

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

**TUULIKULABADE JÄÄTMETE JA LASKEMOONA
KASUTAMISEST TEKKINUD JÄÄTMETE KÄITLUS EESTIS**

**MANAGEMENT OF WASTES FROM WIND BLADES AND FROM THE
USE OF AMMUNITION IN ESTONIA**

MAGISTRANTUURITÖÖ

Üliõpilane: Alo Toom

Üliõpilaskood: 211594KAKM

Juhendaja: Helari Buht

Kaasjuhendaja: Marina Kritševskaja

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“ 24” mai 2023

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“24 ” mai 2023

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“24” mai 2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Alo Toom

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tuulikulabade jäätmete ja laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlus eestis“,

mille juhendajad on Helari Buht ja Marina Kritševskaja,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Alo Toom, 211594KAKM
Õppekava, peeriala: KAKM, keemia- ja keskkonnakaitse tehnoloogia
Juhendaja(d): Keskkonnaspetsialist, Helari Buht, 53938739
Professor, Marina Kritševskaja, 6202851

Lõputöö teema:

Tuulikulabade jäätmete ja laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlus eestis
Management of Wastes from Wind Blades and from the Use of Ammunition in Estonia

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Luua ülevaade tuulikulabade ja laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlusviisidest maailma mastaabis
2. Leida potentsiaalne lahendus tuulikulabade jäätmete käitlusele
3. Leida potentsiaalne lahendus laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlusele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Jäätmetest ülevaate koostamine	01.02.23
2.	Käitlustehnoloogiate ja keskkonnaprobleemide ülevaate koostamine	28.03.23
3.	Potentsiaalsete lahenduste koostamine ja esitamine. Magistritöö kirjutamine ja vormistamine	15.05.23

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/digitaalselt allkirjastatud/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/digitaalselt allkirjastatud/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/digitaalselt allkirjastatud/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise

Sisukord	
Lühendite nimekiri	7
Sissejuhatus	8
1. JÄÄTMETE ÜLEVAADE	10
1.1 Laskemoona jäätmete olemus	10
1.2 Laskemoona jäätmete käitlemise ajalugu	11
1.3 Laskemoona jäätmete käitlus tänapäeval	12
1.4 Tuulegeneraatorilabade jäätmed.....	17
1.4.1 Tuuleenergia kasutus	17
1.4.2 Tuulegeneraatorite konstruktsioon.....	18
1.5 Tuulegeneraatorite labade käitlus	19
1.5.1 Keemiline käitlus	19
1.5.2 Mehaaniline käitlus.....	20
1.5.3 Termiline käitlus	21
2. JÄÄTMETE KÄITLEMISEST PÕHJUSTATUD KESKKONNAOHT	23
2.1 Tuulegeneraatorite labade käitlemisest põhjustatud keskkonnoht	23
2.1 Laskemoona jäätmetest põhjustatud oht.....	24
2.1.1 Laskemoona jäätmete käitlemise kitsaskohad.....	24
3. KÄITLUSTEHNOLOOGIATE ARENGUSUUNAD	26
3.1 Lõhkeainetest põhjustatud keskkonnoht	32
3.1.1 Põhja- ja pinnaveeseire Eestis laskeharjutusväljadel	32
3.1.2 Männiku lasketiiru pliisisalduse pinnaseuuringud 2020	34
4. POTENTIAALSSED LAHENDUSED EESTIS	37
4.1 Võimalikud lahendused laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmetele Eestis	37
4.1.1 Ringmajanduskeskuse loomine.....	38
4.1.2 Ettevõtte terviklahendus	38
4.2 Tuulikulabade jäätmete ümbertöötlemine	41
4.2.1 Uued materjalitehnoloogiad komposiitmaterjalidele	41
4.2.2 Komposiitmaterjali ringlussevõtt.....	42
4.2.3 Taaskasutamine	43
4.2.4 Jäätmete ekspordimine.....	44
KOKKUVÕTE	45
SUMMARY	46
VIITED	47

EESSÕNA

Lõputöö on algatatud Riigi Kaitseinvesteeringute Keskuse ja üliõpilase Alo Toom omavahelises koostöös leidmaks lahenduse laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmetele. Põhilised algandmed on saadud kas internetis saadavatest artiklitest või Riigi Kaitseinvesteeringute Keskuse asutusesisestest dokumentidest. Töös olevate laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete andmete kasutamisel ja töötlemisel on aidanud põhijuhendaks olev Helari Buht ja kaasjuhendajana on abi osutanud Tallinna Tehnikaülikooli materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituudi professor Marina Kritševskaja.

Käesoleva töö kirjutamisel on saadud inspiratsiooni magistrantuuri praktika käigus tegeletud tööülesannetest. Laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlemise puudumise puhul on tegemist aktuaalse probleemiga, mis pole leidnud laialdast kõlapinda ning vajab lahendust. Tuulikulabade jäätmete puhul on Eestis tegemist veel tulevikus tekkiva probleemiga, mistõttu hõlbustamiseks lähitulevikus tekkivate jäätmete käitlust on töös toodud välja võimalikud lahendused ja kitsaskohad tuulikulabade osas.

Märksõnad: tuulikulabade jäätmed, laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmed, käitlustehnoloogiad, magistrantuuritöö

Lühendite nimekiri

BPA – Bisfenool A

DoD - Kaitseministeerium, *ingl* Department of Defence

EPA - Ameerika Ühendriikide Keskkonnakaitseagentuur, *ingl* United States Environmental Protection Agency

OB – lahtine põletamine, *ingl* Open Burning

OD – lahtine lõhkamine, *ingl* Open Detonation

GFRP – klaaskiududega tugevdatud polümeerid, *ingl* Glass Fiber Reinforced Polymer

LER - vedela epoksiidvaiku meetod, *ingl* Liquid Epoxy Resin method

NAMMO - Nordic Ammunition Company

RDX - Royal Demolition explosive (heksogeen, tsüklotrimetüleentrinitroamiin)

RFS – Taastuvkütuse standardprogramm, *ingl* Renewable Fuel Standard System

SsER – pooltahked epoksiidvaigud, *ingl* Semi-solid state Epoxy Resins

Subpart X – käesolevas töös USA Föderaalkoodeksi paragrahv 40 osa 264 alajagu x

TNT – trinitrotolueen

Sissejuhatus

Inimpopulatsiooni järk-järguline kasvamine on aspekt, millest põhjustatud tagajärgedega tuleks tegeleda aktiivselt ja järjepidevalt. Inimestena oleme valdavalt harjunud kujundama oma elu nii, et olemas oleks tihtipeale kõik mugavused ja hüved. Lisaks kõige elementaarsematele väärtustele nagu toit, vesi ja elamispind on suurenenud ka heaoluühiskonnast tingitud vajadus muuta inimeste elu lihtsaks ja mugavaks, mis ei ole kontseptsiooni poolest vale, aga piir hüvede saavutamise ning keskkonna reostuse vahel on sageli väga ähmane. Vastavast asjaolust tulenevalt ei pöörata sageli tähelepanu sellele, et kõikide hüvede kätte saamiseks tuleb sageli ohvreid tuua keskkonnareostuse näol.

Erinevate inimtegevuste tagajärjel on väga aktuaalseks teemaks globaalne soojenemine, mille jälgimisega on tegeldud juba tööstusrevolutsiooni aegadest (1850-1900). Enne tööstusrevolutsiooni aega on hinnatud, et inimesed on põhjustanud Maakera globaalset soojenemist ligikaudu +1 °C ning praeguste hinnangute kohaselt see number kasvab 0.2 °C aastakümne kohta. [1] Kuigi väikeosa globaalsest soojenemisest toimub looduse enda mõjul (vulkaanide tegevus näiteks), siis suurem osakaal on põhjustatud siiski inimtegevusest, millest suurimaks faktoriks on fossiilsete kütuste põletamine. Põletamisel eralduvad gaasid nagu CO₂, NO_x jt, mis atmosfääri jõudes neelavad endasse Maalt tagasipeegelduvat soojusenergiat ning seetõttu tõusebki üleüldine temperatuur maakeral. [2] Globaalse soojenemise efekti aeglustamiseks on kasutusele võetud erinevad nõuded ja seadused, mis suunavad inimesi otsima alternatiivseid lahendusi fossiilkütustele. USAst võib seaduse näol tuua näite taastuvkütuse standardprogrammi, RFS (*ingl Renewable Fuel Standard Program*), järgimises, mille eesmärk on vähendada kasvuhoonegaase ja suurendada taastuva energia kütuse sektorimahtu [3]. Euroopa Liidus on vastavaks juhiseks taastuva energia direktiiv (Renewable Energy Directive) – vastava raamseadustiku eesmärk on arendada kõikides EU majandussektorites taastuvate energiaressursside kasutust [4].

Ühe võimalusena suurendada globaalset taastuva energia kasutusmahtu on võtta kasutusele tuuleenergia, mis vähendab suures koguses CO₂ emissioonide teket [5]. Eestis on viimase paarikümne aasta jooksul tuulenenergial põhinev energia tootmine teinud suure arenguhüppe ja sama praktikaga liigutakse jõudsalt edasi. Plaanis on arendada mitmeid meretuuleenergia projekte, sh näiteks Eesti ja Läti ühine projekt nimega ELWIND. [6] Väga sageli keskendutakse „positiivsele“ väljundile, mida tuuleenergia pakkuda saab, ent varju jääb tuulikutega seotud käitlus pärast nende eluea lõppemist. Nimelt ligi 85% tuuliku

konstruktsioonist on tänapäeval võimalik suunata teisejärgulisse ringlusse, aga ülejäänud 15% materjalide puhul kerkivad esile probleemid. [7] Nimelt moodustavad 15 % tuulegeneraatorite tiivikud, mille käitlus on raskendatud nende konstruktsioonimaterjalide pärast, mis suures osas komposiitmaterjalid.

Teise lahenduskäiguna saab välja tuua ringmajanduse efekti, mille abil on võimalik kas toormaterjalist või juba jäätmeteks muutunud materjalist toota teisejärgulist toorainet, mis aitab samuti kaasa keskkonna säästmisele. Jäätmete optimaalseks kasutamiseks on 3 moodust – taaskasutamine, korduskasutamine ja ringlussevõtt. [8]

Võib aga juhtuda, et jäätmetel pärast toodeteks olemise lakkamist ei leidu edaspidist eesmärki ringmajanduses. Taolisi jäätmeid nimetatakse probleemtoodeteks, kui vastavate toodete jäätmeteks muutumisel kaob nende edaspidine väärtus. Rohepöörde ja alternatiivsete energiaallikate peale üle minek Eesti jaoks võiks tähendada näiteks tuuleenergia edendamist – tuuleenergia jaoks vajalikud tingimused on meil olemas. Vähe on pööratud tähelepanu aga tuulegeneraatorite kasutamisest tekkinud jäätmetele – jäätmed tiivikulabade näol. Tegemist on keskkonnaprobleemiga, mis vajab lahendust lähitulevikus. Teiseks probleemkategooriaks on valitud laskemoona jäätmed – tegemist on aktuaalse probleemiga, millel hetkeseisul kindel lahendus puudub. Käesolevas töös on püstitatud hüpotees, et laskemoona jäätmete käitluseks ja tulevikus tuulegeneraatori labade käitlemiseks on võimalik leida universaalne käitlustehnoloogia, mis lubab käidelda mõlemaid jäätmeid seejuures võimalikult palju teisest tooret tagasi ringlusse suunates. Eestis on käesoleval hetkel probleem laskemoona kasutamisest põhjustatud jäätmete käitlemisega ja keskmisest tuuliku elueast tulenevalt (ca 20-25 a) on varsti probleem ka tuulikulabade käitlusega. Töös uuritakse, kas on võimalik leida selline tehnoloogia, mis esiteks oleks võimeline käitlema nii tuulikulabade jäätmeid kui ka laskemoona kasutamisest põhjustatud jäätmeid. Teiseks tuleb uurida, kas on olemas selliseid purusteid/purustamistehnoloogiaid, millega saab käidelda erinevaid materjale ja väljundina saaks võimalikult suures mahus teisest tooret tagasi turule suunata. Käesolevas töös ja probleemi lahenduses on lähtutud eespool juttuolevatest aspektidest.

1. JÄÄTMETE ÜLEVAADE

1.1 Laskemoona jäätmete olemus

Probleemist parema ülevaate ning olemuse aru saamiseks tuleb eelnevalt lahti seletada, mida on peetud silmas laskemoona jäätmete all.

