Türgi	EP, TCLP (ingl. <i>K toxicity characteristic leaching procedure</i>), ASTM leostamise protseduurid	Kasutatud kolm ekstraheerimise viisi andsid tuhaproovide ekstraktides erinevad elementide kontsentratsioonid. EP ja TCLP puhul klassifitseeruks kõigi kolme jaama põhja- ja lendtuhad kui „toksilised jäätmed“, samas kui ASTM-i protseduuri põhjal klassifitseeruks tuhk mittetoksilisteks jäätmeks.
[77]	Kahe elektrijaama lendtuhad, koldetuhk keevkihi jääk	erineva ühe ning EP, akuutne toksilisus (48h) ning krooniline toksilisus (28 päeva) <i>D. magna</i> 'le.	Esimese elektrijaama 48-h LC50 (%) <i>D. magna</i> 'le oli immobiliseeritavus lendtuha korral 90 ning koldetuha jaoks 94. Teise elektrijaama lendtuha puhul oli antud väärtus 15,2 ning keevkihi jäägi korral 12,6. Olulist kroonilist toksilisust ei täheldatud ühelgi juhul.
[78]	Ligniit (Western fly ash W2 – Põhja-Dakota, Minnesota, tolmpõletus) ja Illinoisi söebasseini söe tuhad	US EPA ekstraktide akuutne toksilisus (96 h) <i>Pimephales promelase</i> 'le.	Tugeval leelisel leovee lahus (pH 12,4), LC50 väärtus 2,8 ehk väga toksiline (pH 12,4), samas ülejäänud (Illinoisi söebasseini tuhkade) leostusveed mittetoksilised (LC50 enamasti >85). W2: mineraalne koostis: kvarts, periklaas, anhüdriit, UNK; Illinoisi basseini söe tuhad: kvarts, mulliid, hematiid, lubi, magnetiid-maghemiid. W2 peamised keemiline ühendid: SiO ₂ 35%, Al ₂ O ₃ 11,3%, Fe ₂ O ₃ 4,7%, CaO 23,7%, MgO 7,9%, Na ₂ O 5,5%, SO ₃ 6,27%; Illinoisi basseini tuhad: SiO ₂ >48 %, Al ₂ O ₃ >18%, Fe ₂ O ₃ >16%, CaO 2,5-5,3%, MgO <0,6%, Na ₂ O <1,3%, SO ₃ <2,7%.
[79]	Kivisöe töötlemise jäätmed	termilise Akuutne toksilisus (48 h) <i>D. magna</i> 'le.	EPA-EP ekstraktsioonimeetodiga analüüsitud tuhad/jäätmed (pH reguleerimine äädikhappega) olid kõik tugevalt toksilised (LC50 enamasti <5 %). Toksilisus on seotud ka metallide sisaldusega. Ülejäänud ekstraktsiooniprotokollide järgi saadud leoveed mittetoksilised.

[80]	Erinevate elektriyaamade tuhad, pärit erinevatest allikatest, klass F ja klass C lendtuhad	Microtox	Toksilisuse määramine Microtoxi testiga näitas lendtuha nõrgvee kerget potentsiaalset toksilisust, välja arvatud lendtuhale kõrgeima pH-ga (12,4). Kui kõrge pH-ga lendtuhkade nõrgvesi neutraliseeriti, kõrvaldati sellega ka toksilisus.
[81]	Lendtuhad Suurbritanniast (A, B), Austriast (C), Itaaliast (D, E)	Akute toksilisus (96 h) <i>D. magna'</i> le.	Kõik tuhad on mittetoksilised.
[82]	Kolaghat soojuselektriyaam, India	Amesi test kasutades <i>S. typhimurium</i> (TA 97a and TA 102); Comet analüüs <i>in vivo Nicotiana</i> lehe rakkudele	Amesi testi (mutatsioonid) ning Comet analüüsi (geelelektroforeesanalüüs; DNA katkestuste/esmaste DNA kahjustuste tuvastamine) tulemused viitavad sellele, et kivisöetuha nõrgvesi on genotoksiline.
[83]		113 kirjandusest leitud artikli kokkuvõte	Kivisöel töötavate elektriyaamade vahetus läheduses elavatel inimestel oli kõrgem enneaegne suremus, suurenenud hingamisteede haiguste ja kopsuvähi, südame-veresoonkonna haiguste, laste tervisliku seisundi halvenemise ja kõrgema imiku suremuse oht. Suurenenud terviserisk oli seotud elektriyaamade heitmetest tuleneva õhu saasteainete ja söe tuhas sisalduvate raskmetallide ja radioaktiivsete isotoopidega.
[84]	Indoneesia ning Semirara põhja- ja lendtuhad	TCLP, Microtox	TCLP näitab, et rohkem kui 99% kroomist ja arseenist jäävad kivisöetuha maatriksisse. Eluaatide keemilise analüüsi tulemused, mis saadi TCLP meetodil standardsete leostumiskatsete abil, näitasid, et ohtlikud elemendid nagu raskemetallid ja metalloïdid, mis sisalduvad lend- ja koldetuhkades, võivad liikuda vedelasse faasi. Microtox-i kohaselt on koldetuhk vähem mürgine kui lendtuhk, mis on tingitud toksiliste elementide aurustumisest põlemisel ja nende adsorptsioonist lendtuha pinnale. Peale selle mõjutab kroomi leostumist kivisöetuhaproovidest olulisel määral pH.
[85]	Lõuna-Aafrika ja Kolumbia kivisöe tuhad (tsirkuleeriv keevkihtkatel)	TCLP U.S. EPA meetod 1311 (1992)	Lendtuha leostusvesi on toksilisem merebakteritele võrreldes koldetuha leostusveega. Tulemused näitasid, et lendtuha leostusvesi, eriti kottfiltritest pärit lendtuha leostusvesi, avaldasid merebakteritele tugevamat mõju kui koldetuha nõrgvesi. Tuhafraktsioonide suuruse analüüs näitas, et raskemetallid on kontsebreerunud lendtuha peenes fraktsioonis. Leostusvee keemilise koostise analüüs näitas suuremat raskmetallide sisaldust lendtuha nõrgvees.
[86]	Lõuna-Aafrika ja Kolumbia kivisöe tuhad	TCLP U.S. EPA meetod 1311 (1992), Microtox	Lendtuha leostusvesi toksilisem koldetuha leostusveest. Koldetuhkade leostusvesi inhibeeris luminesseeruvate bakterite <i>V. Fischeri</i> luminesentsi 25 kuni 30% ulatuses,

	(tsirkuleeriv keevkihtkatel)			lendtuha leostusvesi 30 kuni 45% ulatuses. Lendtuha suurema toksilisuse eeldatav põhjus on kõrgem Ni, Cu ja Cr sisaldus.
[87]	Inglismaa, Austria ja Itaalia	TCLP 1311, EN 12457-2, Microtox		Vähem kui 10 % inhibeerimist <i>V. fischeri</i> puhul. 70 % inhibeerimist <i>D. magna</i> and <i>P. subcapitata</i> puhul.
[88]	Lendtuhk (soojuelektrijaamast)	Kolonnis leostamine (NEN 7341)		5 minutiline kokkupuude avaldab suuremat mõju <i>D. magna</i> 'le kui 30 minutiline kokkupuuteaeg <i>V. fischeri</i> le. Samuti esineb toksilisuse vähenemine L/S suhte suurenemisel.
[91]	Kingstoni lendtuhk	Bioakumulatsioon, prebioakumulatsioon, 10-päevane toksilisuse sõeluuringu		Jõesed, mis sisaldavad rohkem kui 40% kiviõetuhka on tõenäoliselt toksilised jõe põhjakihi loomastikule. Toksilisus korreleerus esmajoones arseeniga kokkupuutega ja vähemal määral ka tuhas sisalduvate metallide või metalloiididega.
[92]	Indian River Power Plant	Microtox		Erinevatele pH tasemetele reguleeritud proovid (HCl ja CH ₃ COOH). Tuha toksilisus suurenes koos lahuse pH langusega nii HCl kui ka CH ₃ COOH puhul. Leostamisel HCl-ga, olid toksilisus ja raskmetallide kontsentratsioonid kõrgemad kui CH ₃ COOH puhul. Uuritavate proovide toksilisus ja raskmetallide kontsentratsioon näitasid selget korrelatsiooni, mis viitab sellele, et tuhas olevad metallid on seotud nõrgvee toksilisusega.
[93]	Bituminoosne süsi (Inglismaalt ning imporditud mujalt)	Plasmiidide lõhustumise analüüs (ingl k <i>Plasmid Scission Assay</i> – PSA)		PSA tulemused viitavad sellele, et lendtuha toksilisus on seotud osakeste pinna kristallilisusega (oksüdeerivate radikaalide tekke soodustamine), mitteleostuvate metallide või geokeemilise koostisega.
[89]	Kiviõe termilise töötlemise jäätmed	US EPA ekstraktide akuutne toksilisus (96 h) <i>Pimephales promelase</i> 'le.		Toksilisus peamiselt tingitud pH väärtusest ja lahuse ioontugevusest. Mõningad metallid võivad „panustada“ toksilisusesse.
[90]	Kiviõe tuhad (Bulgaariast, Serbiast ja Kreekast)	<i>V. fischeri</i> inhibeerimine	bioluminentsi	Enamasti mõjutab toksilisust pH. Kahe tuha korral oli tuhk toksiline olenemata pH reguleerimisest – tõenäoliselt tingitud ohtlike „kemikaalide“ sisaldusest tuha leovees.

6 Söe- ja põlevkivituhkade võrdlus

6.1 Söe ja põlevkivi koostise võrdlus

Oma koostiselt on nii süsi kui ka põlevkivi varieeruvad. Järgnevas tabelis (Tabel 18) on toodud olulisemate kütuseid iseloomustavate parameetrite väärtused, sh normained/jälgelemendid, mida peetakse jäätmete ökotoksilisuse hindamisel prioriteetseteks. Tabelist on näha, et põlevkivi koostises olevate elementide osas on sisaldused Eesti põlevkivis võrreldes erinevate söetüüpidega kas madalamad või samas suurusjärgus.

Tabel 18. Erinevate söetüüpide [59] ja Eesti põlevkivi parameetrid

Parameeter	Ühikud	Süsi				Põlevkivi [35,94,95]
		Ligniit	Bituminoosne	Madala lendosaga bituminoosne ja antratsiitne	Antratsiit	
Niiskus	% ar	30–70	2–20	2–20	2–20	7-12
Tuhk	% ar	5–40	1–30	1–30	1–30	45,4
Lendosa	% daf	40–70	> 22	8–22	< 8	70-80
Orgaaniline süsinik	% daf	35–60	55–85	85–92	> 92	47,9
Üldsüsinik	% daf	60–80	80–95	90–95	92–95	59,13
Vesinik	% daf	4,5–6,5	4,5–6,5	3,5–4,5	3–8	6,02
Hapnik	% daf	12–30	1,5–14	1,2–6	1,2–5	33,7
Väävel (org)	% daf	0,5–4,7	0,3–4,5	0,5–1	0,5–0,8	1,09
Ülemine kütteväärtus	MJ/kg daf	23–35	32–38,5	35–38	35–38	18,82
Alumine kütteväärtus	MJ/kg ar	4–30	26–32	25–32,3	30–31,4	8,4
N	% db	0,3–1,5	0,6–2	1,4–4	0,9–1,7	0,2
Hg	mg/kg	0,03–0,22	0,01–0,9	0,07–0,1	0,06–0,2	0,08-0,3
Cd	mg/kg	0,3–5	0,01–10	0,2–1	0,06–4	0,4-4
Tl	mg/kg	2–8	0,01–3,5	NA	1–2	0,4
Sb	mg/kg	0,5	0,02–20	0,1–2,1	0,5–5,2	0,5-0,6
As	mg/kg	10	0,1–22	1–8	0,9–15	7,6-21
Pb	mg/kg	0,1–15	0,1–128	5–15	4–122	20-30
Cr	mg/kg	65–77	0,6–300	24–32	10–470	17-38
Co	mg/kg	11–12	0,5–60	NA	4–60	2,9-3
Cu	mg/kg	35–37	1–165	28	9–35	17-55
Mn	mg/kg	141	3–500	37–95	30–530	310-387
Ni	mg/kg	32–40	0,7–180	13–26	11,5–225	12-21
V	mg/kg	100–107	1,2–390	12–33	18–305	24
Zn	mg/kg	50–56	1,2–385	8–20	1,4–412	76

ar – tarbimisaine; daf – tuhavaba kuivaine; db – kuivaine põhine

6.2 Tuhkade koostise võrdlus

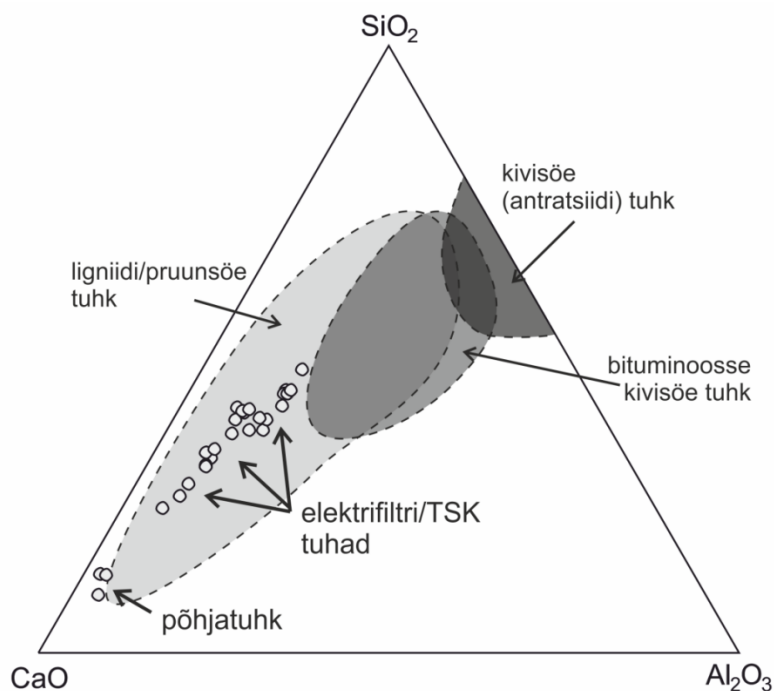
Erinevat geoloogilist päritolu süte põletamisel tekkinud tuha koostis on suure varieeruvusega ning see sõltub samuti põletustehnoloogiast ja sealhulgas suitsugaaside puhastuse tehnoloogiast. Nii nagu ülaltoodud söetuhkade ülevaates on kirjeldatud, jagatakse söetuhad kahte klassi - klass F ja klass C.

Esimese (klass F) koostises domineerivad Si ja Al ning Fe ühendid, mis tüüpiliselt moodustavad >60-70% kogu tuhamassist. Valdav osa tuhamassist on klass F tuhka klaasja räbu või sfääriliste amorfsete osakestena. Tabel 74 (Lisa 1. Mineraalne koostis) on esitatud näited söetuhkade mineraalse koostise kohta.

Teises, klass C tuhka on kõrge Ca ühendite sisaldus, mis tavaliselt esineb lubjana (vaba CaO) mille sisaldused ulatuvad >20%. Klass C tuhka tekivad tavaliselt ligniidi ja subbituminoosne söe põletamisel. Euroopas klaasifitseerub üle 50% söetuhast klass C tuhaks [96], kuna energia tootmiseks kasutatakse siin laialdaselt leiduvat ligniiti [97].

Eesti põlevkivituhad vastavad oma keemiliselt ja mineraalselt koostiselt klass C tuhka. Võrreldes tüüpiliste kivisöetuhkadega on Eesti põlevkivituhas märgatavalt kõrgem (eriti CFBC tuhka) osaliselt lagunemata kaltsiidi (harvem dolomiidi) sisaldus, mis tuleneb Eesti Põlevkivi karbonaatsusest. Kuigi klass C tuhka kvartsi (SiO_2) sisaldused võivad varieeruda suurtes piirides, siis tüüpiliselt on nendes kõrgem Si (kvartsi) ja Al (alumosilikaatide) sisaldus kui Eesti põlevkivituhka. Mõlemas tuhatüübis on sarnaselt kõrge CaO (eriti lubja, vaba CaO) sisaldus (Tabel 19).

Kui võrrelda Eesti põlevkivituhka keemilise koostise varieeruvust peamiste süte tüüpidega (kõrgekvaliteediline süsi – antratsiit, bituminoosne süsi ja madalakvaliteediline ligniit/pruunsüsi) siis sarnaneb Eesti põlevkivituha ühemõtteliselt Ca-rikastele ligniidi tüüpi sütele (Joonis 37).



Joonis 37. Söe ja põlevkivituhkade põhikomponentide varieeruvus. Söetuhkade väljad [98] järgi.

Jälgelementide sisaldused kivisöetuhkades on väga varieeruvad ning sõltuvad söe konkreetsest päritolust ja diagenetilisest arenguloost. Potentsiaalselt olulisemateks inimeste tervist ja keskkonda mõjutavateks loetakse kivisöetuhkades arseeni, berülliumi, boori, kaadmiumit, kroomi, koobaltit, pliid, elavhõbedat, mangaani ja niklit. Lisaks söe ja põlevkivi koostise varieeruvusele mõjutab jälgelementide sisaldust tuhkades ka põletustehnoloogia. Enamus juhtudel on aga nii lend- kui ka koldetuhas nimetatud elementide sisaldused alla 1000 mg/kg (ppm) ehk alla 0,1% (

Tabel 20). Lisainfo jälgelementide sisalduse kohta tuhkades on esitatud Tabel 83 ja Tabel 84 (Lisa 3. Jälgelemendid). Lisaks on Tabel 12 toodud ECHA andmebaasis registreeritud tolm-põletusel tekkivate tuhkade (EÜ number 931-322-8) jälgelementide sisaldused. Põlevkivituhkade ja söetuhkade jälgelementide sisalduse võrdluse põhjal võib järeldada, et valdavas enamuses on põlevkivituhkade raskmetallide ja teiste jälgelementide sisaldused madalamad, välja arvatud Ti ja Mn korral. Üldiselt aga varieeruvad jälgelementide sisaldused nii põlevkivis kui ka söes. Samas on varieeruvus märkimisväärselt suurem süte korral.

Peamine erinevus söe ja põlevkivituhkade vahel on madalam vaba CaO sisaldus kõrgema kvaliteediga söe tüüpides. Viimastes võib vaba CaO praktiliselt puududa, kuid ligniidi põletamisel tekkinud tuhkade puhul võib mõningatel juhtudel (sõltuvalt ligniidi päritolust/koostisest) vaba CaO sisaldus isegi ületada põlevkivituhkade vaba CaO sisaldust.

Tabel 19. Primaarsete ja sekundaarsete mineraalide sisalduste varieeruvus põlevkivituhkades ja söetuhkades [mass %]

Kütus		Põlevkivi				Süsi	
Mineraal	Auvere CFBC	FW CFBC	PC+NID	Enefit 280	Petroter	PC	CFBC
Kvarts (SiO ₂)	2,8 - 13,8	4 - 19,9	4,3 - 13,8	4,3 - 15,8	10,5 - 11,3	4 - 46	4,2 - 16,5
K-päevakivi	2,1 - 21	3 - 18,8	1,9 - 5,7	2,1 - 16,7	4,6 - 16,5	2 - 5	
K-vilk	1,1 - 6,3	1,5 - 10,6	<3,5	1,2 - 8,2	5,4 - 38,7		
kaltsiit	1,2 - 64,1	6,5 - 59,7	4,3 - 9,0	36,5 - 69,2	20,0 - 50,2	<40	
dolomiit	<LOQ - 4,4	0 - 6,9	~0	1,1 - 7,0	1,0 - 14,3	<4	
Lubi (CaO)	<LOQ - 20,8	<LOQ - 13,5	8,0 - 24,6	0	0 - 0,5	0,1 - 25	0 - 16,6
portlandiit	0,5 - 29	1 - 12,3	2,8 - 9,2	0 - 1,5	0,6 - 0,8	<9	1,1 - 1,9
periklaas	3,4 - 7	2,4 - 5,9	4,0 - 6,6	1,2 - 2,2	0 - 1,7		
anhüdriit	1,5 - 14,5	5 - 29,8	2,2 - 11,3	1,4 - 9,6	1,2 - 2,9	<14	1,0 - 3,8
C2S/C4AF	4,8 - 28,1	3,9 - 19,9	18,6 - 20,7	3,9 - 6,3	0,5 - 3,7		
merviniit	1,9 - 6,7	1,7 - 4,6	3,8 - 7,5	1,3 - 3,3	2,1		
akermaniit	<LOQ - 4,1	1,5 - 14,2	4,4 - 16,4	0,8 - 4,2	1,4 - 1,7		
arkaniit	<LOQ - 0,8	0 - 0,6	0	0	0		
sülviin	<LOQ - 1,7	1,1 - 7,8	0	0	0		
hematiit	<LOQ - 1,9	4 - 19,9	0,7 - 1,6	0,9 - 2,3	0 - 0,5	<8	<2,1
vollastoniit		0 - 1,6	0	1,2 - 1,2	0	<2	
kloriit			0		0 - 4,5	<1	

Tabel 20. Põlevkivituhkade ja söetuhkade jälgelementide kontsentratsiooni [mg/kg] varieeruvus (miinimum - maksimum) põlevkivi- ja söetuhkades Tabel 12, Tabel 83 ja Tabel 84 andmete põhjal

Kütus		Põlevkivi				Süsi	
Element	Auvere CFBC	FW CFBC	PC+NID	Enefit 280	Petroter	PC	CFBC
Li	<LOQ - 31,6	1,8 - 40,3	20,2 - 25,2	6,2 - 22,3	11,5 - 56,8	79 - 268	90 - 235
Be	<LOQ - 1,1	<LOQ	<LOQ - 1,1	<LOQ - 0,7	0,4 - 2,4	4 - 34	2 - 11
Ti	5,4 - 3722	885 - 4280	2192 - 2848	572 - 3362	1285 - 5640	<LOQ	<LOQ
V	1,6 - 94,7	17 - 80,2	42,5 - 58,9	13,1 - 70,1	23 - 105,5	155 - 6919	208 - 6076
Cr	<LOQ - 65,9	16,7 - 74,4	36,5 - 63,1	10,3 - 63	21,5 - 85,4	103 - 177	<134
Mn	489,1 - 807,7	447 - 821	451 - 817	290,9 - 525	270,8 - 530	77 - 412	105 - 325
Co	0,9 - 7,8	2,5 - 7,8	4,5 - 6,4	2,8 - 8,3	4 - 11,9	17,3 - 72	<LOQ - 29
Ni	<LOQ - 42,2	13,5 - 39,3	19,8 - 28,2	11,9 - 33,5	15,3 - 41,4	41 - 367	88 - 177
Cu	0,8 - 14,1	5,1 - 15	7,5 - 37,6	3 - 9,7	9 - 78,7	25 - 273	27 - 72
Zn	16,2 - 309,6	22,9 - 40,9	19,6 - 61,7	79,2 - 158,9	35,2 - 37,3	44,5 - 176	39 - 221
As	<LOQ - 56,6	8,1 - 29,8	7,4 - 25	19,6 - 33,9	6,4 - 8,7	19,6 - 109	60 - 86,7
Se	<LOQ - 1,5	1,1 - 1,4	0,7 - 1,3	0,3 - 0,9	<LOQ - 0,5	<LOQ - 291,7	2 - 310
Sr	194 - 580	297 - 459	296 - 418	215 - 351,6	245,4 - 264,3	126 - 2310	<LOQ - 720
Mo	<LOQ - 26,3	0,8 - 6,5	0,2 - 4,4	4,2 - 22,5	1,4 - 3	2,7 - 26	<LOQ - 15
Cd	<LOQ - 2,4	<LOQ	<LOQ	<LOQ - 1,4	<LOQ	0,6 - 2	<LOQ - 1,3
Sb	<LOQ - 1,4	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,1 - 15	0,1 - 4
Tl	0,3 - 4,6	0,4 - 1,9	0,5 - 2,1	<LOQ - 9,6	<LOQ	0,5 - 4	<LOQ - 1,4
Pb	2,4 - 124,7	17,1 - 69,1	12,8 - 73,5	18,5 - 121,2	25,1 - 134,8	6 - 125	<52

Tabel 21. Põlevkivituhkade ja söetuhkade (eraldi välja toodud ligniit) keemilise koostise varieeruvus [mass %]

Kütus	Põlevkivi					Ligniit							
	Ühend	Auvere CFBC	FW CFBC	PC+NID	Enefit 280	Petroter	PC LT [99]	PC LT [100]	PC LT [101]	FBC tsüklon [102]	PC EF1 [103]	PC ja FBC [104]	
											Reinimaa piirkond	Kesk-Saksamaa	Lausitzi piirkond
SiO ₂	4,7 - 33,4	4,6 - 35,8	20,9 - 28,7	9,3 - 32,7	14,8 - 41,4	33,11	27,2-28,9	29,7	31,6	8,7	20-80	18-36	32-68
Fe ₂ O ₃	1,3 - 14,8	<LOQ - 4,9	3,2 - 4,2	1,6 - 5,2	2,0 - 3,8	5,72		6,18	8,7	10,1	1,5-20	1-6	6-22
Al ₂ O ₃	0,2 - 9,6	1,5 - 11,7	5,6 - 14,7	1,3 - 10,6	2,6 - 13,7	13,76		10,65	11,3	2,7	1-15	7-19	5-14
CaO	33,2 - 55,9	27,5 - 57	33,5 - 53,5	29,0 - 45,6	13,9 - 38,5	35,27	32,1-41,5	32,92	11,2	37,3	2-45	30-52	8-23
MgO	1,1 - 7,4	3,7 - 8,1	3,6 - 8,7	2,6 - 3,3	2,6 - 8,1	3,21	3,82-4,75	5,93	3,1	15,4	0,5-11	2-6	2-8
Na ₂ O	<LOQ - 0,4	<LOQ - 0,3	0,1 - 0,4	0,0 - 0,1	0,1 - 0,2	1,33	0,57-0,86	0,74	0,13	3,4	0,1-2	0,01-0,2	0,01-0,2
K ₂ O	<LOQ - 4,3	0,4 - 4,9	1,8 - 4,8	0,5 - 3,9	1,0 - 5,8	0,95	0,59-0,76	0,61	1,2	0,4	0,1-1,5	0,1-0,5	0,5-2
Cl	<LOQ - 0,8	<LOQ - 1,4	0 - 0,7	0,1 - 0,1	0,0 - 0,1								
CO ₂	2,5 - 30,6	1,9 - 27,8	0,8 - 4,1	16,3 - 33,3	0,4 - 1,5								
CaO _{vaba}	5,8 - 31,8*	6,5 - 19,9	11,1 - 23,7	1,1 - 1,8	0,4 - 1,5	**	4,08-12,9 (2-16)	6,49	7,3	11,5	2-25	9-25	0,1-4
C (CO ₂)	0,7 - 8,3	0,5 - 7,6	0,2 - 1,1	16,3 - 33,3	9,1 - 31,1								
C _{org}	<LOQ - 0,8	<LOQ - 1	<0,05	<0,1	1,3 - 3,1					6,5			
SO ₃ kogu	0,2 - 7,9	3,1 - 12	2,1 - 12,6	1,9 - 5,6	4,2 - 5,2	4,98	4,77-6,12	9,98	-	13,7	1,5-15	7-15	1-6
S _{sulfaat}	<LOQ - 3,2	1,4 - 4,9	0,8 - 2,3	1,9 - 2,1	0,5 - 0,6								
S _{sulfiid}	<LOQ - 2	<LOQ - 1	0 - 0,1	<1,4	1,5 - 1,8								

*Suurim väärtus kottfiltrit tuhas, ülejäänud voogudes enamasti all 20%

**Tuha koostise juures ei ole eraldi välja toodud vaba lubja sisaldust, kuid on rõhutatud, et see moodustab suurema osa CaO sisaldusest tuhas. Moutsatsou et al. [105] on näidanud XRD analüüsiga, et lubi on üks peamiseid faase nimetatud tuhas.

6.3 Leostustuvate ühendite kontsentratsioonid põlevkivituha ja kivisöetuha leovees

Tuhkade ökotoksilisust võivad põhjustada/kontrollida mitmed vesilahustes liikuvad ühendid. Liikuvuse hindamiseks kasutatakse leostusteste, mille käigus viiakse teatud kindla aja jooksul (tavaliselt 24 tundi) omavahel kontakti kindel kogus vett ja uuritavat tahket materjal. Mida suurem on ühendite liikuvus, seda suurem on potentsiaalselt nende kontsentratsioon leovees. Seejuures tuleb aga ka märkida, et ühendi liikuvus üksi ei määra kontsentratsiooni leovees. Viimane sõltub ka ühendi kontsentratsioonist veega kontaktis olevas materjalis, materjali iseloomust, kontaktiajast ja leostumise mehhanismist (sõltuvalt, kas tegemist on difusioonse protsessiga ehk leostumisega või lahustumisega) [106].

Käesoleva uuringu raames teostati leostuskatsed erinevatest tehnoloogiatest pärit põlevkivituhkadel. Leostamiseks kasutati tuhkasid nendest voogudest, mis moodustavad suurema osa summaarsetest tuhavoogudest. Samuti teostati leostuskatsed summaarsete lendtuhkadega, mis olid kokku segatud erinevate lendtuhavoogude tuhaproovidest lähtuvalt katelde ja õlitootmistehnoloogiate tuhavoogude bilansist (vt peatükk 3. Põlevkivituhkade liigid ja tekkimine).

Vesikeskkonda liikuvatest ühenditest on olulisemad jälgelemendid (sh raskmetallid) ja PAH-id. Tuginedes kirjanduse andmetele, ei ületa põlevkivituhkade leostusvees summaarsete PAH-de kontsentratsioon 0,06 µg/l [106], mis on kooskõlas põlevkivituhkade madala orgaanilise süsiniku sisaldusega. Erinevate põlevkivituhkade leostusvetes olevate jälgelementide kontsentratsioonid on esitatud Tabel 85 (Lisa 4. Leostumine). Mõõdetud jälgelementide sisaldused põlevkivituhkade leostusvetes on suurusjärgus µg/l (Tabel 22), kusjuures kõrgeim on strontsiumi sisaldus. Paljude jälgelementide sisaldused söetuhkades võivad ületada (sõltuvalt söe päritolust) tuhandeid kordi vastavate jälgelementide sisaldusi põlevkivituhkades.

Leostuskäitumises on põlevkivituhkadele kui ka klass C tuhkadele iseloomulik leovee kõrge pH, mis saavutab kõikidel juhtudel väärtuse 12,0-12,5 samas kui klass F tuhkades jääb pH leoskatsetes reeglina <10. Kõrged pH väärtused on otseselt seotud põlevkivituhas ja klass C söetuhas leiduva vaba lubja (CaO) hüdratiseerumisel tekkiva portlandiidiga Ca(OH)₂ [103]. Portlandiidi tasakaalulise lahustumisega tõuseb vee pH üle 12,5. Senikaua kuni portlandiit on karboniseerimata, jääb kõrgeks ka vesilahuse pH. Õhule avatult hakkavad need algselt kõrged väärtused langemine seoses Ca(OH)₂ karboniseerumisega CO₂ sidumise kaudu.

Põlevkivi mineraalses osas olevate karbonaatide lagunemisel tekkinud vaba CaO seob endaga põlemisprotsessis vabanenud SO₂-e, moodustades anhüdriidi. Veega kontaktis anhüdriit hüdratiseerub (moodustub kips) ja osaliselt lahustub. Selle tulemusena vabaneb vette märkimisväärselt sulfaatioone. Samuti lahustub osaliselt vees tuhas olev kloor. Need ioonid

mõjutavad oluliselt vee juhtivust. Kõrget sulfaatioonide sisaldust on täheldatud ka söetuhkade leostusvetes [107] ning väävliärastusprotsessis tekkinud produkti leostusvetes [108].

Tabel 22. Keskmised põlevkivituhkade ja söetuhkade leostusvetes (Tabel 85 alusel) mõõdetud jälgelementide sisaldused [$\mu\text{g/l}$], keskmised kloriid- ja sulfaatioonide sisaldused [mg/l], keskmine juhtivus [$\mu\text{S/cm}$] ja leostusvee keskmine pH

	Ühik	Auvere	FW CFBC	PC+NID	Enefit 280	Petroter	Söetuhad*
pH		13,09	13,03	13,01	12,17	11,55	<12,8
Juhtivus	$\mu\text{S/cm}$	11110	10660	10833	3356	2651	<1358
Kloriidioon	mg/l	1667	1523	1910	2090	915	1686**
Sulfaatioon	mg/l	10235	14043	9610	14541	6614	5647**
Li	$\mu\text{g/l}$	51,45	26,37	28,63	11,08	15,52	
Be	$\mu\text{g/l}$	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	
Ti	$\mu\text{g/l}$	0,34	0,49	0,89	0,51	1,15	
V	$\mu\text{g/l}$	0,29	0,20	0,30	14,45	24,21	<4620
Cr	$\mu\text{g/l}$	65,46	113,65	25,74	103,80	3,78	<22197
Mn	$\mu\text{g/l}$	0,14	0,27	0,21	0,28	0,81	
Co	$\mu\text{g/l}$	0,23	0,26	0,24	0,18	0,19	
Ni	$\mu\text{g/l}$	0,75	0,78	0,77	0,45	0,47	<10
Cu	$\mu\text{g/l}$	0,82	0,60	0,95	0,83	1,90	<583
Zn	$\mu\text{g/l}$	3,66	1,23	1,30	0,87	2,96	<1593
As	$\mu\text{g/l}$	0,01	0,01	0,22	0,99	1,42	<260
Se	$\mu\text{g/l}$	2,47	2,51	0,31	3,49	1,36	<280
Sr	$\mu\text{g/l}$	5023,48	3326,87	2975,27	1480,79	1117,53	
Mo	$\mu\text{g/l}$	65,94	39,62	32,63	209,21	64,42	<10
Cd	$\mu\text{g/l}$	0,27	0,20	0,18	0,69	0,25	<963
Sb	$\mu\text{g/l}$	0,14	0,10	0,18	0,22	0,44	<3400
Tl	$\mu\text{g/l}$	4,69	3,34	4,40	0,39	7,72	
Pb	$\mu\text{g/l}$	7,11	4,73	2,15	0,13	0,73	<15867

*Esitatud andmed söetuhkade kohta ei ole ammendavad

**[107] Rumeenia ligniidi PC LT

6.4 Ökotoksikoloogiliste omaduste võrdlus

EL-is ei ole saavutatud konsensust jäätmete keskkonnaohtlikkuse hindamise meetodika osas. Üheselt reglementeeritud hindamise meetodika puudumise tõttu ei ole eelretsenseeritud kirjanduses olemas võrdsetel alustel saadud andmeid söe ja põlevkivituhkade ökotoksikoloogiliste omaduste kohta. Lisaks tuleb rõhutada, et olenemata söe omadustest/päritolust, käsitletakse põletamisel tekkivaid söetuhkaid REACH-regulatsiooni raames kui analoogseid tooteid.

Tabel 23. Kivisöe- ja põlevkivituha (öko)toksikoloogiliste omaduste võrdlus vastavalt Euroopa Kemikaali ameti (ECHA) andmebaasile

	Kivisöetuhk	Põlevkivituhk (CFB)
Oht veeorganismidele		
Magevesi	44 µg/l	20 µg/l
Perioodiline heide (magevesi)	300 µg/l	827 µg/l
Merevesi	4,4 µg/l	2 µg/l
Reoveepuhastusjaam	10 mg/l	100 mg/l
Lühiaegne toksilisus kaladele		
	LL50 (4 päeva) 100 mg/l	LL50 (3,2 kuud) 100 mg/l
	LL100 (4 päeva) 100 mg/l	
	NOELR (4 päeva) 100 mg/l	NOELR (4 päeva) 100 mg/l
Pikaajaline toksilisus selgrootutele		
NOELR (21 days)	2,2 mg/l	1 mg/l
LOELR (21 days)	4,6 mg/l	3,2 mg/l
EL50 (48 days)		100 mg/l
Toksilisus vetikatele ja bakteritele		
EL50 (72 h)	30 mg/l	82,7 mg/l
NOELR (72 h)		3,2 mg/l
LOELR (72 h)		10 mg/l
Akuutne toksilisus		
LD50	2000 mg/kg (rott)	2000 mg/kg (rott)

EL50 – Effective Loading; NOELR – No Observable Effect Loading Rate; LOELR – Lowest Observed Effect Loading Rate

Euroopa Kemikaali ameti (ECHA) andmebaasis on kivisöetuhkade kohta kolm kannet: EC / List no.: 924-417-0 ja 268-627-4 ja 931-322-8. Kivisöetuhkale on omistatud ka CAS number 68131-74-8¹⁴ (vt ka 5.4 Söetuhkade füüsikalised-keemilised omadused). Kivisöe lendtuha kohta puudub harmoniseeritud klassifikatsioon. Nimetatud tuhk on tähistatud kui anorgaaniline materjal, millele on märgitud järgmised ohtlikud omadused: Eye Irrit. 2 (H319), Acute Tox. 4 (H302), Skin Corr. 1B (H314), Acute Tox. 3 (H331). Vastava tuha kohta esitatud ökotoksikoloogiline info ECHA andmebaasis sisaldab PNEC

¹⁴ <https://echa.europa.eu/brief-profile/-/briefprofile/100.151.318>

(arvutuslik mittetoimiv sisaldus; ingl k *Predicted No-Effect Concentration*) väärtuseid. Analoogne info on olemas ka põlevkivituha (EC / List no.: 297-648-1; CAS number: 93685-99-5) kohta¹⁵. ECHA andmebaasis olevate tuhkade (öko)toksikoloogiliste omaduste võrdlus on toodud Tabel 23.

7 Põlevkivituha kui jäätme klassifitseerimise alused ja reguleeriv seadusandlus

Eesti seadusandluse kohaselt kehtib alates 1. juunist 2015 jäätmete ohtlikele omadustele Euroopa Liidu komisjoni määrus (EL) nr 1357/2014 [1], mis asendab jäätmete raamdirektiivi III lisas (jäätmeseaduse §-s 8) käsitletud kahjulikud toimed H1–H15 jäätmete ohtlike omadustega HP 1–HP 15.

Jäätmenimistu alusel liigitatakse jäätmed ohtlikeks ja tavajäätmeteks, kusjuures kindlasti ohtlikeks jäätmeteks liigitatakse kõik jäätmenimistus tärniga tähistatud jäätmed¹⁶. Kui jäätmenimistust saab valida jäätmele nii tava- kui ohtlike jäätmete koodi, siis tuleb hinnata vastavalt määrusele (EL) nr 1357/2014 [1] jäätmete ohtlikke omadusi (HP 1-HP 15).

Seejuures sõltub jäätme liigitamine temas sisalduvate ohtlike ainete ohuklasside ja ohukategooriate ning ohulausete koodidest. Ohuklassid ja -kategooriad ning ohulausete ja nendega seonduvad klassifitseerimiskriteeriumid on ühtlustatud kehtivate EL määrustega, näiteks ainete ja segude klassifitseerimist, mürgistamist ja pakendamist käsitleb määrus (EÜ) 1272/2008 [109].

Konkreetselt jäätmete klassifitseerimist reguleerib jäätmete raamdirektiiv 2008/98/EÜ [33] ja jäätmenimistut käsitlev komisjoni otsus 2000/532/EÜ [2], mida on muudetud 2014. ja 2017. aastal.

Jäätmete raamdirektiiv 2008/98/EÜ on peamine ELi tasandil jäätmeid käsitlev õigusakt. Kuna tegemist on direktiiviga, võetakse see liikmesriikide riigisisestesse õigusnormidesse üle eraldi õigusaktidena. Direktiivi kohaldamisala on selle direktiivi artikli 3 lõikes 1 määratletud mõistega „jäätmed“, mis on: „*mis tahes ained või esemed, mille valdaja ära viskab, kavatseb ära visata või on kohustatud ära viskama*“. Kui aine või ese vastab jäätmete kriteeriumidele, kohaldatakse selle suhtes jäätmealaseid õigusakte, sealhulgas jäätmete liigitamise eeskirju (välja arvatud juhul, kui see aine või ese on konkreetselt jäätmete raamdirektiivi kohaldamisalast välja jäetud).

Jäätmete raamdirektiivi artikli 3 lõikes 2 on „ohtlikud jäätmed“ määratletud järgmiselt:

„*jäätmed, millel on üks või rohkem III lisas loetletud ohtlikest omadustest*“.

Ohtlike jäätmete käitlemise suhtes kehtivad ranged tingimused, eelkõige järgmised:

¹⁵ <https://echa.europa.eu/et/brief-profile/-/briefprofile/100.088.729>

¹⁶ <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/532/2015-06-01>

- kohustus esitada tõendeid jäätmete jälgimise kohta kooskõlas asjaomases liikmesriigis kehtestatud süsteemiga (jäätmete raamdirektiivi artikkel 17);
- segamise keeld (jäätmete raamdirektiivi artikkel 18, vt täpsemalt jäätmete raamdirektiivi tõlgendamise juhend);
- konkreetsed märgistamise ja pakendamise kohustused (jäätmete raamdirektiivi artikkel 19).

Lisaks on ELi õigusaktides sätestatud, et ohtlikke jäätmeid tohib käidelda ainult konkreetselt selleks ette nähtud jäätmekäitluskohtades, millel on jäätmete raamdirektiivi artiklitega 23–25, aga ka muude õigusaktidega, näiteks prügilaid ja tööstusheiteid käsitlevate direktiividega, ette nähtud eriluba.

Jäätmete raamdirektiivi III lisas loetletud ohtlikke jäätmete omadusi kohandati hiljuti komisjoni määruse (EL) 1357/2014 [1] abil, mida kohaldatakse alates 1. juunist 2015, ja nõukogu määruse (EL) 2017/997 [3] abil, mida kohaldatakse alates 5. juulist 2018. ELi määrused on liikmesriikides vahetult kohaldatavad, ilma ülevõtmiseta riigisisestesse õigusaktidesse.

Seoses jäätmete liigitamisega on jäätmete raamdirektiivi artiklis 7 sätestatud alus jäätmenimistut kehtestamiseks ja rakendamiseks. Liikmesriigid võivad oma riigisisestesse jäätmenimistut kajastavatesse dokumentidesse lisada täiendavaid kirjeid.

Kehtiva määruse valguses loetakse ohtlikuks jäätteks aine, millele on omistatud üks või mitu ohtliku omadust (Tabel 24). Vastavalt 2015. aasta 14. detsembri keskkonnaministri määrusele nr 70 „Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistut“ [110] on Eesti Vabariigis kehtivasse jäätmenimistusse lisatud täiendavad jäätmekoodid 10 01 97* ja 10 01 98* vastavalt põlevkivikoldetuhale ja põlevkivilendtuhkale. Kuna need jäätmekoodid on tähistatud tärniga, siis tähendab see, et seaduse mõttes on tegemist kindlasti ohtlike (AH) jäätmetega ja need on ilma igasuguse edasise hindamiseta ohtlikud.

Üldiselt aga, kui ei ole teada, kas jääde liigitada ohtlikuks jäätteks või tavajäätteks, on vaja ohtliku omaduse esinemise hindamiseks teada jäätme koostist. Kui on leitud, et jäätme koostises olevad ained on klassifitseeritud ohtlike ainetena, st kas neile on omistatud ohulause kood, tuleb hinnata aine ohtlikuks klassifitseerimist CLP-määruse kriteeriumite alusel.

„ohulause“ – ohuklassile ja ohukategooriale määratud fraas, mis kirjeldab ohtliku aine või seguga seotud ohtude laadi, sealhulgas vajaduse korral ohumäära.

Jäätmete ohtlikud omadused on võimalik välja selgitada ka vastavate katsete teel. Katse tuleb teha kooskõlas katsemeetodite määrusega (EÜ) nr 440/2008 [111], mis käsitleb kemikaalide registreerimist, hindamist, autoriseerimist ja piiramist (REACH) või muude rahvusvaheliselt tunnustatud katsemeetodite ja juhenditega. Kui jäätmete omadusi on hinnatud nii komisjoni määruse kui katse teel, on katse tulemused ülimuslikud.

Tabel 24. Jäätmete omadused(ohuklassid), millel alusel loetakse jäätmeid ohtlikeks jäätmeteks

Ohtlik omadus	Kirjeldus
HP 1	Plahvatusohtlik
HP 2	Oksüdeeriv
HP 3	Tuleohtlik
HP 4	Ärritav
HP 5	Mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav mürgisus
HP 6	Äge mürgisus
HP 7	Kantserogeenne
HP 8	Söövitav
HP 9	Nakkust tekitav
HP 10	Reproduktiivtoksiline
HP 11	Mutageenne
HP 12	Eraldab väga mürgiseid gaase
HP 13	Sensibiliseeriv
HP 14	Keskkonnaohtlik
HP 15	Jäätmed, millel võivad ilmnedä ülalnimetatud ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jäätmetes otseselt

Juhul, kui jäätmete ohtlike omaduste analüüsimisel neis sisalduvate ohtlike ainete alusel selgub, et jäätmetele ei saaks komisjoni määruse kriteeriumite järgi või katsete tulemusel ühtegi ohtlikku omadust määrata, tuleb kontrollida, et jäätmed ei sisalda teatud püsivaid orgaanilisi saasteaineid (POS) üle teatava piirväärtuse.

Püsivaid orgaanilisi saasteaineid käsitleva määruse (EÜ) nr 850/2004 [112] (edaspidi POS-määrus) üks eesmärk on rahvusvaheliste lepingute rakendamise kaudu keskkonna ja inimeste tervise kaitsmine teatud konkreetsete ainete eest, mida transporditakse üle rahvusvaheliste piiride nende allikatest kaugele, mis püsivad keskkonnas ja võivad bioakumuleeruda elusorganismides. Määruse kohaldamisala piirdub määruse lisades loetletud ainetega (Tabel 25).

POS-id on ühendid, mis oma mürgisuse, püsivuse ja bioakumuleeruvuse tõttu ohustavad inimese tervist ning kahjustavad muid elusorganisme ja ökosüsteeme. POS-se reguleerib POS-määrus, kus loetletud ainete tootmine, turuleviimine ja kasutamine ainena ning segude ja toodete koostisainena on keelatud. POS-määrusega sätestatakse neid aineid sisaldavatele jäätmetele eraldi käitlusnõuded.

Tabel 25. POS-määruses loetletud ained ja nende piirväärtused

Ained	Madalaim sisalduse piirväärtus ¹⁷
polüklooritud dibenso-p-doksiinid ja polüklooritud dibensofuraanid (PCDD/PCDF)	15 µg/kg
DDT (1,1,1-trikloro-2,2-bis(4-klorofenüül)etaan), klordaan, heksaklorotsükloheksaanid (sealhulgas lindaan), dieldriin, endriin, heptakloor, heksaklorobenseen, kloordekoon, aldriin, pentaklorobenseen, mireks, toksafeen, heksabromobifenüül või PCBd	50 mg/kg

POS-määruse IV lisas on ainetele kehtestatud nn madalaim sisalduse piirväärtus (Low POP content), mille ületamisel on keelatud taaskasutamise- või kõrvaldamistoimingud, mis võivad viia IV lisas loetletud ainete korduskasutamiseni, taaskasutamiseni või ringlussevõtuni. IV lisas kehtestatud madalaima sisalduse piirväärtuse ületamine ei tähenda aga, et alati on tegemist ohtlike jäätmetega. Jäätmete ohtlikeks klassifitseerimisel pööratakse eritähelpanu teatud pestitsiididele ja tööstuskemikaalidele.

7.1 Jäätmete klassifitseerimise meetodid

Jäätmed klassifitseeritakse ohtlikuks kui neil esineb mõni ohtlik omadus (HP). Ohtliku omaduse hindamisel kasutatakse potentsiaalsete ohtlike ainete loetelu, mis sisaldab ainete ühtlustatud klassifikatsiooni (CLP-määruse VI lisa) ja annab aluse ohuhindamiseks.

Ohuklassi määramine Jäätmete raamdirektiivi alusel on teadaoleva koostisega materjalide või toodete puhul suhteliselt lihtne ülesanne. Heterogeensete jäätmematerjalide ohtlikkuse klassifitseerimine on keerulisem, kuna suuresti ei ole teada, millistes keemilistes vormides on erinevad jäätmetes esinevad elemendid. Kui on olemas konkreetse aine ühtlustatud klassifikatsioon, on selle klassifikatsiooni teave ülimuslik ainerühma ühtlustatud klassifikatsioonidest saadud teabe suhtes. Kui ühtlustatud klassifikatsiooni ei ole olemas, siis soovitatakse jäätmete klassifitseerimiseks kasutada muid teabeallikaid, näiteks ohutuskarti, mis võimaldab, (geo)keemilistele teadmistele tuginedes anda eksperthinnangut ainete teadaolevate või eeldatavate omadustele ning käitumisele erinevates protsessides.

¹⁷ELT L 158 30.4.2004, lk 7 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A02004R0850-20150618>)

Kuna põlevkivituhkade koostises olevatel ainetel puudub ühtlustatud klassifikatsioon (v.a. raskmetallid), siis lähtuti ohulausete koodide määramisel Euroopa Kemikaaliagentuuri kodulehel¹⁸ toodud üksikainete (mineraalid ja jälgelemendid) ohulausete koodide nimekirjast, mis on koostatud tootjatelt ja importijatelt saadud klassifitseerimise ja märgistuse teabe põhjal.

Põlevkivituhas esinevad olulisemad ohtlikud ained, nende ohulaused ja tingimused ohtliku omaduse määramiseks on esitatud järgnevates tabelites (Tabel 26, Tabel 27 ja Tabel 28).

Tabel 26. Põlevkivituhas esinevate mineraalide ohulaused [113]

Mineraal	Ohulaused									
Kvarts	H302	H319	H332	H335	H341	H350	H351	H370	H372	H373
Dolomiit	H319									
Hematiit	H302	H312	H315	H318	H335	H336	H372			
Magnetiit	H302	H315	H319	H335	H373					
Lubi	H302	H314	H315	H318	H319	H335				
Portlandiit	H314	H315	H318	H335	H370	H373				
Vollastoniit	H319	H335	H373							

Tabel 27. Ohulaused summaarse sisalduse jaoks [32]

Mineraalid	Ohulaused	Tingimus
Kvarts, hematiit, magnetiit, lubi	H302	HP 6 kui sum $\geq 25\%$
Hematiit	H312	HP 6 kui sum $\geq 55\%$
Lubi, portlandiit	H314	HP 4 kui sum $\geq 1\%$ ja $< 5\%$ HP 8 kui sum $\geq 5\%$
Hematiit, magnetiit, lubi, portlandiit	H315	HP 4 kui sum $\geq 1\%$ ja $< 5\%$
Hematiit, lubi, portlandiit	H318	HP 4 kui sum $\geq 10\%$
Kvarts, dolomiit, magnetiit, lubi, vollastoniit	H319	HP 4 kui sum $\geq 20\%$
Kvarts	H332	HP 6 kui sum $\geq 22,5\%$

Tabel 28. Ohulaused üksikaine jaoks [32]

Mineraal	Ohulaused	Tingimus
Kvarts, hematiit, magnetiit, lubi, vollastoniit, portlandiit	H335	HP 5 kui $\geq 20\%$ (üksikaine)
Kvarts	H341	HP 11 kui $\geq 1,0\%$ (üksikaine)
Kvarts	H350	HP 7 kui $\geq 0,1\%$ (üksikaine)
Kvarts	H351	HP 7 kui $\geq 1,0\%$ (üksikaine)
Kvarts, portlandiit	H370	HP 5 kui $\geq 1\%$ (üksikaine)
Kvarts, hematiit	H372	HP 5 kui $\geq 1\%$ (üksikaine)
Kvarts, magnetiit, vollastoniit, portlandiit	H373	HP 5 kui $\geq 10\%$ (üksikaine)

¹⁸ <https://echa.europa.eu> kemikaaliteave

Jäätmete liigitamiseks mitte-ohtrikuks ei tohi ükski määruses loetletud 15-st HP-st olla ohupiirkonnas.

Selleks et otsustada, kas materjal kuulub ohuklassi HP 4, HP 6 või HP 8, tuleb kõigi tuvastatud (või eeldatavate) asjakohaste ainete kontsentratsioonide summat võrrelda määruses 1357/2014 määratletud sisalduse piirnormidega. HP 14 määrtlemiseks tuleb juhendada summeerimiskriteeriumitest, millele on osundatud vastavas EL komisjoni ettepanekus [109]. Soovituslikult rakendatakse nn välistavaid piirväärtusi (*cut-off values*), et välistada väga väikeses kontsentratsioonis olevad ained, millel ei ole olulist panust kontsentratsioonide summeerimisetulemusse.

Läviväärtused on määratletud ohuomaduste puhul, mille puhul kohaldatakse liidetavusekriteeriume. Kui üksikute ainete kontsentratsioonid ületavad piirväärtust, tuleb neid arvesse võtta asjaomaste ainete kontsentratsiooni summeerimisel. Sellest tulenevalt ei pea piirväärtusest allapoole jäävate üksikute ainete kontsentratsioone summeerimisel arvestama. Näiteks HP 8 korrosiooni piirväärtus on 1%, mis tähendab, et ainete, mille kontsentratsioon on alla 1%, olemasolu võib eirata. Järeldusi jäätme kuuluvusel HP 5, HP 7, HP 10, HP 11 ja HP 13 klassi saab teha asjaomaste ainete individuaalsete kontsentratsioonide võrdlemisel komisjoni määruses (EL) nr 1357/2014 [1] määratletud sisalduse piirnormidega. Siinjuures tuleb panna tähele, et vastavalt komisjoni otsusele 2000/532/EÜ [2], mida on muudetud komisjoni otsusega 2014/955/EL [114], siis kui jäätmete ohtlik omadus on hinnatud katse abil ja kasutades ohtlike ainete kontsentratsioone, vastavalt direktiivile 2008/98/EÜ [33] lisas III, on katsetulemused üliluslikud.

Ohuklasside HP 1, HP 2, HP 3, HP 9, HP 12 ja HP 15 hindamisel ei rakendata kontsentratsioonide piirväärtusi ja seda tehakse tavaliselt võimaliku füüsilise ohu hindamisega.

Jäätmete ohtlikkuse hindamisel peab arvestama, et materjal nn koguanalüüs näitab ainult elementaarse koostise kohta käivat teavet, kuid ei anna teavet nende elementide keemilistest ühenditest (esinemisvormidest). Kuna võimalike keemiliste ühendite arv on väga suur ja neid on raske tuvastada, siis lähtutakse "halvima stsenaariumi" printsiibist. Näiteks kui esinemisvorm ei ole teada siis tuhas leiduva vase puhul (Cu) eeldatakse, et see esineb kõige kriitilisema ühendi CuCl kujul. Kui sellisest lähenemisviisist tulenev klassifikatsioon ei ole liigitatav ohtlikuks (st sisaldused jäävad allapoole piirväärtusi), ei ole edasisi meetmeid vaja. Kui klassifikatsioon on ohtutsoonis, siis saab anda eksperthinnangu vase esinemisvormidele määratavas tuhas ning realistlikum hinnang Cu ohtlikkusele uuritavas materjalis.

Sellist ohtlikkuse klassifitseerimise strateegiat tuntakse **astmelise lähenemisviisina jäätmete liigitamisel** ning seda on soovitatav rakendada valdava enamuse jäätmematerjalide puhul. Selle

skeemi kohaselt on ASTE 1 tavaliselt üldine andmesõelumine, milles ohtlike omaduste asjakohasus (HP 1 kuni HP 15) hinnatakse jäätmete (nt põlevkivtuhkade) üldomaduste ja keemilise koostise seniste üldteadmiste alusel.

ASTE 2 analüüsib jäätme keemilist koostist ja keskendub nendele ohtlikele omadustele, mida ei ole esimese astme puhul välistatud. Teise sõelumise astme aluseks on esimesel astmel halvima juhu printsiip ja kõige ohtlikumate ainete selgitamine/analüüs, st eeldatakse et iga asjaomase elemendi sisaldused on seotud kõige ohtlikuma ühendiga nagu eelnevas näites. Juhul kui kahel ühendil on samasugune ohukood näiteks, kui kahel Pb ühendil on sama ohulause (kood), siis loetakse kõige ohtlikumaks see, mille kontsentratsioon ületab (kõige enam) seatud piirväärtust (või on piirväärtusele kõige lähemal).

Kui teisel astmel läbi viidud halvima stsenaariumi analüüs välistab mitmed ohuomadused ja/või ohtlikud ained, siis potentsiaalselt olemasolevaid ohtlike ained analüüsitakse järgmisel astmel. ASTE 3 kasutab järele jäänud ohuomaduste hindamiseks eksperthinnangut, mis sisaldab teadmisi ainete stabiilsusest, leostumisomadustest ja võib sisaldada nii geokeemilist modelleerimist kui ka kirjanduse meta-analüüsi.

7.2 Ohuklassid

Jäätmete klassifitseerimine ohtlikuks määratletakse 15 ohtlikku omaduse (ohuklassi – HP) alusel. Järgnevalt kirjeldatakse määruses loetletud ohuklasside peamisi omadusi.

7.2.1 Plahvatusohtlik HP 1

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 1 (plahvatusohtlik) määratletud järgmiselt:

„jätmed, mis võivad keemilise reaktsiooni teel tekitada gaasi sellise temperatuuri, rõhu ja kiirusega, mis kahjustab ümbruskonda; sealhulgas pürotehnilised jätmed, plahvatusohtlikud orgaanilise peroksiidi jätmed ja plahvatusohtlikud isereageerivad jätmed.“

Jäätmetega, mis sisaldavad Tabel 29 esitatud ohuklassi, -kategoriat ja ohulause koodiga aineid, võib teha katseid, et selgitada välja, kas neil on kõnealune ohtlik omadus või mitte. Teise võimalusena võib lihtsalt eeldada, et osutatud aineid sisaldavatel jäätmetel on ohtlikud omadused koodiga HP 1.

Tabelis loetletud aineid sisaldavaid jäätmeid tuleks plahvatusohtlikkuse osas katsetada vastavalt ECHA CLP-juhendile. ECHA CLP-juhend sisaldab eraldi osi järgmisi aineid sisaldavate segude katsetamiseks:

- orgaanilised peroksiidid
- isereageerivad ained ja segud
- lõhkeained.

Tabel 29. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 1 (plahvatusohtlik)

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus
Unst. Expl.	H200	Ebapüsivad lõhkeained
Expl. 1.1	H201	Plahvatusohtlik; massiplahvatusoht
Expl. 1.2	H202	Plahvatusohtlik; suur laialipaiskumisoht
Expl. 1.3	H203	Plahvatusohtlik; süttimis-, plahvatus- või laialipaiskumisoht
Expl. 1.4	H204	Süttimis- või laialipaiskumisoht
Self-react. A	H240	Kuumenemisel võib plahvatada
Org. Perox. A		
Self-react. B	H241	Kuumenemisel võib süttida või plahvatada
Org. Perox. B		

7.2.2 Oksüdeeriv HP 2

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 2 (oksüdeeriv) määratletud järgmiselt:

„jäätmel, mis võivad tavaliselt hapniku eraldamise kaudu põhjustada teise materjali põlemist või sellele kaasa aidata“.

Jäätmel, mis sisaldavad Tabel 30 esitatud ohuklassi, -kategooria ja ohulause koodiga aineid, võib katsetega kontrollida, et teha kindlaks, kas neil on kõnealune ohtlik omadus või mitte. Teise võimalusena võib lihtsalt eeldada, et osutatud aineid sisaldavatel jäätmetel on ohtlikud omadused koodiga HP 2.

Tabel 30. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 2 (oksüdeeriv)

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus
Ox. Gas 1	H270	Võib põhjustada süttimise või soodustada põlemist; oksüdeerija
Ox. Liq. 1	H271	Võib põhjustada süttimise või plahvatus-; tugev oksüdeerija
Ox. Sol. 1		
Ox. Liq. 2	H272	Võib soodustada põlemist; oksüdeerija
Ox. Liq. 3		
Ox. Sol. 2		
Ox. Sol. 3		

Kui

- jäätmed sisaldavad vaid üht nimetatud ainetest;
- ainele on CLP-määruse VI lisa 3. osa tabelis 3 määratud konkreetne sisalduse piirnorm. Tuleks märkida, et sellele ohuklassile ei kohaldata üldisi sisalduse piirnorme;
- aine sisaldus jäätmes jääb alla nimetatud piirnormi;

võib eeldada, et aine ei ole HP 2 alusel ohtlik.

7.2.3 Tuleohtlik HP 3

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 3 (tuleohtlik) määratletud kuues taandes järgmiselt:

- „tuleohtlikud vedeljäätmed: vedeljäätmed, mille leektäpp on alla 60 °C, või jäätmegaasiõli, diislikütus ja kerged kütteõlid, mille leektäpp on > 55 °C ja ≤ 75 °C;
- tuleohtlikud pürofoorsed vedel- ja tahked jäätmed: tahked või vedeljäätmed, mis võivad isegi väikeses koguses süttida viie minuti jooksul pärast kokkupuudet õhuga;
- tuleohtlikud tahked jäätmed: tahked jäätmed, mis on kergesti süttivad või võivad põhjustada süttimist või süttimisele kaasa aidata hõõrdumise tulemusena;
- tuleohtlikud gaasilised jäätmed: gaasilised jäätmed, mis on tuleohtlikud õhutemperatuuril 20 °C ja normaalrõhul 101,3 kPa;
- veega reageerivad jäätmed: jäätmed, mis kokkupuutel veega eraldavad ohtlikus koguses tuleohtlikke gaase;
- muud tuleohtlikud jäätmed: tuleohtlikud aerosoolid, tuleohtlikud isekuumenevad jäätmed, tuleohtlikud orgaanilised peroksiidid ja tuleohtlikud isereageerivad jäätmed.“

Jäätmetega, mis sisaldavad vastavas Tabel 31 esitatud ohuklassi, -kategooria ja ohulause koodiga aineid, võib teha katseid, et selgitada välja, kas neil on kõnealune ohtlik omadus või mitte. Teise võimalusena võib lihtsalt eeldada, et osutatud aineid sisaldavad (suuremas koguses kui jäägid) jäätmed on ohtlikud koodiga HP 2.

Kui jäätmed sisaldavad koodiga H220 või H221 liigitatud ainet, on võimalik arvutada, kas jäätmetel on ohtlik omadus HP 3 või mitte (neljas taane). Arvutusmeetod on sätestatud standardis ISO 10156 ning seda tuleks kohaldada kooskõlas ECHA CLP-juhendiga.

Kui jäätmed sisaldavad H260 või H261 koodiga ainet, st ainet, mis võib vabastada väga tuleohtlikku gaasi kiirusega rohkem kui 1 liiter gaasi aine kg kohta tunnis, kui sellele lisada vett, on võimalik välja arvutada aine miinimumsisaldus jäätmetes, mis muudaks need ohtlikuks HP 3 alusel (viies taane). Kui

sisaldus on väiksem, ei loeta jäätmeid HP 3 alusel ohtlikuks (viies taane). Kui sisaldus on normist suurem või sellega võrdne, loetakse jäätmed HP 3 alusel ohtlikuks või tehakse nendega katseid.

Tabel 31. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 3 (tuleohtlik)

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus
Flam. Gas 1	H220	Eriti tuleohtlik gaas
Flam. gaas 2	H221	Tuleohtlik gaas
Aerosol 1	H222	Eriti tuleohtlik aerosool
Aerosol 2	H223	Tuleohtlik aerosool
Flam. Liq. 1	H224	Eriti tuleohtlik vedelik ja aur
Flam. Liq. 2	H225	Väga tuleohtlik vedelik ja aur
Flam. Liq. 3	H226	Tuleohtlik vedelik ja aur
Flam. Sol. 1	H228	Tuleohtlik tahke aine
Flam. Sol. 2		
Self-react. CD	H242	Kuumenemisel võib süttida
Self-react. EF		
Org. Perox. CD		
Org. Perox. EF	H250	Kokkupuutel õhuga süttib iseenesest
Pyr. Liq. 1		
Pyr. Sol. 1		
Self-heat. 1	H251	Isekuumenev, võib süttida
Self-heat. 2	H252	Suurtes kogustes isekuumenev, võib süttida
Water-react. 1	H260	Kokkupuutel veega eraldab tuleohtlikke gaase, mis võivad iseenesest süttida
Water-react. 2	H261	Kokkupuutel veega eraldab tuleohtlikke gaase
Water-react. 3		

7.2.4 Ärritav — nahka ärritav ja silmi kahjustav HP 4

Jäätmete raamdirektiivi III lisas esitatud määratlus ja täiendav kirjeldus Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 4 (ärritav) määratletud järgmiselt:

„jäätmed, mis kokkupuutel võivad põhjustada nahaärritust või kahjustada silma“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

- Kui jäätmed sisaldavad üle künnise üht või mitut ainet, mis on klassifitseeritud ühega järgmistest (Tabel 32) ohuklassi ja -kategooria koodidest ja ohulausete koodidest ning üks või mitu järgmistest sisalduse piirmääradest on ületatud või on sisaldus võrdne piirmääraga, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikuks koodiga HP 4.
- Et anda hinnang „nahka söövitav 1A, B, C (H314)“, nahka ärritav 2 (H315), silmakahjustus 1 (H318) ja silmade ärritus 2 (H319) on sisalduse piirmäär 1%.

- Kui kõigi selliste ainete sisalduse summa, mis on klassifitseeritud kui nahka söövitav 1A (H314), on 1% või üle selle, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikuks vastavalt kategooriale HP 4.
- Kui kõigi selliste ainete sisalduste summa, mis on klassifitseeritud kui H318, on 10% või üle selle, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikeks koodiga HP 4.
- Kui kõigi selliste ainete sisalduste summa, mis on klassifitseeritud kui H315 ja H319, on 20% või üle selle, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikeks koodiga HP 4.
- Tuleb tähele panna, et jäätmed, mis sisaldavad aineid, mis on klassifitseeritud kui H 314 (nahasöövitav 1A, 1B või 1C) määral, mis on 5% või üle selle, klassifitseeritakse ohtlikeks koodiga HP 8. Koodi HP 4 ei kohaldata, kui jäätmed on klassifitseeritud koodiga HP 8.

Tabel 32. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 4

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (ained kokku)
Skin Corr. 1A	H314	Põhjustab rasket nahasöövitust ja silmakahjustusi	≥ 1 % ja < 5 %
Eye Dam. 1	H318	Põhjustab raskeid silmakahjustusi	≥ 10 %
Skin irrit. 2	H315	Põhjustab nahaärritust	
Eye irrit. 2	H319	Põhjustab tugevat silmade ärritust	≥ 20 %

Kui jäätmed sisaldavad koodiga H315 ja/või H319 aineid ning nende summaarne sisaldus ületab piirnormi, liigitatakse jäätmed koodi HP 4 alusel ohtlikuks.

Kui tegemist on jäätmetega, mis sisaldavad koodiga H314 Skin Corr.1A, 1B või 1C ainet ≥ 5%, vt ka omadust HP 8 (söövitav), siis kõnealused jäätmed tuleks liigitada ohtlikeks koodiga HP 8, mitte HP 4.

Eespool nimetatud sisalduse piirnorme kohaldatakse teadaolevatele jäätmekomponentidele. Kõiki teatavates jäätmetes leiduvaid aineid võib olla keeruline välja selgitada. Kui jäätmeid ei liigitata selles teadaolevalt sisalduvate ainete tõttu ärritavaks ning mõned ained on veel kindlaks tegemata, tuleks hindamisel kasutada jäätmete pH-väärtust.

Jäätmed, mille pH on ≤ 2 või ≥ 11,5, tuleks üldjuhul liigitada koodiga HP 8 (söövitav), v.a juhul, kui: puhvermahtuvuse katse näitab, et söövitavaks liigitamine ei ole põhjendatud, ja täiendavad in vitro katsed või inimeste kogemus ja loomadega tehtud katsed ühekordsel või korduval kokkupuutel kinnitavad, et ärritavaks või söövitavaks liigitamine ei ole asjakohane.

7.2.5 Mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav mürgisus HP 5

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 5 (mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav mürgisus) määratletud järgmiselt:

„jäätmel, mis võivad põhjustada mürgisust sihtelundi suhtes kas ühekordsel või korduval kokkupuutel, või mis põhjustavad ägedat mürgisust sissehingamisel“.

Kui jäätmel sisaldavad üht või mitut ainet, mis on klassifitseeritud ühe või mitmega järgmistest tabelis (Tabel 33) esitatud ohuklassi ja -kategorია ja ohulausete koodidest, ning üks või mitu sisalduse piirnormidest on ületatud või on sisaldus võrdne sisalduse piirnormiga, klassifitseeritakse jäätmel ohtlikeks koodiga HP 5. Kui jäätmel sisaldavad aineid, mis on klassifitseeritud mürgiseks sihtelundi suhtes, tuleb jäätmel klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 5, kui jäätmel sisaldavad ühtainust ainet määral, mis on võrdne sisalduse piirnormiga või ületab seda.

Kui jäätmel sisaldavad üht või mitut ainet, mis on klassifitseeritud kui „Hingamiskahjustus 1“ ning nende ainete sisalduste summa on võrdne sisalduse piirnormiga või ületab seda, tuleb jäätmel klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 5 ainult juhul, kui üldine kinemaatiline viskoossus (40 °C juures) ei ületa 20,5 mm²/s.

Tabel 33. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategorია kood(id) ja ohulause(te) koodid ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 5

Ohuklassi ja -kategorია kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm
STOT SE 1	H370	Kahjustab elundeid	≥ 1 % (üksikaine)
STOT SE 2	H371	Võib kahjustada elundeid	≥ 10 % (üksikaine)
STOT SE 3	H335	Võib põhjustada hingamisteede ärritust	≥ 20 % (üksikaine)
STOT RE 1	H372	Kahjustab elundeid pikaajalisel või korduval kokkupuutel	≥ 1 % (üksikaine)
STOT RE 2	H373	Võib kahjustada elundeid pikaajalisel või korduval kokkupuutel	≥ 10 % (üksikaine)
Asp. Tox. 1	H304	Allaneelamisel või hingamisteedesse sattumisel võib olla surmav	≥ 10 % (kokku)

7.2.6 Äge mürgisus HP 6

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 6 (äge mürgisus) määratletud järgmiselt: „jäätmel, mis võivad põhjustada ägedat toksilist mõju suukaudsel või nahakaudsel manustamisel või sissehingamisel.“

Hindamisel kohaldatakse järgmisi läviväärtusi (Tabel 34):

- H300, H310, H330, H301, H311 ja H331 puhul: 0,1%
- H302, H312, H332 puhul: 1%.