Ameerika Ühendriikide Keskkonnakaitseagentuuri (*ingl United States Environmental Protection Agency, EPA*) tõlgenduse järgi on sellise jäätmete puhul tegemist energiamahukate ohtlike jäätmetega, mis kirjelduse kohaselt omavad potentsiaali lõhkeda iseeneslikult ning mida pole võimalik käidelda teiste traditsiooniliste meetodite abil [9]. Need jäätmed sisaldavad endas ilutulestikke, signaalrakette erinevaid propellante ja ka laskemoona, millest edaspidi juttu tuleb. Energiamahukateks materjalideks nimetatakse aineid, milles on salvestatud suures koguses keemilist energiat, mis on võimalik vabastada lühikese aja jooksul väliste faktorite mõjul [10]. Propellant on materjal, mille põletamisel tekib suur gaaside ja aurude kogus [11].

Laskemoon kujutab endast erinevates vormides pürotehnikat, lõhkeaineid ja propellante, mis võivad esineda lennukipommide, miinide, granaatide ja laskemoona kujul [9].

Eesti raames esineb vastavalt tõlgendamisele kahte sorti jäätmeid – laskemoona ja lahingmoona jäätmeid. Termin „laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmed“ on kasutusel Kaitseväes ja lisaks kasutatakse Päästeametis ka mõistet „lahingmoona“ jäätmed. Erinevus Päästeameti sõnul on aspektis, et „lahingmoona jäätmed“ on mingil ajahetkel endas sisaldanud reaalselt lõhkeainet samas kui „laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmed“ on valdavalt kasutusel treeningmoona kasutamisest järele jäänud jäätmete jaoks. (H. Buht, personaalne infovahetus, 6.september 2022)

Kaitseväes tekkivate laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmete hulka loetakse laskmistegevusest järelejäänud suurekaliibriliste relvade laskemoona kestasid (hülse), granaatide ja miinide ja lõhkekehade osasid ja lisaks veel valgusrakettide kestasid ja laskemoona transportimiseks mõeldud metallist kaste/konteinereid. Olgu öeldud, et kuigi erinevaid jäätmeid kogutakse kokku liigiti, on siiski tegemist segajäätmetega, sest tihtipeale sisaldavad antud jäätmed endas erinevaid materjale nagu näiteks plastik ja metall. Koostöös Keskkonnaministeeriumi, Keskkonnaameti, Kaitseministeeriumi ja Riigi Kaitseinvesteeringute

Keskusega jõuti kokkuleppele, mille kohaselt võib laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmed lugeda metalli jäätmeteks eeldusel, et need on eelnevalt ohutustatud. (H. Buht, personaalne infovahetus, 6.september 2022)

Päästeameti puhul on materjalide mõistes tegemist lihtsama määratlusega, sest valdav osa jäätmetest on erinevad metallisulamid. Metallisulamitega kaasnev probleem hõlmab endas madalat materjalide turuväärtust ning seejuures on sulamist erinevaid materjale kätte saada raske ning kulukas. Jäätmeteks on peaaesjalikult eelnevalt kahjutuks tehtud lõhkeseadeldiste kestad/killud ja vähesemal määral võib hulka kuuluda veel veneaegseid gaasiballoone, mis välimuse põhjal võivad meenutada terviklikke lõhkekehasid.

1.2 Laskemoona jäätmete käitlemise ajalugu

Ühe käitlemisviisina on kasutatud kõrvaldamise ehk lõppladustamist. Lõppladustamise all on silmas peetud laskemoona ladustamist ümbritsevasse keskkonda, näiteks maa sisse kaevamine või merepõhja ladustamine. Vaieldavalt on tegemist kõige keskkonda kahjustavama käitlusviisiga, sest jäätmetest tegelikult ei vabaneta vaid tõstetakse silma alt ära. [12] Laskemoona uputamist Läänemerre kasutati suures mahus pärast Teise maailmasõja lõppu, kui oli vaja vabaneda suurest kogusest laskemoonast ja keemiarelvadest. Riski suurendab omakorda aspekt, et Läänemere puhul on tegemist võrdlemisi madala veekoguga ehk uputatud jäätmed ei olnud täielikult inimkäe ulatusest väljas. Aastate vahemikus 1985-2007 kanti ette vähemalt 448 intsidendist, kui kalurid tõmbasid kalavõrkudega Taani lähedal välja keemiarelvi. [12] „HELCOM’i“ andmetel on Läänemerre uputatud ligemale 40 000 t keemilist laskemoona, millest omakorda ligi 15 000 t sisaldas endas keemiarelvade komponente. Kõige madalamad ladestuskohad on vaid 30 m sügavusel ja sügavamates vetes kohati 70 m sügavusel. Varasemalt vähem kajastust saanud probleem on kerkinud taas esile seoses merepõhja kui majaduslikult väärtusliku kasutusala. Probleemaatiliseks on osutunud Läänemere läänepoolsem piirkond, sh suurema riskiga piirkonda kuuluvad Saksamaa, Poola ja Läti veed. Poolast põhjakaarde jääb Rootsile kuulub saar Bornhold, mille vahetus läheduses on avastatud enim keemiarelvi vahemikus 1994-2012 a. Vahetult inimesele põhjustab ohtu kaldale uhitud valge fosfor ja ipriit ehk sinepigaas. Vähe on teada, kuidas mõjutavad võimalikud lekkivad keemilised ained mereelu ja mis mõju on mainitud kemikaalidel biomagnifikatsiooni osas. [13]

Varasemalt on laskemoona ja lõhkeainet sisaldavate jäätmete käitlemiseks kasutatud lahtist lõhkamist ja põletamist (*ingl open burning and open detonation, OB/OD*). Selline käitlus leiab aset ka praegu siis, kui on vaja vabaneda mitte enam laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmetest vaid säilivusaja ületanud laskemoonast. Lahtine lõhkamine ning põletamine on tihtipeale kõige odavam käitlusviis selliste jäätmete jaoks. Sellisel juhul võetakse jäätmed ning neile lisatakse juurde veel lõhkeaineid, mille süütamisel ka jäätmed süttivad ning seejärel kas põlevad või plahvatavad nagu näidatud joonisel 1.



Joonis 1. Vaade avatud lõhkamise meetodile [14].

USAs on 1980. aastast alates keelatud lahtine põletamine välja arvatud juhul, kui jäätmed on ebastabiilses olekus, et neid saaks teistmoodi käidelda või puuduvad vahendid teistsuguseks käitluseks [9]. Samuti on keelatud OB/OD Saksamaal, Hollandis ning Kanadas [15].

OB/OD ohtlikkus seisneb asjaolus, et põletamise käigus eralduvad õhku erinevad toksiidid, kantserogeenid, raskmetallid ja muud kahjulikud ühendid [15]. Raskmetallide puhul võib olla kerge korjata kokku metallitükid lõhkamisalal, aga väga raskesti on kättesaadavad lõhkamise tulemusel tolmu eraldunud raskmetallid. Mismoodi raskmetallid käituvad pinnases sõltub juba pinnase omadustest ja ümbritseva keskkonna tingimustest [16, 17].

1.3 Laskemoona jäätmete käitlus tänapäeval

Järgnevas peatükis on esitatud ülevaade, milliste meetodite ja vahendite abil käideldakse laskemoona jäätmeid praegu.

Rääkides kaugematest kohtadest on USAs esindatud kõik käitlemistehnoloogiad alustades lahtisest põletamisest/lõhkamisest ning lõpetades külmpurustamisega. Tänapäeval on

kasutusel järgnevad käitlemistehnoloogiad: lahtine lõhkamine (*ingl open detonation*), lahtine põletamine (*ingl open burning*), kontrollitud põletamine (*ingl closed burning*), tagurpidi lahtivõtmine (*ingl reverse assembly*), mehaaniliselt mõõtmete vähendamine (*ingl mechanical downsizing*), väljasulatustehnikad (*ingl melt out techniques*) ja külmpurustamine (*ingl cryogenic fracturing*). [18] Esimene käitlustehnoloogiad puudutav regulatsioon kuulutati USA-s välja 1980. a, millega sätestati, et ohtlike jäätmete põletamine on keelatud väljaarvatud juhul, kui tegemist on lõhkejäätmega [19]. Lõhkeainete jäätmed, kuhu alla kuulub ka osa laskemoona jäätmest, kuulub kategooriasse *Subpart X*. *Subpart X* viitab sellistele komponentidele, mis nõuavad unikaalset ohtlike jäätmete käitlustehnoloogiat, mis on omakorda reguleeritud Ressursside säilitamise ja taastamise seaduse ja Föderaal määruste koodeksi 40. paragrahviga (säte 264, alajagu X). Selle kategooria jäätmed ei käi tüüpiliste käitlusmeetodite alla, vaid selle alajagu X komponendid peavad vastama keskkonnategevuse standarditele. Erinevad jäätmed, mis kuuluvad *Subpart X* kategooria alla, peavad käitlemiseks olema lokaliseeritud ja protsess peab olema kujundatud, ehitatud ja opereeritud nii, et ei toimuks reostuse levikut ümbritsevasse keskkonda. [20] USA-s on erasektoriga seonduvad ettevõtted tänaseks loobunud lahtisest põletamisest/lõhkamisest ehk OB/OD-st sellest tuleneva reostuse ja avalikkuse surve tõttu [15].

Sõjaväega situatsioon nii lihtne aga ei ole ning sõjaväe ning energiasektori jaoks on EPA koostanud erandi, mis lubab neil endiselt toimetada vanade käitlemistehnikate abil [15]. 2018. aasta raporti kohaselt tegeles OB/OD-ga veel 60 asutust. Lõviosa 60st asutusest võttis enda alla DoD (Kaitseministeerium, *ingl Department of Defence*), kes kasutab enim OB/OD käitlemisviisi lõhkeainetest vabanemiseks. Vahemikus 2016-2017 viis DoD läbi demilitariseerimisprotsessi 10 000 t propellantide ja lõhkelaengute jaoks, samuti demilitariseeriti ca 34 000 t erinevat sorti hülsse, miine ja sütikuid ning 650 t koguses rakette. [19] Sõjaväe jaoks on senini olnud OB/OD erinevalt alternatiivsetest meetoditest palju ohutum ja selline lähenemine on lubanud käidelda ka suuri koguseid erinevaid lõhkelaenguid samaaegselt. [19] Mida aeg edasi, seda rohkem on hakatud mõtlema ja kasutusele võtma ka alternatiivseid tehnoloogiasid, mis lisaks ohtlikest jäätmest vabanemisele annab võimalusi ka protsessi käigus toota teisest toormaterjali. Alternatiivsete meetodite põhiliseks puuduseks on suur finantsiline väljaminek.

Järgnevalt on välja toodud erinevad laskemoona (jäätmete) kategooriad ja tehnoloogiad, millega on võimalik taolisi jäätmeid käidelda.

Laskemoona (jäätmete) kategooriad on järgmised: paksu ja õhukese kestaga lõhkelaengud, propellandid ning potentsiaalselt lõhkeaine jääkreostusega reostunud jäätmed.

Erinevad lõhkelaengud, pommid, mürsud, keskmistes ja suurtes mõõtudes raketid kuuluvad nõ paksu kesta ehk *ingl thick case munitions* te kategooria alla. Sellise laskemoona ühiseks jooneks on paksu kesta olemasolu (joonis 2) ning kest tekitab omakorda kahju pärast energiamahuka aine lõhkemist. [19] Võrdluses Eestiga – Eesti laskemoona jäätmetest sobivad siia kategooriasse veneaegsed mürsud, granaadid, treeninglennukipommid jms.



Joonis 2. Eestis leitud veneaegsed laskemoona ühikud [21].