Üksikuid aineid, mille sisaldus on selle aine ohulause koodi puhul kohaldatavast läviväärtusest väiksem, ei võeta kõnealuse ohuklassi ja kategooria koodiga ainete sisalduste summa arvutamisel arvesse.

Tabel 34. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 6

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (ainete summa)
Acute Tox.1 (Oral)	H300	Allaneelamisel surmav	≥ 0,1 %
Acute Tox. 2 (Oral)	H300	Allaneelamisel surmav	≥ 0,25 %
Acute Tox. 3 (Oral)	H301	Allaneelamisel mürgine	≥ 5 %
Acute Tox.4 (Oral)	H302	Allaneelamisel kahjulik	≥ 25 %
Acute Tox.1 (Dermal)	H310	Nahale sattumisel surmav	≥ 0,25 %
Acute Tox.2 (Dermal)	H310	Nahale sattumisel surmav	≥ 2,5 %
Acute Tox.3 (Dermal)	H311	Nahale sattumisel mürgine	≥ 15 %
Acute Tox. 4 (Dermal)	H312	Nahale sattumisel kahjulik	≥ 55 %
Acute Tox.1 (Inhal.)	H330	Sissehingamisel surmav	≥ 0,1 %
Acute Tox.2 (Inhal.)	H330	Sissehingamisel surmav	≥ 0,5 %
Acute Tox. 3 (Inhal.)	H331	Sissehingamisel mürgine	≥ 3,5 %
Acute Tox. 4 (Inhal.)	H332	Sissehingamisel kahjulik	≥ 22,5 %

7.2.7 Kantserogeenne HP 7

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 7 (kantserogeenne) määratletud järgmiselt:

„jätmed, mis tekitavad vähktõbe või suurendavad selle esinemissagedust“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Kui jätmed sisaldavad ainet, mis on klassifitseeritud ühega tabelis esitatud ohuklassi ja -kategooria koodidest ja ohulausete koodidest, ning üks või mitu Tabel 35 esitatud sisalduse piirnormidest on ületatud või on sisaldus võrdne sisalduse piirnormiga, klassifitseeritakse jätmed ohtlikeks koodiga HP 7. Kui jätmed sisaldavad rohkem kui üht ainet, mis on klassifitseeritud kantserogeenseks, peab ühtainust ainet leiduma sisalduse piirnormiga võrdsel määral või üle selle, et jätmeid saaks klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 7.“

Tabel 35. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 7

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (üksik aine)
Carc. 1A Carc. 1B	H350	Võib põhjustada vähktõbe	≥ 0,1 %
Carc. 2	H351	Arvatavasti põhjustab vähktõbe	≥ 1,0 %

7.2.8 Söövitav HP 8

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 8 (söövitav) määratletud järgmiselt:

„Jäätmed, mis võivad kokkupuutel põhjustada naha söövituse“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Kui jäätmed sisaldavad üht või mitut ainet, millel on klassifikatsioon „Nahasöövitus 1A, 1B või 1C (H314)“ ja nende ainete sisalduste summa ületab 5% või on sellega võrdne (Tabel 36), tuleb jäätmed klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 8.“

Tabel 36. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategorია kood(id) ja ohulause(te) koodid ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 8

Ohuklassi ja -kategorია kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (ainete summa)
Skin corr. 1A, 1B, or 1C	H314	Põhjustab rasket nahasöövitust ja silmakahjustusi	≥ 5 %

Hindamisel kohaldatakse järgmisi läviväärtusi:

H314 puhul: 1%. Üksikut ainet, mille sisaldus on alla selle läviväärtuse, koodi H314 puhul määratud summaarses sisalduses arvesse ei võeta.

7.2.9 Nakkust tekitav HP 9

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 9 (nakkust tekitav) määratletud järgmiselt:

„Jäätmed, mis sisaldavad mikroorganisme või nende toksiine, mida teatakse kindlasti või tõenäoliselt põhjustavat inimeste või muude elusorganismide haigestumist“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Koodi HP 9 määramine otsustatakse viitedokumentides või liikmesriikide õigusaktides kehtestatud eeskirjade alusel“.

7.2.10 Reproduktiivtoksiline HP 10

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 10 (reproduktiivtoksiline) määratletud järgmiselt:

„Jäätmed, millel on kahjulik toime täiskasvanud meeste ja naiste ning isas- ja emasloomade suguvõimele ja viljakusele, samuti järglaste arengut mõjutavat mürgisus (arengutoksilisus)“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Kui jäätmed sisaldavad ainet, mis on klassifitseeritud ühega vastavas Tabel 37 esitatud ohuklassi ja -kategooria koodidest ja ohulausete koodidest ning üks tabelis esitatud sisalduse piirnormidest on ületatud või on sisaldus võrdne sisalduse piirnormiga, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikuks koodiga HP 10. Kui jäätmed sisaldavad rohkem kui üht ainet, mis on klassifitseeritud reproduktiivtoksiliseks, peab ühtainust ainet leiduma sisalduse piirnormiga võrdsel määral või üle selle, et jäätmeid saaks klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 10.“

Tabel 37. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) koodid ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 10

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (üksik aine)
Repr. 1A Repr. 1B	H360	Võib kahjustada viljakust või loodet	≥ 0,3 %
Repr. 2	H361	Arvatavasti kahjustab viljakust või loodet	≥ 3,0 %

7.2.11 Mutageenne HP 11

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 11 (mutageenne) määratletud järgmiselt:

„jäätmed, mis võivad põhjustada mutatsiooni – püsivat muutust raku geneetilise materjali koguses või struktuuris“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Kui jäätmed sisaldavad ainet, mis on klassifitseeritud ühega Tabel 38 esitatud ohuklassi ja -kategooria koodidest ja ohulausete koodidest ning üks tabelis esitatud sisalduse piirnormidest on ületatud või on sisaldus võrdne sisalduse piirnormiga, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikuks koodiga HP 11. Kui jäätmed sisaldavad rohkem kui üht ainet, mis on klassifitseeritud mutageenseks, peab ühtainust sellist ainet leiduma sisalduse piinormiga võrdsel määral või üle selle, et jäätmeid saaks klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 11.“

Tabel 38. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 11 (mutageenne)

Ohuklassi ja -kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (üksik aine)
Muta. 1A Muta. 1B	H340	Võib põhjustada geneetilisi defekte	≥ 0,1 %
Muta. 2	H341	Arvatavasti põhjustab geneetilisi defekte	≥ 1,0 %

7.2.12 Eraldab väga mürgiseid gaase HP 12

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 12 (eraldab väga mürgiseid gaase) määratletud järgmiselt:

„jäätmel, mille kokkupuutel vee, õhu või happega tekivad väga mürgised gaasid (Äge mürgisus 1, 2 või 3)“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Kui jäätmel sisaldavad ainet, millele on määratud üks järgmistest täiendava ohu koodidest EUH 029, EUH 031 ja EUH 032 (Tabel 39), klassifitseeritakse jäätmel katsemeetodite või juhendite kohaselt ohtlikeks koodiga HP 12“.

Tabel 39. Jäätmete koostisosade ohulauseid ja täiendava ohuteabe koodid jäätmete klassifitseerimiseks ohtlikeks koodiga HP 12 (eraldab väga mürgiseid gaase)

Ohulause	Ohulause kood(id)
Kokkupuutel veega eraldab mürgiseid gaase	EUH029
Kokkupuutel happega eraldab mürgiseid gaase	EUH031
Kokkupuutel happega eraldab väga mürgiseid gaase	EUH032

7.2.13 Sensibiliseeriv HP 13

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 13 (sensibiliseeriv) määratletud järgmiselt:

„jäätmel, mis sisaldavad üht või mitut ainet, millel on teadaolevalt ülitundlikkust tekitav toime nahale või hingamisteedele“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Kui jäätmel sisaldavad ainet, mis on klassifitseeritud kui sensibiliseeriv ning sellele on määratud üks ohulause koodidest H317 või H334 ning jäätmetes sisalduva üheainsa aine sisaldus on võrdne sisalduse piirnormiga 10% või ületab seda, klassifitseeritakse jäätmel ohtlikeks koodiga HP 13.“ (Tabel 40).

Tabel 40. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategorია kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning vastavad sisalduse piirnormid jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 13 (sensibiliseeriv)

Ohuklassi ja -kategorია kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (üksik aine)
Skin Sens. 1, 1A ja 1B	H317	Võib põhjustada allergilist nahareaktsiooni	≥ 10 %
Resp. Sens. 1, 1A ja 1B	H334	Sissehingamisel võib põhjustada allergia- või astma sümptomeid või hingamisraskusi	≥ 10 %

7.2.14 Keskkonnaohtlik HP 14

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 14 (keskkonnaohtlik) määratletud järgmiselt:

„Jäätmed, mis põhjustavad või võivad põhjustada kas vahetult või pikema aja jooksul ohtu ühele või mitmele keskkonnaelemendile“.

HP 14 puhul eeldatakse, et võimalik keskkonnaohtlikkus on jäätmete olemuslik omadus ning hinnatakse, kas jäätmed põhjustavad või võivad põhjustada vahetult või pikema aja jooksul ohtu ühele või mitmele keskkonnaelemendile.

Kuna HP 14 (keskkonnaohtlik) hindamise täpne meetod sätestati alles nõukogu määruses (EL) 2017/997, peaksid ametiasutused ja ettevõtjad enne nimetatud määruse kohaldamise kuupäeva (5. juuli 2018) lähtuma HP 14 (keskkonnaohtlik) hindamisel oma liikmesriigis kehtivatest eeskirjadest.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt:

„Jäätmed, mis vastavad ühele järgmistest tingimustest, tuleb klassifitseerida ohtlikuks koodiga HP 14 (vt ka Tabel 41).

- Jäätmed, mis sisaldavad ainet, mis vastavalt Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrusele (EÜ) nr 1272/2008 [109] on klassifitseeritud osoonihile ohtlikuks, ainele on määratud ohulause kood H420 ja sellise aine kontsentratsioon võrdub kontsentratsiooni piirnormiga 0,1% või ületab seda. $[\sum c(420) \geq 0,1\%]$
- Jäätmed, mis sisaldavad üht või mitut ainet, mis vastavalt määrusele (EÜ) nr 1272/2008 [109] on klassifitseeritud ohtliku ägeda ohu kategooriasse, ainele või ainetele on määratud ohulause kood H400 ja selliste ainete kontsentratsioonide summa võrdub kontsentratsiooni piirnormiga 25% või ületab seda. Selliste ainete suhtes kohaldatakse läviväärtust 0,1%. $[\sum c(400) \geq 25\%]$
- Jäätmed, mis sisaldavad üht või mitut ainet, mis vastavalt määrusele (EÜ) nr 1272/2008 [109] on klassifitseeritud veekeskkonnale ohtliku kroonilise ohu 1., 2. või 3. kategooriasse, ainele või ainetele on määratud ohulause kood(id) H410, H411 või H412 ning kõigi veekeskkonnale ohtliku kroonilise ohu 1. kategooriasse (H410) klassifitseeritud ainete kontsentratsioonide summa, mis on korrutatud 100-ga, ja liidetud kõigi veekeskkonnale ohtliku kroonilise ohu 2. kategooriasse (H411) klassifitseeritud ainete kontsentratsioonide summale, mis on korrutatud 10-ga, ja liidetud kõigi veekeskkonnale ohtliku kroonilise ohu 3. kategooriasse (H412) klassifitseeritud ainete kontsentratsioonide summale, võrdub kontsentratsiooni piirnormiga 25% või ületab seda. Koodiga H410 klassifitseeritud ainete suhtes kohaldatakse läviväärtust 0,1% ja koodiga H411 või H412 klassifitseeritud ainete suhtes kohaldatakse läviväärtust 1%. $[100 \times \sum c(410) + 10 \times \sum c(411) + \sum c(412) \geq 25\%]$

- Jäätmed, mis sisaldavad üht või mitut ainet, mis vastavalt määrusele (EÜ) nr 1272/2008 [109] on klassifitseeritud veekeskkonnale ohtliku kroonilise ohu 1., 2., 3. või 4. kategooriasse, ainele või ainetele on määratud ohulausete kood(id) H410, H411, H412 või H413 ja selliste ainete kontsentratsioonide summa võrdub kontsentratsiooni piirnormiga 25% või ületab seda. Koodiga H410 klassifitseeritud ainete suhtes kohaldatakse läviväärtust 0,1% ja koodiga H411, H412 või H413 klassifitseeritud ainete suhtes kohaldatakse läviväärtust 1%. $[\sum c(410) + \sum c(411) + \sum c(412) + \sum c(413) \geq 25\%]$

kus Σ = summa ja c = ainete kontsentratsioonid.“

Jäätmed, mis vastavad ükskõik millisele neljas taandes loetletud tingimusele, tuleks liigitada ohtlikuks koodiga HP 14.

Tuleks märkida, et nelja taanet – kaasa arvatud kolmas ja neljas – tuleks kohaldada samaaegselt: neid ei tuleks käsitada „variantidena“, mille hulgast võib valida ühe. Teisisõnu, kui ükskõik millises taandes/valemis osutatud sisalduse piirnorm on ületatud, liigitatakse jäätmed keskkonnaohtlikuks. Seega tuleb koodiga H410, H411 ja H412 liigitatud aineid sisaldavad jäätmed klassifitseerida kolmanda taande alusel igal juhul keskkonnaohtlikuks (olenemata sellest, kas nad sisaldavad ka kategooriasse H413 kuuluvat ainet).

Tabel 41. Jäätmete koostisosade ohuklassi ja -kategooria kood(id) ja ohulause(te) kood(id) ning iga ohulause koodiga liigitatud aine vastav sisalduse piirnorm jäätmete liigitamiseks ohtlikeks koodiga HP 14 (keskkonnaohtlik)

Ohuklassi ja - kategooria kood(id)	Ohulause kood(id)	Kirjeldus	Sisalduse piirnorm (üksikaine või ainete summa)
Ozone 1	H420	Kahjustab tervist ja keskkonda, hävitades kõrgatmosfääris asuvat osoonikihti	$\geq 0,1 \%$
Aquatic Acute 1	H400	Väga mürgine veeorganismidele	$\geq 25 \%$
Aquatic Chronic 1	H410	Väga mürgine veeorganismidele, pikaajaline toime	$\geq 0,25 \%$
Aquatic Chronic 2	H411	Mürgine veeorganismidele, pikaajaline toime	$\geq 2,5 \%$
Aquatic Chronic 3	H412	Ohtlik veeorganismidele, pikaajaline toime	$\geq 25 \%$
Aquatic Chronic 4	H413	Võib avaldada veeorganismidele pikaajalist kahjulikku toimet	$\geq 25 \%$

Hindamisel kohaldatakse järgmisi läviväärtusi:

- H420, H400, H410 puhul: 0,1%
- H411, H412, H413 puhul: 1%.

Kui aine sisaldus on selle aine ohulause koodile määratud läviväärtusest väiksem, siis seda vastava ohuklassi ja kategooria koodi puhul sisalduste summa arvutamisel arvesse ei võeta.

Uuringus [115], kus võrreldi erinevatele jäätmetele erinevate summeerimise meetoditega (Tabel 42) ja biotestidega saadud HP 14 ohuhinnanguid, leiti, et summeerimise meetodid 1 ja 3 annavad biotestidega analoogseid tulemusi.

Kasutatud meetod 1 on analoogne sellele, mis on toodud EL-i regulatsioonis 1272/2008 [109]. Euroopa Komisjoni poolt tellitud uurimuses [116] saadud tulemuste põhjal annavad töö autorid soovitusel lähtuda kaheastmelisest strateegiast. Esiteks kasutada summeerimise meetodit. Teiseks, kui jäädet ei saa klassifitseerida esimese astme järgi (kui nt koostis pole täpselt teada), kasutada üht või mitut biotesti. Biotestide kasutamisel on peamiseks probleemiks, et puuduvad ühtlustatud ja seadusandluses sätestatud piirväärtused (vt nt Tabel 43). Lisaks ei ole määratletud, milline peaks olema vajalik biotestide kogum.

Tabel 42. HP 14 hindamiseks kasutatavad summeerimise meetodid [115]

<p>Meetod 1</p> <p>Kui $c(420) \geq 0,1\%$ või $\sum c(400) \geq 25\%$ või $100 \times \sum c(410) + 10 \times \sum c(411) \times \sum c(412) \geq 25\%$ või $\sum c(410) + \sum c(411) + \sum c(412) + \sum c(413) \geq 25\%$</p> <p style="text-align: center;">↓ OHTLIK JÄÄDE</p>	<p>Meetod 2</p> <p>Kui $c(420) \geq 0,1\%$ või $c(400) \geq \frac{0,1}{M}\%$ ja $\sum [c(400) \times M] \geq 25\%$ või $c(410) \geq \frac{0,1}{M}\%$ ja $c(411) \geq 1\%$ ja või $\sum [M \times 10 \times c(410)] + \sum c(411) \geq 25\%$</p> <p style="text-align: center;">↓ OHTLIK JÄÄDE</p>
<p>Meetod 3</p> <p>Kui $c(420) \geq 0,1\%$ või $\sum c(410) \geq 0,1\%$ või $\sum c(411) \geq 2,5\%$ või $\sum c(412) \geq 25\%$ või $\sum c(413) \geq 25\%$</p> <p style="text-align: center;">↓ OHTLIK JÄÄDE</p>	<p>Meetod 4</p> <p>Kui $c(420) \geq 0,1\%$ või $\sum c(410) \geq \frac{2,5}{M}\%$ või $\sum c(411) \geq 2,5\%$</p> <p style="text-align: center;">↓ OHTLIK JÄÄDE</p>

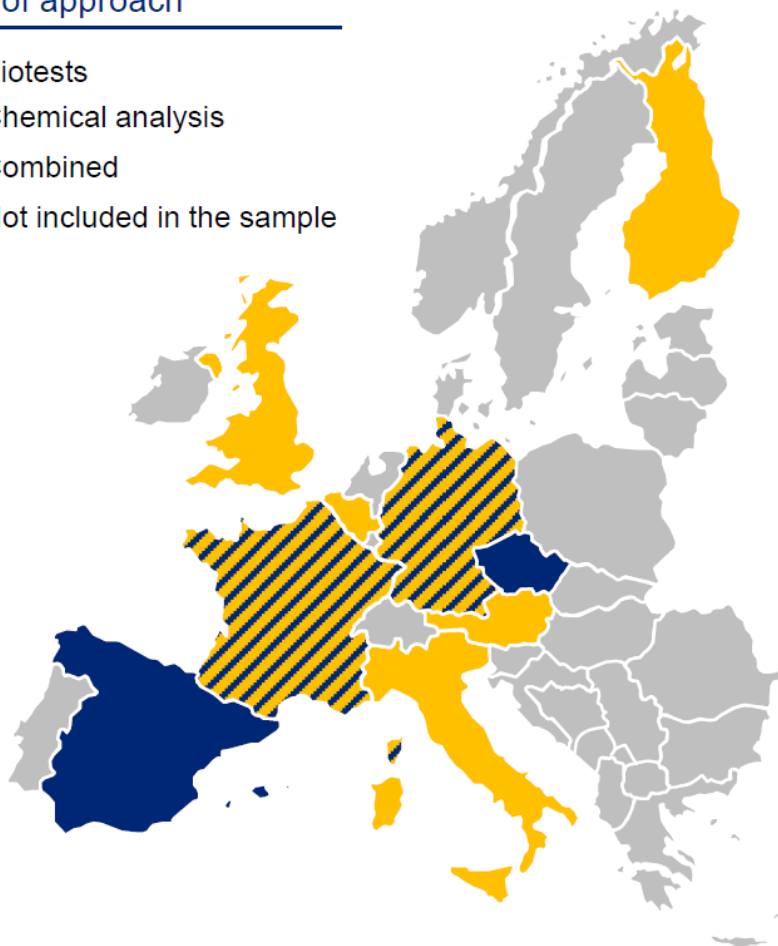
Tabel 43. Erinevate EL-i liikmesriikide poolt ohtliku omaduse HP 14 hindamiseks sätestatud *Daphnia magna* testi piirväärtused [116]

Liikmesriik	Standard	Testi kestvus	Tulemuse väljendus	Piirväärtus
Prantsusmaa		24 või 48 tundi		10% (mahu) ehk 100 ml/l
Hispaania	ISO 6341		EC50	750 mg/l
Saksamaa		48 tundi		10% (mahu) ehk 100 ml/l
Tšehhi Vabariik				10 ml/l ehk 1% (mahu)

Samas uuringus on vaadeldud osalenud riikide poolt rakendatavat lähenemist HP 14 hindamisel. Soome, Austria, Belgia, Itaalia ja Suurbritannia kasutavad summeerimise meetodit. Hispaania ja Tšehhi kasutavad bioteste ning Saksamaa ja Prantsusmaa summeerimise meetodit kombineeritult biotestidega (Joonis 38). Kombineeritud meetodi puhul on peamisteks probleemideks nimetatud piirväärtuste puudumist biotestides ning seda, et summeerimise ja biotesti meetodid põhinevad erinevatel alustel.

Type of approach

- Biotests
- Chemical analysis
- Combined
- Not included in the sample



Joonis 38. Erinevates EL riikides kasutatav HP 14 hindamise meetodikad [116]

Biotestide alusel ohtliku omaduse HP 14 hindamine hõlmab erinevatel vee- ja mullaorganismidel põhinevaid analüüse (nt Tabel 44), millele eelneb testitava jäätme ettevalmistus. Ettevalmistuse

protseduur hõlmab enamasti leostamist (vedeliku ja tahke materjali suhe 10:1; standard EN 12457). Kasutatavad biotestid sõltuvad konkreetsest liikmesriigist.

Tabel 44. Mõndades EL-i liikmesriikides ohtliku omaduse HP 14 hindamiseks kasutatavad biotestid [116]

Liikmesriik	Vesifaasi testid		Maismaa testid	
	Organism	Standard	Organism	Standard
Tšehhi	<i>Daphnia magna</i>	ISO 6341		
Vabariik	<i>Sinapis alba</i>	Tšehhi juhendmaterjalid		
	<i>Desmodesmus subspicatus</i>	ISO 8692		
	<i>Poecilia reticulata</i>	ISO 7346-2		
Prantsusmaa	<i>Daphnia magna</i> (akuutne)	ISO 6341	<i>E. fetida</i>	ISO 17512-1
	<i>Vibrio fischeri</i>	ISO 11348-3	<i>Avena sativa / Brassica rapa</i>	ISO 11269-2
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	NF EN ISO 8692	<i>Arthrobacter globiformis</i>	ISO/DIS 18187
Hispaania	<i>Vibrio fischeri</i> VÕI <i>Daphnia magna</i>	ISO 11348 ISO 6341		
Saksamaa	<i>Daphnia magna</i> (akuutne)	ISO 6341	<i>E. fetida</i> (krooniline)	ISO 12268-1
	<i>Daphnia magna</i> (krooniline)	ISO 10706	<i>Brassica rapa</i>	ISO 11269-2
	<i>Vibrio fischeri</i>	ISO 11348-1/2/3	<i>Arthrobacter globiformis</i>	ISO/DIS 18187
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata / Desmodesmus subspicatus Lemna minor</i>	NF EN ISO 8692 ISO 20079	<i>Folsomia candida</i> (krooniline)	ISO 11267

7.2.15 Jäätmed, millel võivad ilmned ülalnimetatud ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jäätmetes otseselt HP 15

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 15 määratletud järgmiselt: Jäätmed, millel võivad ilmned ülalnimetatud ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jäätmetes otseselt. Kui jäätmed sisaldavad üht või mitut ainet, mis on klassifitseeritud ühe alljärgnevas Tabel 45 esitatud ohulause või täiendava ohuteabe koodiga, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikeks koodiga HP 15, välja arvatud juhul, kui jäätmed on sellisel kujul, et need ei saa mingil juhul olla plahvatusohtlikud ega potentsiaalselt plahvatusohtlikud.

Liikmesriigid võivad täiendavalt kirjeldada jäätmeid ohtlikena koodiga HP 15 muude kohaldatavate kriteeriumide alusel, näiteks leostumise hindamise alusel.

Tabel 45. Jäätmete koostisosade ohulaused ja täiendava ohuteabe koodid jäätmete klassifitseerimiseks ohtlikeks koodiga HP 15

Ohulause	Ohulause kood(id)
Süttimise korral massiplahvatusoht	H205
Plahvatusohtlik kuivana	EUH001
Võib moodustada plahvatusohtlikke peroksiide	EUH019
Plahvatusohtlik kuumutamisel kinnises mahutis	EUH044

8 Eesti põlevkivituhkade võrdlus liigiti HP-dega

8.1 Plahvatusohtlik HP 1

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 1 (plahvatusohtlik) määratletud järgmiselt: „jäätmel, mis võivad keemilise reaktsiooni teel tekitada gaasi sellise temperatuuri, rõhu ja kiirusega, mis kahjustab ümbruskonda; sealhulgas pürotehnilised jäätmel, plahvatusohtlikud orgaanilise peroksiidi jäätmel ja plahvatusohtlikud isereageerivad jäätmel.“

Põlevkivituhkasid ei liigitata ohtlikeks koodiga HP 1. Põlevkivituha erinevad liigid ei sisalda keemilisi ühendeid, mis võiksid keemilise reaktsiooni tulemusena tekitada plahvatusohtliku olukorra. Samuti on elektrijaamades tekkivas põlevkivituhas orgaaniliste ainete osakaal väga madal (<1%, enamasti <0,1%). Lisaks on tuha mineraalses koostises põhikomponentidena aineid, mida tuntakse plahvatuse toimet vähendavatena [nt CaCO₃].

8.2 Oksüdeeriv HP 2

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 2 (oksüdeeriv) määratletud järgmiselt:

„jäätmel, mis võivad tavaliselt hapniku eraldamise kaudu põhjustada teise materjali põlemist või sellele kaasa aidata“.

Põlevkivituhkasid ei liigitata ohtlikeks koodiga HP 2. Põlevkivituhk ei sisalda ained, mis võiksid tekitada oksüdeerumist, mis võiks viia põlemisele või aidata kaasa põlemisele.

8.3 Tuleohtlik HP 3

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 3 (tuleohtlik) määratletud kuues taandes järgmiselt: „tuleohtlikud vedeljäätmel: vedeljäätmel, mille leektäpp on alla 60 °C, või jäätmegaasiõli, diislikütus ja kerged kütteeõlid, mille leektäpp on >55 °C ja ≤75 °C; tuleohtlikud pürofoorsed vedel- ja tahked jäätmel: tahked või vedeljäätmel, mis võivad isegi väikeses koguses süttida viie minuti jooksul pärast kokkupuudet õhuga; tuleohtlikud tahked jäätmel: tahked jäätmel, mis on kergesti süttivad või võivad põhjustada süttimist või süttimisele kaasa aidata hõõrdumise tulemusena; tuleohtlikud gaasilised jäätmel: gaasilised jäätmel, mis on tuleohtlikud õhutemperatuuril 20 °C ja normaalrõhul 101,3 kPa; veega reageerivad jäätmel: jäätmel, mis kokkupuutel veega eraldavad ohtlikus koguses tuleohtlikke gaase; muud tuleohtlikud jäätmel: tuleohtlikud aerosoolid, tuleohtlikud isekuumevad jäätmel, tuleohtlikud orgaanilised peroksiidid ja tuleohtlikud isereageerivad jäätmel.“

Põlevkivituhkasid ei liigitata ohtlikeks koodiga HP 3. Põlevkivituhk ei sisalda gaasilisi ja vedelaid ühendeid, mis võiksid olla potentsiaalselt kergsüttivad.

Märkus: põlevkivituhk sisaldab vaba Ca-oksiidi ehk lupja (CaO), mis reageerimisel veega moodustab Ca-hüdroksiidi. Selle eksotermilise reaktsioonientalpia on -104 kJ/mol, mistõttu toimub reaktsioonis märgatav soojuse eraldumine.

8.4 Ärritav — nahka ärritav ja silmi kahjustav HP 4

Jäätmete raamdirektiivi III lisas esitatud määratlus ja täiendav kirjeldus Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 4 (ärritav) määratletud järgmiselt:

„jäätmel, mis kokkupuutel võivad põhjustada nahaärritust või kahjustada silma“

Vastavalt HP 4 definitsioonile on potentsiaalseteks ärritavateks aineteks põlevkivituhhas sisalduvad mineraalid, mida kirjeldavad ohukoodid H314, H315, H318 ning/või H319 – kvarts, dolomiit, magnetiit, lubi ning vollastoniit (Tabel 26). HP 4 hindamisel tuleb vaadata sama ohulauset omavate komponentide summaarset sisaldust.

Potentsiaalselt ohtlikest ärritavatest ainetest esineb põlevkivituhkades Ca-oksiid (lubi) ja Ca-hüdroksiid (kustutatud lubi; portlandiit), vastavalt ohuluse koodidega H314, H315, H318 ja H319 (ainult lubi). Keevkihtkatelde koldetuhhas varieerub vaba CaO sisaldus suhteliselt suurtes piirides (5 ja 19% vahel). Vaba CaO sisaldused õlitööstuse tuhkades on alla 5%. Portlandiidi sisaldus on keevkihtkatelde tuhkades keskmiselt umbes 5% ja tolmpõletuskatelde tuhkades keskmiselt 10%. Samas ei ole alust väita, et põlevkivituhad oleksid selles osas oluliselt erinevad kui Ca-rikkad ligniidituhad. Kirjanduses on avaldatud andmeid Euroopa söetuhkade koostise kohta, mis vaba CaO sisalduse poolest sarnanevad nii keevkiht- kui ka tolmpõletusprotsessidest pärit põlevkivituhkadele (Tabel 46), kusjuures mõningatel juhtudel võib vaba CaO sisaldus ligniidi põletamisel tekkinud tuhkades ületada ka 20%.

Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] tulenevalt peab tuhad liigitama ohtlikuks HP 4 alusel kui tuhkades ohulause koodi H314 Skin Corr. 1A omavate ainete (milleks põlevkivituhhas on CaO (lubi)) sisaldus jääb vahemikku 1 kuni 5%. Samas, kui tegemist on jäätmetega, milles ohulause koodi H314 Skin Corr. 1A, 1B või 1C omava aine sisaldus on võrdne või suurem kui 5%, siis kõnealused jäätmel tuleks liigitada ohtlikeks koodiga HP 8, mitte HP 4. Allpool on toodud eraldi erinevate tuhavoogude klassifikatsioon elektrijaamade tuhkades (Tabel 48) ja õlitööstuse tuhkades (Tabel 49). Elektrijaamade tuhad klassifitseeruvad suures osas ohtlikeks HP 8 mõistes. Auvere CFBC kottfiltrite tuhk ei klassifitseeru HP 4 mõistes ohtlikuks ohulause koodi H314 Skin Corr.1A (Tabel 47) omava aine sisalduse tõttu, küll aga ohulauset H318 omavate ainete (hematiit, lubi, portlandiit) sisalduse tõttu klassifitseerub ta ohtlikuks HP 8 mõistes. Õlitööstuse tuhad klassifitseeruvad valdavalt ohtlikeks HP 4 mõistes. Täiendavalt on vaja uurida Enefit 140 tehnoloogia elektrifiltrite tuhka, kuna antud tuhavoog ei ole täielikult karakteriseeritud. Lähtuvalt sellest, et Petroteri tehnoloogia elektrifiltrite tuha koostis on

hästi teada ning ohulause koodi H314, H315, H318 ja/või H319 omavate ainete sisaldus ei ületa künnist, on nimetatud tuhik HP 4 mõistes mitteohtlik. Kuna NID-i tuhik on klassifitseeritav kui tavajäätme jäätmekoodiga 10 01 05, siis ei ole NID-i tuha puhul vaja hinnata tema ohtlikkust.

Tabel 46. Vaba CaO sisaldus ligniidi põletamisel tekkivates tühkades

Päritolu (elektrijaam)	Tuha iseloomustus	Vaba CaO sisaldus (mass%)	Viide
Türgi (Soma)	PC LT	9,32	[117]
Kreeka (Ptolemais)	PC LT	5,18	[68]
Kreeka (Agios Dimitrios)	PC LT	18 kuni 20	[118]
Kreeka (Kardia)	PC LT EF	2 kuni 16	[100]
Kreeka		14,4	[119]
Hispaania		10	
Türgi		11,4	[120]
Poola (Jaworzno III)	FBC LT	18,6	
Poola (Tychy S.A.)	FBC LT	Kuni 22,9	[69]
Poola (Turow)	FBC LT	10,7	
Kosovo (Kosova B)	PC LT	9,9	[121]
Saksamaa (Neurath)	PC LT EF1	6,49	[101]
Saksamaa, Reinimaa		11,5	[103]
Saksamaa, Kesk-Saksamaa		Kuni 25	[104]
		Kuni 25	

Analoogselt NID-i tuhaga ei ole vaja hinnata söe kolde- ja lendtühkade ohtlikkust (jäätmekoodid vastavalt 10 01 01 ja 10 01 02). Samas, lähtudes põlevkivituhale kehtivatest hindamise kriteeriumitest tuleks erineva päritoluga/koostisega söe (bituminoosne süsi ja ligniit) tuhad lugeda analoogselt elektrijaamade põlevkivitühkadega HP 4 mõistes ohtlikeks jäätmeteks ohulause koodi H315 ja H319 omavate ainete (kvarts, hematiit, magnetiit, mulliit) suure sisalduse tõttu (

Tabel 50). Kuna ligniidi põletamisel tekkinud lendtuhad sisaldavad ohulause koodi H314 Skin Corr. 1A omavat ainet (lupja) üle 5%, liigituvad nad koheselt ohtlikeks HP 8 mõistes.

Tabel 47. Ohulause koodi H314 (Skin Corr. 1A) omavate ühendite kontsentratsioon elektrijaamade tühkades

Voog Katel	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	TSÜKLON	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF
	Auvere CFBC	18,4		16,0*	19,2		19,4	20,3	9,8	10,1	9,1	
FW CFBC	3,7	6,7	6,5	10,5		9,7	6,2	2,9	1,0			
PC+NID	18,7	19,6	18,9		24,6						8,0*	

*Ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaiseri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona

Tabel 48. Ohulause koodi H314 (Skin Corr. 1A ja Skin corr. 1B) omavate ühendite kontsentratsioon elektriyaamade tuhkades ja tuhkade klassifikatsioon: HP 4 - , HP 8 - , MITTEOHTLIK -

Voog Katel	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	TSÜKLON	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF
Auvere CFBC	20,4		16,9*	20,5		20,4	21,2	14,6	16,3	26,9		14,6
FW CFBC	7,4	10,2	12,1	16,9		11,8	9,6	5,6	3,2			
PC+NID	29,5	30,2	30,5		33,5						23,4**	

*ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaiseri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona; **tavajääde jäätmekoodiga 10 01 05

Tabel 49. Ohulause koodi H314 (Skin Corr. 1A), H315, H318 ja H319 omavate ühendite kontsentratsioon õlitööstuse tuhkades ja tuhkade klassifikatsioon: HP 4 - , VAJAB TÄIENDAVID UURINGUID - , MITTEOHTLIK -

Näitaja	Enefit 280				Enefit 140		Petroter	
	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
H314 (Skin Corr. 1A)	tr	tr	tr	0,73	1,21	0,75	tr	0,54
H315	1,57	2,47	2,3	1,33		1,45	0,57	1,77
H318	1,57	2,47	2,3	1,33		1,45	0,57	1,77
H319	18,06	23,46	19,43	20,57		8,85	24,71	12,78
Info koostise kohta	Täielik		Täielik			Puudulik		Täielik
Leostusvee pH						>11,5		10,42

Tabel 50. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv hinnang võrdlustuhkadele: HP 4 - , HP 8 -

Voog	KT	LT
Tuha allikas [viide]		
Ligniit, Türgi [122]	 	
Ligniit, Kreeka [123]	Info puudub	
Ligniit, Poola [124]	 	
Bituminoosne süsi, Poola [124]	 	
Bituminoosne süsi, Hispaania [125]	Info puudub	

8.5 Mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav mürgisus HP 5

Jäätmete raamdirektiivi III lisa on ohtlik omadus HP 5 (mürgisus sihtelundi suhtes / hingamiskahjustusi tekitav mürgisus) määratletud järgmiselt: „jätmed, mis võivad põhjustada mürgisust sihtelundi suhtes kas ühekordsel või korduval kokkupuutel, või mis põhjustavad ägedat mürgisust sissehingamisel“.