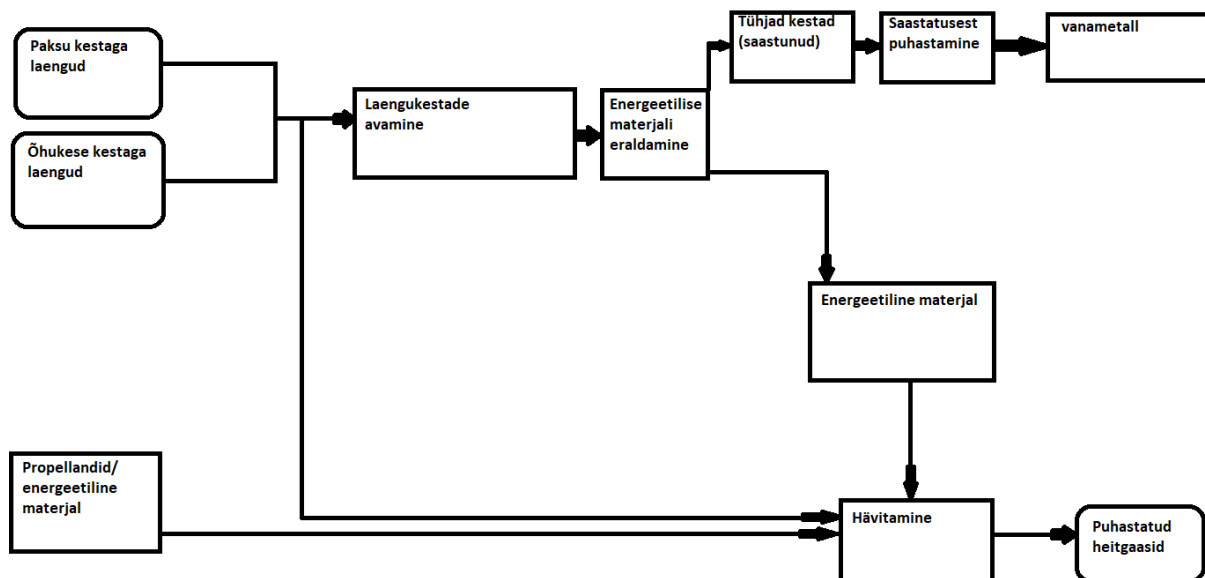
Õhukese kestaga laskemoona alla kuuluvad näiteks erinevad padruneid vahemikus 5,6 -12,7 mm ja ka 14 - 40 mm. Lisaks selles kategoorias on veel erinevad sütikud, detonaatorid ja erinevates mõõtmetes väikesekaliibrilisi padroneid. Paksu kestaga moonast eristab neid asjaolu, et selle kategooria laskemoonas on ligikaudu 227 g energiamahukaid materjale. [19] Eestis näiteks läheb sellise kategooria alla erinevad käsitulirelvade laskemoon nagu näidatud joonisel 3.



Joonis 3. Vaade erinevas suuruses käsitulirelvade padrunitele [22].

Veel on olemas propellandid, mis sisaldavad endas kinnitamata koguses energiamahukaid materjale ja potentsiaalselt lõhkeainega reostunud jäätmed. Eestis potentsiaalselt lõhkeainega reostunud jäätmeid pigem ei esine.

Paksu ja õhukese hülsikestadega laskemoona üldise käitlemispõhimõtte näevad välja järgmised: esmalt toimub kestade avamine, millele järgneb energiamahuka materjali eraldamine ülejäänud osadest. Seejärel tühjad kestad, mis on veel potentsiaalselt lõhkeainetega reostunud, puhastatakse ning allesjäänud metallkestad suunatakse vanametalli. Kätte saadud energiamahukas materjal kogutakse kokku ja suunatakse hävitamisele – hävitamise käigus tekkivad gaasid puhastatakse ja suunatakse ümbritsevasse keskkonda. Protsessi skeem on välja toodud joonisel 4. [19]



Joonis 4. Laengute käitlusprotsessi skeem [modifits. 19].

Peatükis 3 räägitakse lähemalt erinevatest laskemoona käitlemise etappidest ja omapäradest seoses keskkonnareostusohuga.

Eesti lähiriikides eksisteerivad ka erinevad ettevõtted, kes on spetsialiseerunud laskemoona jäätmete käitlemise ja vajaliku tehnikaga varustamisele. Ühe sellise ettevõtteks võib välja tuua Rootsi ettevõtte Dynosafe'i, kes tegeleb laskemoona jäätmete käitluslahenduse pakkumisega. Firma pakub välja erinevaid terviklahendusi pakkudes nii ohutuid transpordi võimalusi kui ka kohapealseid demilitariseerimisvõimalusi. Rootsi kõrval Norras on ka teine kosmose ja kaitsetehnika toodangut pakkuv suurfirma NAMMO, kelle esindused on üle maailma laiali. Ka NAMMO kasutab käitlemiseks lõhkamistehnikat aga selle erinevusega, et viiakse läbi kontrollitud lõhkamine. 900 meetri sügavusele paigutatakse vanasse kaevandusse laskemoona jäätmepõletus, mis lõhatakse ning selle tulemusel eralduvad gaasid läbivad erinevad filtersüsteemid ning lõpptulemusena tekkinud heitgaasid vastavad Euroopa Liidus kehtivatele nõuetele. [23]

Sarnaselt NAMMO tegevusele tegutsevad firmad, mis pakuvad mobiilseid lahendusi laskemoona jäätmepõletamiseks.

1.4 Tuulegeneraatorilabade jäätmed

1.4.1 Tuuleenergia kasutus

Paremat ja keskkonda säästvamata tulevikku silmas pidades tuleb mõelda alternatiivsetele energialahendustele, näiteks tuuleenergia. Tuuleenergia kuulub taastuenergia kategooriasse ning on laialdaselt kasutusel üle maailmas.

Tuuleenergia muundatakse elektriks tuulegeneraatorite abil. Tuuleenergia positiivsete külgedena saab välja tuua kasvuhoonegaaside puudumise, kohapealse tootmise ja jätkusuutlikkuse. [5] Taastuenergeetika kodulehel oleva info kohaselt on Eestis püstitatud 145 tuulegeneraatorit, mis tagavad maksimaalse võimsuse kuni 320 MW [24]. Aastate vahemikus 2008-2016 on tuuleenergia tootlikkus suurenenud ligikaudu neli korda [25]. Hetkeseisu järgi on kõik tuulegeneraatorite pargid ehitatud maismaale, aga tulevikus on lootus välja arendada ka rannikumere tuulepargid, aga selleks tuleb esmalt ületada erinevad takistused [26]. Suur ajakulu on põhjustatud erinevatest menetlustest, mis kaasnevad selliste ehitamisprojektidega – nt planeerimismenetlus ja hoonestusloa saamiseks võib kuluda mitu aastat. Lisatakistuseks on keskkonnakaitsjate ja elanikkonna vastumeelsus. [27]

Tuuleenergial esineb ka teatud puudujääke, millest räägibki järgnev lõik.

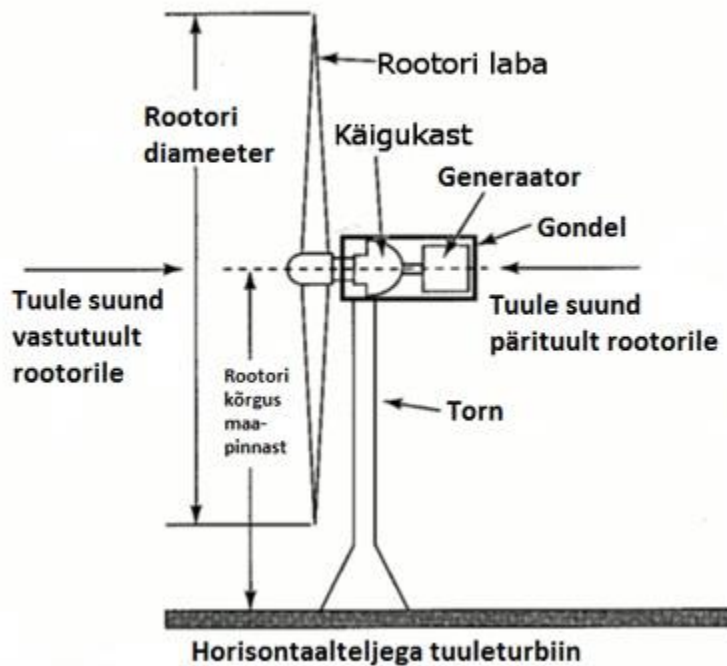
Esiteks peab tuuleenergia kasutuseks väljavaadatud kohas olema tagatud pidev tuul vastasel juhul ei jõua tuuleenergia konkureerida olemasolevate energialiikidega [28]. Eesti mõistes on olemas nii tooraine (tuul) energia tootmiseks kui ka maa-ala, kuhu ehitada generaatorid. Teisalt tuleb väga selgelt läbi mõelda tuulegeneraatorite paigaldus, sest elektriliinide pikkusest hakkab sõltuma toodetava elektri hind [5]. Kolmandana saab välja tuua võimaliku keskkonnamõju ja inimeste seisukohad tuulegeneraatorite suhtes – Hiiumaale kavandatava meretuulepargi ehitusele on vastukaaluks välja toodud müra kasv, looduskeskkonna häirimine ja esteetiliste väärtuste kadumine [29].

Pealekauba eelnevalt mainitud probleemkohtadele on võrdlemisi vähe välja toodud fakti, et ka tuulegeneraatorid pole igavesed ning nende edasine käitlus pärast kasutusaja lõppu on üpris ebaselge.

Tulenevalt eelmainitud asjaolust olekski tarvis uurida, kas ja millised on Eesti võimalused tuulegeneraatorite käitluseks pärast nende eluea lõppu.

1.4.2 Tuulegeneraatorite konstruktsioon

Konstruktsiooni alusel võib jagada tuulegeneraatori kolme suuremasse kategooriasse: torn, gondel ja rootori tiivikud [30]. Joonisel 5 on näidatud tuulegeneraatori konstruktsiooniosad.



Joonis 5. Tuulegeneraatori konstruktsiooniosad [modifits. 31].

Torn on tavapäraselt ehitatud terasest, betoonist ja/või terasevõrestikust [32]. Materjalide valikul lähtutakse ilmastikuoludele vastupidavusest. Gondliks nimetatakse konstruktsiooniosa, kus toimub mehaanilise energia ümbermuundamine elektrienergiaks. Gondel on ehitatud klaaskiududest, mis tagavad konstruktsiooniosa tugevuse omades seejuures võimalikult väikest kaalu. [33] Rootori tiivikud (tavaliselt 3 tk) koosnevad peasjalikult klaaskiudude ja tugevdatud polüestrist või epoksiidist [34].

Keskeltläbi võib tuulegeneraatorite elueaks lugeda ca 25 aastat, mis tähendaks, et esimesed tuulegeneraatorid vajaksid käitlemisvõimalusi varasemalt aastal 2033 [35]. Pärast tuulegeneraatori kasutamise lõppu saab kuni 85% materjalidest, milleks võivad olla teras konstruktsiooniosad, vaskjuhtmed, elektroonika ning käiguajamid, suunata probleemideta taaskasutusse. Komplikatsioonid tekivad ülejäänud 15% käitlemisse suunamisel, mis koosnevad peamiselt rootori tiivikutest. [35] Tiivikute materjal (klaaskiudude ja polümeeride segu) on komposiitmaterjal, mille käitlemist raskendab asjaolu, et heterogeensest hübriidstruktuurist on raske eraldada kahte komponenti [36]. Komposiitmaterjalide taaskasutamisse suunamiseks kasutatakse praegu nii mehaanilisi, termilisi kui ka keemilisi meetodeid eraldamiseks üksteisest komponente. Olgu öeldud, et ükski viis pole hetkeseisuga majanduslikult kasumlik. [36]

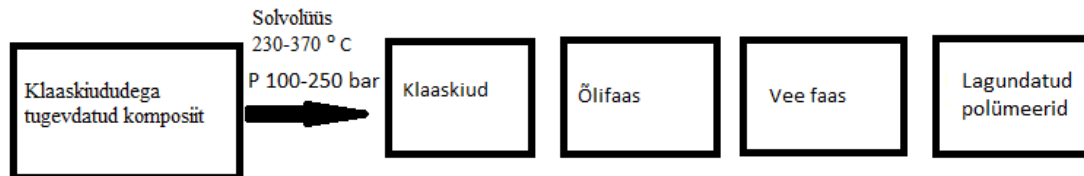
1.5 Tuulegeneraatorite labade käitlus

Kuigi suurem on tuulegeneraatori konstruktsiooni elementidest on ringlusse suunatav kerkib probleem esile tuulikulabade käitlusel, sest labad koosnevad komposiitmaterjalidest, mida on majanduslikult väga kallis ja keeruline ümber töödelda [37]. Maailmas on kasutusel kolme sorti tehnoloogia, mille alusel saab teha vahet taaskasutusprotsessidel: mehaaniline, termiline ja keemiline taaskasutus [37]. Klaaskiududega tugevdatud polümeeride (GFRP) puhul on tegemist väga tugeva materjalidega, mis keerulise ja majanduslikult kalli tooraineteks lahutamise tõttu raskendab tiivikute töötlemisprotsessi. Tuulikulabade materjali füüsikokeemilistest omadustest tulenevalt on käitlustehnoloogiad majanduslikult kallid, mistõttu läheb suur osa tiivikutest määramata ajaks ladustamisele või halvemal juhul prügimäele. [35]

1.5.1 Keemiline käitlus

Tuulikulabade keemiliseks käitlemiseks saab kasutada solvolüüsi protsessi. Solvolüüs kujutab endast keemilist reaktsiooni, mis võtab aset lahustunud aine ja lahusti vahel, kus üks reaagentidest on liias [38]. Kõrgete temperatuuride (250 - 370 °C) ja rõhkude (100 - 250 bar) juuresolul käitub vesi nii reagendi kui ka lahustina. Reaktsiooni käigus plasti osakesed taandatakse väikesteks kildudeks, kui samal ajal klaaskiud eralduvad komposiitosakeste võrgustikust. Reaktsiooni produktideks on monomeerid, oligomeerid ja polümeerid, mis

omakorda jagunevad vee ja õli faasi vahel sõltuvalt nende polaarsusest.[39] Solvolüüsi protsessi kirjeldab joonis 6.