Ohtliku omaduse HP 5 hindamisel tuleb vaadelda põlevkivituha koostises esinevate mineraalide sisaldust üksikaine põhiselt. Mineraalid, mis esinevad põlevkivituhas ja mida kirjeldavad ohulause koodid H370, H371, H335, H372, H373 ja/või H304 on kvarts, hematit, magnetiit, lubi, portlandiit ning vullastoniit (Tabel 26). Kõigi uuritud voogude puhul oli kvartsi sisaldus, ja mõnedes tuhades ka portlandiidi sisaldus üle H370 või H372 ohulause koodiga aine piirnõrmi (1%, Tabel 51). Siiski, lisaks vastava ohulause koodiga mineraali sisaldusele, tuleb hinnata vastavate faaside sissehingatavust. Kvarts, dolomiit, magnetiit, portlandiit ja vullastoniit omavad ohtlikku mõju vaid siis kui need on tolmuna sissehingatavad.

Tabel 51. Ohulause koodi H370 või H372 omavate üksikainete põhine elektrijaamade tuhade HP 5 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Katel	Voog												
	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	Tsüklon	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF	
Auvere	*	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
CFBC	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
FW CFBC	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
PC+NID	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	***	*	*

*selgitus järgnevas tekstis; **ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaisereri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona; ***tavajääde jäätmekoodiga 10 01 05

Tabel 52. Ohulause koodi H370 või H372 omavate üksikainete põhine elektrijaamade tuhade HP 5 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

HP 5 klassifikatsioon	Enefit 280			Enefit 140		Petroter		
	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
HP 5 klassifikatsioon	*	*	*	*	*	*	*	*

Sissehingatavaks tolmuks loetakse kokkuleppeliselt osakesi, mille aerodünaamiline läbimõõt on alla 10 µm (ehk PM₁₀) [126], mis läbivad hingamisteed (ninaõõs, kurgu piirkond) ja jõuavad kopsudesse. Suuremad osakesed peatuvad kas ninas või hingetorus. Peentolmu osakesed aerodünaamilise diameetriga alla 2,5 µm (ehk PM_{2,5}) jõuavad kopsu alveoolidesse [127].

Tüüpiline koldetuhade lõimise kaalutud (mass)keskmise läbimõõt on vahemikus 0,3-1,5 mm. Seega, kuigi elektrijaamade ja õlitööstuse seadmete koldetuhad ületavad kvartsi sisalduse piirnõrmi, ei liigitata neid ohtlikeks koodiga HP 5 (Tabel 51).

CFBC katelde lendtuha masskeskmise osakeste läbimõõt on keskmiselt 16 µm ja PM₁₀ osakaal lendtuhas ligi 40 kuni 50 % (Joonis 8). Kristallilise kvartsi sisaldused elektrijaamade ja õlitööstuse lendtuhades (elektrifiltrite, tsükloni- ja kottfiltrite tuhas) on vahemikus 3-20% (vt Lisa 1. Mineraalne koostis). PM₁₀ fraktsiooni kristallilist koostist määratud ei ole. Kui eeldada, et kristalliliste faaside

vahekorrad on lendtuhas püsivad, siis on PM₁₀ fraktsiooni kuuluva ja potentsiaalselt sisse hingatava kristallilise kvartsi osakaal lendtuhkades umbes 1,5-4(6)%, mis ületab ohulauset H370 omava üksikaine jaoks määratud piirnormi (Tabel 28). Potentsiaalselt sissehingatava portlandiid osakaal on sellisel juhul alla 1% ning sellega ei arvestata.

Seega tuleb liigitada piirnorme ületava kristallilise kvartsi sisaldusega peenosakesi (PM₁₀) sisaldavada elektriijaamade ja õlitööstuse lendtuhad ohtlikuks koodiga HP 5. Võrdluseks, söe lendtuhkade koostises varieerub kristallilise kvartsi sisaldus tolmpõletuse korral 1,3-25,4% ning keevkihtpõletuse puhul 4,2-16,5% [118,122,125,128–131]. Info lendtuha osakeste suuruse jaotuse kohta on erinev, millest tulenevalt on PM₁₀ fraktsiooni osakaal lendtuhkades vahemikus 5 kuni 90% [132–140]. Osakeste mediaanmõõt võib varieeruda samuti suurtes piirides: alla 5 µm [141] kuni umbes 20 µm [139]. Seega, sisse hingatava kvartsi osakaal söetuhkades on hinnanguliselt kuni 5% [142], mis analoogselt põlevkivituhale ületab ohulauset H370 omava üksikaine jaoks määratud piirnormi ning ohtlikuse hindamisel klassifitseeruks söe lendtuhad HP 5 mõistes ohtlikeks. Kuna alapunktis 8.4 toodud võrdlustuhkade kohta puudub osakeste suuruse jaotuse hinnang, siis ei ole võimalik hinnata sisse hingatava kvartsi osakaalu lendtuhkades.

8.6 Äge mürgisus HP 6

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 6 (äge mürgisus) määratletud järgmiselt: „jätmed, mis võivad põhjustada ägedat toksilist mõju suukaudsel või nahakaudsel manustamisel või sissehingamisel.“

Eesti põlevkivituha ohtlikust hinnates vastavalt omadusele HP 6, tuleb lähtuda tuhas sisalduvate mineraalide summaarsest koostisest. Põlevkivituhas sisalduvad mineraalid, mida kirjeldavad ohukoodid H300, H301, H302, H310, H311, H312, H330, H331, ja/või H332 on kvarts, hematiiit, magnetiit ning lubi (Tabel 26). Ohtliku omaduse HP 6 hindamisel tuleb vaadata ühesugust ohulauset omavate komponentide summaarset koostist. Lähtudes tuhavoogude faasilisest koostisest (Lisa 1. Mineraalne koostis) ületavad HP 6 mõistes piirnorme või on sellel ligilähedase sisaldusega elektriijaamades CFBC tehnoloogia ÖKO, ÖES, EF1 ja EF2 lendtuhad ning PC-NID tehnoloogia ÜK, ÖKO ja Tsükloni tuhad, mis on potentsiaalselt ohtlikud allaneelamisel ja/või sissehingamisel (Tabel 53). Õlitööstuse tuhad ei ole ohtlikud (Tabel 54).

Põlevkivituhale rakendatavatest hindamise kriteeriumitest lähtudes tuleks klassifitseerida bituminoosse söe ja ligniidi lendtuhad analoogselt osade elektriijaamade lendtuhkadega HP 6 mõistes ohtlikeks jäätmeteks ohulause koodi H302 omavate ainete (kvarts, hematiiit, magnetiit, lubi) suure sisalduse tõttu (Tabel 55).

Tabel 53. Elektriijaamade tuhade ohtliku omaduse HP 6 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Katel	Voog											
	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	Tsüklon	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF
Auvere	■		■ *	■		■	■	■	■	■		■
CFBC	■		■	■		■	■	■	■	■		■
FW CFBC	■	■	■	■		■	■	■	■	■		■
PC+NID	■	■	■		■						■ **	

*ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaiseri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona; **tavajäade jäätmekoodiga 10 01 05

Tabel 54. Õlitööstuse tuhade ohtliku omaduse HP 6 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■, VAJAB TÄIENDAVAID UURINGUID - ■

HP 6 klassifikatsioon	Enefit 280				Enefit 140		Petroter	
	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
HP 6 klassifikatsioon	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabel 55. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv HP 6 klassifikatsioon võrdlustuhkadele: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Tuha allikas [viide]	Voog	
	KT	LT
Ligniit, Türgi [122]	■	■
Ligniit, Kreeka [123]	Info puudub	■
Ligniit, Poola [124]	■	■
Bituminoosne süsi, Poola [124]	■	■
Bituminoosne süsi, Hispaania [125]	Info puudub	■

8.7 Kantserogeenne HP 7

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 7 (kantserogeenne) määratletud järgmiselt: „jätmed, mis tekitavad vähktõbe või suurendavad selle esinemissagedust“.

Kantserogeenseteks aineteks klassifitseeritakse ained või ainete segud, mis põhjustavad vähki haigestumist või võivad suurendada vähki haigestumise riski. Ohtliku omaduse HP 7 esinemist hinnatakse ainete suhtes, mille puhul on põhjust eeldada vähki tekitavaid omadusi.

Vähki tekitavate ainetena vaadeldakse pürolüüsi protsessidest pärit jäätmetes valdavalt BTEX, PAH, PCB ühendeid ja fenooli. Vastavaid uuringuid on tehtud ainult Kiviteri protsessi jäätmele, poolkoksile, mille orgaanilise aine sisaldus on üle 10% [48], ületades kordades TSK tehnoloogiate (eelkõige Enefit 280 ja Petroter) tuhade orgaanika sisaldust. Vastavas uuringus leiti, et ka värskes poolkoks ei ole ohtlikus koguses potentsiaalselt kantserogeenseid orgaanilisi ühendeid. Samale tulemusele jõuti ka Eesti Keskkonnauuringute Keskuse poolt läbi viidud poolkoksi keskkonnaohtlikkuse uuringus, kus

tuvastati, et poolkoksis ei ületa PAH-de kontsentratsioon Keskkonnaministri määruses nr 38 (vastu võetud 11.08.2010) piirarvu (20 mg/kg) elamumaal¹⁹. Tehnoloogilistest eripäradest tulenevalt ei saa vastavate ühendite kontsentratsioonid Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiates ületada kontsentratsioone poolkoksis.

Põlevkivi põletamisel tekkivates tuhkades (nii PC kui ka CFBC tehnoloogia) H350 ohulause koodiga määratud orgaaniliste ühendite sisaldused jäävad µg/kg suurusjärku, kuna juba jääkorgaanika sisaldus elektriijaamade tuhkades on enamasti alla 0,5%. Näiteks Irha et al. [106] andmetel on kantserogeensete PAH-de sisaldused elektriijaamad tuhkades alla 0,15 mg/kg, jäädes selgelt allapoole kehtestatud piirnorme. Seejuures on PAH-de kontsentratsioon madalam CFBC tuhkades. Samuti on jälgelementide sisaldused põlevkivituhkades kõigi tuhaliikide (elektriijaamade ja õlitööstuse tuhad) osas liiga madalad, et ületada HP 7 toodud eri ohuklasside piirnorme (Carc. 1A ja 1B ≥ 0,1% ning Carc. 2 ≥ 1%). Nt jälgelementidest suurima sisaldusega ja H350 ohulause koodi alla kuuluva strontsiumi halvima stsenaariumi järgi arvutatud ühendi sisaldus jääb kahekordselt alla H350 sätestatud piirnormi. Lisaks on jälgelemendid põlevkivituhkades seotud mineraalsete faaside koostisesse/struktuuri ega moodusta üldjuhul eraldi anorgaanilisi ühendeid ega spetsiifilisi mineraale.

Kolmanda potentsiaalselt ohtliku rühma moodustavad vähki tekitavad mineraalsed ained. Võimalikest ohulause koodidele H350 ja/või H351 vastavates ainetest, mis esinevad tuha koostises on mikrokristalliline kvarts (Tabel 26). Paljude elektriijaamade lendtuha fraktsioonide puhul (Lisa 1. Mineraalne koostis) ületas kvartsi sisaldus lubatud piirnormi (Tabel 35). Siiski peab arvestama, et kvartsi kantserogeensus avaldub ainult kvartsitolmu sissehingamisel, mille tulemusel võib tekkida silikoos, mis põhjustab kopsuvähi kõrge riski. Sissehingatavaks tolmuks loetakse osakesi, mille aerodünaamiline läbimõõt on alla 10 µm.

Tüüpiline elektriijaamade koldetuhkade lõimise kaalutud keskmine (masskeskmine) osakeste läbimõõt on vahemikus 0,3-1,5 mm, Enefit 280 tehnoloogia koldetuhhal vahemikus 0,4 kuni 0,6 mm. Seega ei rakendu HP 7 piirnormi ületavad kvartsi sisaldused elektriijaamade ja õlitööstuse seadmete koldetuhkadele (Tabel 56 ja Tabel 57). Lendtuha masskeskmine osakeste läbimõõt on ca. 12 µm ning lendtuhk on potentsiaalselt sissehingatav. Kristallilise kvartsi sisaldused elektriijaamade ja õlitööstuse lendtuhkades (elektrifiltrite, tsükloni- ja kottfiltrite tuhas) on vahemikus 3-20% (vt Lisa 1. Mineraalne koostis). PM₁₀ fraktsiooni kristallilist koostist eraldi määratud ei ole. Kui eeldada, et kristalliliste faaside vahekorrad on lendtuhas püsivad, siis on PM₁₀ fraktsiooni kuuluva ja potentsiaalselt sisse hingatava kristallilise kvartsi osakaal lendtuhkades umbes 1,5-6%, mis ületab koodide H350/351 üksikaine jaoks

¹⁹ RT I 2010, 57, 373

määratud piirnормi. Seega tuleb piirnorme ületava kvartsi sisalduse tõttu lugeda elektriyaamade ja õlitööstuse lendtuhkaside ohtlikeks koodiga HP 7 kõigis kategooriates (Carc. 1A ja 1B \geq 0,1% ohulause koodiga H350 ning Carc. 2 \geq 1,0% ohulause koodiga H351) (Tabel 56 ja Tabel 57). Analoogselt tuleks hinnata ohtlikeks ka võrdlustuhkade lendtuha fraktsioon (Tabel 58).

Jälgelementide ja orgaaniliste ühendite sisaldused põlevkivituhkades jäävad allapoole HP 7 toodud piirmäärasid ja seega HP 7 seisukohalt ei ole ohtlikud.

Tabel 56. Elektriyaamade tuhade ohtliku omaduse HP 7 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Katel	Voog											
	KT	ÜK	ÖKO	ÖES	Tsüklon	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF
Auvere	*		**	*		*	*	*	*	*		*
CFBC			*	*		*	*	*	*	*		*
FW CFBC	*	*	*	*		*	*	*	*	*		*
PC+NID	*		*		*						***	

* - selgitus tekstis (koldetuha fraktsiooni osakesed ei ole sissehingatavad); **ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaiseri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona; ***tavajäade jäätmekoodiga 10 01 05

Tabel 57. Õlitööstuse tuhade ohtliku omaduse HP 7 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

HP 7 klassifikatsioon	Enefit 280			Enefit 140		Petroter		
	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
HP 7 klassifikatsioon	*	*	*	*	*	*	*	*

* - selgitus tekstis (koldetuha fraktsiooni osakesed ei ole sissehingatavad)

Tabel 58. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv HP 7 klassifikatsioon võrdlustuhkadele: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Tuha allikas [viide]	Voog	
	KT	LT
Ligniit, Türgi [122]	*	*
Ligniit, Kreeka [123]	Info puudub	
Ligniit, Poola [124]	*	*
Bituminoosne süsi, Poola [124]	*	*
Bituminoosne süsi, Hispaania [125]	Info puudub	

*koldetuha fraktsiooni osakesed ei ole eeldatavasti sissehingatavad

8.8 Söövitav HP 8

Ohtlike jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 8 (söövitav) määratletud järgmiselt: „jätmed, mis võivad kokkupuutel põhjustada naha söövituse“. HP 8 määratluse seisukohalt on oluline, et kui jätmed sisaldavad üht või mitut ainet, millel on klassifikatsioon „Nahasöövitus 1A, 1B



või 1C (H314)“ ja nende ainete sisalduste summa $\geq 5\%$, tuleb jäätmed klassifitseerida ohtlikeks koodiga HP 8.

Hinnates Eesti põlevkivituha ohtlikust vastavalt ohtlikule omadusele HP 8, tuleks vaadata selles sisalduvaid mineraale. Põlevkivituhas sisalduvateks mineraalideks, mida kirjeldab ohulause kood H314, on vaba lubi CaO ja portlandiit Ca(OH)₂ (Tabel 26), mille sisaldused on alla lävi- või piirväärtuse õlitööstuse tuhkades (Tabel 60) ning üle määratletud lävi- ja piirväärtuse (vastavalt $>1\%$ ja $>5\%$) kõikides elektrijaamade tuhkades peale FW CFBC EF4 tuha (Tabel 59). Kuigi ka NID-ist väljuv tuhavoog klassifitseeruks koostise järgi ohtlikuks, siis jäätmete liigitamise määruse ja ka ohtlike jäätmete nimistu järgi on tegemist tavajäätmega jäätmekoodiga 10 01 05. Analoogne näite võib tuua räbutöötlemisjääkide (10 02 01) ja töötlemata räbu (10 02 02) kohta. EK jäätmete klassifitseerimise tehnilises juhendis [32] on öeldud, et isegi kui nimetatud jäätmete „kaltsiumoksiidi sisaldus on üle jäätmete raamdirektiivi III lisas esitatud piirnormati, tuleks jäätmed liigitada tavajäätmeteks“. Analoogne olukord on võrdlustuhaga (ligniit), mis on liigitatud tavajäätmeks hoolimata sellest, et nii kolde- kui ka lendtuhas leiduvate „Nahasöövitus 1A, 1B või 1C (H314)“ klassifikatsiooniga ainete sisaldus on $\geq 5\%$.



Tabel 59. Elektrijaamade tuhkade ohtliku omaduse HP 8 klassifikatsioon: OHTLIK - , MITTEOHTLIK - 

Katel	Voog												
	KT	ÜK	ÖKO	ÖES	Tsüklon	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF	
Auvere			*										
CFBC													
FW CFBC													
PC+NID												**	

*ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaiseri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona; **tavajäätme jäätmekoodiga 10 01 05

Tabel 60. Õlitööstuse tuhkade ohtliku omaduse HP 8 klassifikatsioon: OHTLIK - , MITTEOHTLIK - 

HP 8 klassifikatsioon	Enefit 280			Enefit 140		Petroter		
	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
HP 8 klassifikatsioon								

Tabel 61. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv hinnang võrdlustuhkadele ja ohulause koodiga H314 ainete summaarne sisaldus nendes tuhkades: HP 4 - , HP 8 - 

Tuha allikas [viide]	Voog	
	KT	LT
Ligniit, Türgi [122]	6 kuni 9%	9 kuni 10%
Ligniit, Kreeka [123]	Info puudub	3,8 kuni 13%
Ligniit, Poola [124]		1,4%
Bituminoosne süsi, Poola [124]		
Bituminoosne süsi, Hispaania [125]	Info puudub	~0%

Vaba lubja (CaO) sisaldused Eesti põlevkivituha liikidest on 5% või suuremad kõikides tolm põletustuhkade liikides (CaO sisaldus 10-25%), samuti ka enamikes keevkihttuhkade liikides (vaba lubja sisaldus koos kaltsiumhüdroksiidiga arvatuna varieerub 5-19%). Täpsemalt selgitatud alapunktis 4.1.2 Elektri jaamade tuhkade mineraalne koostis. Vaba lubja (CaO) sisaldused Eesti põlevkivituha liikidest on madalamad kui 5% ainult Petroter tehnoloogia tahke soojuskandja tuhka (TSK), kus vaba lubja sisaldus on keskmiselt 1,5% ning Enefit280 CFBC tuhka, kus vaba lubja sisaldus praktiliselt puudub (Lisa 1, Tabel 73).

Seega tuleb kõikide elektri jaamade kõik tuhaliigid (välja arvatud NID-i tuhka) klassifitseerida HP 8 mõistes ohtlikuks. Õlitööstuse tuhad ei liigitata ohtlikeks koodiga HP 8.

HP 8 osas tuleb aga arvestada, et CaO on äärmiselt reaktiivne kokkupuutel veega (õhuniiskusega), kui toimub kiire hüdratiseerumine ja kustutatud lubja (portlandiidi) moodustumine. Veekeskkonnas leiab see aset esimese 24 tunni jooksul: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$.

Portlandiit (Ca(OH)_2) reageerib omakorda õhus oleva süsihappegaasiga. Seeläbi moodustub stabiilne kaltsiumkarbonaat: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Seega on põlevkivituha söövitavad omadused avatud seisemisel (st kontaktis atmosfääriga) ajas muutuvad ning pikemaajalisel seisemisel materjal neutraliseerub looduslike protsesside tulemusena.

8.9 Nakkust tekitav HP 9

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on HP 9 järgi ohtlikud jäätmed need, mis sisaldavad mikroorganisme või nende toksine, mida teatakse kindlasti või tõenäoliselt põhjustavat inimeste või muude elusorganismide haigestumist.

Ohuklassi HP 9 määramisel ei lähtuta kontsentratsiooni piiridest vaid hinnatakse võimalikku füüsilist ohtu inimeste või muude elusorganismide tervisele.

Sõltuvalt konkreetsest tehnoloogiast toimub elektri jaamades põlevkivi põletamine. Põletamisel on temperatuurid minimaalselt 750 °C keevkihtkateldes ja 1000 kuni 1500 °C tolm põletuskateldes. Põlevkiviõli utmisel on temperatuurid retordis vahemikus 400-500 °C ning järelpõletusel >700 °C. Need temperatuurid on piisavalt kõrged, et täielikult steriliseerida põlemise käigus tekkiv tahke jääk (kõik erinevad tuhaliigid ja poolkoks). Seetõttu, lähtudes põlevkivi põletamise tehnoloogiast ja kasutatavatest temperatuuridest, ei ole tõenäoline, et võimalikud haigus tekitajad säiliks. Seega põlevkivituhasid ei liigitata ohtlikeks koodiga HP 9.

8.10 Reproduktiivtoksiline HP 10

Jäätmete ohtlik omadus HP 10 (reproduktiivtoksiline) määratletakse kui „jätmed, millel on kahjulik toime täiskasvanud meeste ja naiste ning isas- ja emasloomade suguvõimele ja viljakusele, samuti järglaste arengut mõjutavat mürgisus (arengutoksilisus)“.

Reproduktiivtoksilisteks aineteks klassifitseeritakse ained, mis ohulausete koodi H360(FD) alusel “võib kahjustada viljakust või loodet” ja koodi H361(FD) järgi “arvatavasti kahjustab viljakust või loodet”. HP 10 hindamisel arvestatakse potentsiaalselt reproduktiivtoksilisi aineid eraldi ja nende sisaldusi piirnormidega (H360 – Repr. 1A ja 1B \geq 0,3 % ja H361 - Repr. 2 \geq 3,0 %) võrdlemisel ei summeerita. Kantserogeensuse HP 7, reproduktiivtoksilisuse HP 10 ja mutageensuse HP 11, hindamisel kasutatakse samu põhimõttelisi printsiipe. Erinevalt HP 7 ja HP 11 on HP 10 läviväärtused kolm korda kõrgemad. Sisulised erinevused seisnevad selles, et nende kolme HP ohulausete koodid osaliselt erinevad ja osaliselt kattuvad erinevate tuhkades leiduvate elementide/anorgaaniliste ühendite/mineraalsete faaside ja orgaaniliste ühendite suhtes. Seega kehtivad HP 10 hindamisel kõrgemad piirnormid (0,3% ja 3%). Sellest lähtuvalt ei ületa ühegi elektrijaama tuhaliigi (PC, CFBC) jälgelementide ja õlitööstustuhkade (TSK, poolkoks) jälgelementide ning orgaaniliste ühendite sisaldused piirnorme ning neid ei saa käsitleda HP 10 mõistes reproduktiivtoksilistena.

Ohtliku omaduse HP 10 hindamisel ei pea arvestama tuhkade mineraalse koostisega, kuna seal leiduvatel mineraalsetel faasidel puuduvad hindamisel kasutatavad ohulausete koodid.

Põlevkivituhk, mis tekib elektrijaamades ja õlitööstuses (sh väävlipüüdurite tuhk) ei sisalda määratavas koguses reproduktiivtoksilisi aineid/ühendeid. Seega ei liigitata põlevkivituhkaid ohtlikeks koodiga HP 10.

Võrdlustuhkades leidub seevastu ohulause koodiga H361 - Repr. 2 tähistatud ainetest magnetiiti, mille sisaldus ligniidi lendtuhas võib olla kuni 4% [122] ja bituminoosse söe lendtuhas kuni 3% [125]. Toodud väärtused on võrdsed või ületavad vastava ohulause koodiga tähistatud üksikaine sisalduse piirnormi (3,0%).

8.11 Mutageenne HP 11

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 11 (mutageenne) määratletud järgmiselt:

„jätmed, mis võivad põhjustada mutatsiooni – püsivat muutust raku geneetilise materjali koguses või struktuuris“.

Ohtliku omaduse HP 11 hindamisel arvestatakse potentsiaalselt mutageenseid aineid eraldi ja nende sisaldusi piirväärtustega (H340 - Muta. 1A ja 1B \geq 0,1 % ja H341 - Muta. 2 \geq 1,0 %) võrdlemisel ei summeerita. Nii nagu HP 7 kantserogeensuse hindamise osas, rakendatakse ohuklassi HP 11

hindamisel samu kriteeriume. Nende kriteeriumite järgi on jälgelementide sisaldused põlevkivituhkades liiga madalad, et ka võimalike halvima stsenaariumi järgi ületada ohuklassile HP 11 seatud piirnorme.

Põlevkiviõlitööstuse tuhkades sisalduvatest orgaanilistes ühenditest kuuluvad H340 ohulause koodi alusel ohuklassi HP 11 mutageensuse hindamisele osad TSK tuhas leiduvad BTEX ja PAH hulka kuuluvad ühendid, mille sisaldused on aga madalamad kui ohuklassi HP 11 kohaldamiseks seatud piirnormid [106]. Elektriyaamade tuhkade orgaanilise komponendi sisaldused on äärmiselt madalad tulenevalt kõrgetest põlemistemperatuuridest ning tuhkades määratud orgaaniliste ühendite sisaldused jäävad kaugelt alla seatud piirnormide.

Ohtlikuse hindamisel vastavalt ohtliku omaduse HP 11 klassifikatsioonile, tuleb vaadelda tuhas sisalduvate mineraalide üksikaine koostisi. Ohulause koodidele H340 ja/või H341 vastab tuha koostises kvarts (Tabel 26). Kõigis tuhaliikides ületas kvartsi sisaldus lubatud piirnorme. Nii nagu kantserogeensuse puhul, avaldub kvartsi mutageensus ainult kvartsitolmu sissehingamisel. Sissehingatavateks loetakse osakesi mille terasuurus on <10 µm.

Tüüpiline kaalutud keskmine (masskeskmine) põlevkivi koldetuha osakese läbimõõt on vahemikus 0,3-1,5 mm. Seega ei liigitu elektriyaamade ja õlitööstuse seadmete koldetuhad ohtlikeks ohtliku omaduse HP 11 järgi olenemata sellest, et kvartsi sisaldused ületavad piirnormi.

Lendtuha masskeskmine osakeste läbimõõt on ca. 12 µm ning lendtuhk on kergesti respireeritav. PM_{2,5} varieerub lendtuhkades 10-20% piires. Kristallilise kvartsi sisaldused elektriyaamade ja õlitööstuse lendtuhkades (elektrifiltrite, tsükloni- ja kottfiltrite tuhas) on 3-20% piires. Kui eeldada, et kristalliliste faaside vahekorrad on lendtuhas püsivad, siis on PM_{2,5} fraktsiooni kuuluva ja kopsudesse potentsiaalselt tungiva kristallilise kvartsi osakaal lendtuhkades 1,5-6%. Seega tuleb piirnorme ületava sissehingatava kvartsi sisalduse (>1%) tõttu liigitada elektriyaamade ja õlitööstuse lendtuhkaid ohtlikeks koodiga HP 11 (ohulause kood H341) (Tabel 62 ja Tabel 63). Analoogselt tuleks vaadelda ka söetuhkaid (Tabel 64).

Tabel 62. Elektriyaamade tuhkade ohtliku omaduse HP 11 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Katel \ Voog	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	Tsüklon	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	NID	KF
Auvere	*		**									
CFBC	*											
FW CFBC	*											
PC+NID	*										***	

*koldetuha fraktsiooni osakesed ei ole sissehingatavad; **ülekuumendi (ÜK) ja ökonomaiseri (ÖKO) tuhad väljuvad ühe voona; ***tavajääde jäätmekoodiga 10 01 05

Tabel 63. Õlitööstuse tuhjade ohtliku omaduse HP 11 klassifikatsioon: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

	Enefit 280				Enefit 140		Petroter	
	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
HP 11 klassifikatsioon	*							

*koldetuha fraktsiooni osakesed ei ole sissehingatavad

Tabel 64. Jäätmete liigitamise tehnilisest juhendist [32] lähtuv HP 11 klassifikatsioon võrdlustuhkadele: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

	Voog	KT	LT
Tuha allikas [viide]			
Ligniit, Türgi [122]	*		
Ligniit, Kreeka [123]		Info puudub	
Ligniit, Poola [124]	*		
Bituminoosne süsi, Poola [124]	*		
Bituminoosne süsi, Hispaania [125]		Info puudub	

*koldetuha fraktsiooni osakesed ei ole eeldatavasti sissehingatavad

8.12 Väga mürgiseid gaase eraldav HP 12

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 12 (eraldab väga mürgiseid gaase) määratletud järgmiselt: „jäätmel, mille kokkupuutel vee, õhu või happega tekivad väga mürgised gaasid (Äge mürgisus 1, 2 või 3)“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt: „Kui jäätmel sisaldavad ainet, millele on määratud üks järgmistest täiendava ohu koodidest EUH 029, EUH 031 ja EUH 032 (Tabel 65), klassifitseeritakse jäätmel katsemeetodite või juhendite kohaselt ohtlikeks koodiga HP 12“.

Tabel 65. Täiendava ohu koodid

Ohulause	Ohulause kood(id)
Kokkupuutel veega eraldab mürgiseid gaase	EUH029
Kokkupuutel happega eraldab mürgiseid gaase	EUH031
Kokkupuutel happega eraldab väga mürgiseid gaase	EUH032

Arvestades põlevkivituhajäätmete omaduste koostisega on potentsiaalselt ohtlikud võimalikud gaasid, mis teoreetiliselt võiksid vastavalt eelpoolkirjeldatud tingimustele moodustuda HCl, Cl₂, CO, HF, HCN, PH₃, H₂S ja SO₂.

Samuti, lähtudes tuhjade keemilisest ja faasilisest koostisest on potentsiaalselt võimalik loetletud gaaside eraldumine reageerimisel vee või hapetega õlitööstuse tuhkadest (TSK meetod) ja poolkoksi jäätmetest (Kiviter tehnoloogia).

Elektriyaamade tuhajäätmete reageerimisel veega või hapetega ei ole võimalik nende gaaside eraldumine. Põlevkivituhk on osaliselt karbonaatne ning selle reageerimisel happega võib eralduda CO₂, mida ei loetleta HP 12 mõistes ohtlikuks gaasiks. Seega ei ole elektriyaamade põlevkivituhad liigitatavad ohtlikeks koodiga HP 12.

8.13 Sensibiliseeriv HP 13

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 13 (sensibiliseeriv) määratletud kui „jäätmel, mis sisaldavad üht või mitut ainet, millel on teadaolevalt ülitundlikkust tekitav toime nahale või hingamisteedele“.

Jäätmete raamdirektiivis selgitatakse täiendavalt, et „Kui jäätmel sisaldavad ainet, mis on klassifitseeritud kui sensibiliseeriv ning sellele on määratud üks ohulausetest koodidest H317 või H334 ning jäätmetes sisalduva üheainsa aine sisaldus on võrdne sisalduse piirnormiga 10% või ületab seda, klassifitseeritakse jäätmel ohtlikeks koodiga HP 13.“ (vt ka Tabel 40).

Elektriyaamade põlevkivituhkade, õlitööstuse tuha, Enefit280 tuha ja poolkoksi klassifitseerimisel HP 13 mõistes on potentsiaalseteks ohulausetele vastavateks aineteks raskmetallid ja kompleksed orgaanilised ühendid/allergeenid.

H317 ja H334 ohulause koodiga elementide ja nende võimalike ühendite sisaldused on kõigis erinevates Eesti põlevkivitööstuse tahketes jäätmetes kaugelt väiksemad kui üksikainele kehtestatud piirnormid (10%). Seega põlevkivituhkaid ei liigitata ohtlikeks koodiga HP 13.

8.14 Keskkonnaohtlik HP 14

Vastavalt jäätmete raamdirektiivile eeldatakse HP 14 puhul, et võimalik keskkonnaohtlikkus on jäätmete olemuslik omadus ning hinnatakse, kas jäätmel põhjustavad või võivad põhjustada vahetult või pikema aja jooksul ohtu ühele või mitmele keskkonnaelemendile.

Keskkonnaohtlikud ühendid on põlevkivituhas sisalduvad komponendid, mis võivad hävitada osoonikihti või olla ohtlikud veeorganismidele. Sellistele ühenditele on määratud ohulause koodid H420, H400, H410, H411, H412 ja/või H413. Vastavalt kirjeldusele punktis 4.3.14, kehtivad keskkonnaohtlikuse hindamisel valemid, mis võimaldavad hinnata erinevate ühendite koostõju keskkonnale. Nende valemite rakendamisel tuleb tähele panna, et keskkonnaohtlikud ühendid on jaotatud kahte klassi, millel on erinevad läviväärtused. Ühenditele ohulause koodidega H420, H400 ja H410 kehtib läviväärtus 0,1% ning H411, H412 ning H413 puhul 1%.

Ohulause koodiga H420 klassifitseeritakse aineid mida loetakse ohtlikuks osoonikihile ja sellise aine kontsentratsiooni piirnorm on 0,1%. Eesti põlevkivituhad ei sisalda aineid, mida klassifitseeritakse ohulause koodiga H420.

Ohulause koodiga H400, H410, H411, H412 ja/või H413 on ained mis on kahjulikud veekeskkonnale. Põlevkivituhas on selliste koodidega elemendid raskmetallid. Näide raskmetallide sisaldusest põlevkivituhas on toodud Lisa 3. Jälgelemendid.

Ohtlikkuse hindamiseks kasutatakse kas arvutusmeetodeid või bioloogilist ökotoksikoloogilist katset veekeskkonna selgrootutega. Nõukogu määruses on öeldud, et kui jäätmete ohtlike omadusi on hinnatud katsetega ja kasutades jäätmete raamdirektiivi III lisa kohaseid ohtlike ainete sisalduse piirnorme, peaksid katse tulemused olema ülimuslikud.

Siiski, komisjon ei esita konkreetseid soovitusi, millist lähenemisviisi kasutada jäätmete keskkonnaohtlikkuse kirjeldamisel bioloogiliste katsete abil. Seni kuni täiendavaid ELi juhendeid ei ole, peavad liikmesriigid ise juhtumipõhiselt otsustama, kas tulemused, mis saadakse jäätmete keskkonnaohtlikkuse määramiseks tehtavate bioloogiliste katsete põhjal, on vastuvõetavad ja kuidas neid tõlgendada, võttes vajaduse korral arvesse ka biosaadavust ja bioomastatavust. Seejuures peab arvestama, et **Euroopa Komisjoni viimase ettepaneku kohaselt [3] on eelistatud meetod HP 14 hindamise puhul arvutusvalem(id), mis võtavad arvesse keskkonnaohtlike ühendite kontsentratsioone.**

Käesoleva uuringu raames teostati valitud põlevkivitööstuse tuhkadele leostuskatsed (vastavalt standardile EN 12457-4; L:S = 10:1) ning määrati leostusvee mõju *Daphnia magna*'le (akuutse toksilisuse test; CSN EN ISO 6341, STN 83 8303) ja luminesseerivatele bakteritele *Vibrio Fischeri* (Microtox test; CSN EN ISO 11348-2). Nende analüüside tulemused on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 66).

Võrreldes kivisöe ökotoksikoloogiliste uuringutega (vt punkt 5.5, Tabel 17), jäävad Tabel 66 toodud ökotoksikoloogia andmed sarnasesse suurusjärku kivisöe tuhkadega. Analoogselt varasemate põlevkivituhkade toksilisuse andmetega [48], näitab *Daphnia magna* akuutse toksilisuse test, et kõik elektrijaamade tuhad on toksilisuse ühiku klassifikatsiooni [143] alusel väga toksilised ($10 \leq TU < 100$), samas kui õlitööstuse tuhkadel toksilisus puudub või on nad toksilised ($1 \leq TU < 10$; erand on Petroteri soojusvaheti tuhk, mis on väga toksiline). Võrreldes tulemusi *Vibrio fischeri* akuutse toksilisuse testi tulemustega (pH reguleeritud neutraalseks) võib kinnitada varasemaid tulemusi, et elektrijaamade tuhkade leostusvete peamiseks toksilisuse põhjuseks on vee kõrge pH väärtus ja mineraalsus. Eranditena on *Vibrio fischeri* Enefit 280 tehnoloogia lendtuhk toksiline ja Petroter tehnoloogia soojusvaheti tuhk väga toksiline.

Tabel 66. Erinevate põlevkivitööstuse tuhade toksilisuse hindamise tulemused*

Tuhk	<i>D. magna</i>		Microtox			
	EC50 48 h, ml/l	TU	EC50, ml/l	EC20, ml/l	TU	Inhibeerimine lahjenduse 800 ml/l korral, %
Auvere CFBC KT	23,2	43	N/A	N/A	N/A	17,9
Auvere CFBC EF1	44,2	23	N/A	724	N/A	23,6
Auvere LT	27,9	36	N/A	N/A	N/A	14,7
FW CFBC LT	19,3	52	N/A	N/A	N/A	19,6
FW CFBC KT	20,1	50	N/A	N/A	N/A	3,7
FW CFBC EF1	28,5	35	N/A	N/A	N/A	9,1
PC+NID LT	20,5	49	N/A	N/A	N/A	12,1
PC+NID NID	23,2	43	N/A	N/A	N/A	18,4
PC+NID KT	21,6	46	N/A	626	N/A	29,9
Enefit 280 KT	278	4	N/A	N/A	N/A	9,3
Enefit 280 tuhatsüklon	362	3	N/A	N/A	N/A	18,5
Enefit 280 LT	N/A	N/A	560	133	2	66,8
Petroter SV	43,6	23	23	6,9	44	98,8
Petroter EF	N/A	N/A	N/A	391	N/A	36,7

*Tähis N/A – ei olnud võimalik toksilisust määrata, kuna inhibeeruvuse väärtust ei saavutatud; st proov pole piisavalt toksiline, et määrata lahjenduse väärtust

Füsioloogiliselt ebasobiva pH toksiline mõju veeorganismidele näitlikustab vesikirbu *Daphnia magna* elulevus, mis on stabiilselt kõrge pH vahemikus 5,5...10, ent pH > 10 ja pH < 4 tingimused on organismidele surmavad, seejuures *Daphnia magna* pool-letaalseks pH väärtuseks (proovi lahjendusega määratud pH mille juures surmataakse pooled vesikirbud) on pH = 10,9 (13,5 mg [OH⁻]/l). Lisaks pH taluvuse piirangutele tuleb arvestada, et testorganism vesikirp *Daphnia magna* asustab mageda kuni riimiveelisi veekogusid ning talub soolsust kuni 6-7 PSU. Seega ei ole tegemist kõige sobilikuma organismiga kõrge mineraalsusega (lahustunud komponentide sisaldusega) keskkondade ökotoksikoloogilise seisundi hindamiseks.

Lähtudes aga erinevates EL-i liikmesriikides, kes kasutavad ohtliku omaduse HP 14 hindamiseks bioteste, sätestatud piirväärtustest *Daphnia magna*'le (Tabel 43), võivad põlevkivituhad klassifitseeruda HP 14 mõistes nii ohtlikuks kui ka mitteohtlikuks. Näiteks Prantsusmaal ja Saksamaal sätestatud piirväärtuste järgi ei ole *Daphnia magna* testi põhjal keskkonnaohtlik ainult Enefit 280 ja Petroter tehnoloogiate tuhad, samas kui Hispaanias ja Tšehhi Vabariigis sätestatud piirväärtuste järgi on ohutud kõik uuritud põlevkivitööstuse tuhad.

Ohtlikut omadust HP 14 võib vastavalt Euroopa Komisjoni ettepanekule hinnata arvutuslike meetoditega (Meetodid 1–4), mis põhinevad ühendite millele on määratud ohulause kood H400,

H410, H411, H412, H413 ja H420 summeerimisele. Seejuures eeldab arvutusmeetodite kasutamine konkreetse jäätmepuhul, et kõikide ökotoksiliste omadustega ühendite sisaldused on määratud, kvantifitseeritud ja klassifitseeritud vastavalt CLP-direktiivile. Kuna tavapäraste keemilise analüüsi meetoditega ei tuvastata kõiki jäätmepuhul esinevaid keemilisi ühendeid, siis arvutusmeetodites kasutatakse konservatiivset lähenemist ehk eeldatakse, et keemiline element esineb jäätmepuhul oma kõige ohtlikumal kujul. Selline halvima stsenaariumi lähenemiskiivi võib ülehinnata jäätmepuhul ohtlikkust eriti kui tegemist on jäätmepuhul, milles ohtlike ühendite kontsentratsioonid lähenevad piirmääradele.

Soovituslikud neli arvutusmeetodit põhinevad ohtlike ühendite summeerimisele, kuid erinevad üksteisest kuna ohulausete koodidele vastavad erinevad sisalduse piirnormid ning korrutustegurid (M-tegurid). Seetõttu toimub ägedate ja krooniliste ohtude puhul summeerimine eraldi. Kui ühendil, mis kvalifitseerub ühe või mitme ohulause koodi alla, jääb kontsentratsioon allpoole vastava ohulause(te) koodi(de) piirmäära, siis ei arvestata seda ühendit summeerimisel.

CLP-direktiivis on sätestatud M-tegurite kasutamine väga keskkonnakahjulike ainete puhul. M-tegurite mõiste lisab segude klassifitseerimisel väga mürgistele ainetele suurema kaalu. M-tegureid kohaldatakse ainult siis, kui ained on klassifitseeritud ohtlikuks veekeskkonnale - Aquatic Acute 1 (väga mürgine veeorganismidele märgistatud koodiga H400) ja Aquatic Chronic 1 (väga mürgine veeorganismidele, pikaajaline toime, kood H410). M-tegurid on ainespetsiifilised ning M-teguriga ainete sisaldus segus mõjutab tugevalt jäätmepuhul klassifikatsiooni.

Eelnevast tulenevalt rakendati arvutusvalemeid Eesti põlevkivitööstuse jäätmepuhule. Seejuures lähtuti järgnevatest eeldustest:

- Läviväärtusi antud arvutustes ei arvestatud ning kõik määratud elemendid/ühendid läksid arvesse sõltumata nende sisaldusest. Sellega simuleeriti halvimat võimalikku stsenaariumit. Summeeriti kõikide vastavate ohukoodidega märgitud elementide sisaldused.
- Kui elemendi sisaldus konkreetses jäätmepuhul oli madalam määramispiirist siis kasutati elemendi sisaldusena analüüsi määramispiiri väärtust, et simuleerida halvimat võimalikku stsenaariumit.
- Kuigi teatud element võib esineda nii ohtlikul kui mitte ohtlikul kujul, nt Cr (III) või Cr (VI), eeldati arvutustes, et ohulause koodi H400, H410, H411, H412, H413 alla käivad elemendid esinesid oma kõige ohtlikumal kujul.
- Reinik et al. [106] ja Laja et al. [43] on varasemalt uurinud polüaromaatsete süsivesinike (PAH) sisaldusi eesti põlevkivitööstuse jäätmepuhul, milledest teatud osa on kantserogeensed ühendid ning kirjeldatud ohukoodidega H400, H410 ja H413. Käesoleval juhul loeti ohtlikeks kõik PAH ühendid st kogusisaldus.

- M-tegurite väärtustena kasutati Hennebert *et al.* [115] poolt välja toodud väärtusi.
- Ohulause koodiga H420 klassifitseeritakse aineid mida loetakse ohtlikuks osoonikihile, mis üldjuhul sisaldavad erineval määral kloori, fluori, broomi, süsinikku ja vesinikku ning neid tähistatakse sageli üldnimetusega „halogeensüivesinikud“. Klorofluorosüsinikud, tetrakloorsüsinik ja metüülkloroform on olulised inimtekkelised osoonikihti kahandavad gaasid. Teine oluline inimtekkeline halogeensüivesinike rühm on haloonid, mis sisaldavad süsinikku, broomi, fluori ja (mõnel juhul) kloriini. Eesti põlevkivitööstuse jäätmed ei sisalda aineid, mida klassifitseeritakse ohulause koodiga H420 ja arvutusvalemite on antud ainete sisaldused võrdsustatud nulliga.

Arvutustulemused näitavad, et ka kõige halvema stsenaariumi korral ei ole põlevkivitööstuse elektri- ja õlitootmise tuhad mitte ühegi soovitatud arvutusvalemi alusel (Meetodi 1-4) keskkonnaohtlikud HP 14 mõistes (Lisa 5. HP 14 arvutustulemused). Kõige suuremad väärtused saadi Meetodi 1 valemitega, kus kasutatakse ohukoodidega H410 ja H411 määratud elementide võimendamist 10 ja 100 kordselt, aga ka sellisel juhul jäävad tulemused kordades väiksemaks ohupiirist.

Seega on tegemist HP 14 osas ilmse vastuoluga bioloogiliste katsete ning arvutuslike hinnangute osas.

Arvestades, et:

- käesoleval ajal puudub ELi tasandil HP 14 hindamise jaoks ühtlustatud katsemeetodika;
- vastavalt Euroopa Kemikaaliameti (ECHA) juhiste klassifitseerimise, märgistamise ja pakendamise kriteeriumide kohaldamise kohta (ECHA juhend, 4. osa, IV lisa, lk 489 ja 580) saab piirata kokkupuudet ökotoksiliste ainetega nende lahustuvusele ja kättesaadavusele veefaasis;
- vastavalt EL komisjoni otsusele 2014/955/EL: „Ohtlikku omadust saab hinnata, kasutades direktiivi 2008/98/EÜ III lisas määratletud ainete kontsentratsiooni jäätmetes või kui määruses (EÜ) Nr 1272/2008, tehes katse vastavalt määrusele (EÜ) nr 1272/2008, 440/2008 või muid rahvusvaheliselt tunnustatud katsemeetodeid ja suuniseid, võttes arvesse määruse (EÜ) nr 1272/2008 artiklit 7 seoses loomade ja inimeste katsetamisega;
- kuigi otsuses 2000/532/EÜ on sätestatud, et kui jäätmete ohtlik omadus on hinnatud direktiivi 2008/98/EÜ III lisas osutatud katsega ja kasutades ohtlike ainete kontsentratsioone, on katsetulemused ülimuslikud;

siis on otstarbekas HP 14 hindamise läbi viia kasutades määruses viidatud arvutusvalemeid koos leostumisandmetega.. Selline lähenemine ohtliku omaduse HP 14 hindamisele võtab arvesse

asjaomaste ainete lahustuvust (nagu on ka Euroopa Kemikaaliamet (ECHA) poolt tunnustatud) üldkoguse asemel ja hinnatakse ökotoksilisi omadusi võrreldes lubatud sisalduse piirnormidega. Paraku ei ole katsemeetodite hulgas praegu HP 14 hindamise jaoks ELi tasandil ühtlustatud meetodit ning küsimus on jätkuv teaduslike analüüside ja vaidluste objekt (nt [115,144–146]).

Kokkuvõtvalt, jäätmete puhul, mille korral on põhjust kaaluda ohtliku omaduse HP 14 (ökotoksilisus) klassifikatsiooni, on selle adekvaatne kindlakstegemine keeruline ja vastuoluline protsess. Samas on tegemist paljude võimaliku taaskasutusega jäätmevoogude jaoks kriitilise omadusega. Seetõttu nõuavad lõplikud otsused HP 14 (ökotoksilisus) osas põhjaliku lühi- ja pikaajalise tagajärgede analüüsi, eriti selles osas mis puudutab jäätmete ringlussevõttu/ringmajandust.

8.15 Jäätmed, millel võivad ilmnedä ülnimetatud ohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jäätmetes otseselt – HP 15.

Jäätmete raamdirektiivi III lisas on ohtlik omadus HP 15 määratletud jäätmetele, millel võivad ilmnedä plahvatusohtlikud omadused, kuid mis ei esine algsetes jäätmetes otseselt. Kui jäätmed sisaldavad üht või mitut ainet, mis on klassifitseeritud vastavas tabelis esitatud ohulause või täiendava ohuteabe koodiga, klassifitseeritakse jäätmed ohtlikeks koodiga HP 15, välja arvatud juhul, kui jäätmed on sellisel kujul, et need ei saa mingil juhul olla plahvatusohtlikud ega potentsiaalselt plahvatusohtlikud.

Põlevkivitööstuse tuhad ei sisalda aineid mis on loetletud ohtliku omaduse **HP 15 all ning vastav ohtlik omadus põlevkivituhkadel puudub.**

9 Põlevkivituhkade potentsiaalselt ohtlike omaduste olemus ja jäätme ohtlikkuse hinnang võrreldes söetuhkadega

Eesti põlevkivituhkade füüsikaliste, keemiliste ja mineraalsete omaduste analüüs ning sellest tulenev liigitus vastavuses jäätmete ohtlikele omadustele otsekohalduva Euroopa Liidu komisjoni määrusega nr 1357/2014 [3] näitab, et peamisteks põlevkivituhkades sisalduvateks ohtlikeks aineteks, mis on aluseks põlevkivituhkade ohtlike omaduste määramisel, on vaba lubi (CaO) ja selle hüdratiseerumisel tekkiv Ca(OH)₂ (portlandiit) ning mikrokristalliline kvarts. Teiste potentsiaalselt ohtlike lihtainete ja/või nende ühendite (sh orgaanilised ühendid, raskmetallid jt) sisaldused on põlevkivituhkades madalad ning ei kuulu ohtlike omaduste hindamisel arvestamisele või ei ületa ka halvima võimaliku stsenaariumi korral kehtestatud piirväärtusi.

9.1 CaO ja Ca(OH)₂

Eesti põlevkivi (kukersiit) on settekivim, mis sisaldab merelist päritolu orgaanilist ainet kerogeeni. Kukersiit esineb lubjakivi vahekihtidena ning sisaldab lisaks orgaanilisele ainele ka karbonaatset ja savikas-terrigeenet mineraalset osa. Orgaanilise aine sisaldus kukersiidis jääb vahemikku 10-65% ja karbonaatse materjali sisaldus vahemikku 15-70% (sh karbonaatide sisaldus 20-45%-ni ja purdmaterjali ehk terrigeensete mineraalide sisaldus 20-40%). Põlevkivi termilisel töötlemisel toimub peale orgaanilise ainese põlemise ja/või transformeerumisele ka mineraalse osa muutumine. Karbonaatide (kaltsiidi ja dolomiidi) lagunemine algab temperatuuridel üle 600 °C ning kaltsiit termilise lagunemise maksimum on 895 °C ja dolomiidil 750 °C juures.

Vaba CaO (kustutamata lubi), mida loetakse potentsiaalselt ohtlikuks aineks, tekib kaltsiidi ja dolomiidi termilisel lagunemisel (dolomiidi lagunemisel koos MgO-ga). Tekkiv CaO on kõrge reaktiivusega ning PC tehnoloogia tuhas on reeglina 60-70% tekkinud CaO-st seotud erinevatesse mineraalidesse ja amorfsetesse faasidesse. Umbes 25% pole keemiliselt seotud (vaba CaO) ja 5-10% jääb seotuks (lagunemata karbonaadid). Kuna PC tehnoloogias toimub põlemine temperatuuridel >1000 °C, on selles karbonaatide (kaltsiit, dolomiit) lagunemisaste peaaegu 100%. CFBC tehnoloogias, kus põlemistemperatuur on 800 kuni 850 °C, on karbonaatide lagunemisaste 60-75%. Seetõttu on PC tuhas reeglina ka kõrgemad vaba CaO sisaldus. Sõltuvalt tuha eemaldamise punktist erinevates tehnoloogiates, muutub nii CFBC tehnoloogia kui ka PC tehnoloogia tuhas CaO sisaldus. Üldtrendina langeb CaO sisaldus järk-järgult alates koldetuhast kuni elektrifiltersüsteemideni.

CaO on samuti äärmiselt reaktiivne kokkupuutel veega (õhuniiskusega), mille tulemusena toimub CaO kiire hüdratiseerumine ja kustutatud lubja (Ca(OH)₂ ehk portlandiidi) moodustumine. Niiskes keskkonnas leiab see aset esimeste ööpäevade jooksul. Portlandiiti loetakse samuti potentsiaalselt

ohtlikuks aineks, kuid portlandiit Ca(OH)_2 reageerib omakorda õhus oleva süsihappegaasiga, mille tulemusena moodustub uuesti stabiilne mitte-ohtlik aine kaltsiumkarbonaat.

CaO ja portlandiidi (nn kustutatud lubja) ohtlikkus seineb nende aluselises ja sellest tingitud söövitavas toimes. CaO kokkupuutel niiskusega tekkiva Ca(OH)_2 tasakaaluline pH on normaaltingimustel 13,25. Selline tugevalt aluseline keskkond põhjustab ärritust ja nii pindmistes kui sisemistes kudedes/organites. Ka sissehingamisel põhjustavad need ained ärritust ja korduval/pikaajalisel sissehingamisel organite kahjustusi ning suurte koguste korral võib olla surmav. Selle tõttu on kehtestatud lubja või portlandiiti sisaldavatele toodetele (nt lubimördid, krohvisegud, lubivärvid, keemia- ja toiduainetetööstuse materjalidele jne) vastavad ohutusnormid/reeglid.

Põlevkivituhas sisalduva lubja ja portlandiidi ohtlikkuse analüüsimisel tuleb lähtuda kolmest asjaolust:

- Esiteks, lubja ja portlandiiti (kustutatud lubja) toodetakse suuremahuliselt tööstuslikult ning need ained leiavad kasutust nii meditsiiniliseks otstarbeks, insektsiidideks, väga laialdaselt tsemendi, paberi ja kõrgkvaliteedilise terase tootmisel, ehitusmaterjalide tootmises, keemiatööstuses ja toiduainetetööstuses (nt suhkru rafineerimine), reoveepuhastuses, põllumajanduses ning CO_2 sidujana. Selle juures ei loeta lubja ega kustutatud lubja keelatud aineks, kuid neile on lähtuvalt materjalide aluselisesest kehtestatud vastavad käitlemisreeglid.
- Teiseks, tänu karboniseerimisreaktsioonidele on põlevkivituhkade söövitavad omadused avatud seismisel (st kontaktis atmosfääriga) ajas muutuvad ning toimub sellise ohtlikuks liigitatud materjali neutraliseerumine ja ümberkristalliseerumine mitte-ohtlikuks kaltsiidiks. Seega on tegemist mööduva ohtlikkusega.
- Kolmandaks, Euroopa Komisjoni teatis jäätmete liigitamise tehnilise juhendi kohta [32] vastavuses jäätmete raamdirektiiviga 2008/98/EÜ [33] ja jäätmenimistut käsitleva komisjoni otsusega 2000/532/EÜ [2], mida on muudetud 2014. ja 2017. aastal, täpsustab alapeatükis 1.4.4. „CaO ja Ca(OH)_2 sisaldavad jäätmed“ üldiseid juhiseid kaltsiumoksiidi CaO ja kaltsiumhüdroksiidi Ca(OH)_2 sisaldavate jäätmete liigitamiseks.

Nimetatud peatükis tuuakse eraldi välja, et kaltsiumoksiidi ja kaltsiumhüdroksiidi tekib põlemisprotsessides suurtes kogustes ning neid leidub tuhas. Samuti rõhutatakse, et CaO/ Ca(OH)_2 sisaldavaid jäätmeid võib liigitada paljude kirjete alla ning toob välja alajaotised:

10 01 - Jõujaamades ja muudes põletusseadmetes tekkinud jäätmed (v.a jaotises 19 nimetatud jäätmed)

10 02 - Raua- ja terasetootmisjäätmed

10 13 - Tsemendi, lubja, krohvisegu ning nendest toodete valmistamisel tekkinud jäätmed

Samuti, kui $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ kasutatakse protsessi (antud juhul põlevkivipõletusprotsessist) tekkinud suitsugaasi puhastamisel, võib tahketele jääkidele kohaldada järgmisi kirjeid:

10 01 05 - Protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmed

10 01 07 - Protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised püdelad reaktsioonijäätmed

Põlevkivituhka selles nimistus eraldi ei loetleta, kuid selle põhimõtteline olemus, keemilised ja füüsikalised omadused ja tekkimisviis (fossiilse orgaanilise kütuse põletamisel või retortimisel ja järelpõletamisel tekkiv tahke jääde) annavad aluse põlevkivituha liigitamiseks koodiga 10 01 - Jõujaamades ja muudes põletusseadmetes tekkinud jäätmed.

Erinevalt 2015. aasta keskkonnaministri määrusest nr 70 „Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu“ [110], milles on Eesti Vabariigis kehtivasse jäätmenimistusse põlevkivikoldetuhale ja põlevkivi lendtuhale lisatud täiendavad jäätmekoodid (vastavalt 10 01 97* ja 10 01 98*), tuleks lähtudes põlevkivituhkade omaduste täielikust vastavusest klass C söetuhkadega põlevkivituhad liigitada (va väävlipüüdurite tuhad) kuuluvaks kahte (kolme) alaliiki:

- Koldetuhad: 10 01 01 - Koldetuhk, räbu ja katlatuhk v.a koodinumbriga 10 01 04 nimetatud katlatuhk (koodiga 10 01 04* on selles nimistus õilendtuhk ja –katlatuhk, mis ei ole rakendatava Eesti põlevkivituhkadele)
- Lendtuhad: 10 01 02 – Kivisöelendtuhk
- Põhimõtteliselt on keevkiht tehnoloogia kateldele koldetuhkadele rakendatav ka kood 10 01 24 - keevkihi katelde liiv.

Sama lähenemise korral klassifitseerub PC tehnoloogia väävlipüüdurite (NID) tuhk selles nimistus üheselt koodiga 10 01 05 - Protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmed.

Kõik nimetatud jäätmekoodidega märgitud jäätmeid loetakse vaatamata nende kaltsiumoksiidi või kaltsiumhüdroksiidi sisaldusele kindlasti tavajäätmete kirje alla (tähistus ANH). See tähendab, et ohtlike omaduste edasine hindamine ei ole vajalik.

Sellisel lähenemisel on otsene vastuolu eelnevas peatükis kirjeldatud jäätme ohtlikkuse hinnangutega, mille alusel on valdava osa Eesti põlevkivituhkade $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ sisaldused piisavalt kõrged nende ohtlikuks jäätmeks tunnistamiseks kas (enamustel juhtudel) HP4 või HP8 mõistes. Siiski on antud küsimuse konteksti oluline rõhutada kahte määravat asjaolu:

- Esiteks, Euroopa Komisjoni teatise jäätmete liigitamise tehnilise juhendi kohta [32] alapeatükis 1.4.4 tuuakse eraldi näitena välja jäätmed koodiga 10 02 01 – Räbutöötlemisjäätmed, mille puhul on rõhutatud jäätme liigitamisel arvesse võetavat asjaolu, et isegi kui raua- ja terasetööstusest pärit räbu kaltsiumoksiidi sisaldus on üle jäätmete raamdirektiivi III lisas esitatud piirnormi, tuleks jäätmed liigitada tavajäätmeteks, välja arvatud juhul, kui liikmesriik kohaldab jäätmete raamdirektiivi artiklit 7. Seega ei ole jäätme ohtlikkuse hindamisel määrav ainuüksi vastavate ainete sisaldus, vaid ka teised asjaolud nagu näiteks ainete kättesaadavus/vabanemine ja reaktsioonivõime ning ohtliku omaduse püsivus.
- Teiseks, Eesti põlevkivituha omadused, mis on esmaseks ja olulisimaks jäätme liigitamise aluseks, on analoogsed suure osa EL-is tekkivate söetuhkadega, mis on vastavalt EL-i jäätmenimistule liigitatavad kindlasti tavajäätmeteks jäätmekoodidega 10 01 01 – koldetuhk, räbu ja katlatuhk; 10 01 02 – kivisöelendtuhk; 10 01 05 – protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmed.

Euroopa elektri- ja soojusjaamades söe põletamisel tekkivate söetuhkade koostis varieerub suurtes piirides, mis tuleneb konkreetsest kasutatavast söe tüübist - ligniit, (sub-)bituminoosne süsi või antratsiit ja põletustehnoloogiast. Sõltuvalt söe koostisest, eristatakse kahte tuhka klassi: klass F mis moodustub kõrgekvaliteedilise söe (peamiselt antratsiit ja bituminoosne süsi) põlemisel ning mille koostises domineerivad Si ja Al ühendid (moodustades koos rauaga oksiidse vormiga >60-70% kogu tuhamassist) ja klass C tuhad, mis tekivad peamiselt ligniidi ja subbituminoosse söe põletamisel ning mida iseloomustab kõrge Ca sisaldus. **Eesti põlevkivituhad on keemiliselt ja mineraalselt koostiselt üheselt võrreldavad klass C tuhkadega, mille vaba CaO sisaldus on sarnane nii keevkiht- kui ka tolmpõletusprotsessidest pärit põlevkivituhkadele (Tabel 67), kusjuures mõningatel juhtudel võib vaba CaO sisaldus ligniidi põletamisel tekkinud tuhka ületada ka 20% piiri (nagu tolmpõletusel tekkinud põlevkivituhkades).** Reeglina jäävad ligniidi põletamisel tekkivates tuhka vaba CaO sisaldused samale tasemele Eesti põlevkivi põletamisel CFBC tehnoloogia kateldes tekkivate tuhkadega, kus CaO/Ca(OH)₂ sisaldused varieeruvad 5-25% piires (PC tuhka kuni 30%, vt Lisa 1. Mineraalne koostis või Lisa 2. Keemiline koostis) ning õlitööstuse tuhka on CaO/Ca(OH)₂ sisaldused <5%.

Ainuüksi 2017 aastal kaevandati ECOBA andmetel Saksamaal 166 Mt ligniiti, mille põletamisel elektri jaamades tekkis ligikaudu 36 miljonit tonni lendtuhka, millest ligikaudu 17-18 Mt on klassifitseeritav kui Ca-rikas klass C lendtuhk, mille keskmine reaktiivse CaO sisaldus on >10% (või >15%).

Tabel 67. Vaba CaO sisaldus ligniidi põletamisel tekkivates tuhkades

Päritolu (elektrijaam)	Tuha iseloomustus	Vaba CaO sisaldus (mass%)	Viide
Türgi (Soma)	PC LT	9,32	[117]
Kreeka (Ptolemais)	PC LT	5,18	[68]
Kreeka (Agios Dimitrios)	PC LT	18 kuni 20	[118]
Kreeka (Kardia)	PC LT EF	2 kuni 16	[100]
Kreeka		14,4	[119]
Hispaania		10	
Türgi		11,4	[120]
Poola (Jaworzno III)	FBC LT	18,6	
Poola (Tychy S.A.)	FBC LT	Kuni 22,9	[69]
Poola (Turow)	FBC LT	10,7	
Kosovo (Kosova B)	PC LT	9,9	[121]
Saksamaa (Neurath)	PC LT EF1	6,49	[101]
Saksamaa, Reinimaa		11,5	[103]
Saksamaa, Kesk-Saksamaa		Kuni 25	[104]
		Kuni 25	

Kuna ligniidi põletamisel tekkivaid kõrge CaO/Ca(OH)₂ sisaldusega tuhkasid käsitletakse vastavuses EL jäätmete raamdirektiiviga kindlasti tavajäätmelena jäätmekoodidega 10 01 01 – koldetuhk, räbu ja katlatuhk; 10 01 02 – kivisöelendtuhk; 10 01 05 – protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmel, siis ei ole sisuliselt põhjendatud Eesti põlevkivituhkade eristamine nimetatud jäätmeltest ning neid tuleb klassifitseerida samadel alustel samade jäätmekoodidega ning kindlasti tavajäätmel tüübina (ANH).

Samuti on siinkohal oluline, et põlevkivi tuhajäätmel ei eristu söetuhkadest ka keskkonnaohtlikkuse hinnangu küsimuses. Eesti põlevkivituhad ei ole kindlasti keskkonnaohtlikud HP 14 mõistes kui lähtuda HP 14 hindamisel Euroopa Komisjoni viimase ettepaneku kohaselt [3] eelistatud arvutusvalemel meetodist. Samas, kui juhinduda ökotoksikoloogilistest (bioloogilistest) katsetest, siis tänu vesilahuste kõrgele leeliselisusele ning soolsusele (soolade sisaldusele) on põlevkivituhad reeglina toksilised spetsiifiliselt enimkasutatud mudel-liigi vesikirp *Daphnia magna* suhtes. Sisuliselt samasugusele järeldusele on jõutud kivisöetuhkade (öko)toksilisuse määramisel, kus hinnangud kivisöetuhkade toksilisuse kohta varieerub akuutsest, väga toksilisest [75–79] kuni mittetoksiliseni [76–81] ning samuti on leitud, et laialt kasutatav vesikirp *Daphnia magna* on kivisöetuha leoveele tundlikum kui bakter *Vibrio fischeri* [75,87,88]. Sarnaselt Eesti põlevkivituhkadele on jõutud ka järeldusteni, et tuhkade toksilisust põhjustab enamasti eelkõige vesilahuste kõrge pH väärtus (sh just ligniidi tüüpi kivisöetuha korral) ja analüüsitava lahuse kõrge soolsus. Erinevalt Eesti põlevkivituhkadest on kivisöetuhkadel üheks toksilisuse põhjuseks loeatud ka leostuvaid raskmetalle [91,92], mis on põlevkivituhkade korral väheolulised.

9.2 Kristallilise kvartsitolmu ohtlikkus

Räni esineb looduses kristallilise ja amorfse ränidioksiidina (SiO_2). Kristalliline SiO_2 esineb looduses peamiselt α -kvartsi, β -kvartsi, (α,β)tridümiidi ja (α,β)kristobaliidina. Enimlevinumaks SiO_2 vormiks looduses on α -kvarts, mille domineeriva esinemissageduse tõttu kasutatakse kristallilise ränidioksiidi väljendamiseks tihtipeale üheselt terminit kvarts. (α -)kvarts on SiO_2 termodünaamiliselt stabiilne vorm kusjuures „ α “ eesliide tähistab SiO_2 madalatemperatuurset vormi, samas kui β -kvarts on SiO_2 kõrgtemperatuurne vorm, mis esineb looduses valdavalt vulkaanilistes tuhkaades.

(α -)Kvartsi leidub põhikomponendina või kaasneva mineraalina enamikes kivimtüüpides, kus ta esineb tihtipeale valdava mineraalse faasina. Lisaks erinevatele kivimtüüpidele esineb kvartsi 90-95% sisaldusega erinevate pinnaste liiva ja aleuriidi fraktsioonis. Kvartsi laialdasest levikust tulenevalt on erinevad maapõue kasutamise seotud eluvalad ja tegevused nagu maavarade kaevandamine ja töötlemine, sh tahketel fossiilsetel kütustel põhinev energeetika, mineraalsete ehitusmaterjalide tootmine, keraamika, klaasi ja tsemendi tootmine, põllumajanduses põldude hooldamine ja ehitus- ning lammutustööd peamised valdkonnad, kus töölised puutuvad kokku kristallilise kvartsi osakeste ja tolmuga [147].

Kvartsitolmu sissehingamist seostatakse seniste epidemioloogiliste uuringute alusel terviseohuga, mis võib areneda hingamisteede ja kopsude põletikulise reaktsioonini, raske ja pöördumatu kopsukahjustuse ehk silikoosini ning kopsuvähini. Lisaks hinnatakse, et kvartsitolm võib kujutada ohtu ka neerudele ja põhjustada autoimmuunhaigusi. Tervisele ohtlik on vaid kristallilise kvartsi peen sissehingatav fraktsioon, mitte aga SiO_2 amorfseid vormid ega jämekristalliline kvartsitolm [147–150]. Senised uuringud ei ole üheselt välja toodud kvartsi osakeste suurusi, millest alates loetakse sissehingatavat kvartsitolmu ohtlikuks, kuid üldiselt loetakse respireeritavateks neid osakesi, mille terasuurus on $<10 \mu\text{m}$ (PM10) ja kopsude alveoolidesse jõuab peentolm aerodünaamilise diameetriga $<2,5 \mu\text{m}$ (PM2.5).

Kvarts on Eesti põlevkivis peamine looduslik terrigeenne mineraal, mis koos savimineraalide ja K-päevakividega moodustab 20-40% põlevkivi põhimassist. Looduslik kvarts on põlevkivis väheümardunud–killuliste terakestena ning esineb valdavalt peen kuni jämealeuriidi osakestena ning on settesse sisse kandunud hõljumina. Põletamisel on kvarts vähereaktiivne, kuid võib osaliselt reageerida põletusprotsessis tekkiva CaO ja MgO-ga, moodustades sekundaarseid Ca-Mg-silikaatmineraale. Eesti põlevkivienergeetika ja õlitööstuse tüüpiline koldetuhkade lõimise kaalutud keskmine (masskeskmine) osakese läbimõõt on vahemikus 0,3-1,5 mm. Lentuha masskeskmine osakeste läbimõõt on ca. $12 \mu\text{m}$ ning lentuhk on osaliselt respireeritav. PM2,5, st osakeste osakaal mille diameeter on $<2,5 \mu\text{m}$ varieerub lentuhkades 10-20% piires. Kristallilise kvartsi sisaldused elektrijaamade ja õlitööstuse lentuhas (elektrifiltrite, tsüklon- ja kottfiltrite tuhas) on püsivalt 15-

20%. Kui eeldada, et kristalliliste faaside vahekorrad on lendtuha erinevates fraktsioonides/voogudes püsivad siis on PM_{2,5} fraktsiooni kuuluva ja potentsiaalselt kopsudesse tungiva kristallilise kvartsi osakaal lendtuhkades 1,5-4(6)%.