Joonis 6. Solvolüüsi skeem [modifits. 39].

Olulisimate faktoritena saab välja tuua, et kõrgema temperatuuri olemasolul langeb klaaskiudude tugevus olulisel määral. 270 °C juures moodustas regenereeritud kiudude tugevus 70% originaalkiudude tugevusest. Sekundaarse kasutamise otstarbel tuleb regenereeritud klaaskiudusid pesta orgaanilise lahustiga ning osakeste suurust uuesti korrigeerida. [39]

1.5.2 Mehaaniline käitlus

Mehaaniline taaskasutamine tähendab, et tuulikulabad purustatakse sobivasse suurusesse ning eraldatakse klaaskiud ning peen fraktsioon, mis leiab rakendust komposiitse täiteainena. Jäätmete sisendvoost saadakse tagasi 21% klaaskiududest ning 30% täiteaine otstarbeks. Purustamine toimub kahes astmes – esiteks purustatakse labade osad sobivasse mõõtu (5-10 cm) ja seejärel toimub järelpurustamine haamerpurusti abil, kust sõelte ja tsüklonite abil eraldatakse täiteaine- ja kiududerikkad fraktsioonid. [40] Taoline protsess annab võimaluse ligi 75% ulatuses asendada uute klaaskiudude tootmise regenereerimisprotsessiga. Uute klaaskiududega võrdväärse tõmbetugevuse saavutamiseks tuleb osaliselt kasutada ka uusi klaaskiudusid. Allesjäänud täitematerjali saab kasutada asendamaks CaCO₃ tsemendi tootmises. Allesjäänud 49 % jäätmetest omab sidemeid jämedakoeliste ja komposiitosakeste

vahel, mistõttu see pole sobilik regenereerimiseks ja see osa läheb tihti ladestamisele, sest ei oma ka suurt kütteväärtust. [40]

1.5.3 Termiline käitlus

Tuulelabade käitluseks sobib põhimõtte poolest veel termiline töötlemine, aga ka sellel meetodil on omad miinused, näiteks termiline lagundamine ei aita kaasa ringmajandusele ehk pürolüüsi tulemusena jääb järgi tahke jääk, saadakse kätte õli, gaas ja söeprodukt. Protsess toimub ilma hapniku juurepääsuta kõrgetel temperatuuridel 300-1000 °C. Pürolüüsi käigus saadakse kätte kiud ja peaaegu kõik kõrvalproduktid on sobilikud taaskasutamiseks. [41]

Kõige tavalisem maismaa tuulegeneraatori tiivikute pikkus jääb tavaliselt 52 m ligi, mis muudab selle transportimise väga kulukaks [42]. Seepärast lõigatakse pärast tiivikute mahavõtmist need väiksemateks osadeks.

Kõrvaldamismeetodite kõrval kerkib esile ka teisi viise, kuidas taaskasutada tuulegeneraatori tiivikuid ning laiatarbelise meetodika välja töötamisega tegeldakse aktiivselt. USA firma „Carbon Fibers“ taaskasutab komposiitmaterjale, sh ka tuulegeneraatorite tiivikuid [43]. Pürolüüsi käigus saadakse kätte „rebenenud klaaskiud“, mis pole küll sobilikud teise toormena uute tiivikute valmistamiseks, aga materjal suunatakse edasi auto-, mere- ja massitarbe kaubaks [43]. Veel võib välja tuua „Global Fibergalss Solutions“i, kes toodab vanadest tuulelabadest termoplastseid klaaskiudpelleteid [44]. Teise valmistoodanguna on välja toodud komposiitpaneelid, millel on lai kasutusala ehitusvaldkonnas [45]. Euroopas saab näitena välja tuua „Reciclaia“, kes ühe osana töötleb ümber ka klaaskiududest tuulegeneraatorilabasid. Ettevõtte pakub ka kohapealset lammutusteenust, mis hoiab kokku transpordi kulude pealt. Lõpp-produktina tekib teisejärguline tooraine, mida saab edasi kasutada kas lennunduses, ehituses, autotööstuses või taaskord tuuleenergeetikas [46].

„Siemens Gamesa“ on probleemist sammu võrra ees ja maha kantud tiivalabade taaskasutamise asemel panustab enne tiivikute turule suunamist materjalidesse, mis lihtsustavad pärast eluea lõppu taaskasutust. Ettevõtte sõnul koosnevad uued tuulegeneraatori tiivikud sellistest materjalidest, mida saab 100% ulatuses pärast tiivikute käitlust suunata tagasi tootmisse. [47] Sarnaselt „Siemensile“ tegutseb ka „Vestas“, kelle eesmärgiks on toota nullemissiooniga tuulikuid aastaks 2040. Toetudes keemilisele ümbertöötlemisele on ettevõtte visiooniks tuulelabad pärast kasutust lahutada materjalid alkomponentideks, millest on võimalik toota uut epoksiidi. [48]

Saksa tööstusfirma „Anlagenbau Umwelt + Technik Chemnitz“ valmistab mitmeotstarbelisi purusteid, näiteks *DIABOLO*, mis sobivad ka tuulegeneraatorite purustamiseks. Saksamaal on keelatud tuulegeneraatorite labade maha matmine aastast 2005, mis tähendab, et vajalik on alternatiivne lahendus labade käitluseks. [49] *DIABOLO* purusti töötab kaheastme põhimõttel ehk toimub eelpurustamine ning pärast peenestamisprotsess. Masin on varustatud magnetilise separaatoriga, mis võimaldab eraldada üksteisest metalli ja muud materjalid. Teisejärguline peenestusprotsess võimaldab valida materjali parameetreid vastavalt soovile. Sobilikud materjalid masinale on lisaks tuulelabadele ka erinevad metallid jpt. [50] Kui vaadata masina mitmeotstarbelisust võiks ka Eesti kaaluda sarnast lahendust nii tuulegeneraatori labadele kui ka laskemoona jäätmetele.

2. JÄÄTMETE KÄITLEMISEST PÕHJUSTATUD KESKKONNAOHT

2.1 Tuulegeneraatorite labade käitlemisest põhjustatud keskkonnoaht

Tuulegeneraatori labad on immutatud 40% ulatuses epoksiidiga, mis tagab neile suurema tugevuse. Epoksiidvaiku kasutatakse laialdaselt ka teistes ehitusvaldkondades – oma heade keemiliste omaduste tõttu on aine kasutusel tihti liimainena, sest on väga vastupidav kuumusele, pinge all olemisele ning on keemiliselt kindel [51]. Samuti on epoksiidvaik kasutusel veemahutitel kaitsekihina [52].

Tuulegeneraatori labade tootmine toimub epoksiidvaiku kasutades kahel erineva viisil – esiteks kasutades vedel epoksiidvaiku (*ingl Liquid Epoxy Resin method, LER-Method*) ja teiseks kasutades pooltahkes olekus vaigu osakesi (*ingl Semi-solid state Epoxy Resins, SsER*) [53].

LER meetodi kohaselt imetakse infusiooni teel vedelfaasis epoksiidi vaik koos tahendjaga tuulikulaba vormi, milles toimub komposiitmaterjalide immutamine. Pärast kuumutamist ja tahenemist saadakse vormist kätte pool tuulikulaba, mis omakorda liimitakse kokku teise pooliku tuulikulabaga epoksiid sideainete abil. [53] SsER meetodi kohaselt toimub eelimmutus enne protsessi edasisi faase. Parema püsivuse saavutamiseks hoitakse eelnevalt epoksiidivaiku toatemperatuuril. Tootmisprotsess saab alguse käsitsi tuulikulaba välise kihi katmisega epoksiidvaiguga. Eelimmutatud matid asetatakse tuulikulabavormi, misjärel toimub kuumutamine ja liimimine teise tuulikulabaga. [53] Epoksiidis sisalduv bisfenool A kogus (*edaspidi BPA*) sõltub tootmismetoodika valikust – SsER meetodi puhul on BPA sisaldus 61% ja LER meetodi puhul 45% [53]. Mõlema meetodi puhul on ühiseks jooneks asjaolu, et osa BPA-st jääb reageerimata. Tehtud analüüsi põhjal on suurim võimalik kogus 7294 kg reageerimata BPA-d tänini Euroopas kasutusel olevates tuulikulabades [53]. Kuigi tuuliku kasutusaja jooksul labade pealt eralduv BPA kogus pole märkimisväärne on kasutusest eemaldatud tuulikulabade käitlus ning roll keskkonnoahu suhtes lahtine. *Epoxy Resin Committee* raporti kohaselt kõrvaldatakse ajavahemikus 2020 – 2034 ligikaudu 1 mlj. t

tuulikulabasiid ja sellise koguse juures on võimalik BPA sattumine keskkonda 4760 kg ulatuses. [53]

Varasemalt on läbi viidud katsed, kus erinevatel temperatuuridel testiti bisfenool A leostumist epoksiidivaigust vette [52]. Katse tulemusel selgus, et kõigist 3-st proovist eraldus BPA vette ja leostumine suurenes temperatuuri kasvades [52]. Kokkuvõtvalt võivad labad sisaldada kuni 33% BPA-d [54]. BPA on läbipaistev aine molaarmassiga 228,29 g/mol, mida kasutatakse kommertsplastikute sünteesimisel, samuti epoksiidivaigu tootmisel. Inimese kokkupuutel BPA-ga võib suurenedagi vähki haigestumise risk [55]. Tegemist on endokriinsüsteemi kahjustava ainega, mis tähendab, et esinevad häiringud organismi kasvu, paljunemise ja hormoonide töötamisega [56].

Tuuliku labades leiduv BPA võib keskkonda sattuda mitmel viisil. Aja jooksul erinevates ilmastiku tingimustes võib teatud osa BPA-d eralduda juba tuulegeneraatori töötamisel keskkonda ning teiseks hiljem tuulikute labade käitlemisel [57]. Samuti võib BPA sattuda keskkonda erinevate jäätmekäitlus ettevõtete kaudu või sekundaarselt plasti või metalli kaudu prügilatest [56]. Siit joonistub välja selge põhjus, miks ei tohiks vanu tuuliku labasid maha matta.

Tuuliku labade pürolüüsil kõrgete temperatuuride juuresolul aurustuvad labades olevad kemikaalid. BPA-l ei ole suurt aururõhku, mis tähendab, et tegemist pole lenduva komponendiga, küll aga võib kontrollimata termiline töötlemine kaasa aidata BPA levikul tuulikulabadest edasi pinnasesse [58, 59].

2.1 Laskemoona jäätmetest põhjustatud oht

2.1.1 Laskemoona jäätmete käitlemise kitsaskohad

Kõige esimese faktorina taoliste jäätmete käitlemisel tuleks silmas pidada ohutust nii töötajate kui ka ümbritseva keskkonna seisukohast vaadatuna.

Sageli sisaldavad laskemoona jäätmed endas täielikult ära põletamata lõhkeaine osakesi, mis võivad edasisel töötlemisel põhjustada ohtlikke olukordasid.