Lähtudes sellistest eeldustest, on vormiliselt kristallilise kvartsi sisaldused Eesti põlevkivituhkade lendtuhkade peenfraktsioonides (terasuurusega alla 10 µm) kõrgemad soovitatud tasemest ning on ohukoodide mõistes klassifitseeritavad ohtliku omaduse HP 7 – kantserogeenne alla, Carc. 1A ja 1B (kristallilise kvartsi sisaldus $\geq 0,1\%$) ning Carc. 2, kristallilise kvartsi sisaldused $\geq 1\%$).

Samamoodi liigituvad Eesti põlevkivituhkade lendtuhkade fraktsioonid peamiselt peeneteralise kristallilise kvartsi tõttu ohtlike omaduste HP 11 – mutageenne, HP 5 – mürgisus, HP 6 – äge mürgisus osas.

Sellise liigituse põhjuseks on silikoosi ja kopsuvähi otsesed seosed. Silikoosi ja kopsuvähi tekkepõhjused seisnevad kopsudesse (alveoolidesse) sattunud kristallilise kvartsi vastu tekkinud tugevas põletikulises reaktsioonis. Uuringud katseloomadega on näidanud, et kvartsi peentolmu osakesed põhjustavad rottide kopsudesse tungimisel tahkete osakeste kopsudest eemaldamise rolli täitvate makrofaagide hukkumise. Makrofaagide laguproduktid - oksüdandid ja tsütokiinid - põhjustavad tugeva ja püsiva põletikulise reaktsiooni kopsudes, seeläbi immuunsüsteemi aktiveerumise ja suurenenud immuunsüsteemi rakkude hulga. See viib epiteelkoe kahjustumiseni ja epiteelrakkude kontrollimatu paljunemiseni, mille tulemusena areneb kopsudes välja silikoos. Püsiv põletikuline seisund kopsudes ja pidev oksüdantide/radikaalide vabanemine võib lõpuks viia kopsuvähi arenemiseni. Arvatakse, et sarnaselt mõjutab kvarts kopsuvähi areng ka inimestel [149,150].

Kristallilise ränidioksiidi ohu suurus ei ole ühesugune igasuguse kvartsitolmu korral ja sõltub kvartsi kristalliitide füüsikalise-keemilistest omadustest, mida omakorda mõjutavad kristalliitide tekketingimused, kristallstruktuur ja ka osakeste nõ puhtus, nt kvartsitolmus esinevad lisandid ja kaasnevad ühendid (nt savi vm Al-ühendid) tõkestavad SiO₂ kristalliitidel kvartsitolmu tsütotoksilisust ja vähendavad mõju rakkudele [147]. Fubini et al. [151] on näidanud, et kvartsi kristalliitide tsütotoksilisus on samuti sõltuvuses kristallipinna hüdrofiilsusega ja hüdrofoobsemad kristallipinnad on väiksema ohtlikkusega. Kõrgtemperatuurne β -kvarts, mida leidub vulkaanilises tuhas ja võib ka leiduda lendtuhkades, on hüdrofoobsete omadustega. IARC raportis [147] tuuakse välja, et organismide reaktsioon kvartsitolmule sõltub veel kristalliitide morfoloogiast. Mida nurgelisem ja värskem on kristalliidi pind, seda suurema ohupotentsiaaliga selline kvartsitolm on. Seda läbi vabade radikaalide ja oksüdantide genereerimise, millel on negatiivne mõju rakkude normaalsele toimimisele, st rakusetele ja -välistele keemilistele protsessidele.

WHO Rahvusvahelise Vähiuuringute Keskuse (IARC) 2012 raportis [147] võetakse kokku mikrokristallilise kvartsitolmu ohtlikkus ja sedastatakse, et:

- a) on piisavalt tõendatud, et SiO₂ kristallilise kvartsi (ja kristobaliidi) vormis on kantserogeenne ja põhjustab inimestel kopsuvähki,
- b) on piisavalt tõendatud kvartsitolmu kantserogeensus katseloomade suhtes,
- c) on piiratud tõendid tridümiidi ja kristobaliidi tolmu kantserogeensuse osas katseloomade suhtes,
- d) kristallilise kvartsi ja kristobaliidi tolmu on inimestele kantserogeensed.

Eesti põlevkivi energeetika ja õlitööstuse tuhkades leiduva kristallilise kvartsitolmu osas ei ole seni tehtud uuringuid terviseriskide ja kantserogeensuse kohta ega leidu ühtegi uuringut, mis spetsiifiliselt oleks hinnanud põlevkivi tuhkades kristallilise kvartsitolmu sisaldusi ja teralist jaotust ning füüsikalise-keemilisi omadusi.

Jäätmete liigitamise määrus ei sätesta ega näe ette kantserogeensuse ja teiste seotud omaduste (mutageensus, mürgisus/äge mürgisus) katsemetoodikat, kuid nimetab, et enamasti peetakse võimaliku kantserogeensuse kindlakstegemiseks sobivaks mutageensuse katseid, mis on loetletud ohtliku omaduse HP 11 mutageensus katsemeetodite nimistus.

Kuna peenkristallilise kvartsi kantserogeensus ja/või mutageensus ei sõltu ainult kvartsi enese olemasolust vaid väga paljudest lisateguritest (sh keemilised ja füüsikalised omadused, kaasnevad ained ja ühendid jne), siis on otstarbekas enne ohtlikuse küsimuses kaalutletud otsuse tegemist viia läbi spetsiaalsed *in vitro* uuringud põlevkivituha lendtuhkade võimalike kahjulike mutageensete/kantserogeensete omaduste selgitamiseks.

10 Järeldused

Eesti seadusandluse kohaselt kehtib alates 1. juunist 2015 jäätmete ohtlikele omadustele komisjoni määrus (EL) nr 1357/2014 [1], mis asendab jäätmete raamdirektiivi III lisas (jäätmeseaduse §-s 8) käsitletud kahjulikud toimed H1-H15 jäätmete ohtlike omadustega HP 1-HP 15.

Olemasolevate avaldatud põlevkivituhkade uurimisandmete põhjal ei ole esialgsel hinnangul põlevkivituhkadele jäätmete ohtlikud omadused asjakohased vastavalt klassifikatsioonile HP 1, HP 2, HP 3, HP 9, HP 10, HP 13 ja HP 15 (Tabel 68 ja Tabel 69).

Kõigi teiste ohuliikide va HP 14 osas (HP 4, HP 5, HP 6, HP 7, HP 8, HP 11; HP 12) tuleb lugeda põlevkivitööstuse elektrijaamade ja õlitööstuse tahkeid jäätmeid ohtlikeks kas kõigi erinevate tuhaliikide osas või ainult osade tuhaliikide piires.

Tabel 68. Tuhkade koostisest tingitud hindamist mittevajavad ohtlikud omadused ja potentsiaalselt ohtlikud omadused

Põlevkivituhad		Sõetuhad	
Ei vaja hindamist	Vajab hindamist	Ei vaja hindamist	Vajab hindamist
HP 1	HP 4	HP 1	HP 4
HP 2	HP 5	HP 2	HP 5
HP 3	HP 6	HP 3	HP 6
HP 9	HP 7	HP 9	HP 7
HP 10	HP 8	HP 12	HP 8
HP 12	HP 11	HP 13	HP 10
HP 13	HP 14		HP 11
			HP 14

Ohtlikuks liigitamine koodiga HP 4/HP 8 tuleneb põlevkivituhkade piirmäärasid ületavast lubja (vaba CaO) sisaldusest, mille alusel liigituvad tuhad, sõltuvalt koostisest, kas HP 4 – ärritav (vaba CaO sisaldused <5%) või HP 8 – Söövitav (vaba CaO sisaldused >5%).

Liigitumine ohtlikuks koodiga HP 5, HP 6, HP 7, HP 11 ja HP 13 tuleneb esmaselt respireeritava kvartsi või respireeritava kvartsi ning lubja (vaba CaO) piirnorme ületavast sisaldusest. Neist HP 7 – kantserogeenne ja HP 11 – mutageenne on põhjustatud respireeritava kristallilise kvartsi piirmäärasid ületavast sisaldusest, vastavalt >0,1% ja >1% (vt lähemalt ptk 8.7).

Ohtliku omaduse HP 14 selgitamiseks on vaja defineerida meetodika – arvutusmeetod või ökotoksikoloogilised katsed (vt lähemalt ptk 7.14 ja ptk 8.14) – ja määratleda piirväärtused. Arvustulemuste põhjal, mis põhiosas arvestavad raskmetallide sisaldustega, ei ole tuhad keskkonnaohtlikud.

Varasemad ökotoksikoloogilised katsed selgrootute organismidega (*Daphnia magna*) on näidanud põlevkivituhkade akuutset toksilisust, mille põhjuseks peetakse põlevkivituhkade leostusvee

aluselisust ja kõrget soolsust. Samas, sõltuvalt kasutatud testorganismidest (biotestist) on saadud hinnang toksilisusele olnud erinev. Lisaks, hinnang ohtliku omaduse HP 14 osas sõltub ka toksilisusele seatud piirväärtusest (need erinevad riigiti). Seega, **kuigi ökotoksikoloogiliste testide tulemusi peetakse arvutusliku meetodikaga saadud tulemuste ees ülimuslikuks, siis arvestades, et HP 14 osas puudub ühtne EL-i ülene aktsepteeritud meetodika, bioloogiliste katsetega määratud toksilisus ja arvutusvalemite tulemused on vasturääkivad ning bioloogiliste katsetega määratud toksilisuse tegelikud põhjused ei ole üheselt selged, siis vajab ohtliku omaduse HP 14 hindamise ning selle pikaajalise või lühiajalise perspektiivi määramine eraldi otsustust. Lähtudes olemasolevast EL-i praktikast ja arvestades lähiriikide soovitusi (nt. Soome) on soovitatav rakendada ohtliku omaduse HP 14 määramisel arvutusmeetodit.**

Uurimisaluste erinevate tuhaliikide esmase ohtlikkuse hinnangu koondtabel (sh. HP 14 arvutuslikust meetodist) koos hinnanguga võrdlustuhkadele on toodud Tabel 69.

Käesolev uuring selgitas:

1. Eesti elektrijaamades- ja õlitööstuses tekkivate põlevkivituhavoogude struktuuri, hinnangulised osakaalud ning erinevate tuhaliikide füüsilised, keemilised ja mineraalsed omadused:

- 1.1. Sõltuvalt konkreetsest tehnoloogiast moodustab koldes tekkiv jämedateraline (masskeskmise terasuurus 0,3-1,5 mm) koldetuhk 30-40% kogu tuhavoost ning peenteralises lendtuhas (masskeskmise terasuurus 12-20 µm) domineerib elektrifiltri esimese välja ja/või tsüklontuhk, mille osakaal on 40-60% kogu tuhavoost.
- 1.2. Põletamisel ja/või retortimisel koos järgneva põletamisega tekkivate tuhade keemiline ja mineraalne koostis ning osakeste morfoloogia sõltub otseselt põletamistehnoloogiast, kusjuures olulisim roll on põletustemperatuuridel: toImpõletusel (PC tehnoloogia) põletatakse tolmuks peenestatud põlevkivi temperatuuridel 1250-1450 °C ja keevkihtpõletusel (CFBC tehnoloogia) ja tahke soojuskandja retortide poolkoksi järelpõletusel aerofontäänkolletes või keevkihtkoldes 700-850 °C juures.
- 1.3. PC tehnoloogia korral toimub valdav osa silikaatide mineraalseid muutusi kõrge temperatuuri juures (>1200 °C). Kuna CFBC tehnoloogia korral on temperatuur madalam, siis on see osa reaktsioonidest pärsitud ning silikaatse osa muutumine on vähene ja transformatsioonid ei saavuta keemilist tasakaalu. Samuti ei ole CFBC tehnoloogia korral karbonaatide (ennekõike kaltsiidi) lagunemine täielik ning koldetuhkades on märkimisväärselt kõrged termiliselt lagunemata kaltsiidi või osaliselt lagunenud dolomiidi sisaldused.
- 1.4. Peamisteks sekundaarseteks faasideks põlevkivituhkades on CaO, MgO, sekundaarsed Ca(Mg)-silikaadid ja põlevkivis leiduva mineraalse Ca ning mineraalides ja orgaanilises aines leiduva väevli arvelt tekkivad väga erinevad kaltsiumit ja väevlit sisaldavad oksiidid-silikaadid

ja sulfaatsed komponendid. Kõige kõrgem vaba CaO sisaldus on PC tuhkades (20-35%), CFBC tuhkades on vaba CaO sisaldus reeglina 5-20% ning õlitööstuse tuhkades <5%. Vaba CaO sisaldus CFBC tuhavoogudes väheneb rikastatud põlevkivi põletamisel. Peamiste jääk- ja sekundaarsete mineraalide sisaldused muutuvad seaduspäraselt tuhavoo erinevates osades ning üldtrendina langeb CaO sisaldus ja kasvab lagunemata jäägi (peamiselt kvartsi) sisaldus järk-järgult alates koldetuhast kuni elektrifiltersüsteemideni.

1.5. Jälgelementide, sh raskmetallide, sisaldused on põlevkivituhas madalad ja ei ületa reeglina normatiive (sihtarve), mis on seatud teenindus ja/või elamumaadele. Valdavalt kasvavad kõigi raskmetallide ja teiste jälgelementide sisaldused kolde(põhja)tuhast lendtuha peenemate fraktsioonide suunas. Kõige kõrgemad jälgelementide (sh raskmetallide) sisaldused on mõõdetud elektrifiltrite viimastes väljades. Näiteks, Pb sisaldused varieeruvad koldetuhas 15-20 ppm-st kuni 60-140 ppm-ni elektrifiltrite viimastes väljades. Cr sisaldused varieeruvad sarnaselt 10-20 ppm-st koldetuhas kuni 50-60 ppm-ni elektrifiltrite viimastes väljades. Samuti varieeruvad Hg (<0,02 ppm kuni 0,04-0,05 ppm), Ni (10-12 kuni 30-40 ppm), Zn (40-60 ppm kuni 150 pm), Cu (4-8 kuni 11-12 ppm), Ba (tõuseb kuni 180-200 ppm), U (1-2 ppm kuni 4-5 ppm) ning Th (2 ppm kuni 5-6 ppm). Samas moodustavad elektrifiltrite viimaste väljade tuhavood väga väikese osa summaarsetest tuhavoogudest.

2. Eesti põlevkivituhkade ja tüüpiliste söetuhkade omaduste ja koostise võrreldavus:

2.1. Võrreldes Eesti põlevkiviga ja põlevkivituhkadega on erinevat tüüpi süte ja nende põletamisel tekkinud tuhkade koostised suure varieeruvusega, kuid sõltuvad samuti põletustehnoloogiast ja kasutatavast suitsugaaside puhastuse tehnoloogiast. Sõltuvalt söe lähtepäritolust ning diagenetilisest astmest eristatakse kolme põhitüüpi sütt: ligniit, (sub-)bituminoosne süsi ja antratsiit. Nende põletamisel tekivad erinevate keemiliste omadustega tuhad – klass F tuhad, mis on silikaatse koostisega, mis tüüpiliselt moodustavad >60-70% kogu tuhamassist, ja klass C tuhad ehk Ca-rikkad tuhad, milles on kõrge Ca ühendite sisaldus, mis tavaliselt esineb lubjana (vaba CaO) ja mille sisaldused ulatuvad >20%. Klass C tuhad tekivad tavaliselt ligniidi ja sub-bituminoosse söe põletamisel.

2.2. Eesti põlevkivituhad vastavad oma keemiliselt ja mineraalselt koostiselt klass C tuhkadele. Võrreldes tüüpiliste kivisöetuhkadega on Eesti põlevkivituhas märgatavalt kõrgem (eriti CFBC tuhkades) osaliselt lagunemata kaltsiidi (harvem dolomiidi) sisaldus, mis tuleneb Eesti põlevkivi karbonaatsusest. Kuigi klass C tuhkade kvartsi (SiO₂) sisaldused võivad varieeruda suurtes piirides, siis tüüpiliselt on nendes kõrgem Si (kvartsi) ja Al (alumosilikaatide) sisaldus kui Eesti põlevkivituhkades. Mõlemas tuhatüübis on sarnaselt kõrge CaO (eriti vaba CaO) sisaldus, mis on mõlemal juhul >10%.

- 2.3. Kui võrrelda Eesti põlevkivituhkade keemilise koostise varieeruvust peamiste süte tüüpidega (kõrgekvaliteediline süsi – antratsiit, bituminoosne süsi ja madalakvaliteediline ligniit/pruunsüsi), siis sarnaneb Eesti põlevkivituhk ühemõtteliselt Ca-rikastele ligniidi tüüpi süte tuhkadele.
- 2.4. Jälgelementide sisaldused söetuhkades on väga varieeruvad ning sõltuvad söe konkreetsest päritolust ja diagenetilisest arenguloost. Potentsiaalselt olulisemateks inimeste tervist ja keskkonda mõjutavateks loetakse kivisöetuhkades arseeni, berülliumi, boori, kaadmiumit, kroomi, koobaltit, pliid, elavhõbedat, mangaani ja niklit. Lisaks söe ja põlevkivi koostise varieeruvusele, mõjutab jälgelementide sisaldust tuhkades ka põletustehnoloogia. Enamus juhtudel on aga nii lend- kui ka koldetuhas nimetatud elementide sisaldused alla 1000 mg/kg (ppm) ehk alla 0,1%. Põlevkivituhkade ja söetuhkade jälgelementide sisalduse võrdluse põhjal võib järeldada, et valdavas enamuses on põlevkivituhkade raskmetallide ja teiste jälgelementide sisaldused madalamad, välja arvatud üksikute jälgelementide osas.
3. **Eesti põlevkivituhkade omadused lähtudes EL jäätmete raamdirektiivis loetletud jäätmete ohtlikest omadustest HP 1–HP 15:**
- 3.1. Põlevkivituhkade koostise ja omaduste analüüs näitab, et põlevkivituhkade korral ei ole asjakohased jäätmete ohtlikud omadused HP 1, HP 2, HP 3, HP 9, HP 10, HP 13 ja HP 15.
- 3.2. Ohtlike omaduste HP 4, HP 5, HP 6, HP 7, HP 8, HP 11 ja HP 12 osas tuleb lugeda põlevkivitööstuse elektrijaamade ja õlitööstuse tahked jäätmed ohtlikeks kas kõigi erinevate tuhaliikide osas või ainult osade tuhaliikide piires.
- 3.3. Põlevkivituhkade ohtlikuks liigitamine koodiga HP 4/HP 8 tuleneb põlevkivituhkades piirväärtuseid ületavast lubja (vaba CaO) sisaldusest, mille alusel liigituvad tuhad, sõltuvalt koostisest, kas HP 4 – ärritav (vaba CaO sisaldused <5%) või HP 8 - söövitav (vaba CaO sisaldused >5%).
- 3.4. Põlevkivituhkade liigitumine ohtlikuks koodiga HP 5, HP 6, HP 7, HP 11 ja HP 13 tuleneb esmaselt respireeritava kvartsi või respireeritava kvartsi ja lubja (vaba CaO) piirväärtuseid ületavast sisaldusest. Neist HP 7 - kantserogeenne ja HP 11 – mutageenne on põhjustatud respireeritava kristallilise kvartsi piirväärtuseid ületavast sisaldusest (vastavalt >0,1% ja >1%).
- 3.5. Ohtliku omaduse HP 14 hindamise tulemused sõltuvad kasutatavast meetodikast. Arvestades ka kõige halvema stsenaariumiga ei ole arvutustulemuste põhjal, mis põhiosas arvestavad raskmetallide sisaldustega, mitte ükski põlevkivituha liik ohtlik jääde. Ökotoxikoloogiliste katsete tulemused näitavad, et elektrijaamade tuhad on akuutselt toksilised vesikirbu *Daphna magna* suhtes (TU järgi), kuid on vähetoksilised või ei ole toksilised bakteritele *Vibrio*

fischeri. Seejuures sõltub toksilisuse hinnang ka *Daphnia magna* testi tulemustele rakendatavast piirväärtustest.

3.6. Kuna olemasolevad bioloogiliste katsetega määratud toksilisuse ja arvutusvalemite tulemused on vasturääkivad ning bioloogiliste katsetega määratud toksilisuse tegelikud põhjused ei ole üheselt selged, siis vajab ohtliku omaduse HP 14 hindamise metoodika (sh kasutatavad testid ja rakendatavad piirväärtused) valik eraldi otsustust. Lähtudes olemasolevast EL praktikast ja arvestades lähiriikide soovitusi (nt. Soome) on soovitatav rakendada ohtliku omaduse HP 14 hindamisel arvutusmeetodit.

4. Põlevkivituhkade potentsiaalselt ohtlike omaduste olemust ja jäätme ohtlikkuse hinnangut võrreldes söetuhkadega:

4.1. Eesti põlevkivituhkades on peamisteks jäätmetes sisalduvateks ohtlikeks aineteks, mis on aluseks ohuklasside ja ohukategooriate määramisel, kaks mineraalsete faaside rühma - vaba lubi (CaO) ja selle hüdratiseerumisel tekkiv Ca(OH)₂ (portlandiit) ning mikrokristalliline kvarts. Teiste potentsiaalselt ohtlike lihtainete ja/või ühendite (sh orgaanilised ühendid, raskmetallid jt) sisaldused on põlevkivituhkades madalad ning ei kuulu ohtlikuse hindamisel arvestamisele või ei ületa ka halvima võimaliku stsenaariumi korral kehtestatud piirväärtusi.

4.2. CaO, mida loetakse potentsiaalselt ohtlikuks aineks, tekib kaltsiidi ja dolomiidi termilisel lagunemisel (koos MgO-ga dolomiidi lagunemisel). CaO ja portlandiidi (nn kustutatud lubja) ohtlikkus seisneb nende aluselises ja sellest tingitud söövitavas toimes.

4.3. Tänu karboniseerimisreaktsioonidele on põlevkivituhkade söövitavad omadused avatud seisemisel (st kontaktis atmosfääriga) ajas muutuvad ning aja jooksul toimub sellise ohtlikuks liigitatud materjali neutraliseerumine ja ümberkristalliseerumine mitte-ohtlikuks kaltsiidiks. Seega on tegemist mööduva ohtlikkusega.

4.4. Euroopa Komisjoni teatis jäätmete liigitamise tehnilise juhendi kohta [32] vastavuses jäätmete raamdirektiiviga [33] ja jäätmenimistut käsitleva komisjoni otsusega [2], mida on muudetud 2014. ja 2017. aastal toob eraldi välja, et kaltsiumoksiidi ja kaltsiumhüdroksiidi tekib suurtes kogustes põlemisprotsesside käigus ning neid leidub allesjäänud tuhas. Eraldi näitena tuuakse välja jäätmed koodiga 10 02 01 – Räbutöötlemisjäätmed, mille puhul on välja toodud jäätme liigitamisel arvesse võetav asjaolu, et isegi kui raua- ja terasetööstusest pärit räbu kaltsiumoksiidi sisaldus on üle jäätmete raamdirektiivi III lisas esitatud piirnormi, tuleks jäätmed liigitada tavajäätmeteks, välja arvatud juhul, kui liikmesriik kohaldab jäätmete raamdirektiivi artiklit 7.

- 4.5. Seega ei ole jäätmehaavade ohtlikkuse hindamisel määrav ainuüksi vastavate ainete sisaldus vaid ka teised asjaolud nagu näiteks ainete kättesaadavus/vabanemine ja reaktsioonivõime ning ohtliku omaduse püsivus.
- 4.6. Eesti põlevkivituhad on keemiliselt ja mineraalselt koostiselt üheselt võrreldavad ligniidi (ja sub-bituminoosse söe) põletamisel tekkivate klass C tuhkadega, mille vaba CaO sisaldus on sarnane nii keevkiht- kui ka tolmipõletusprotsessidest pärit põlevkivituhkadele.
- 4.7. Kuna ligniidi põletamisel tekkivaid kõrge CaO/Ca(OH)₂ sisaldusega tuhkasid käsitletakse EL jäätmehaavade raamdirektiivi alusel kindlasti tavajäätmehaavade järelekoostisega 10 01 01 – koldetuhk, räbu ja katlatuhk; 10 01 02 – kivisöölenähtuhk; 10 01 05 – protsessist väljuvate gaaside väävlitustamisel tekkinud kaltsiumipõhised tahked reaktsioonijäätmehaavade, siis ei ole sisuliselt põhjendatud alust Eesti põlevkivituhkade eristamiseks nimetatud jäätmehaavade ning neid tuleb klassifitseerida samadel alustel samade järelekoostisega ning kindlasti tavajäätmehaavade tüübina (ANH).
- 4.8. Kõik nimetatud järelekoostisega märgitud jäätmehaavade loetakse vaatamata nende koostisele (sh kaltsiumoksiidi või kaltsiumhüdrosiidi sisaldusele) kindlasti tavajäätmehaavade kirje alla (tähistus ANH). See tähendab, et ohtlike omaduste edasine hindamine ei ole vajalik.
- 4.9. Põlevkivituhk kui jääde ei eristu söetuhkadest ka keskkonnaohtlikkuse hinnangu küsimuses. Eesti põlevkivituhad ei ole kindlasti keskkonnaohtlikud HP 14 mõistes kui lähtuda Euroopa Komisjoni viimase ettepaneku kohaselt [3] eelistatud arvutusvalemite meetodist HP 14 hindamiseks. Samas, kui juhinduda ökotoksikoloogilistest (bioloogilistest) katsetest siis tänu vesilahuste kõrgele leeliselisusele ning mineraalsusele on põlevkivituhad reeglina toksilised spetsiifiliselt enimkasutatud mudel-liigi vesikirp *Daphnia magna* suhtes, kuid vähetoksilised või mitte-toksilised bakterikultuuride suhtes. Sisuliselt samasugusele järelekoostisele on jõutud kivisööetuhkade (öko)toksilisuse määramisel, kus hinnangud kivisööetuhkade toksilisuse kohta varieeruvad akuutsest väga toksilisest kuni mittetoksiliseni ning samuti on leitud, et tuhkade toksilisust põhjustab enamasti eelkõige vesilahuste kõrge pH väärtus (sh just ligniidi tüüpi söetuhha korral) ja analüüsitava lahuse kõrge soolsus. Erinevalt Eesti põlevkivituhkadest on kivisööetuhkadel täiendavaks toksilisuse põhjuseks leostuvad raskmetallid, millede osatähtsus põlevkivituhkade süsteemides on väike.
- 4.10. Potentsiaalselt sisse hingatava kristallilise kvartsi sisaldused elektrijaamade ja õlitööstuse lendtuhkades (elektrifiltrite, tsüklon- ja kottfiltrite tuhas) on püsivalt 15-20%. Kui eeldada, et kristalliliste faaside vahekorrad on lendtuha erinevates terasuurse fraktsioonides püsivad siis PM_{2,5} fraktsiooni kuuluva ja potentsiaalselt kopsudesse tungiva kristallilise kvartsi osakaal lendtuhkades on 1,5-4(6)%.

- 4.11. Lähtudes sellistest eeldustest on vormiliselt kristallilise kvartsi sisaldused Eesti põlevkivituhkade lendtuhkade peenfraktsioonides (terasuurusega alla 10 μm) kõrgemad soovitatud väärtusest ning lendtuhad on ohtliku omaduse HP 7 – kantserogeenne mõistes ohtlikud (Carc. 1A ja 1B (kristallilise kvartsi sisaldus $\geq 0,1\%$) ning Carc. 2, kristallilise kvartsi sisaldused $\geq 1\%$). Samamoodi on Eesti põlevkivituhkade lendtuha fraktsioonid peamiselt peeneteralise kristallilise kvartsi tõttu ohtlikud ohtliku omaduse HP 11 – mutageenne, HP 5 – mürgisus ja HP 6 – äge mürgisus osas.
- 4.12. Kristallilise ränidioksiidi ohu suurus ei ole ühesugune igasuguse kvartsitolmu korral ja sõltub kvartsi kristalliitide füüsikalise-keemilistest omadustest, mida omakorda mõjutavad kristalliitide tekketingimused, kristallstruktuur ja ka osakeste nõ puhtus. Nt kvartsitolmus esinevad lisandid ja kaasnevad ühendid (nt savi vm Al-ühendid) tõkestavad SiO_2 kristalliitidel kvartsitolmu tsütotoksilist mõju rakkudele. Samuti mõjutab kvartsi kristalliitide tsütotoksilisust kristallipinna hüdrofiilsus.
- 4.13. Eesti põlevkivi elektri ja õlitööstuse tuhkades leiduva kristallilise kvartsitolmu osas ei ole seni tehtud uuringuid terviseriskide ja kantserogeensuse kohta. Samuti ei leitud ühtegi uuringut, mis spetsiifiliselt oleks hinnanud kristallilise kvartsitolmu sisaldust ja teralist jaotust ning füüsikalise-keemilise omadusi põlevkivituhkades.
- 4.14. Kuna peenkristallilise kvartsi kantserogeensus ja/või mutageensus ei sõltu ainult kvartsi enese olemasolust, vaid väga paljudest lisateguritest (sh keemilised ja füüsikalised omadused, kaasnevad ained ja ühendid jne) siis on otstarbekas kaalutletud ohtlikkuse otsuste tegemiseks viia läbi spetsiaalsed *in vitro* uuringud põlevkivi lendtuhkade võimalike kahjulike mutageensete/kantserogeensete omaduste selgitamiseks.

Tabel 69. Tuhaliikide ohtlikkuse hinnangud: OHTLIK - ■, MITTEOHTLIK - ■

Tehnoloogia	voog	HP 1	HP 2	HP 3	HP 4	HP 5	HP 6	HP 7	HP 8	HP 9	HP 10	HP 11	HP 12	HP 13	HP 14	HP 15
		Plahvatusohtlik	Oksüdeeriv	Tuleohtlik	Ärritav	Mürgisus	Äge mürgisus	Kantserogeenne	Söövitav	Nakkust tekitav	Reproduktiivtoksiiline	Mutageenne	Eraldab gaase	Sensibiliseeriv	Keskonnaohtlik	Teisene ohtlikkus
Põlevkivi																
PC+NID*	KT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CFBC	KT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Auvere	KT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
E140**	Tsüklon	■	■	■	■	■	?	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	EF	■	■	■	?	■	?	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Petroter	EF	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	SV	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Enefit280	KT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Süsi																
PC (ligniit, Türgi) [122]	KT	■	■	■	■	?	■	■	■	■	?	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	?	■	■	■	■	?	■	■	■	■	■
PC (bitumi-noosne süsi, Hispaania) [125]	KT	■	■	■	?	?	?	?	?	■	?	?	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■	■	■	■	■
PC (ligniit, Poola) [124]	KT	■	■	■	■	?	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	?	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
PC (bitumi-noosne süsi, Poola) [124]	KT	■	■	■	■	?	■	■	?	■	■	■	■	■	■	■
	LT	■	■	■	■	?	■	■	?	■	■	■	■	■	■	■
PC (ligniit, Kreeka) [123]	LT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tehnoloogia	voog	HP 1	HP 2	HP 3	HP 4	HP 5	HP 6	HP 7	HP 8	HP 9	HP 10	HP 11	HP 12	HP 13	HP 14	HP 15

*NIDI tuhk on tavajäade jäätmekoodiga 10 01 05; **Enefit 140 andmed on lünklikud, kuna Enefit 140 tuhka ei ole võimalik kuivalt kätte saada; Petroter tehnoloogia tuhka andmeid ei saa kasutada tulenevalt Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiatega erinevusest; ? – hindamiseks on info puudulik

11 Kirjandus

1. Commission Regulation (EU) No 1357/2014 of 18 December 2014 replacing Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. Off J Eur Union [Internet]. 2014 [cited 2019 Feb 12];57:89–96. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32014R1357>
2. 2000/532/EC: Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Art. Off J Eur Union [Internet]. 2000;3–24. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32000D0532>
3. Council Regulation (EU) 2017/997 of 8 June 2017 amending Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council as regards the hazardous property HP 14 ‘Ecotoxic’ [Internet]. Off. J. Eur. Union 2017 p. 1–4. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32017R0997>
4. Dilaktorski N. Theoretical basis for the utilization of the mineral compound of oil-shale in building materials industry [in Russian]. Stud Build. 1964;3:5–45.
5. Vingisaar P, Kattai V, Utsal K. The composition of the kukersite in the Baltic Oil Shale Basin [in Russian]. Proc Est Acad Sci Geol. 1984;33:55–62.
6. Kattai V, Saadre T, Savitski L. Eesti põlevkivi : geoloogia, ressurs, kaevandamistingimused. Eesti Geoloogiakeskus; 2000.
7. Paat A. About the mineralogical composition of Estonian oil shale ash. Oil Shale. 2002;19:321–33.
8. Veiderma M. Estonian Oil Shale - Resources and Usage. Oil Shale. 2003;20:295–303.
9. Lille Ü, Heinmaa I, Pehk T. Molecular model of Estonian kukersite kerogen evaluated by ¹³C MAS NMR spectra☆. Fuel. 2003;82:799–804.
10. Golubev N. Solid heat carrier technology for oil shale retorting. Oil Shale. 2003;20:324–32.
11. Soone J, Doilov S. Sustainable utilization of oil shale resources and comparison of contemporary technologies used for oil shale processing. Oil Shale. 2003;20:311–23.
12. Loo L, Konist A, Neshumayev D, Pihu T, Maaten B, Siirde A. Ash and flue gas from oil shale oxy-fuel circulating fluidized bed combustion. Energies. 2018;11.
13. Arro H, Prikk A, Pihu T, Öpik I. Utilization of semi-coke of Estonian shale oil industry. Oil Shale [Internet]. 2002 [cited 2018 Nov 29];19:117–25. Available from:

http://www.kirj.ee/public/oilshale/3_arro_2002_2.pdf

14. Kaljuvee T, Trass O, Pihu T, Konist A, Kuusik R. Activation and reactivity of Estonian oil shale cyclone ash towards SO₂ binding. *J Therm Anal Calorim.* 2015;121:19–28.

15. Ots A. Oil shale fuel combustion. Tallinn, Estonia: Tallinn University of Technology; 2006.

16. Pihu T, Konist A, Neshumayev D, Loosaar J, Siirde A, Parve T, et al. Short-term tests on firing oil shale fuel applying low-temperature vortex technology. *Oil Shale.* 2012;29.

17. Uibu M, Uus M, Kuusik R. CO₂ mineral sequestration in oil-shale wastes from Estonian power production. *J Environ Manage* [Internet]. 2009 [cited 2017 May 2];90:1253–60. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479708002053>

18. Mõtlep R, Kirsimäe K, Talviste P, Puura E, Jürgenson J. Mineral Composition of Estonian Oil Shale Semi-Coke Sediments. *Oil Shale* [Internet]. 2007 [cited 2018 Apr 17];24:405–22. Available from: [https://books.google.ee/books?id=NkYX-U-ifroC&pg=PA408&lpg=PA408&dq=oil-shale+semi-coke+surface+area&source=bl&ots=TUQ7HNez9w&sig=YODMMKUTQy2ueUXi1dBfHeFbthQ&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwix6ZbCqsHaAhVRyKQKHcmSA204ChDoAQglMAA#v=onepage&q=oil-shale semi-coke s](https://books.google.ee/books?id=NkYX-U-ifroC&pg=PA408&lpg=PA408&dq=oil-shale+semi-coke+surface+area&source=bl&ots=TUQ7HNez9w&sig=YODMMKUTQy2ueUXi1dBfHeFbthQ&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwix6ZbCqsHaAhVRyKQKHcmSA204ChDoAQglMAA#v=onepage&q=oil-shale%20semi-coke%20s)

19. Triikkel A, Keelmann M, Kaljuvee T, Kuusik R. CO₂ and SO₂ uptake by oil shale ashes. *J Therm Anal Calorim* [Internet]. 2010 [cited 2019 May 14];99:763–9. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-009-0423-7>

20. Velts O, Hautaniemi M, Kallas J, Kuosa M, Kuusik R. Modeling calcium dissolution from oil shale ash: Part 2.: Continuous washing of the ash layer. *Fuel Process Technol* [Internet]. Elsevier; 2010 [cited 2019 May 14];91:491–5. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382009003579?via%3Dihub>

21. Maaten B, Loo L, Konist A, Siirde A. Mineral matter effect on the decomposition of Ca-rich oil shale. *J Therm Anal Calorim.* 2017;

22. Blinova I, Bitjukova L, Kasemets K, Ivask A, Käkinen A, Kurvet I, et al. Environmental hazard of oil shale combustion fly ash. *J Hazard Mater* [Internet]. Elsevier; 2012 [cited 2019 Feb 12];229–230:192–200. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389412006061?via%3Dihub>

23. Konist A, Maaten B, Loo L, Neshumayev D, Pihu T. Mineral sequestration of CO₂ by carbonation of Ca-rich oil shale ash in natural conditions. *Oil Shale.* 2016;33:248–59.

24. Konist A, Pihu T, Neshumayev D, Külaots I. Low Grade Fuel Oil Shale and Biomass Co-Combustion

in CFB Boiler. Oil Shale. 2013;30:294–304.

25. Konist A, Pihu T, Neshumayev D, Siirde A. Oil shale pulverized firing: boiler efficiency, ash balance and flue gas composition. Oil Shale. 2013;30:6–18.

26. Reinik J, Irha N, Steinnes E, Urb G, Jefimova J, Piirisalu E. Release of 22 elements from bottom and fly ash samples of oil shale fueled PF and CFB boilers by a two-cycle standard leaching test. Fuel Process Technol [Internet]. Elsevier; 2014 [cited 2019 May 14];124:147–54. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382014001076>

27. Hotta A, Parkkonen R, Hiltunen M, Arro H, Loosaar J, Parve T, et al. Experience of Estonian Oil Shale Combustion Based On CFB Technology at Narva Power Plants. Oil Shale [Internet]. 2005;22:381–97. Available from: http://www.kirj.ee/public/oilshale/3_hotta_4s_05.pdf

28. Siirde A. Editor's page. Oil shale related fundamental research and industry development. Oil Shale. 2015;32:1.

29. Neshumayev D, Ots A, Parve T, Pihu T, Plamus K, Prikk A. Combustion of baltic oil shales in boilers with fluidized bed combustion. Power Technol Eng. Springer US; 2011;44:382–5.

30. Pihu T, Konist A, Neshumayev D, Loo L, Molodtsov A, Valtsev A. Full-scale tests on the co-firing of peat and oil shale in an oil shale fired circulating fluidized bed boiler. Oil Shale. 2017;34.

31. Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016-2030 täitmise 2016. ja 2017. aasta aruanne [Internet]. Tallinn; 2019. Available from: <http://eelnouid.valitsus.ee/main#cGCKnUHB>

32. Commission notice on technical guidance on the classification of waste. Off J Eur Union [Internet]. 2018;C 124:1–134. Available from: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018XC0409\(01\)&qid=1561016270264](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018XC0409(01)&qid=1561016270264)

33. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Off J Eur Union [Internet]. 2008;3–30. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>

34. Jäätmeseadus. Riigiteataja [Internet]. 2018;1. Available from: <https://www.riigiteataja.ee/akt/112122018040>

35. Ots A. Põlevkivi põletustehnika. Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda; 2004.

36. Ots A. Tahkekütuse keevkihtpõletustehnika. Abo L, editor. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus; 2016.

37. Ots A, Prikk A, Nešumajev D, Pihu T, Soosaar S, Parve T, et al. Põlevkivi koostise mõju CFBC kateldega energiaploki tehnilis-majanduslikele näitajatele ja heitmetele. 2008.

38. Aarna I. Põlevkivist vedelkütuste arendamine meil ja mujal. Loengusari, TTU. 2015.
39. Maaten B, Pikkor H, Konist A, Siirde A. Determination of the total sulphur content of oil shale by using different analytical methods. *Oil Shale* [Internet]. 2018 [cited 2019 Jun 27];35:144. Available from: http://www.kirj.ee/?id=30417&tpl=1061&c_tpl=1064
40. Kirso U, Otson R, Irha N, Tanner R, Tanner H, Bogdanov A. Some Analytical Problems Concerning Environment Pollutants. *Proc Est Acad Sci Chem*. 1994;43:180–94.
41. Paalme L, Voll M, Urbas E, Palvadre R, Johannes I, Kirso U. Oil shale region influence on the atmospheric pollution of Lake Peipsi [in Estonian]. *Proc Est Acad Sci Chem*. 1990;39:18–27.
42. Kirso U, Irha N. Leaching of pyrene from fly ash and mineral particles. *Polycyclic Aromatic Compounds*. *Polycycl Aromat Compd*. 1999;14–15:161–8.
43. Kirso U, Laja M, Urb G. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in ash fractions of oil shale combustion: fluidized bed vers pulverized fuel process. *Oil Shale*. 2005;22:537–45.
44. Roots O, Sweetman A. Passive air sampling of persistent organic pollutants in two Estonian air monitoring stations. *Oil Shale*. 2007;24:483–94.
45. Kahru A. Põlevkivituha CO₂-ga neutraliseerimise/karboniseerimise mõju saadud produkti ökotoksilisusele. Tallinn; 2008.
46. Pihu T, Konist A. Uttevee kasutamise katsed Eesti Elektriijaama energiaploki katlal E08-K2. Tallinn; 2017.
47. 2003/33/EC: NÕUKOGU OTSUS 19 detsember 2002, millega kehtestatakse jäätmete prügilatesse vastuvõtmise kriteeriumid ja kord direktiivi 1999/31/EÜ artikli 16 ja II lisa kohaselt. Euroopa Liidu Teat [Internet]. 2003;15:314–36. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003D0033&qid=1557844616292&from=en>
48. Kahru A, Põllumaa L. Environmental hazard of the waste streams of estonian oil shale industry: An ecotoxicological review. *Oil Shale* [Internet]. 2006 [cited 2018 Apr 17];23:53–93. Available from: <http://www.kirj.ee/public/oilshale/oil-2006-1-5.pdf>
49. Orupõld K, Tenno T, Henrysson T. Biological lagooning of phenols-containing oil shale ash heaps leachate. *Water Res* [Internet]. Pergamon; 2000 [cited 2019 May 14];34:4389–96. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400002104>
50. Kahru A, Maloverjan A, Sillak H, Põllumaa L. The toxicity and fate of phenolic pollutants in the contaminated soils associated with the oil-shale industry. *Environ Sci Pollut Res Int* [Internet]. 2002 [cited 2019 May 14];Spec No 1:27–33. Available from:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12638745>

51. Raave H, Kapak S, Orupõld K. Phytotoxicity Of Oil Shale Semi-Coke and Its Aqueous Extracts: A Study by Seed Germination Bioassay. *Oil Shale*. 2007;24:59–71.

52. Reinik J, Irha N, Steinnes E, Piirisalu E, Aruoja V, Schultz E, et al. Characterization of water extracts of oil shale retorting residues from gaseous and solid heat carrier processes. *Fuel Process Technol* [Internet]. Elsevier; 2015 [cited 2019 May 14];131:443–51. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838201400544X>

53. Laur T. Põlevkivituhk on ja jääb väärtuslikuks ehitustööstuse toormeks. *Ehitaja* [Internet]. 2018;8:42–5. Available from: https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2018/12/Ehitaja_nr8_2018_Toomas-Laur-Polevkivituhk_lk42-45.pdf

54. Põlevkivi keevkihi katla tuha ja DeSOx tuha baasil valmistatava uue CEM II tsemendi retseptuuri väljatöötamine. 2016.

55. Pototski A. Eesti Keskkonnastrateegia. 2013.

56. Koroljova A, Talviste P. Põlevkivi lendtuha taaskasutamine hüdraulilise sideainena pehmete pinnaste tugevdamisel. 2018.

57. Narva Elektri jaamade keevkihtkatelde tuha ja tuhktsemendisegude vastavus Portland-põlevkivitsemendi standarditele ja keskkonnaohutuse uuring. 2014.

58. Mohamed HA, Campos L. Oil shale ash utilization in industrial processes as an alternative raw material. *Royal Institute of Technology*; 2016.

59. Lecomte T, Ferrería de la Fuente JF, Frederik N, Canova M, Pinasseau A, Ivan J, et al. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants [Internet]. Luxembourg; 2017. Available from: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP/JRC107769_LCP_bref2017.pdf

60. WCA. What is coal? [Internet]. [cited 2019 Jun 7]. Available from: <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>

61. Coal Information 2018 [Internet]. OECD; 2018 [cited 2019 Apr 12]. Available from: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/coal-information-2018_coal-2018-en

62. Schwartz GE, Hower JC, Phillips AL, Rivera N, Vengosh A, Hsu-Kim H. Ranking Coal Ash Materials for Their Potential to Leach Arsenic and Selenium: Relative Importance of Ash Chemistry and Site Biogeochemistry. *Environ Eng Sci* [Internet]. Mary Ann Liebert, Inc.; 2018 [cited 2019 Jun 25];35:728–38. Available from: <http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ees.2017.0347>

63. Heidrich C, Feuerborn H-J, Weir A. Coal Combustion Products: a Global Perspective. *World Coal*

Ash Conf [Internet]. Lexington; 2013. Available from: <http://www.flyash.info/2013/171-Heidrich-Plenary-2013.pdf>

64. Feuerborn H-J. Coal Combustion Products and REACH. 2nd Hell Conf Util Ind By-Products Constr [Internet]. Aiani; 2009. p. 1–20. Available from: <https://docplayer.gr/697674-Coal-combustion-products-and-reach.html>

65. American Coal Ash Association. 2019.

66. Flue Gas Desulfurization (FGD) - Wet, Spray Dry, and Dry Scrubbers [Internet]. 2003. Available from: <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/ffdg.pdf>

67. Moreno N, Querol X, Andrés JM, Stanton K, Towler M, Nugteren H, et al. Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2005 [cited 2019 Feb 20];84:1351–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236104003394>

68. Papadakis VG. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash. *Cem Concr Res* [Internet]. Pergamon; 2000 [cited 2019 Mar 13];30:1647–54. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600003884>

69. Uliasz-Bochenczyk A, Mokrzycki E. Fly Ashes from Polish Power Plants and Combined Heat and Power Plants and Conditions of their Application for Carbon Dioxide Utilization. *Chem Eng Res Des* [Internet]. Elsevier; 2006 [cited 2019 Jun 7];84:837–42. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876206729641>

70. Vassilev S V., Vassileva CG. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2007 [cited 2019 Jun 10];86:1490–512. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236106004674>

71. Kula I, Olgun A, Sevinc V, Erdogan Y. An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as Portland cement replacement materials. *Cem Concr Res*. 2002;32:227–32.

72. Cao D, Selic E, Herbell J-D. Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China. *J Zhejiang Univ Sci A* [Internet]. 2008;9:681–7. Available from: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1631%2Fjzus.A072163.pdf>

73. Mohan S, Gandhimathi R. Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. *J Hazard Mater*. 2009;169:351–9.

74. Lanzerstorfer C. Fly ash from coal combustion: Dependence of the concentration of various

elements on the particle size. *Fuel*. 2018;28:263–71.

75. Tsiroidis V, Petala M, Samaras P, Kungolos A, Sakellaropoulos GP. Environmental hazard assessment of coal fly ashes using leaching and ecotoxicity tests. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2012;84:212–20.

76. Baba A, Kaya A. Leaching characteristics of solid wastes from thermal power plants of western Turkey and comparison of toxicity methodologies. *J Environ Manage* [Internet]. 2004 [cited 2019 Feb 7];73:199–207. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15474737>

77. Millemann RE, Parkhurst BR. Comparative toxicity of solid waste leachates to *Daphnia magna*. *Environ Int* [Internet]. Pergamon; 1980 [cited 2019 Feb 18];4:255–60. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0160412080901737>

78. Suloway JI, Skelly TM, Roy WR, Dickerson, Donald R, Schuller RM, Griffin RA. Chemical and Toxicological Properties of Coal Fly Ash [Internet]. Illinois; 1983. Available from: <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/78885/chemicaltoxicolo105sulo.pdf?sequence=1>

79. Neufeld RD, Wallach S. Chemical and Toxicity Analysis of Leachates from Coal Conversion Solid Wastes. *J /Water Pollut Control Fed* [Internet]. 1984;56:266–73. Available from: https://www.jstor.org/stable/25042215?seq=1#page_scan_tab_contents

80. Palumbo A V., Tarver JR, Fagan LA, McNeilly MS, Ruther R, Fisher LS, et al. Comparing metal leaching and toxicity from high pH, low pH, and high ammonia fly ash. *Fuel* [Internet]. 2007 [cited 2019 Feb 7];86:1623–30. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236106004510>

81. Andreevich Bushumov, S, Germanovna Korotkova T, Jurevna Ksandopulo S, Vladimirovna Solonnikova N, Ivanovich Demin V. Determination of the Hazard Class of Ash After Coal Combustion by the Method of Biotesting. *Orient J Chem* [Internet]. 2018 [cited 2019 Feb 18];34:276–85. Available from: <http://www.orientjchem.org/vol34no1/determination-of-the-hazard-class-of-ash-after-coal-combustion-by-the-method-of-biotesting/>

82. Chakraborty R, Mukherjee A. Mutagenicity and genotoxicity of coal fly ash water leachate. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2009 [cited 2019 Feb 7];72:838–42. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18995907>

83. Kravchenko J, Lyerly HK. The Impact of Coal-Powered Electrical Plants and Coal Ash Impoundments on the Health of Residential Communities. *N C Med J* [Internet]. 2018 [cited 2019 Feb 7];79:289–300. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30228133>

84. Gallardo S, van Hullebusch ED, Pangayao D, Salido BM, Ronquillo R. Chemical, Leaching, and Toxicity Characteristics of Coal Ashes from Circulating Fluidized Bed of a Philippine Coal-Fired Power

Plant. Water, Air, Soil Pollut [Internet]. Springer International Publishing; 2015 [cited 2019 Feb 7];226:312. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11270-015-2367-9>

85. Skodras G, Grammelis P, Prokopidou M, Kakaras E, Sakellariopoulos G. Chemical, leaching and toxicity characteristics of CFB combustion residues. Fuel [Internet]. Elsevier; 2009 [cited 2019 Feb 18];88:1201–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236107003018?via%3Dihub>

86. Grammelis P, Skodras G, Prokopidou M, Delvinquier V, Lial B, Kakaras E, et al. Investigations on the Operating Performance and Ash Toxicity of CFBC With Improved Coals. In: Werther J, Nowak W, Wirth K-E, Hartge E-U, editors. 9th Int Conf Circ Fluid Beds. Hamburg: TUTech Innovation GmbH; 2008. p. 1150.

87. Tsiridis V, Samaras P, Kungolos A, Sakellariopoulos GP. Application of leaching tests for toxicity evaluation of coal fly ash. Environ Toxicol [Internet]. 2006 [cited 2019 Feb 7];21:409–16. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/tox.20187>

88. Darakas E, Tsiridis V, Petala M, Kungolos A. Hexavalent chromium release from lignite fly ash and related ecotoxic effects. J Environ Sci Heal Part A [Internet]. 2013 [cited 2019 Feb 18];48:1390–8. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23705615>

89. Griffin RA, Schuller RM, Suloway JI, Shimp NF, Childers WF, Shiley RH. Chemical and biological characterization of leachates from coal solid wastes. Illinois; 1980.

90. Ikeda S, Kostova IP, Sekine H, Sekine Y. Effect of Coal Fly Ash Leachate on the Bioluminescence Intensity of *Vibrio fischeri*. Coal Combust Gasif Prod. 2016;8:60–7.

91. Sherrard RM, Carriker NE, Greeley MS. How toxic is coal ash? A laboratory toxicity case study. Integr Environ Assess Manag [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2015 [cited 2019 Feb 7];11:5–9. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/ieam.1587>

92. Karuppiyah M, Gupta G. Toxicity of and metals in coal combustion ash leachate. J Hazard Mater [Internet]. Elsevier; 1997 [cited 2019 Feb 7];56:53–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389497000344>

93. Jones T, Brown P, BéruBé K, Włodarczyk A, Longyi S. The physicochemistry and toxicology of CFA particles. J Toxicol Environ Health A [Internet]. 2010 [cited 2019 Feb 7];73:341–54. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20155577>

94. Aunela-Tapola LA, Frandsen FJ, Häsänen EK. Trace metal emissions from the Estonian oil shale fired power plant. Fuel Process Technol [Internet]. Elsevier; 1998 [cited 2018 May 16];57:1–24. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382098000691>

95. Arro H, Prikk A, Pihu T. Calculation of qualitative and quantitative composition of Estonian oil shale and its combustion products. Part 2. Calculation on the basis of technical analysis data. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2003 [cited 2019 Jun 26];82:2197–204. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236103001960>
96. Feuerborn HJ. Coal combustion products in Europe—An update on production and utilization, standardisation and regulation. *World Coal Ash Conf* [Internet]. Denver; 2011 [cited 2019 Jun 6]. Available from: <http://www.flyash.info/2011/007-feuerborn-2011.pdf>
97. *Coal Industry Across Europe*. 2017.
98. Fox JM. Fly Ash Classification - Old and New Ideas. *World Coal Ash Conf* [Internet]. Lexington; 2017. Available from: <http://www.flyash.info/AshSymposium/AshLibraryAgenda.asp#2017>
99. Ćwik A, Casanova I, Rausis K, Koukouzas N, Zarębska K. Carbonation of high-calcium fly ashes and its potential for carbon dioxide removal in coal fired power plants. *J Clean Prod* [Internet]. Elsevier; 2018 [cited 2019 Jun 6];202:1026–34. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618325836#bib8>
100. Sotiropoulos D, Georgakopoulos A, Kolovos N. Impact of Free Calcium Oxide Content of Fly Ash on Dust and Sulfur Dioxide Emissions in a Lignite-Fired Power Plant. *J Air Waste Manage Assoc* [Internet]. Taylor & Francis Group ; 2005 [cited 2019 Jun 6];55:1042–9. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10473289.2005.10464694>
101. Qafleshi M, Aliko L. Characterization, Classification and Standardization of Fly Ash of Kosovo Lignite-Fired Power Stations as Industrial Construction Product. *Int J Mod Eng Res* [Internet]. 2013;3:3063–70. Available from: http://www.ijmer.com/papers/Vol3_Issue5/CY3530633070.pdf
102. Sulovsky P. Mineralogy and chemistry of conventional and fluidised bed coal ashes. *Bull Czech Geol Surv* [Internet]. 2002;77:1–11. Available from: <http://www.geology.cz/bulletin/fulltext/001-011sulovsky.pdf>
103. Back M, Kuehn M, Stanjek H, Peiffer S. Reactivity of Alkaline Lignite Fly Ashes Towards CO₂ in Water. *Environ Sci Technol* [Internet]. American Chemical Society; 2008 [cited 2019 Jun 7];42:4520–6. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es702760v>
104. Feuerborn H-J, Müller B, Walter E. Use of Calcareous Fly Ash in Germany. *EUROCOALASH 2012* [Internet]. Thessaloniki; 2012. Available from: http://www.evipar.org/innet/files/EUROCOALASH2012/Docs/slides/03_Feuerborn_et_al_EUROCOALASH2012-paper.pdf
105. Moutsatsou A, Stamatakis E, Hatzitzotzia K, Protonotarios V. The utilization of Ca-rich and Ca–Si-

rich fly ashes in zeolites production. Fuel [Internet]. Elsevier; 2006 [cited 2019 Jun 6];85:657–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236105003522>

106. Irha N, Reinik J, Jefimova J, Koroljova A, Raado L-M, Hain T, et al. PAHs in leachates from thermal power plant wastes and ash-based construction materials. Environ Sci Pollut Res [Internet]. Springer Berlin Heidelberg; 2015 [cited 2019 May 24];22:11877–89. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-015-4459-x>

107. Wächter MR, Ionel I, Negrea A, Cebucean D, Manzatu V, Ciopec M. Leaching investigation of coal fly ash and dry desulphurisation residues by stabilization into ash rock. Rev Chim [Internet]. 2015;66:1881–4. Available from: <http://www.revistadechimie.ro/pdf/WACHETR R.pdf> 11 15.pdf

108. Kost DA, Bigham JM, Stehouwer RC, Beeghly JH, Fowler R, Traina SJ, et al. Chemical and physical properties of dry flue gas desulfurization products. J Environ Qual. 34:676–86.

109. The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC). Off J Eur Union [Internet]. 2008;1–1355. Available from: http://eur-lex.europa.eu/pri/en/oj/dat/2003/l_285/l_28520031101en00330037.pdf

110. Jäätmete liigitamise kord ja jäätmenimistu [Internet]. Estonia; 2016. Available from: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118122015014>

111. Council Regulation (EC) No 440/2008 of 30 May 2008 laying down test methods pursuant to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Off J Eur Union [Internet]. 2008;1–739. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32008R0440>

112. Regulation (EC) No 850/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on persistent organic pollutants and amending Directive 79/117/EEC. Off J Eur Union [Internet]. 2004;7–49. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/TXT/?uri=celex:32004R0850>

113. Klassifitseerimis- ja märgistusandmiku andmebaas - ECHA [Internet]. [cited 2019 Feb 3]. Available from: <https://echa.europa.eu/et/information-on-chemicals/cl-inventory-database>

114. 2014/955/EU: Commission Decision of 18 December 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. Off J Eur Union [Internet]. 2014;44–86. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014D0955>

115. Hennebert P, Humez N, Conche I, Bishop I, Rebischung F. Assessment of four calculation methods

- proposed by the EC for waste hazardous property HP 14 'Ecotoxic.' Waste Manag [Internet]. 2016 [cited 2019 Jan 29];48:24–33. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26690049>
116. Planchon M, Saïdi N, Pandard P, Troise A. Study to assess the impacts of different classification approaches for hazard property “HP 14” on selected waste streams. 2015.
117. Sezer A, İnan G, Yılmaz HR, Ramyar K. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. Build Environ [Internet]. Pergamon; 2006 [cited 2019 Jun 7];41:150–5. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304003841>
118. Filippidis A, Georgakopoulos A. Mineralogical and chemical investigation of fly ash from the Main and Northern lignite fields in Ptolemais, Greece. Fuel. 1992;71:373–6.
119. Arditsoglou A, Petaloti C, Terzi E, Sofoniou M, Samara C. Size distribution of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in fly ashes generated in Greek lignite-fired power plants. Sci Total Environ [Internet]. Elsevier; 2004 [cited 2019 Jun 7];323:153–67. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969703005977>
120. Ilic M, Cheeseman C, Sollars C, Knight J. Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash. Fuel [Internet]. Elsevier; 2003 [cited 2019 Jun 7];82:331–6. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236102002727#BIB13>
121. Kotwica Ł, Wons W, Malata G, Murzyn P, Jamrozik A, Gonet A. Utilisation of drilling waste muds from drilling waste dump. AGH Drilling, Oil, Gas [Internet]. 2015 [cited 2019 Jun 25];32:623. Available from: <http://journals.bg.agh.edu.pl/DRILLING/2015.32.3/623.php>
122. Vassilev S V., Vassileva CG, Karayigit AI, Bulut Y, Alastuey A, Querol X. Phase–mineral and chemical composition of composite samples from feed coals, bottom ashes and fly ashes at the Soma power station, Turkey. Int J Coal Geol [Internet]. Elsevier; 2005 [cited 2019 Jun 26];61:35–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516204001272>
123. Koukouzas NK, Zeng R, Perdikatsis V, Xu W, Kakaras EK. Mineralogy and Geochemistry of Greek and Chinese Coal Fly Ash: Research for Potential Applications. World Coal Ash Conf [Internet]. Lexington; 2005. Available from: <http://www.flyash.info/2005/37kou.pdf>
124. Uzarowicz Ł, Skiba M, Leue M, Zagórski Z, Gąsiński A, Trzciński J. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. CATENA [Internet]. Elsevier; 2018 [cited 2019 Jun 27];162:255–69. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816217303739>
125. Vassilev S V, Menendez R, Alvarez D, Diaz-Somoano M, Martinez-Tarazona MR. Phase-mineral

- and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 1. Characterization of feed coals and fly ashes. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2003 [cited 2019 May 27];82:1793–811. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236103001236>
126. Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica [Internet]. Cincinnati; 2002. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2002-129/pdfs/2002-129.pdf>
127. Orru H. Välisõhu kvaliteedi mõju inimeste tervisele Tartu, Kohtla-Järve, Narva ja Pärnu linnas [Internet]. Tartu, Estonia; 2010. Available from: https://www.envir.ee/sites/default/files/ohusaaste_tervisemoju_hinnang_tkjnp.pdf
128. Jankowski J, Ward CR, French D, Groves S. Mobility of trace elements from selected Australian fly ashes and its potential impact on aquatic ecosystems. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2006 [cited 2019 Jan 24];85:243–56. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623610500308X>
129. Silva LFO, Ward CR, Hower JC, Izquierdo M, Waanders F, Oliveira MLS, et al. Mineralogy and Leaching Characteristics of Coal Ash from a Major Brazilian Power Plant. *Coal Combust Gasif Prod* [Internet]. Center for Applied Energy Research, University of Kentucky; 2010 [cited 2019 Jan 24];2:51–65. Available from: <http://www.coalcp-journal.org/>
130. Goodarzi F. Characteristics and composition of fly ash from Canadian coal-fired power plants. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2006 [cited 2019 May 27];85:1418–27. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236105004643>
131. Matjie R, Ward C, Li Z. Mineralogical Transformations in Coal Feedstocks during Carbon Conversion, Based on Packed-Bed Combustor Tests: Part 2. Behavior of Individual Particles. *Coal Combust Gasif Prod* [Internet]. 2012 [cited 2019 Jun 11];4:55–67. Available from: <http://www.coalcp-journal.org/papers/2012/CCGP-D-12-00004.1-Matjie.pdf>
132. Miller SF, Schobert HH. Effect of fuel particle and droplet size distribution on particle size distribution of char and ash during pilot-scale combustion of pulverized coal and coal-water slurry fuels. *Energy & Fuels* [Internet]. American Chemical Society; 1993 [cited 2019 Jun 11];7:520–31. Available from: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef00040a013>
133. Mehdipour I, Khayat KH. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. *Cem Concr Compos* [Internet]. Elsevier; 2017 [cited 2019 Jun 11];78:120–31. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946517300677#tbl2>

134. Hower JC, Trimble AS, Eble CF. Temporal and spatial variations in fly ash quality. *Fuel Process Technol* [Internet]. Elsevier; 2001 [cited 2019 Jun 11];73:37–58. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838200100193X#FIG2>
135. Karayigit AI, Bulut Y, Querol X, Alastuey A, Vassilev S. Variations in Fly Ash Composition from the Soma Power Plant, Turkey. *Energy Sources* [Internet]. Taylor & Francis Group ; 2005 [cited 2019 Jun 11];27:1473–81. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/009083190523811>
136. Stoch A. Fly ash from coal combustion -characterization [Internet]. Universidade de Lisboa; 2015. Available from: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043833907/Dissertation_Aleksandra_Stoch.pdf
137. Fuller A, Maier J, Karampinis E, Kalivodova J, Grammelis P, Kakaras E, et al. Fly Ash Formation and Characteristics from (co-)Combustion of an Herbaceous Biomass and a Greek Lignite (Low-Rank Coal) in a Pulverized Fuel Pilot-Scale Test Facility. *Energies* [Internet]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2018 [cited 2019 Jun 11];11:1581. Available from: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1581>
138. Li HL, Liu GL, Cao Y. Content and Distribution of Trace Elements and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fly Ash from a Coal-Fired CHP Plant. *Aerosol Air Qual Res* [Internet]. 2014 [cited 2019 Jun 11];14:1179–88. Available from: <http://www.aaqr.org/doi/10.4209/aaqr.2013.06.0216>
139. Koukouzas N, Hämäläinen J, Papanikolaou D, Tourunen A, Jäntti T. Mineralogical and elemental composition of fly ash from pilot scale fluidised bed combustion of lignite, bituminous coal, wood chips and their blends. *Fuel* [Internet]. Elsevier; 2007 [cited 2019 Jun 11];86:2186–93. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236107001421>
140. Shaheen SM, Hooda PS, Tsadilas CD. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – A review. *J Environ Manage* [Internet]. Academic Press; 2014 [cited 2019 Jun 20];145:249–67. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714003375?via%3Dihub>
141. Riehl A, Elsass F, Duplay J, Huber F, Trautmann M. Changes in soil properties in a fluvisol (calcaric) amended with coal fly ash. *Geoderma* [Internet]. Elsevier; 2010 [cited 2019 Jun 20];155:67–74. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706109003760>
142. Peterson T, Sarofim A, Helble J, Wendt J, Shah A, Huffman GP, et al. Reactions of Calcium and Sodium during Combustion of Lignite. *Int Ash Util Symp* [Internet]. Lexington: University of Kentucky Center for Applied Energy Research; 1999. Available from:

<http://www.flyash.info/1999/chemist/shah2.pdf>

143. Persoone G, Marsalek B, Blinova I, Törökne A, Zarina D, Manusadzianas L, et al. A practical and user-friendly toxicity classification system with microbiotests for natural waters and wastewaters. *Environ Toxicol* [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2003 [cited 2019 Jun 27];18:395–402. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/tox.10141>

144. Pandard P, Römbke J. Proposal for a “Harmonized” strategy for the assessment of the HP 14 property. *Integr Environ Assess Manag* [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2013 [cited 2019 Jan 30];9:665–72. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/ieam.1447>

145. Stiernström S, Wik O, Bendz D. Evaluation of frameworks for ecotoxicological hazard classification of waste. *Waste Manag* [Internet]. 2016 [cited 2019 Jan 30];58:14–24. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27639283>

146. Römbke J, Moser T, Moser H. Ecotoxicological characterisation of 12 incineration ashes using 6 laboratory tests. *Waste Manag* [Internet]. Pergamon; 2009 [cited 2019 Feb 12];29:2475–82. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09001329>

147. Silica Dust, Crystalline, in the form of Quartz or Cristobalite [Internet]. Lyon; 2012. Available from: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono100C-14.pdf>

148. Brown LM, Gridley G, Olsen JH, Mellekjær L, Linet MS, Fraumeni JF. Cancer risk and mortality patterns among silicotic men in Sweden and Denmark. *J Occup Environ Med*. 1997;39:633–8.

149. Report on Carcinogens [Internet]. 2016. Available from: <https://ntp.niehs.nih.gov/pubhealth/roc/index-1.html>

150. Steenland K, Ward E. Silica: A lung carcinogen. *CA Cancer J Clin* [Internet]. American Cancer Society; 2014 [cited 2019 Jun 29];64:63–9. Available from: <http://doi.wiley.com/10.3322/caac.21214>

151. Fubini B, Zanetti G, Altiglia S, Tiozzo R, Lison D, Saffiotti U. Relationship between Surface Properties and Cellular Responses to Crystalline Silica: Studies with Heat-Treated Cristobalite. *Chem Res Toxicol* [Internet]. 1999 [cited 2019 Jun 29];12:737–45. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/tx980261a>

152. Llorens JF, Fernández-Turiel JL, Querol X. The fate of trace elements in a large coal-fired power plant. *Environ Geol* [Internet]. 2001;40:409–16. Available from: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs002540000191.pdf>

153. Xiang W, Han B, Zhou D, Nzihou A. Physicochemical properties and heavy metals leachability of fly ash from coal-fired power plant. *Int J Min Sci Technol*. 2012;22:405–9.