Eelnevalt mainitud asjaolu tingibki probleemi olemasolus Eestis. Jäätmekäitlejad ei ole valmis võtma riski, et metallijäätmete purustamisel võiks toimuda kõrvalekalle, mis kahjustaks töötajaid või seadmestikku. Vastuoluliselt käitlejatele on valmis nii Kaitsevägi kui ka Päästeamet andma kinnituse, et nende poolt tekitatud jäätmed on käitlemiseks ohutud. Hetkeseisul aga puudub huvi laskemoona jäätmete käitlemise vastu, sest käitlejatel endal pole võimalust tõendada jäätmete ohutust. [21]

Teise osana probleemist kerkib esile jäätmete spetsiifilise militaarse kuju olemasolu. Militaarkuju tõttu võivad hilisema tegevusega esineda erinevad komplikatsioonid – nimelt, kui on soov saata jäätmed edasi teise riiki, siis saadetise kontrolli käigus leitud militaarse välimusega komponendi tõttu on oht, et saadetakse tagasi kogu laadung. Kogu finantsiline pool jääb sel juhul saadetise välja saatnud osapoole kanda, mistõttu ei oldagi valmis seda riski võtma. [21]

Militaarsest kujust on küll võimalik vabaneda, aga tänasel päeval puuduvad Eestis olevatel jäätmekäitlejatel vajalikud tehnilised vahendid. Tehniliste vahendite soetamine ainuüksi laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlemiseks on kulukas protsess, mistõttu tuleks leida veel jäätmeliike, mis on sobilikud käitlemiseks sama tehnoloogiaga lisaks laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmetele. [21]

3. KÄITLUSTEHNOLOOGIATE ARENGUSUUNAD

Kui arutletakse laskemoonajäätmete käitlemise üle Eesti kontekstis, siis sageli on probleemiks suhteliselt väike ja kõikuv jäätmete kogus. Seega ei ole mõtet investeerida tehnoloogia ostmisse ainult laskemoonast üle jäävate jäätmete käitlemiseks, mistõttu on vaja leida ühisosa erinevate jäätmete käitlemiseks. Tuleb uurida tehnoloogiaid, mida saab rakendada nii laskemoona kui ka teiste jäätmete liikide, nt tuulelabade jäätmete käitlemiseks.

Käesolevas peatükis tuleb juttu erinevatest üle kasutusaja läinud laskemoona käitlemisvõimalustest, mis on juba kasutusel ning võimalustest, mis on alles testimisjärgus või välja arendamisel. Olgu öeldud, et mõned meetodid on sobivad ka laskemoona kasutamisest järele jäänud jäätmete käitlemiseks ning osad meetodid on sobilikud vaid terviklike üle kasutusaja läinud laskemoona käitlemiseks, nt tagurpidi kokkupanek sobib vaid terviklike laengute käitlemiseks

Eelnevas peatükis öeldu kohaselt algab käitlus laskemoona lahti võtmise protsessist. Üheks võimaluseks on tagurpidi kokkupanek (*ingl Reverse Assembly*). Protsessi mõte seisneb tervikliku ühiku komponentideks lahti võtmises – nõnda tegutsedes on võimalik hilisemalt kasutada näiteks olemasolevaid komponente uue laskemoona tootmiseks. Plussina võibki välja tuua aspekti, et osa komponente on võimalik korduvkasutada pärast lahti võtmist. Protsess on võimalik läbi viia kas automatiseeritult või kasutades käsitööjõudu. Automatiseeritud protsessi kasuks räägib asjaolu, et ohutus on sel juhul maksimaalne, mis tähendab, et robotid teostavad protsessi ja inimene kontrollib roboteid konsooli abil turvalises kauguses. Lisaks tuleb rahaline kokkuhoid inimtööjõu pealt. Limiteerivaks asjaoluks on tehnika olemasolu – üldjuhul on firma, mis toodab laskemoona, võimeline teostama ka lahti võtmist ja eraldi tehnoloogiat soetada lihtsalt lahti võtmise pärast ei ole majanduslikult otstarbekas. Eraldi väärib mainimist, et laskemoona lahti võtmist teostav tootmisliin ei ole universaalne ehk teatud tootmisliinid on võimelised näiteks teatud kuju või kaliibriga moona lahti võtma. [60] Käsitsi lammutamise kasuks räägib aga vähene finantsinvesteering, samas tuleb arvestada töötajate väljaõppeprogrammi ning üleüldise turvalisuse saavutamise nii töötaja kui ümbritseva keskkonna suhtes [19]. Tagurpidi kokkupanemist kirjeldab joonis 7.



Joonis 7. Pilt tagurpidi kokkupanemise masinast [61].

Vesilõikuriga kesta lahti lõikamise eeliseks on selle suur varieeruvus laskemoona mõõtmete suhtes – pole vahet, kas tegemist on keskmise- või suurekalibrilise moonaga, sest vesilõikur võimaldab lõigata ka suure diameetriga laskemoona nagu näiteks lennukipommid. Eelise *reverse assembly* ees annab ka võimalus pääseda lõhkeainetele ligi sellise moona puhul, mis võib olla aastaid seisnud rasketes tingimustes, mistõttu laskemoona kest võib olla roostetanud ja raskesti töödeldav. Ebastabiilsete ainete puhul töötab vesi samaaegselt lõikamisega ka jahutusena, mis stabiliseerib energiamahukat komponenti. [19]

Vee ja lõhkeainete kokku sattumise puhul tuleb ainete segu suunata hilisemale töötlemisele. Võrreldes teiste lõiketehnoloogiatega ei toimu vesilõikuri puhul tehnika ülekuumenemist ja sama tehnoloogiat saaks kasutada ka laskemoona jäätmete purustamisele muude materjalide purustamiseks. Arvestades, et keskmise tuulegeneraatori laba pikkus jääb vahemikku 36 – 85 m, siis transportimise soodustamiseks tuleks labad lõigata tükkideks. Vesilõikuriga on võimalik lõigata nii klaas- kui ka süsinikkiudu [62], mis moodustavad mõlemad suurema osa

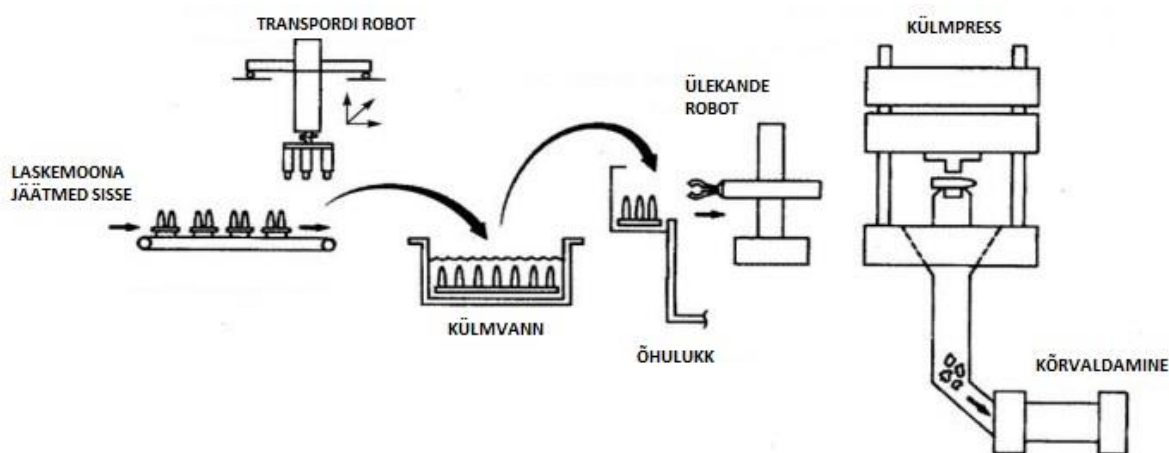
tuulelaba materjalist [63]. Vesilõikuri puhul on lõigatava materjali suurimaks paksuseks 30 cm, seega teoreetiliselt oleks võimalik vesilõikuriga lõigata ka tuulikulabasisid [64, 65]. Eestis on Päästeamet ka välja käinud idee, et selline tehnoloogia võiks olla saadaval massiivsemate lõhkejätmete ohutustamisel. Joonisel 8 on välja toodud näide vesilõikurist.



Joonis 8. Vesilõikuriga kesta avamine [18].

Külmpurustamise protsess seisneb materjali purustamises väga madalate temperatuuride juuresolekul. Külmagensiks kasutatakse tavaliselt vedellämmastikku või kuivjääd ehk vedelsüsihappegaasi. Vedellämmastik võimaldab külmvannis saavutada minimaalse temperatuuri -196° samas kui kuivjää temperatuur jääb -78.5° juurde [66, 67]. Külmpurustamise eesmärk on jäätmed purustada madalate temperatuuride juures. Külmpurustamine suurim erinevus tavalise purustamise kõrval on külmagensi kasutamine ja madalad temperatuurid. Madalate temperatuuride juuresolekul muutuvad ka raskesti purustatavad materjalid (nt lennukipommikillud) hapraks ning seetõttu muutub ka nende

purustamine võimalikuks. Tänu madalatele temperatuuridele on ka võimalikud lõhkeaineosad stabiilsemas olekus, mis võimaldab protsessi ohutumalt läbi viia kui tavaline purustamine. Võimalike plahvatuste kahjude vältimiseks on kogu protsess automatiseeritud ning ümbritsetud plahvatuskindlate seintega. [19] Protsess näeb üldjoontes välja järgmine. Laskemoona jäätmed pannakse roboti abil konveierile, mis suunab jäätmed lämmastikuvanni. Lämmastiku vanniks nimetatakse anumad, mis on täidetud vedellämmastikuga ning kuhu uputatakse jäätmed täielikult. Pärast jäätmete termilist töötlemist liiguvad jäätmed külmpressi alla, mis purustab jäätmed. Võimalikud lõhkeained eraldatakse metalloosadest ning metalli võib edasi suunata vanametalli käitlejatele. [68] Protsessi otstarve ei pea piirduma ainult laskemoona jäätmetega, vaid käitlust saab kasutada ka muul otstarbel – vanade rehvide purustamiseks, elektroonikaseadmete purustamiseks või näiteks USA-s on firma, kes töötleb ümber liitiumakusid kasutades selleks külmpurustamist. Näitena Euroopas võib välja tuua firma „General Atomics“, mis kasutabki külmpurustamist laskemoona jäätmete käitlemisel [69]. Firma pakub ka terviklahendusi, sh nii statsionaarseid lahendusi kui ka mobiilseid süsteeme [69]. Külmpurustamise protsessi skeem on välja toodud joonisel 9.



Joonis 9. Külmpurustamise skeem [modifits. 70].

Suurema diameetriga jäätmetest on võimalik lõhkeainetele ligi pääseda kasutades *lintlõikurit*. Lintlõikuri tehnoloogia võib jagada kaheks – lõikamine jahutusega ja sukeldatud lõikamine. Jahutusega lõikamisel toimub lõikamisega samaaegselt jahutamine vee või jahutusvedelikuga, et ei toimuks lõhkeainete plahvatamist protsessi käigus. Kasutusel on ka versioon, kus lõikamine toimub täielikult vedelikuga täidetud keskkonnas. Erinevalt külmpurustamisest on selles protsessis jahutusest olenemata kõrgemad temperatuurid, seega

tuleb mõelda lisaohutusnõuete peale. [19] Lintlõikurlahendusi pakub näiteks Dynasafe [61]. Näide lintlõikurist on välja toodud joonisel 10.

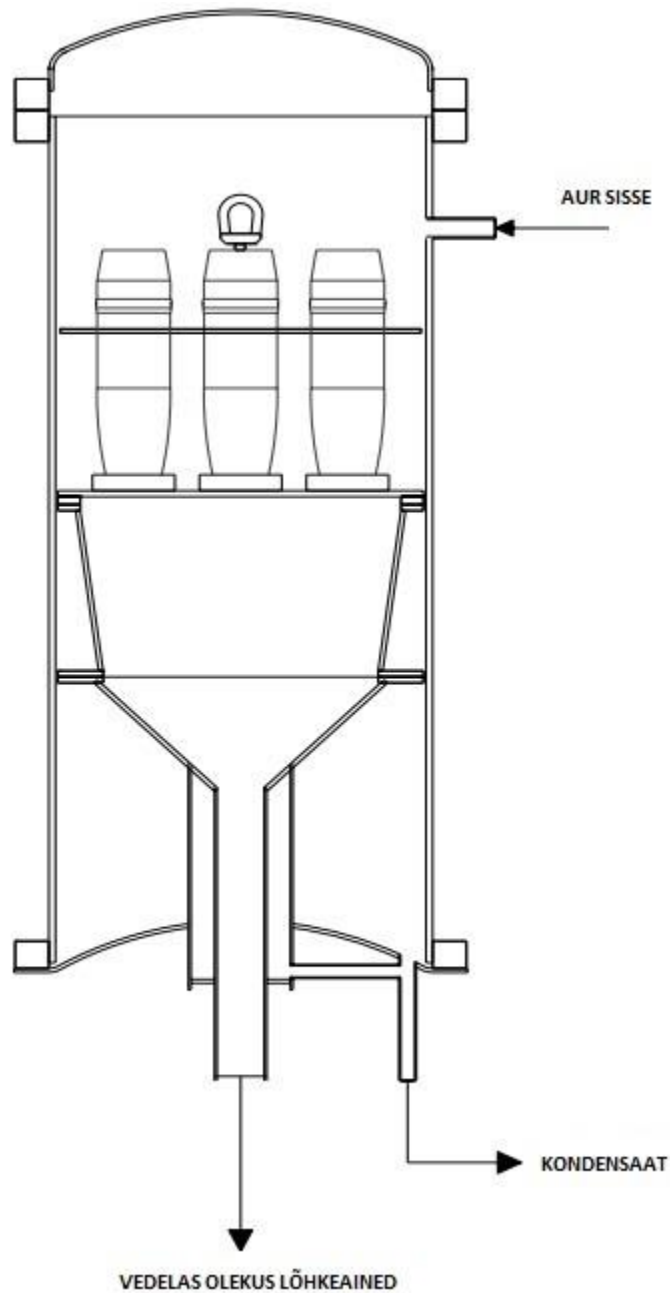


Joonis 10. Vaade lintlõikurile [61].

Pärast laskemoona jäätmete avamist tuleb järgmine etapp ehk energiamahuka materjali eraldamine ülejäänud jäätmetest. Energiamahuka materjali kätte saamiseks on kasutusel järgmised meetodid

Trinitrotolueeni (TNT) ja heksogeeni ehk RDX sisaldavate materjalide kätte saamiseks sobib näiteks *autoklaavis väljasulatus* tehnoloogia [19]. Protsess on võimalik tänu vastavate ainete madalatele sulamistemperatuuridele – mõlema aine sulamiseks on vaja ca 80° [19]. Meetod on sobilik lõhkeainetele, mis on algselt valatud lõhkepea vormi – lõhkeained on viidud vedelasse olekusse, misjärel täidetakse lõhkeainetega laskemoon. Autoklaavis sulatusprotsess näeb välja järgmine: lõhkepea viiakse rõhu all olevasse kinnisesse anumasse, kus vesi saavutab keemistemperatuuri ent ei ületa 121°, mille tulemusena tekib aur, mis sulatab lõhkepea vormi valatud lõhkeained lahti kesta küljest. Sulavormis lõhkeained kogutakse anuma alumise osa kaudu kokku ja lastakse jahtuda, misjärel saadakse kätte energiamahukas aine, mida on võimalik taaskasutada. [19] Protsessis tekib minimaalselt heitvett, sest lõhkeaineteks kasutatav aur viiakse kontakti lõhkepea välispinnaga ja lõhkeaine ja vee omavaheline kokkupuude sisuliselt puudub. Küll aga võib protsess muutuda

ajakulukaks, kui meetodit kasutatakse suurekaliibrilise laskemoona jäätmete puhul. Sellisel juhul on võimalik protsessi kiirendada viies lõhkepea sisse aurutoru – ajakulu väheneb, aga pärast tuleb tegelda auru ja lõhkeainete omavahelisel kokkupuutel tekkinud heitveega. Väljasulatus tehnoloogia on toodud esile joonisel 11.



Joonis 11. Läbilõige autoklaavi mehhanismist [modifits. 71]

3.1 Lõhkeainetest põhjustatud keskkonnaoht

TNT-ga reostunud vesi ei tohi jõuda keskkonda, sest TNT kokkupuutel inimorganismiga on tegemist kantserogeeniga [72]. TNT võib inimese organismi jõuda näiteks sisse hingamisel, joogivee kaudu või põllukultuuride kaudu, mis on kasvatatud TNT-ga reostunud pinnasel [72]. TNT ja RDX puhul on peamised võimalikud viisid inimorganismi jõudmiseks läbi põhjavee ning taimede kaudu. TNT osakesed võivad mullast üle kanduda taimede juurestikku ja RDX aineosakesed võivad jõuda koos mullast saadavate toitainetega taimestiku lehtedesse [72].

3.1.1 Põhja- ja pinnaveeseire Eestis laskeharjutusväljadel

Tänapäeval on jõutud arusaamisele, et jäätmete ladestamine ei ole jätkusuutlik tegevus ning kasutusele tuleb võtta teised abinõud, et ladestamist vältida. Laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete viibimisel keskkonnas on kõrgendatud risk, et kahjustada saab nii loodus kui ka inimesed ise nagu oli varasemalt Läänemere ladestatud keemiarelvade näite puhul välja toodud. Eelmises lõikes mainitu kohaselt võivad ohtlikud ained jõuda organismi eelkõige joogivee ja taimestiku kaudu. Eestis oleva olukorra paremaks mõistmiseks viiakse läbi erinevaid pinnase ja veeseire uuringuid – töös kasutatud materjalidest on kasutatud andmeid, mis pärinevad erinevatest Eestis olevatest laskeharjutusväljade pinnase- ja veeuuringutest aastatel 2018-2022 [73].

Aastal 2022 viidi uuringud läbi järgmistel harjutusväljakutel koostöös Riigikaitse Investeeringute Keskuse, Maves OÜ-ga, ja Eesti Keskkonnauuringute Keskusega – Sirgala harjutusväli, Keskpõlvõgon, Kikepera harjutusväli, Nursipalu harjutusväli, Männiku harjutusväli [73]. Pinnasevee mõõdetavateks parameetriteks olid värvus, keemiline hapnikutarve, BHT₅, hõljuvaine, üldlämmastik ja -fosfor, ammoniumlämmastik. Raskmetallide sisaldusest määrati - Cd, Cr, Ni, Zn, Pb, Cu, Sn ja Hg. Raskmetallide künnisarvud ja piirväärtused on välja toodud järgnevas tabelis nr 1. [73]

Tabel 1. Ohtlike ainete põhjavee [74] ja pinnavee kvaliteedi [75] piirväärtused [modifits. 73]

Näitaja	Põhjavesi (määrus nr 39)		Pinnavesi (määrus nr 28) ³
	Künnisarv, µg/l	Piirarv, µg/l	Piirväärtus, µg/l
Hg	0,4	2	0,07
Cd	1	10	≤0,45-1,5 ⁴
Pb	10	200	14
Zn	50	5000	10,9 ⁵
Ni	10	200	34
Cr	10	200	4,7 ⁶
Cu	15	1000	7,8 ⁷
Sn	3	150	-
Naftasaadused	20	600	100

Uuritavatest proovidest selgub, et drastilisi muutusi vee kvaliteedis toimunud ei ole. Sirgala harjutusväljal võetud pinnasevee proovidest nähtub, et pH, üldlämmastik ning -fosfor vastavad seisundiklassile „väga hea“. Põhjaveest võetud proovidest nähtub, et ohtlike ainete põhjavee künnisarvu on ületanud järgmised raskmetallid – kroom (24,0 µg/l), nikkel (44,0 µg/l) ja plii (110,0 µg/l). [73] Mainitud raskmetallide sisaldus on tõusutrendis, seega on mõistlik jätkata seiramist vastavate raskmetallide osas. Sirgala harjutusvälja kõrged raskmetallide kontsentratsioonid võivad olla põhjastatud asjaolust, et tegemist on endise karjäärialaga, millega kaasneb raskmetallide levik ümbritsevasse keskkonda. Novaatoris ilmunud artikli põhjal [76] võib järeldada, et kui Aidu karjääris on vees olev kõrge niklisisaldus põhjustatud kaevandamisest, siis võib Sirgala harjutusvälja kõrge raskmetallide sisaldus olla põhjustatud analoogsestest allikatest.

Keskpolügoonil esimesest pinnasevee mõõtepunktist võetud proovidest vastasid pH, BHT₅, üldlämmastiku ja üldfosfori ning ammoniumi sisaldus veekogumi väga heale seisundile, ent lahustunud hapniku sisaldus jäi kesisesse seisundiklassi. Raskmetallidest väärrib tähelepanu nikli sisaldus, mis ületas küll määramispiiri, aga jäi alla keskkonnakvaliteedi piirväärtust. Teises mõõtepunktist võetud proovidest analoogselt vastasid eelmanitud näitajad väga heale nõudeklassile erinevusega, et üldfosfori sisaldus jäi heasse seisundiklassi. [73] Raskmetallide osas jäid kõik näitajad alla labori määramispiiri või alla keskkonnakvaliteedi piirväärtuse. Põhjavee seire käigus kahest proovivõtukohest võetud proovidest nähtus, et esimeses proovivõtukohas ei olnud raskmetallide sisaldusega probleeme, ent teises punktis võetud

proovist kajastus künnisarvu ületamine nikli osas (13 µg/l). [73] Kikepera harjutusväljal võetud kolmest pinnasevee proovivõtukohest lähtus, et näitajate väärtused jäid väga heasse kvaliteediklassi ning raskmetallid alla keskkonnakvaliteedi piirväärtust [73]. Nursipalu harjutusväljal seirati pinnasevett kahes proovivõtukohas. Esimest nähtus, et ammooniumi seisund kuulus heasse kvaliteediklassi ja üldfosfor väga halba seisundiklassi – ülejäänud näitajad olid väga heas kvaliteediklassis. Teises proovivõtukohas jäi üldlämmastik heasse kvaliteediklassi. Kummaski pinnasevee proovivõtukohas jäid raskmetallide sisaldused alla labori määramistäpsust. Kolmest põhjavee proovivõtukohest nähtus, et raskmetallide sisaldused jäid alla labori määramispiiri või alla põhjavee künnisarvu. Männikul määrati põhjaveest pliisisaldust, mis jäi alla põhjavee künnisarvu. [73]

3.1.2 Männiku lasketiiru pliisisalduse pinnaseuuringud 2020

Aastatel 2018 ja 2019 võeti Männikul asuvast lasketiirus kuulipüüdjast proovid määramaks pliisisaldust pinnases [77]. Võetud tulemustest selgus, et plii kogused pinnases on normid ületanud, mis on põhjustatud lasketiirus kasutatavast laskemoonast [77]. Seire eesmärgiks on uuringutulemuste põhjal leida optimaalne intervall, mille jooksul tuleks vahetada kuulipüüdjates pinnast, et lokaalne ülenormatiivne plii kogus kuulipüüdjast ei jõuaks edasi levida ega põhjavette leostuda [77].

Männiku lasketiir on rajatud liivakarjäärade vahele nii, et itta jääb Raku järv, läände Männiku järv, põhjast piirneb lasketiir rohealaga ja lõunast moodustab suure osa piirist Männiku raba. Lasketiiru aluspinnaks on liivik, mis tähendab et tegemist on liivaalaga, kus on hõre taimkate ning väheliigestunud pinnamoega liivane pinnas. Männiku liiviku liivakihi paksus varieerub vahemikus 6-30m – edelas madalam, kirdes sügavam. Liivakihi all omakorda on esindatud saviliivmoreen paksusega 1-2m. Liivakihti katavad soosetted paksusega 2-3m. [78]

Lasketiiru otsa on ehitatud suur vall, mida osaliselt katab ekstra kattekiht (kuulipüüdja), mille eesmärgiks on püüda kinni kõik märklaudade pihta lastud kuulid. Männiku lasketiiru kuulipüüdjad jagunevad alumiseks ja ülemiseks kuulipüüdjaks [77]. Kuulipüüdja ehitamisel on kasutatud puitmaterjalist sõrestikku, mis on täidetud liiva, saepurusegu ja puistulaastude ning soolaga – igal komponendil on oma kindel ostarve. Liiva, mida kasutatakse nii täiteks kui kattematerjalina, on segatud saepuruga, mille eesmärk on hoida liivamass niiske ja stabiilsena. Soola eesmärk on vähendada külmemal ajaperioodil külmumise ohtu [77].

Männiku lasketiir on mõeldud eelkõige käsitulirelvadega laskmiseks, mis tähendab, et valdav osa laskemoonast on 7,62mm kaliibriga, mis koosnevad vasest (padrunikestad) ja pliiist (kuulisüdamikud) [79]. Vasest põhjustatud reostus on kogunenud peaaesjalikult laskepositsiooni vahetusse lähedusse ja pliireostus on kontsentreeritud sihtmärkide ümbrusesse [79]. Käsitulirelvadega lastes on korraldus korjata pärast laskmist padrunikestad kokku, mis vähendab vasereostust keskkonda.

Plii satub kuulipüüdjasse, kui kuul põrkab kokku kas märklaua või kuulipüüdja endaga ning kuul puruneb. Kaitseväge keskpölügooni eriplaneeringu keskkonnamõju hindamise aruandest selgub, et plii levikut pinnases soodustab liivane pinnaseprofiil nagu näiteks on Männiku lasketiiril.