12 Lisa 1. Mineraalne koostis

Tabel 70. Auvere elektrijaama tuhkade keskmine mineraloogiline koostis (mass %)

Tähis Joonis 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tsoon	KT	ÜK+ÖKO	ÕES	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	KF
Mineraal									
Kvarts (SiO ₂)	3,6	14,3	12,5	12,7	10,8	10,6	6,6	5,3	3,1
K-päevakivi	2,2	18,3	13,3	17,3	15,9	15,7	11,9	10,9	8,6
K-vilk	2,1	4,6	3,3	5,2	5,1	3,7	3,1	3,9	2,4
kaltsiit	35,0	15,4	12,5	10,0	10,8	17,7	18,1	9,5	9,6
dolomiit	5,2		0,5						18,3
Lubi (CaO)	18,4	16,0	19,2	19,4	20,3	9,8	10,1	9,1	<LOQ
portlandiit	2,0	0,9	1,3	1,0	1,0	4,8	6,3	17,8	14,6
periklaas	7,0	5,3	6,8	5,6	5,4	5,3	5,3	4,9	7,7
anhüdriit	10,1	6,3	10,0	6,9	6,7	7,0	8,2	7,6	7,3
C2S/C4AF	7,1	9,5	10,3	10,9	13,0	14,7	18,7	19,0	9,3
merviniit	3,1	5,3	5,2	5,9	6,4	6,6	7,8	8,0	5,3
akermaniit	3,6	2,4	3,9	3,2	3,1	2,1	2,2	2,1	8,8
arkaniit				0,4	0,3				3,4
sülviin	0,3				0,3	0,3	0,4	0,9	
hematiit	0,6	1,5	1,1	1,3	1,1	1,2	1,0	0,7	<LOQ

Tabel 71. FW CFBC tuhkade keskmine mineraloogiline koostis (mass %)

Tähis Joonis 6	1	2	3	4	5	6	7	8
Tsoon	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	EF1	EF2	EF3	EF4
Mineraal								
Kvarts (SiO ₂)	4,5	18,9	18,45	16,05	17,4	17,95	15,8	11,6
K-päevakivi	4	9	13,15	10,2	13,15	15,75	16,6	14,45
K-vilk	<0,5	7,6	5,3	6,2	7,7	7,45	7,75	5,8
kaltsiit	49,45	17,5	14,3	10,95	12,8	12,45	11,65	13,7
dolomiit	5,75							
Lubi (CaO)	3,7	6,7	6,5	10,5	9,7	6,15	2,9	1,9
portlandiit	3,65	3,5	5,6	6,35	2,1	3,4	2,7	2,2
periklaas	4,2	3,1	4,05	4,65	2,8	3,15	2,85	3,45
anhüdriit	9,4	9,7	10,4	13,55	9,5	9,1	9,8	13,95
C2S/C4AF	6,95	4,5	6,4	6,4	9,35	7,3	9,5	16,15
merviniit	2,65	2,7	2,25	2,45	2,55	2,75	3,6	2,9
akermaniit	4,4	9,6	8,5	9,2	9,35	8,45	9,9	5,8
sülviin	tr	tr	0,5	0,6				
hematiit	2,6	5,9	4,15	4,55	5,75	5,5	6,3	6,4
vollastoniit	1,4	1,4	1,5	1	1,6	1,3	1,3	

Tabel 72. NID-ga varustatud 185 MW_{el} tolmpõletus energiablokkide tuhkade keskmine mineraloogiline koostis (mass %)

Tähis	1	2	3	4	5
Joonis 13	KT	ÜK	ÖKO	Tsüklon	NID
Tsoon					
Mineraal					
Kvarts (SiO ₂)	3,4	4,9	5,8	7,3	13,8
K-päevakivi	4,5	5,7	4,8	4,1	1,9
K-vilk	2,4	3,5		2,1	1,2
kaltsiit	5,4	2,0	7,2	4,1	9,0
dolomiit				0,5	
Lubi (CaO)	18,7	19,6	18,9	24,6	8,0
portlandiit	10,8	10,6	11,6	8,9	9,2
periklaas	4,6	4,2	4,3	6,3	4
anhüdriit	3,5	8,3	6,7	6,4	11,3
hannebahiit					
C2S/C4AF	20,4	20,6	23,6	21,3	18,6
merviniit	4,8	4,3	5,8	6,0	3,8
akermaniit	14,5	16,8	10,5	8,0	4,4
sülviin		0,9	1,0	1,4	
hematiit	1,3	1,6	1,4	1,6	1,6
vollastoniit					

Tabel 73. Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade mineraloogiline koostis (mass %)

Tehnoloogia	Enefit 280 (Joonis 20)				Enefit 140 (Joonis 24)		Petroter (Joonis 27)	
Tähis	1	2	3	4	1	2	1	2
Tsoon	KT	WHB	Tsüklon	EF	Tsüklon	EF	SV	EF
Mineraal								
Kvarts (SiO ₂)	3,43	16,83	15,99	14,87	9,5	7,3	10,46	11,29
K-päevakivi	3,30	22,07	17,58	29,93	7,9	16,6	4,55	16,50
K-vilk	0,87	5,97	9,4	10,87			5,39	38,65
kaltsiit	57,57	29,30	32,4	20,40	40,2	18,7	50,16	20,00
dolomiit	14,63	6,63	3,44	4,97	3,7		14,25	0,95
hematiit	1,07	2,47	2,3		1,7	0,7		0,45
Lubi (CaO)				0,73	1,21	0,75		0,54
portlandiit	0,50			0,60		<0,5	0,57	0,78
periklaas	3,07	2,83	2,12	0,97	1,7		1,69	<0,5
anhüdriit	10,73	9,37	8,94	4,97	1,5	0,5	2,89	1,22
oldhamiit					2,2	0,7		
C2S/C4AF	3,80	1,80	4,97	3,50	3,1	8,5	3,73	0,49
vollastoniit					0,8	0,8		
akermaniit	0,70	1,93	1,32	2,23			1,36	1,73
merviniit	1,25	0,80	1,37	0,55	2,4	<0,5	2,12	2,09
sülviin				1,27				
hannebahiit							4,5	
kloriit				4,10				

Tabel 74. Näiteid söe (Hispaania) põletamisel tekkivate lendtuhkade mineraalse koostise kohta [125]

Mineraal	Sisaldus [mass %]				
	LT 1	LT 2	LT 3	LT 4	LT 5
Kvarts	31	37	37	26	26
K-päevakivi	2	2	2	5	3
Hematiit	8	8	4	6	7
Magnetiit	1	1	2	3	1
Anhüdroit	2	4	3	5	3
Vollastoniit	2				
Kristobaliit	2	3	3	5	2
Kaoliniit	7	9	2	8	3
Mulliit	36	32	41	36	46
Plagioklass	3	2	2	6	5
Meliliit	3	3	2		4
Korund	2				

13 Lisa 2. Keemiline koostis

Tabel 75. Auvere CFBC katla tuhkade keemiline koostis (keskmised väärtused, mass %)

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Joonis 3										
Ühend	Tsoon	KT	ÜK+ÖKO	ÕES	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	KF
SiO₂		8,12	30,58	28,40	29,13	29,98	29,33	26,25	20,52	15,68
Fe₂O₃		2,37	3,12	3,49	3,35	3,76	3,87	3,71	2,90	6,09
Al₂O₃		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
Na₂O		0,06	0,20	0,15	0,16	0,25	0,18	0,24	0,18	0,22
K₂O		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
CO₂		22,34	7,89	6,56	5,88	5,44	6,33	6,14	5,07	7,91
CaO_{vaba}		13,97	16,05	17,61	18,13	17,42	13,52	14,90	20,08	31,76
C (CO₂)		6,09	2,15	1,79	1,60	1,48	1,73	1,67	1,38	2,16
C_{org}		0,51	0,07	0,13	0,14	0,11	0,08	0,10	0,18	0,27
SO₃kogu		5,04	4,61	6,16	6,42	4,96	5,54	6,72	5,93	4,25
S_{sulfaat}		1,98	0,69	1,32	1,53	1,39	1,54	1,65	1,76	1,53
SO₃sulfaat		4,94	1,73	3,31	3,83	3,48	3,85	4,13	4,41	3,83
S_{sulfiid}		0,16	1,15	1,14	1,04	0,61	0,73	1,10	0,64	0,17
C_{elem}		6,61	2,21	1,92	1,74	1,60	1,80	1,74	1,57	2,37
N_{elem}		0,02	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04

Tabel 76. FW CFBC katla tuhkade keemiline koostis (EEJ 8. ploki tuhkade analüüsi tulemused)

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Joonis 6										
Ühend	Tsoon	KT	ÜK	ÖKO	ÖES	EF1	EF2	EF3	EF4	Heittuhk
SiO ₂	6,20	31,88	31,91	26,61	32,39	32,85	29,93	25,62	27,44	
Fe ₂ O ₃	2,65	4,10	4,09	3,77	4,31	4,31	4,55	4,60	4,74	
Al ₂ O ₃	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 ₂ O	0,03	0,14	0,13	0,12	0,18	0,17	0,15	0,16	0,10	
K ₂ 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 ₂	23,73	3,62	2,98	2,04	2,81	2,74	3,28	3,94	2,80	
CaO _{vaba}	14,31	14,16	15,64	18,95	16,29	15,29	11,46	8,23		
C (CO ₂)	6,47	0,99	0,81	0,56	0,77	0,75	0,89	1,07	0,90	
C _{org}	0,61	0,12	0,14	0,16	0,12	0,12	0,07	0,10		
SO ₃ kogu	4,12	7,44	6,29	10,69	6,08	6,92	7,25	9,23	9,77	
S _{sulfaat}	1,77	3,51	3,35	4,53	2,64	2,56	2,81	3,57		
SO ₃ sulfaat	4,43	8,77	8,38	11,31	6,59	6,41	7,03	8,93		
S _{sulfiid}	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	0,27	0,11	0,14		
C _{elem}	7,08	1,11	0,95	0,71	0,89	0,87	0,96	1,11		
N _{elem}	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02		

Tabel 77. PC-NID katla tuhkade keemiline koostis

Tähis	1	2	3	4	5	
Joonis 13						
Ühend	Tsoon	KT	ÜK	ÖKO	Tsüklon	NID
SiO ₂		20,91	24,55	23,54	24,82	26,60
Fe ₂ O ₃		4,01	3,80	3,74	3,78	3,28
Al ₂ O ₃		5,62	6,40	6,21	6,65	8,07
CaO		53,53	45,13	45,81	48,79	33,47
MgO		8,65	7,23	5,75	6,12	3,72
Na ₂ O		0,07	0,06	0,08	0,08	0,14
K ₂ O		2,07	2,52	2,45	2,29	4,83
Cl		0,03	0,04	0,10	0,13	0,59
CO ₂		1,86	0,84	3,87	1,40	4,12
CaO _{vaba}		21,74	14,4	15,0	17,3	11,1
C (CO ₂)		0,51	0,23	1,06	0,38	1,12
C _{org}		0,04	0	0,01	0,03	0,00
SO ₃ kogu		2,49	8,17	7,35	4,83	12,59
C _{elem}		0,55	0,17	1,07	0,41	1,00
N _{elem}		0,01	0,01	0,01	0,02	0,03

Tabel 78. Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade keemiline koostis (mass %)

Tähis	Enefit 280				Petroter		Enefit 140	
	1	2	3	4	1	2	1	2
Ühend	KT	WHB	Tsüklon	EF	SV	EF	EF	Tsüklon I-III*
SiO ₂	9,25	32,72	28,43	28,6	14,83	41,40	34,76	21,46
Fe ₂ O ₃	1,58	5,17	4,27	2,9	2,04	3,70	4,11	3,34
Al ₂ O ₃	1,26	10,56	9,15	8,2	2,55	13,66	11,43	5,08
CaO	45,61	28,95	31,50	22,3	38,47	13,93	21,48	36,67
MgO	3,19	3,27	2,62	2,0	4,69	2,62	2,36	4,03
Na ₂ O	0,04	0,11	0,14	0,3	0,10	0,22	0,21	0,19
K ₂ O	0,46	3,87	3,47	3,5	1,03	5,78	5,12	2,08
MnO ₂	n.d	0,08	0,06	<0,01	n.d	n.d	0,03	0,051
TiO ₂	0,08	0,61	0,44	0,5	0,15	0,74	0,67	0,305
P ₂ O ₅	0,13	0,16	0,14	0,1	0,13	0,25	0,22	0,12
Cl	0,06		0,08	0,3	0,12	0,02	<LOQ	0,048
CaO _{vaba}	1,06		1,76		1,48	0,37		
CO ₂	33,28		16,27		31,13	9,10	12,54	21,87
C _{org}	0,11		0,06		1,26	3,06	6,38	1,92
SO ₃ kogu	1,90	5,58	2,77	4,6	5,17	4,16	3,83	4,23
S _{sulfaat}	1,90		2,05		0,61	0,49	0,26	0,56
S _{sulfiid}	<LOQ		1,38		1,82	1,47	0,66	0,43
S _{püriit}								0,35

*73,7%-wt I + 17,9%-wt II + 8,4%-wt III

14 Lisa 3. Jälgelemendid

Tabel 79. Jälgelementide sisaldused Auvere elektrijaama tuhkades (ppm ehk mg/kg)

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Element	KT	ÜK+ÖKO	ÕES	EF-1	EF-2	EF-3	EF-4	EF-5	KF
Li	6,6	23,4	18,3	26,2	24,5	25,4	19,7	16,8	11,2
Be	0,4	0,3	0,4	0,6	0,5	1,1	0,9	0,9	0,2
Ti	702,3	2842,5	2170,9	2947,1	2986,1	2958,9	2836,3	2691,9	2022,4
V	29,2	72,9	59,7	83,3	86,4	86,5	88,0	80,6	60,3
Cr	17,8	50,5	39,0	49,5	50,0	50,2	48,5	47,2	41,5
Mn	771,1	527,4	688,3	601,6	586,1	518,2	522,0	496,2	501,5
Co	4,0	6,8	5,8	7,1	6,9	7,5	7,1	6,6	5,7
Ni	18,9	32,0	27,5	33,4	32,0	35,6	32,5	30,5	27,1
Cu	3,9	9,2	7,6	9,9	9,7	10,1	9,7	9,1	10,1
Zn	235,0	151,1	171,2	172,9	144,9	157,7	126,3	116,9	115,5
As	53,4	22,2	39,9	27,5	28,2	31,2	37,0	35,8	43,8
Se	0,3	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
Sr	359,8	350,6	342,0	382,5	400,8	404,1	429,5	432,4	428,2
Mo	7,3	7,8	8,4	8,3	8,7	11,7	13,1	11,9	16,6
Cd	0,3	0,6	0,6	0,8	0,8	0,9	0,6	0,6	0,3
Sb	0,2	0,1	0,2	0,2	1,4	0,3	0,3	0,3	0,2
Tl	1,3	0,7	0,9	1,3	4,6	1,6	1,8	1,6	1,2
Pb	27,8	94,1	70,3	102,9	98,1	96,9	92,4	88,5	48,0

Tabel 80. Jälgelementide sisaldused EEJ ja BEJ CFBC katelde tuhkades (ppm ehk mg/kg)

Tähis	1	2	3	4	5	6	7	8
Tsoon								
Element	KT	ÜK	ÖKO	ÕES	EF1	EF2	EF3	EF4
Li	1,8	n.d	40,3	30,2	38,8	29,7	37,7	29,4
Be	<LOQ	n.d	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Ti	884,8	n.d	4206,8	3190,6	4280,1	3166,8	3675,2	3237,4
V	17	49	72,7	56,2	75,1	72	80,2	76,3
Cr	16,7	43	70,4	55,1	73,9	66	74,4	73,9
Mn	821,0	463	757,3	797,8	590,7	492,8	479,7	447
Co	2,5	4,9	7,6	6,1	7,8	6,6	7,2	7,6
Ni	13,5	24	39,3	29,8	38,3	35	36,5	39,3
Cu	5,1	8	15	9,7	12	10,7	12	14,4
Zn	22,9	44	40,9	35,7	34,6	28,7	29,7	30
As	8,1	9	15,9	19,5	15	15,6	23,1	29,8
Se	n.d	n.d	1,4	1,1	1,3	1,2	1,3	1,1
Sr	296,8	228	458,8	415,3	437	357,6	422,7	424
Mo	0,8	2,7	5,3	4,1	4,7	3,4	6,5	5,7
Cd	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Sb	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Tl	0,4	0,2	1,1	0,8	1,6	1,6	1,9	1,9
Pb	17,1	47	57,9	37,9	62,9	51,8	69,1	60,8

Tabel 81. NID-ga varustatud 185 MWel tolmpõletus energiablokkide tuhkade keskmine jälgelementide sisaldus (ppm ehk mg/kg)

Tähis	1	2	3	4	5
Tsoon					
Element	KT	ÜK	ÖKO	Tsüklon	NID
Li	22,7	22,0	20,2	24,9	25,2
Be	1,1	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,3
Ti	2306,3	2335,3	2405,7	2582,2	2848,4
V	42,5	46,2	48,1	51,7	55,4
Cr	36,5	39,4	41,5	46,2	57,4
Mn	744,4	667,0	705,9	783,2	454,1
Co	5,4	4,5	4,9	5,0	6,4
Ni	23,2	20,5	23,3	22,5	28,2
Cu	9,0	10,3	9,8	37,6	7,5
Zn	31,7	29,6	23,9	19,6	56,9
As	7,4	8,0	10,7	8,2	21,6
Se	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0
Sr	397,5	351,9	387,2	417,5	296,9
Mo	1,3	<LOQ	0,9	<LOQ	4,4
Cd	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Sb	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Tl	0,5	0,5	0,5	0,8	2,1
Pb	13,5	30,0	28,2	25,9	64,5

Tabel 82. Enefit 280, Enefit 140 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade jälgelementide sisaldus (ppm ehk mg/kg)

Tähis Element	Enefit 280				Petroter		Enefit 140		
	Tsoon	1 KT	2 WHB	3 Tsüklon	4 EF	1 SV	2 EF	1 EF	2 Tsüklon I-III*
Li		6,2	19,1	21,8	22,3	11,5	56,8	N/A	N/A
Be		0,3	n.d	0,7	n,d	0,4	2,4	N/A	N/A
Ti		571,8	2876,0	2816,7	3362,0	1285,1	5639,6	N/A	N/A
V		13,06	54,2	48,9	70,1	23,0	105,5	N/A	N/A
Cr		10,3	57,2	48,4	63,0	21,5	85,4	N/A	N/A
Mn		525,0	484,3	340,5	290,9	530,0	270,8	N/A	N/A
Co		2,8	5,9	6,8	8,3	4,0	11,9	N/A	N/A
Ni		11,9	25,1	33,5	30,1	15,3	41,4	N/A	N/A
Cu		3,0	8,3	8,0	9,7	78,7	9,0	N/A	N/A
Zn		158,9	113,3	79,2	95,4	37,3	35,2	N/A	N/A
As		19,6	30,6	27,5	33,9	6,4	8,7	N/A	N/A
Se		0,6	0,9	0,3	0,9	<0,2	0,5	N/A	N/A
Sr		351,6	346,1	332,3	215,0	264,3	245,4	N/A	N/A
Mo		4,2	15,5	12,5	22,5	1,4	3,0	N/A	N/A
Cd		0,3	1,2	n,d	1,4	n.d	n.d	N/A	N/A
Sb		n,d	n,d	n,d	n,d	n.d	n.d	N/A	N/A
Tl		0,8	1,6	n,d	9,6	n.d	n.d	N/A	N/A
Pb		18,5	121,2	52,5	102,2	25,1	134,8	N/A	N/A

*73,7%-wt I + 17,9%-wt II + 8,4%-wt III

Tabel 83. Näiteid jälgelementide sisalduste [mg/kg] kohta kivisöe elektrijaamade katelde koldetuhkades

Katel	PC						CFBC	
	Viide [152]	[129]					[153]	
Element								
Li	234	85,4	80,9	79,1	79,8	91,5	175,8	89,56
Be	9,8	10,9	8	7,5	8,4	9,5	4,33	2,17
V	155	197,2	202,5	190,9	207,2	230,6	5415	6076
Cr	117,9	102,6	109,6	104,1	111	122,2		
Mn	360,5	417,6	320,6	392,4	397,8	411,9	76,65	105,3
Co	29,4	19,5	17,3	17,7	18,7	19,5		
Ni	85	44,2	40,8	42,1	43,5	44,5	367,1	176,6
Cu	81,4	43,2	39,4	52,7	42,5	43,7	25,21	26,7
Zn	156	142,1	62,1	49,3	132,1	144,9	44,49	39,01
As	19,6	<1	<1	<1	<1	<1	37,09	86,69
Se	<0,1	4,4	6,8	4,8	5,9	5,6	291,7	309,5
Sr	660	190,4	138,3	125,8	131,4	139,8		
Mo	6	3,3	3,1	3,7	2,9	2,7		
Cd	0,6	<1	<1	<1	<1	<1		
Sb	2	1,1	<1	<1	0,7	0,8	0,1	0,07
Tl	0,5	1,9	1,2	1,2	1,7	1,9		
Pb	31	22,4	8,3	5,7	20,4	24,4		

Tabel 84. Näiteid jälgelementide sisalduste [mg/kg] kohta kivisöe elektrijaamade katelde lendtuhkades (LT) ja elektrifiltrite (EF) tuhkades

Katel		PC										CFBC	
Iseloomustus		EF									LT		
Viide		[129]				[128]				[74]	[153]		[152]
Element													
Li	85,3	79,1	93,1	90,3	90,9						222,2	106,8	235
Be	10,3	7,9	9,5	10,1	9,5						5,46	3,91	11
V	199,5	197,9	238,6	234,7	251,4					507	6919	5795	208
Cr	106,4	105,3	130,5	122,8	133,7	130	69,2	18	49,6	164			134,2
Mn	554,2	307,3	314,2	348,5	334,3	225	1630	899	87,5	1010	85	104,3	324,6
Co	19,3	15	15,2	16,9	17,9	100	35	5,6	11	67			29,2
Ni	44,3	35	35,9	38,8	37,9	242	52,9	10,5	41,2	61	265,1	447,5	87,9
Cu	47,1	38,5	43,2	41,1	42,8	93,8	93	28,1	51,6	273	34,54	38,7	71,8
Zn	203,4	219,9	320,4	287,4	300,7					144	67,68	53,24	221
As	2,1	10	24,4	15	19	11	22,3	6,58	12,4	15	107,1	80,71	60
Se	7,6	5,2	5,4	7	5,1	3,01	2,26	2,48	5,15	5	291,7	309,5	1,6
Sr	113,4	132	158,7	136,8	141,2					2310			720
Mo	5,8	5,3	6,9	6,2	7,6	21	6,1	4,9	8,1	26			14,6
Cd	<1	<1	1,2	1,1	1,1	1,34	0,52	0,25	0,404	<LOQ			1,3
Sb	2,5	2,1	4,8	2,3	2,5					15	0,66	0,27	3,8
Tl	3,3	4,2	5,4	4,6	4,8					4			1,4
Pb	34,4	43,2	64,3	51,9	59,1	80	49	48	59	125			52

15 Lisa 4. Leostumine

Tabel 85. Vastavalt standardile EVS-EN 12457-4:2002 (L/S=10; 24 tundi) saadud põlevkivituhkade leostusvete jälgelementide sisaldused [$\mu\text{g/l}$] ja tulemuste suhteline standardhälve [%]

Tuha päritolu	Ühik	Li	Be	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sb	Tl	Pb
Auvere KT	ppb*	24,8	<LOQ	0,4	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,3	1,0	0,3	6,0	<LOQ	0,4	3908,1	50,1	0,2	0,2	<LOQ	<LOQ
	%	4,0	n.d	15,2	n.d	n.d	n.d	1,8	2,1	1,8	1,5	n.d	1,8	0,8	0,7	1,4	4,3	n.d	n.d
Auvere EF1	ppb	61,1	<LOQ	0,3	0,4	99,9	0,2	0,2	0,7	0,6	2,6	<LOQ	3,4	5438,2	74,2	0,3	<LOQ	4,8	11,0
	%	2,2	n.d	42,9	7,0	0,9	2,9	3,6	0,8	3,3	1,8	n.d	2,7	0,2	1,0	1,8	n.d	n,d	0,6
Auvere LT	ppb	68,4	<LOQ	0,3	0,4	96,5	<LOQ	0,2	0,6	1,5	2,3	<LOQ	3,6	5724,1	73,6	0,3	<LOQ	4,6	10,3
	%	3,3	n.d	19,8	4,3	0,7	n.d	2,3	3,6	0,8	1,6	n.d	1,9	0,9	n,d	3,0	n.d	1,0	0,9
EEJ CFBC KT	ppb	17,4	<LOQ	0,6	<LOQ	<LOQ	0,6	0,2	0,8	0,3	0,9	<LOQ	0,9	2650,3	15,3	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	%	7,3	n.d	24,4	10,0	n,d	1,8	2,6	2,4	28,8	2,4	n.d	4,8	0,8	3,0	n.d	n.d	n.d	n.d
EEJ CFBC EF1	ppb	32,9	<LOQ	0,4	0,3	117,3	<LOQ	0,3	0,8	1,0	1,5	<LOQ	3,4	3508,3	51,4	0,2	<LOQ	3,7	4,1
	%	5,5	n.d	15,1	11,7	0,6	n.d	3,9	5,6	2,2	1,9	n.d	1,9	2,1	0,7	2,1	n.d	1,4	1,3
EEJ CFBC LT	ppb	28,9	<LOQ	0,5	0,3	110,0	<LOQ	0,3	0,8	0,5	1,3	<LOQ	3,2	3822,0	52,2	0,2	<LOQ	3,0	5,3
	%	6,1	n.d	36,7	5,2	n,d	n.d	1,5	6,9	2,4	3,9	n.d	2,2	0,6	n,d	3,4	n.d	1,0	0,8
PC+NID LT	ppb	24,6	<LOQ	0,6	0,2	35,0	0,2	0,2	0,8	0,4	1,0	0,2	0,4	2080,8	37,6	0,2	0,4	4,1	2,8
	%	7,0	n.d	10,0	16,1	3,9	12,0	6,5	9,5	3,1	1,8	5,3	3,8	1,9	1,2	3,1	3,7	1,0	1,3
PC+NID KF	ppb	27,9	<LOQ	1,7	0,4	42,2	0,3	0,3	0,9	1,3	1,2	0,3	0,4	1664,3	46,0	0,2	<LOQ	4,7	3,4
	%	2,9	n.d	9,3	4,4	0,9	3,8	2,1	3,2	1,9	3,9	2,0	9,3	1,0	0,9	3,5	n.d	1,2	1,0
PC (TP-67) KT	ppb	33,4	<LOQ	0,4	<LOQ	<LOQ	0,2	0,2	0,6	1,1	1,6	<LOQ	0,2	5180,8	14,3	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,3
	%	4,5	n.d	30,5	n.d	n.d	1,2	0,7	5,9	1,8	4,1	n.d	5,7	1,9	0,6	n.d	n.d	n,d	0,3
Enefit 280 WHB	ppb	11,7	<LOQ	0,8	16,0	150,7	0,6	0,2	0,6	1,6	1,8	0,8	5,2	1906,9	291,9	0,8	<LOQ	0,4	<LOQ
	%	6,8	n.d	3,8	2,1	n,d	2,4	2,9	4,8	2,0	2,0	1,0	1,0	1,1	1,6	1,6	n.d	1,7	n.d
Enefit 280 KT	ppb	10,3	<LOQ	0,4	10,2	21,0	<LOQ	0,2	0,4	0,3	0,2	1,0	0,6	894,7	78,0	0,6	0,5	0,0	<LOQ
	%	8,2	n.d	29,3	2,0	0,9	n.d	4,7	2,8	4,1	7,3	1,7	6,2	1,0	1,2	2,9	4,0	3,8	n.d
Enefit 280 LT	ppb	11,3	<LOQ	0,4	17,1	139,7	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	1,2	4,6	1640,8	257,8	0,7	<LOQ	0,7	<LOQ
	%	8,2	n.d	31,0	1,2	0,7	1,2	2,9	3,1	2,3	7,0	1,4	3,1	1,7	1,6	2,1	n.d	0,3	n.d
Petroter SV	ppb	18,9	<LOQ	0,4	2,4	<LOQ	<LOQ	0,2	0,4	2,0	2,3	0,4	<LOQ	1176,7	40,7	0,2	0,2	<LOQ	0,0
	%	5,8	n.d	32,1	1,9	n.d	n.d	2,2	3,5	1,6	0,9	1,8	n.d	1,7	1,4	2,0	2,2	n.d	8,3
Petroter EF	ppb	12,2	<LOQ	1,9	46,0	7,5	1,5	0,2	0,5	1,8	3,6	2,4	2,6	1058,3	88,2	0,3	0,7	7,7	1,4
	%	12,6	n.d	19,2	0,6	1,4	0,6	4,0	3,1	2,2	2,8	0,9	2,4	0,9	2,1	1,7	3,0	0,7	1,0

*ppb on ekvivalentne $\mu\text{g/kg}$

LOQ – üldistatult on väärtus madalam kui 0,1 $\mu\text{g/kg}$

Tabel 86. Näiteid jälgelementide sisaldusest [mg/kg] sötuhkade leostusvees

	pH	Juhtivus, μS/cm	Li mg/kg	Be	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sb	Tl	Pb	Viide
PC LT			16,3	0,042 5		2,2	2,122	0,123	0,454	0,699	0,6	0,1	0,166	0,042 4	30,67	6,097	0,022 8	0,004 5	0,000 3	0,003 8	[152]
PC KT			1,3	0,043 5		1,415	0,671	0,224	0,484	0,745	0,6	0,1	0,123	0,006 2	9,64	0,3	0,003 1	0,012	0,000 2	0,011 8	[152]
PC LT							0,812			3,08	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,268	<LOQ		<LOQ	[107]
PC EF	10,36	972	0,92	<LOQ	<LOQ	1,51	0,26	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,12	0,26	1,84	1,32	<LOQ	3,4	<LOQ	<LOQ	
	10,31	1309	2,86	<LOQ	0,01	1,33	0,76	<LOQ	<LOQ	0,01	<LOQ	<LOQ	0,08	0,05	3,25	2,49	<LOQ	0,01	<LOQ	<LOQ	
	10,21	1358	5,92	<LOQ	<LOQ	2,08	1,25	<LOQ	<LOQ	0,01	<LOQ	<LOQ	0,15	0,08	3,68	3,44	<LOQ	0,02	<LOQ	<LOQ	
	10,16	1163	3,51	<LOQ	<LOQ	2,55	1,22	<LOQ	<LOQ	0,01	<LOQ	<LOQ	0,22	0,11	2,98	3,12	<LOQ	0,03	<LOQ	<LOQ	
	9,93	884	3,63	<LOQ	0,01	4,62	1,87	<LOQ	<LOQ	0,01	<LOQ	<LOQ	0,26	0,28	3,25	3,92	<LOQ	0,1	<LOQ	<LOQ	[129]
PC KT	6,72	183	0,75	<LOQ	0,04	0,33	0,02	0,11	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,25	0,01	0,56	0,11	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	
	6,69	451	0,74	<LOQ	0,02	0,16	<LOQ	0,08	<LOQ	<LOQ	0,07	<LOQ	0,04	0,02	0,62	0,08	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	
	6,78	671	1,08	<LOQ	<LOQ	0,12	<LOQ	0,05	<LOQ	<LOQ	0,01	<LOQ	0,03	0,03	1,32	0,08	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	
	7,1	391	1,04	<LOQ	0,04	0,36	0,02	0,05	<LOQ	<LOQ	0,02	<LOQ	0,1	0,02	0,85	0,12	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	
	7,11	310	0,68	<LOQ	0,05	0,29	<LOQ	0,07	<LOQ	<LOQ	0,01	<LOQ	0,07	0,01	0,51	0,08	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	
PC EF*	4,25												0,07 - 0,12	0,17 - 0,31		0,17 - 4,43					
	10,22												0,10 - 0,13	0,15 - 0,22		0,85 - 0,87					
	12,03												0,06 - 0,08	0,21 - 0,31		0,97 - 1,06				0,05 - 0,09	[128]
	4,84												0,01 - 0,18	0,06 - 0,32		0,09 - 1,63					
PC EF	9,4						4,92			<LOQ	0,23	0,45	0,74	1,27		15,09	<LOQ	<LOQ		<LOQ	[75]
	12,2						1,6			<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	1,48		6,28	<LOQ	<LOQ		<LOQ	meet
	11,5						0,58			<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,05		0,97	<LOQ	<LOQ		<LOQ	od
	12,6						1,64			<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,748		4,68	<LOQ	<LOQ		<LOQ	EN
	12,6						3,78			<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		1,52	<LOQ	<LOQ		<LOQ	1245
PC EF	12,8					5,73			<LOQ	0,36	0,42	<LOQ	<LOQ		1,98	<LOQ	<LOQ		<LOQ	7-3	
CFBC LT							0,52 - 0,83	1,34 - 3,58	0,97 - 2,28	0,11 - 0,21	1,21 - 1,70					0,015 -					[153]
																0,022					

*tabelis esitatud kogus sõltub keskkonna pH väärtusest (lahuse pH väärtust reguleeriti)

16 Lisa 5. HP 14 arvutustulemused

Tabel 87. HP 14 arvutamisel kasutatud M-tegurite väärtused

M-tegur	Element
1	B, Ba, Mo, Mn, Ni, Sn, Sb, Ti, Tl, U, V
10	As, Co, Cu, Cr, Pb, Se, Zn
100	Cd, PAH
1000	Hg

Tabel 88. Jälgelementide protsentuaalsed sisaldused Auvere elektrijaama tuhkades ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused

Tsoon	1 KT	2 ÜK+ÖKO	3 ÕES	4 EF1	5 EF2	6 EF3	7 EF4	8 EF5	9 KF
Meetod 1									
A, ≥0,1 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥25 %	0,121	0,086	0,097	0,116	0,097	0,083	0,091	0,080	0,073
C, ≥25 %	5,493	5,421	5,608	5,629	4,312	5,562	5,820	5,513	4,772
D, ≥25 %	0,344	0,280	0,310	0,354	0,306	0,279	0,304	0,343	0,245
Meetod 2									
A, ≥0,1 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B, $\sum[c(400) \times M] \geq 25\%$	0,464	0,333	0,351	0,478	0,336	0,342	0,367	0,311	0,267
C, ≥25 %	3,865	2,737	2,835	4,022	2,669	2,865	3,051	2,593	2,158
Meetod 3									
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥0,1%	0,038	0,026	0,027	0,038	0,026	0,028	0,029	0,025	0,021
C, ≥2,5%	0,089	0,074	0,083	0,096	0,087	0,073	0,080	0,095	0,064
D, ≥25%	0,086	0,068	0,077	0,088	0,081	0,066	0,074	0,090	0,060
E, ≥25%	0,131	0,113	0,123	0,132	0,113	0,112	0,122	0,134	0,100
Meetod 4									
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥2,5%/M	0,378	0,266	0,275	0,393	0,258	0,279	0,297	0,250	0,209
C, ≥2,5%	0,089	0,074	0,083	0,096	0,087	0,073	0,080	0,095	0,064

Tabel 89. Jälgelementide protsentuaalsed sisaldused EEJ ja BEJ tuhkades ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused

Tsoon	1 KT	2 ÜK	3 ÖKO	4 ÕES	5 EF1	6 EF2	7 EF3	8 EF4
Meetod 1								
A, ≥0,1 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥25 %	0,091	0,101	0,099	0,084	0,071	0,073	0,070	0,091
C, ≥25 %	3,699	5,203	4,750	5,041	4,660	5,067	4,673	3,699
D, ≥25 %	0,303	0,377	0,364	0,336	0,299	0,317	0,296	0,303
Meetod 2								
A, ≥0,1 %	0	0	0	0	0	0	0	0
B, $\sum[c(400) \times M] \geq 25\%$	0,159	0,291	0,250	0,275	0,238	0,274	0,271	0,159
C, ≥25 %	0,813	2,134	1,709	2,128	1,863	2,229	2,216	0,813
Meetod 3								
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥0,1%	0,007	0,020	0,016	0,020	0,017	0,021	0,021	0,007
C, ≥2,5%	0,091	0,110	0,107	0,097	0,085	0,090	0,084	0,091
D, ≥25%	0,089	0,104	0,103	0,090	0,080	0,083	0,078	0,089
E, ≥25%	0,116	0,143	0,138	0,129	0,117	0,123	0,114	0,116
Meetod 4								
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥2,5%/M	0,072	0,202	0,160	0,203	0,178	0,214	0,213	0,072
C, ≥2,5%	0,091	0,110	0,107	0,097	0,085	0,090	0,084	0,091

Tabel 90. NID-ga varustatud 185 MWel toimpõletus energiaplokkide tuhkade keskmine jälgelementide protsentuaalne sisaldus ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused

Tsoon	1 KT	2 ÜK	3 ÖKO	4 Tsüklon	5 NID
Meetod 1					
A, ≥0,1 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥25 %	0,094	0,081	0,085	0,095	0,071
C, ≥25 %	4,097	4,187	4,189	4,564	5,009
D, ≥25 %	0,342	0,314	0,323	0,364	0,241
Meetod 2					
A, ≥0,1 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, $\sum[c(400) \times M] \geq 25\%$	0,189	0,194	0,195	0,226	0,290
C, ≥25 %	1,101	1,288	1,260	1,506	2,417
Meetod 3					
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥0,1%	0,010	0,012	0,011	0,014	0,023
C, ≥2,5%	0,102	0,092	0,096	0,108	0,063
D, ≥25%	0,101	0,089	0,093	0,106	0,056
E, ≥25%	0,130	0,120	0,123	0,136	0,098
Meetod 4					
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥2,5%/M	0,100	0,120	0,116	0,140	0,235
C, ≥2,5%	0,102	0,092	0,096	0,108	0,063

Tabel 91. Enefit 280 ja Petroter tehnoloogiate tuhkade jälgelementide protsentuaalne sisaldus ning HP 14 hindamiseks kasutatavate arvutusmeetodite (Tabel 42) rakendamise tulemused

Tsoon	Enefit 280				Petroter	
	1 KT	2 WHB	3 Tsüklon	4 EF	1 SV	2 EF
Meetod 1						
A, ≥0,1 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥25 %	0,019	0,020	0,016	0,019	0,007	0,013
C, ≥25 %	1,945	2,074	1,588	1,969	0,707	1,324
D, ≥25 %	0,133	0,372	0,346	0,404	0,195	0,629
Meetod 2						
A, ≥0,1 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, $\sum[c(400) \times M] \geq 25\%$	0,189	0,201	0,155	0,192	0,065	0,129
C, ≥25 %	0,721	3,578	3,430	4,169	1,565	6,722
Meetod 3						
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥0,1%	0,019	0,020	0,016	0,019	0,007	0,013
C, ≥2,5%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D, ≥25%	0,054	0,051	0,037	0,032	0,055	0,031
E, ≥25%	0,060	0,301	0,293	0,353	0,134	0,585
Meetod 4						
A, ≥0,1%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B, ≥2,5%/M	0,019	0,020	0,016	0,019	0,007	0,013
C, ≥2,5%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000