Ohtlike ainete lubatud sisaldus pinnases on keskkonnaministri määrusega nr 26 järgmine – plii sihtarvuks on 50 mg/kg, elumaal on piiriks 300 mg/kg ja tööstusmaal 600 mg/kg [80]. Plii sisaldus pinnases oli aastatel 2018. ja 2019. vastavalt 2827 mg/kg ja 7936 mg/kg [77]. Tegemist on minimaalselt 4,7-kordse tööstusmaa piirmäära ületamisega, mistõttu oli vajalik teostada edasisi pinnaseireid, et selgitada välja, kas reostus levib edasi ka väljaspool lasketiiru.

12.05.2020 võeti kokku 6 pinnaseproovi alumisest kuulipüüdja vallist [77]. 19.06.2020 võeti kokku võrdselt 10 keskmistatud pinnaseproovi nii alumisest kui ülemisest kuulipüüdja vallist. Proovid sõeluti 4 erinevasse fraktsiooni - >4 mm, 2 - 4 mm, 1 - 2 mm ning <1 mm. Suurimast fraktsioonist plii sisaldust ei määratud, kuna see fraktsioon koosnes ainult puidu- ning kuulitükkidest. [77]

Sama uuringu käigus võeti ka veeproovid – 2 pinnaseveeproovi ning 8 põhjaveeproovi [77].

Tulemustest selgus, et kahes pinnaseproovis oli vastavalt näitudele ühes ületatud elamumaa jaoks sätestatud piirväärtus (317 mg/kg ja lubatud väärtus on 300 mg/kg) ja teises tööstusmaa piirväärtus (630 mg/kg ja lubatud väärtus on 600 mg/kg). Analüüsi tulemustest selgus, et fraktsiooni vahemikus 2-4 mm oli pliisisaldus ligi 5 korda kõrgem, kui fraktsioonis 1-2 mm. [77] Plii kõrgem sisaldus suuremas fraktsioonis on põhjustatud aspektist, et suurem osa pliiitükkidest jääb kokkupõrkel kuulipüüdjaga ülemisse kattesesse pidama.

Veeproovidest saab määrata keskkonnaohtlikust leostuskatsete abil. Suurenenud reostuse oht eksisteerib, kui leostuvus on suurem kui 0,5 mg/kg [77]. Katsetest selgus, et kuigi kahel korral ületas leostuvuse piirmäär lubatud, on tegemist kahe kuulipüüdja pealmise kihiga ning alumistest kihtides on leostuvuse väärtus kümnetes kordades väiksem. Samuti ei ületanud

pliisisaldus pinnases kehtestatud sihtarvu 50 mg/kg tagavalli ümber oleval alal. Plii leostuvus kuivaine kohta jäi alla kehtestatud piirmäära (0,5 mg/kg). Pliisisaldus pinnase- ja põhjavees vastas normidele ehk künnisarvu 10 µg/l ei ole ületatud ning põhjavesi pole reostunud. [77]

Uuringu tulemustest lähtuvalt saab öelda, et keskkonnaohuga Männiku lasketiirus tegemist ei ole. Regulaarselt tuleb vahetada kuulipüüdja täitematerjale, et plii kontsentratsioonid püsiks tööstusmaa piirväärtuste piires.

4. POTENTIAALSED LAHENDUSED EESTIS

4.1 Võimalikud lahendused laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmetele Eestis

Millised aga võiksid olla Eesti väljavaated antud teemale? Eestis tekib Kaitseväel iga-aastaselt ca 25 t laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmeid (hülsid, granaadi splindid/kestad, treeningmoonaga seonduv, laskemoona kastid, lahingmoon jms), mis ei ole jäätmekäitlejate jaoks sobilikud töötlemiseks erinevatel põhjustel [21]. Kord on põhjusteks militaarne kuju, teine kord materjali koostis ei allu olemasolevatele masinatele, transpordiga seonduvad komplikatsioonid jne. Päästeametil tekib lahingmoona jäätmeid suurusjärgus 10 t/a, mis on küll väiksem kogus kui Kaitseväel, aga ka ladustamispingu napib – Päästeametil on tegelikult laod täis laskemoona jäätmeid ja probleem kerkib esile iga-aastaselt [21].

Päästeametil on probleemseteks jäätmeteks veneaegsed lennukipommid/ -killud ja Kaitseväel on analoogsete parameetrite alusel treeninglennukipommid – mõlema juhtumi puhul on kahtlus, et kasutuselolevate purustite jõud ei käi üle töödeldavast materjalist [21]. Eelnevalt mainitule lisaks on Kaitseväes tekkivate jäätmete puhul tegemist segajäätmetega, mis tähendab, et jäätmed võivad sisaldada endas erinevaid materjale (puit, metall, erinevad plastikud jne) [21]. Probleemi paremaks lahenduseks saaks Kaitsevägi enne jäätmete edasisse töötlemisse suunamist panustada jäätmete eraldi sorteerimise läbi. Kaitseväel ei ole kindlat soosingut ühe või teise lahenduse kasuks, samas Päästeameti soovitus oleks võtta kasutusele põletusahi (Päästeamet, personaalne infovahetus, 12. mai, 2022). Põletusahju puhul sulatatakse kõik metalljäätmed erinevateks sulamiteks ja võimalikud lõhkeainete jääkkontsentratsioonid põleksid ära protsessi käigus kõrgetel temperatuuridel. Võimaliku lahendusena võiks kaaluda ka külmpurustamist just seetõttu, et maailmas kasutatav praktika näitab, et külmpurustamise väljundiks on peened/väikesed jäätmete osakesed, mis näitab, et selle protsessi tulemusel kaob jäätmete militaarne kuju. Väga madalate temperatuuride tõttu ei ole takistuseks ka materjalide füüsikalised omadused.

4.1.1 Ringmajanduskeskuse loomine

Eesti üheks võimaluseks oleks luua Ringmajanduskeskus, mis tegelekski probleemtoodetest tekkinud jäätmete käitlemisega. Probleemtoote puhul on tekkimist toodetega, mille jäätmed võivad põhjustada keskkonnaohtu, ohtu tervisele või keskkonna ülemäärast risustamist [81]. Töös käsitletud jäätmed kuuluvad probleemtoodete alla, sest neil puudub praeguseks edasine kindel käitlusviis ja selliste jäätmete puhul toimub keskkonna üleliigne risustamine. Ringmajanduskeskuse loomine aitaks kaasa ringmajanduse huvide elluviimisele ja jäätmete üldkoguse vähenemisele. Keskuse puhul tuleks ka arvestada, et samade seadmetega saaks käitleda lisaks kahele väljatoodud jäätmekategooriale ka muid probleemseid jäätmeid.

Kaitseväl on lähitulevikus plaanis hakata kontrollima ohutust oma laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmetel kohapeal. Edasise ühe võimalusena võiks need panna kinnistesse konteineritesse ja suunata edasi ringmajanduskeskusse. Tulemusena saadakse kätte erinevast materjalist jäätmed, mis hõlbustaks edasist käitlust. Edasi saab laskemoona kasutamisest järgi jäänud jäätmed suunata purustisse, kus need deformeeritakse ning kaob spetsiifiline militaarne kuju jäätmetel. Sõltuvalt purusti valikust väljuksid masinast erinevad metallisegude fraktsioonid, mille saaks suunata tagasi ringlusse teisese toorainena. Väljatuleva erinevate metallide segu saaks edasi anda metallikäitlejatele, kes vastavalt soovile või vajadusele väärtuslikumad metallid välja sorteeriks ja ülejäänud jäätmed ekspordiks. Veelgi parem oleks kui leiduks ettevõtte, kes on nõus tootma purustist läbikäinud metalli jäätmetest uusi tooteid.

4.1.2 Ettevõtte terviklahendus

Käesoleva töö raames on võetud sisend ka ettevõtte X poolt, kellel on välja pakkuda terviklahendus laskemoona käitlemise osas. Üliõpilane palus ühel ettevõttel tuua välja oma seisukoht Eestis oleva laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete osas ning milline võiks olla eraettevõtte lähenemine probleemile. Järgnevas alapeatükis on välja toodud ettevõtte seisukohad ja sealjuures tähelepanuväärivad aspektid.

Ettevõtte esindaja sõnul jõudis ametlik informatsioon nendeni kaks aastat tagasi, kui Riigi Kaitseinvesteeringute Keskus võttis nendega ühendust ja uuris, kas neil oleks võimalik leida

lahendus laskemoonast tekkinud jäätmeprobleemile (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Teadaoleva informatsiooni kohaselt seisneb probleem laskemoona kasutamisest tekkinud peaaesjalikult metall(sulamite) jäätmete käitlemise võimalikkuse puudumises nii vajaliku tehnoloogia kui ka metallikäitlejate tahtmise puudumise tõttu. Tahtmise puudumine seisneb aspektis, et käitlejad ei ole nõus vastu võtma jäätmeid, mille kuju viitab militaarsele päritolule. Jäätmeseaduse § 13 järgi on jäätmekäitlus jäätmete kogumine, vedamine, taaskasutamine, sealhulgas sortimine, ja kõrvaldamine, sealhulgas vahendamine või edasimüümine [82]. Käitleja ehk jäätmekäitleja all mõeldakse konkreetset probleemi silmas pidades isikut, kes tegeleks laskemoona kasutamisest tekkinud metallijäätmega. Esmalt on vaja ettevõttel registreerida end jäätmekäitlejana, sest jäätmeseaduse § 98⁷ ütleb, et jäätmekäitleja peab oma tegevuse registreerima Keskkonnaametis juhul kui tegevuseks on jäätmevedu majandus- või kutsetegevuses, vahendajaks olemine jäätmete kõrvaldamisel või taaskasutamisel kellegi teise nimel või on tegevuseks jäätmete edasimüük [82]. Lisaks on vaja taotleda jäätmeluba, mis on antud hetkel vajalik, et teostada metallijäätmete taaskasutamiseks ja taaskasutamisele eelnevaid toiminguid [82]. Lisaks puudub käitlejatel endil võimalus metallijäätmel ohutuks tunnistada. Kui edasisest käitlemiseks suunatud ekspordi saadetest leitakse militaarsele päritolule viitavate tunnustega jääde, saadetakse kogu saadetus tagasi ja kulud peab katma eksportija. Olgu öeldud, et kuigi laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete hulgas leidub erinevaid materjale (metall, puit, plastik jms), siis ettevõtte esindaja sõnul keskenduksid nemad üksnes metalli sisaldavatele jäätmetele (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Ettevõtte esindaja sõnul on Eesti koguseid arvestades mõistlik ettevalmistada laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmeid käsitsi tööjõudu kasutades. Esindaja sõnul oli paar aastat tagasi Soomes vastav purusti olemas, aga sama tehnoloogia kasutamine osutuks Eestile väga kalliks investeeringuks ja esialgu sellest mõttest loobuti (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023).

Ettevõtte esindaja sõnul on neil plaanis kasutada kolme purustamiseks vajalikku tehnoloogiat – plasmalõikus, laserlõikus ja gaasilõikus. Erinevate kaalutluste ja arvutuste põhjal on kõige kulutõhusam lahendus leitud, aga reaalsete katseteni pole veel jõutud. Optimaalseimaks lahenduseks on kombineerida eelnevalt mainitud kolme lõikustehnoloogiat, sest erinevatele jäätmetele tuleks läheneda erinevalt materjalist sõltuvalt. Käesolevas töös on ühe lahendusena välja toodud ka metallisulatus. Ettevõtte esindaja sõnul on see idee arutamisel olnud, ent materjalist sõltuvalt tuleks mõningate jäätmete puhul viia temperatuur väga kõrgele, mis teeks ka käitluskulud suureks. Samuti pole võimalik hinnata täpselt tekkiva metallisulami kvaliteeti, kuna metallijäätmete materjal on juhuslik.

Ettevõtte esindaja sõnul on terviklahendus läbi mõeldud ja võiks välja näha järgmine. Ettevõtte osutaks käitlusteenust riiklikul tasandil ehk teenusevõtjad oleksid Kaitsevägi ja Päästeamet (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Teenus seisneks jäätmete tekkekohas jäätmete sorteerimises, jäätmete transpordis, hilisemalt jäätmete käitlemises ning ladustamises enne lõplikult jäätmete üleandmist. Kes oleks eelkaideldud metallijäätmetest huvitatud jäi veel lahtiseks. Protsess jäätmete sorteerimisest kuni jäätmete lõpliku üleandamiseni oleks ettevõtte kontrolli all, sest nii on võimalik omada täielikku ülevaadet laskemoona jäätmatega seotud toimingute kohta (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Samas on ka Kaitseväl vastav pädevus, et laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmel ohutuks tunnistada, seega tuleks leida kompromiss, mis sobiks mõlemale osapoolle. Käitlemiseks sobilikud jäätmel on ainult eelnevalt lõhatud/kasutatud laskemoona jäätmel – üle tähtaja möödunud laskemoona selliste töömeetoditega käidelda ei saa (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Ettevõtte saaks pakkuda mobiilset käitluseelset teenust, mis tähendaks seda, et ettevõtte sõidab ise jäätmel juurde kohale Eesti piires ja ohustab jäätmel tekkekohas. Töötajateks on ainult vastava kutsekvalifikatsiooniga lahingumoonaeksperdid (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Kohapeal kontrollitakse jäätmel üle, eraldatakse juba ohutuks tunnistatud jäätmel ülejäänud jäätmel hulgast ning ohutud jäätmel omakorda kas suletakse konteineritesse, kui on tegemist suurema jäätmekogusega, või võetakse ettevõtte poolt kaasa (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Jäätmeregistreering annab loa jäätmekäitlejale vedada riigisiselt jäätmel. Ettevõtte enda territooriumil toimuks ohutuks tunnistatud jäätmel purustamine, mis aitaks vabaneda militaarsete päritolule viitavast jäätmekujust. Kuna reaalses tingimustes katseid pole veel läbi viidud pole selge, kas piisab metallijäätmel ühekordsest lõikusest erinevate tehnoloogiate abil või tuleks materjale mitu korda käidelda (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023).

Laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmel eelkäitlust tuleks teostada regulaarselt. Ettevõtte esindaja hinnangul oleksid nad võimelised kõik praeguseks kogunenud jäätmel ära eelkäidelda u poole aastaga (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Hinnanguliselt võiks ligikaudu paari kuud tagant või kvartalis korra teostada jäätmekäitlust, sest nõnda saab vältida jäätmel kuhjumist nende tekkekohas. Käitlusele eelnevalt tuleks jäätmel sorteerida materjali järgi, mis võimaldaks tõhustada jäätmekäitlusprotsessi. Eelmainitud silmas pidades võiks ettevõtte esindaja sõnul kaaluda ka tuulikulabade lõikamist. Loetletud tehnoloogiatega on teoreetiliselt võimalik tükeldada ka teisi probleemseid tooteid, samas eraettevõtte seisukohast hakkab rolli mängima kasumimarginaal ning üleüldine finantsiline kulu. Tuues näiteks tuulikulabad ja laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmel,

materjalid varieeruvad ja on väga erinevad, mistõttu pole sageli väga otstarbekas väiksel ettevõttel sellist teenust osutada (Ettevõtte X, personaalne infovahetus, 15. märts, 2023). Kui aga üheks osapooleks oleks riik, kes finantsiliselt sellist lahendust toetab, oleks võimalik teostada ka erinevate materjalide ja omadustega probleemtoodete universaalset purustamist.

Aastal 2020 Kaitseväe toetuse väejuhatuse koostöös ettevõttega Y viisid läbi katsetuse, mille eesmärgiks oli katsetada utiliseerimisahju ning leida lubatav makismaalne käideldav laskemoona kogus. Kokku viidi läbi 7 katset, kus põletati lõhkeaineid/padruneid mõõtevahemikus 7,62 mm – 30 mm. Katsetel 1-6 ei tuvastatud pärast põletamist ühtegi lõhkemoonajääki jäätmel. Katsetel nr 7 koormati ahi üle tahtlikult nii, et katse käigus toimus detonatsioon – nõnda leiti maksimaalne võimalik põletatav kogus.

Katse tulemustest selgus, et suurim võimalik sobilik kaliiber on mitmeotstarbeline 12.7mm. Teadaolevalt käsituli relvades kasutatavate padrunite kasutamisest tekkinud jäätmega käitlemisel probleeme ei teki, seega suurekaliibrilistele ja soomuslähivõitle laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmetele tuleb lahendust edasi otsida.

4.2 Tuulikulabade jäätmete ümbertöötlemine

4.2.1 Uued materjalitehnoloogiad komposiitmaterjalidele

Ühe ennetava meetmena saab välja tuua edusammud komposiitmaterjalide arenguvaldkonnas. Võttes kasutusele uusi ja innovaatilisi lahendusi komposiitmaterjalide tootmises on võimalik luua ka selliseid komposiitmaterjale, mis pärast oma eluea lõppu on lihtsamini ümbertöödeldavad. Võttes Eesti tuuleenergia valdkonnas kasutusele uued komposiitmaterjalid saame vähendada käitlusprobleeme tulevikus.

Näiteks „CIDETEC Surface Engineering“ on toonud turule epoksiidvaigu, mida on võimalik hiljem termomehaaniliselt ringi töödelda nii, et ühe väljundina on võimalik tagasi saada algne materjal [83]. Asja tuumaks on epoksiidvaigud ning komposiitmaterjalid, mis saadakse dünaamiliste tahenejate abil. Mõte seisneb aspektis, et traditsiooniliste polümeeride kõrval tekitatakse polümeeride ahelas tagasipööratavaid sidemeid, mis töötavad aromaatses disulfiidi vahetusreaktsioonil [83]. Mehaanilise töötlemise tulemusena on võimalik jahvatada kasutatud komposiitmaterjal helvesteks või pelletiteks, mille üleskuumutamise ja pinge avaldamise tulemusena saab protsessist kätte tugevdatud lühikesed komposiitkiud. Keemilise käitluse

abil, kasutades 2-merkptoetanooli ja dimetüülformamiidi [83] on võimalik vaik lahustada täielikult. Tulemiks on originaalmaterjali väärilised kiud. Sama tehnoloogia poolt on lubatud samuti komposiitkiudude parandamine, kui kahjustunud kohta töödelda kuumuse ja pinge avaldamisega. Selline aspekt annab võimaluse taastada materjali algne olek ilma algparameetreid muutmata. Keskmise tuulegeneraatori eluiga jääb vahemikku 20-25 a oma elueal saadava suure koormuse tõttu, mis ühtlasi aja jooksul kahjustab tuulikulabasisid [84]. Kui tuulikulabad oleks tehtud eelnevalt kirjeldatud tehnoloogial põhinevast vaigust, oleks ehk võimalik suurendada tuulikulabade eluiga neid teatud aja tagant parandades. Samuti väheneks tuulikulabadest tekkiv jäätmekogus.

Teise uudse tehnoloogia lahendusena võib välja tuua juba eelnevas peatükis mainitud firma „Siemens Gamesa“, kes oma tööstusliku lahendusena pakub turule 100% ümbertöödeldavaid tuulegeneraatoreid. „Siemens Gamesa“ kasutab ümbertöötlemisel keemilist töötlemist, kus protsess näeb välja järgmine. Esiteks asetatakse tiivikud lahjasse kuumutatud lahusesse, mis eraldab epoksiidvaigu ülejäänud osade küljest nagu klaaskiud, plastikud ja metalloosid. Üksteisest eraldatud osad loputatakse ning kuivatatakse. Seejärel on töödeldud materjalid valmis ringlusse võtuks. [85]

4.2.2 Komposiitmaterjali ringlussevõtt

Väga laialdaselt on maailmas praegu kasutusel meetod, kus ümberkäideldavad komposiidid suunatakse tsemendi tootmisse. Taolise protsessi kasuks räägib suur käitlusvõime, mis on tingitud klinkeri tootmisel vajaminevatest suurtest ahjustest. [86] Erinevalt mõnest teisest lahendusest lähevad selles protsessis kõik materjalid ringlusse – polümeeridest saadakse kilnis kätte pürolüüsil eralduv õli või kasutatakse seda soojusenergiana (epoksiidis olev energia on 70 MJ/kg) ning taastatud kiudusid saab kasutada tsemendi tootmises. Taaskasutamisele lisaks on klaaskiududega tugevdatud tsement paremate ehituslike parameetritega kui traditsiooniline tsement – klaaskiududega tugevdatud tsement võib olla ligikaudu 2-4 korda suurema paindetugevusega kui traditsiooniline. [87] Lisaks parematele ehitusparameetrite esinemisele on väiksem ka süsiniku jalajälg tsemendi tootmisel. Kuna väiksem kogus klaaskiududega tugevdatud tsementi on tugevuse poolest võrdväärne suurema koguse traditsioonilise tsemendiga, siis sama koguse tootmisel eraldub õhku kuni 16% vähem CO₂. [86] Klinkeri tootmises polümeeride kasutamisel tuleb tähelepanu pöörata saasteainetele ning eralduvatele tahketele osadele [86]. Tootmisektorile lisaks on võimalik

vähendada süsiniku jalajälge ka transpordisektoris terasetööstuses. Klaaskiududega tugevdatud polümeerid (GFRP) kaaluvad märkimisväärselt vähem kui teras, mis tähendab, et GFRP-st produktide transportimisel saab ühe veosega transportida suurema koguse materjale vähendades seeläbi transportimise kulusid [88]. Praktikast lähtub veel, et ehitiste puhul tuleb ajaga tekkinud kahjustustest tulenevalt hakata parandustöid teostama 10-20 aasta pärast [88]. Klaaskiududega tugevdatud betoonil on oluline eelis terasega tugevdatud betooni ees – nimelt klaaskiududega tugevdatud betoon ei roosteta ja vajab seetõttu vähem parandustöid tulevikus [88]. Võimalus on saada läbi jahvatamise kätte kiududerikas pulber ja polümeeri põhimaatriksipulber, mida on kumbagi võimalik edaspidi kasutada ka täiteainena või tugevdajatena. Protsessist kättesaadavad materjalid ei ole parameetrite poolest aga võrreldavad originaaltoormega ja selle protsessiga kaasneb 40% jäätmete teke [86].

Pürolüüsi abil on võimalik toota pürolüüsõli ja täiteaineid, mida on võimalik kasutada täitmiseks ja liimainena. Pürolüüsi kahjuks räägivad aga kõrged kasutuskulud ja suur finantsiline investering. Eestis oleks mõeldav luua tuulegeneraatorite osas leping Eesti Energiaga, kellel on võimekus olemas teostada pürolüüsi. [86]

Elektrilise impulsi abil on võimalik separeerida üksteisest väärtuslikud kiud ja maatriksi osad. Tulemusena saadakse kätte lühikesed kiud, kuid protsessi energiavajadus on väga kõrge. Kõrge energiavajaduse saaks ohjas hoida, kui pidevalt käiksid protsessid läbi suured mahud – Eesti mastaape silmas pidades ei ole see mõistlik lahendus.

Palju optimaalsemat lahendust Eesti jaoks pakub firma „Composite Recycling“. Suures pildis on tegemist traditsioonilise pürolüüsiga, aga lisaks toimub ka käitlusjärgne töötlemine materjalile, et tõsta esile just vajalikud parameetrid. Pürolüüsiks vajalikud reaktorid on transportitavad merekonteineri suurused üksused – see välistaks suurte tiivikute transpordi probleemi. [89]

4.2.3 Taaskasutamine

Taaskasutamine tuulikulabade puhul tähendab, et tuulikulabad leiaksid kasutust muudes valdkondades kui algselt tuulegeneraatorites. Poola firma „Anmet“ näitel oleks võimalik ümber hinnata tuulikulabade korduskasutuse võimalikkus. „Anmet“ idee poolest pakuvad tuulikulabad võimalusi leida kasutust muudes nii arhitektuuri kui ka ehituslikes perspektiivides erinevate toodetena. Tükeldatud tuulikulabadest on võimalik luua lihtsaid mööbliesemeid või kui läheneda suuremas mastaabis võib näiteks tuua jalakäijatele mõeldud silla, mille

ehitamisel on kasutatud tuulikulaba. Sillas täidab tuulikulaba oma ehituslike omaduste tõttu silla kandetala rolli. Analoogselt lähenedes probleemile saaks tuulikulabasid kasutada ehituses mujalgi tugitaladena, kus muidu on kasutusel puit- või metallkandetald. [90] Arvestades Eesti riigi mõõtmeid võiks tuulikulabade kasutamine konstruktsioonelementidena olla üheks väljundiks.

4.2.4 Jäätmete eksportimine

Ühe väljundina võib kaaluda veel tuulikulabade väljavedamist Eestist. Põhifookuses on tuulikulabade suurusest ja kaalust sõltuvalt transport. Tuulikulabade (ja muude konstruktsioonelementide) puhul on samaaegselt tegemist nii raskeveosega kui ka ülegabariidilise veosega. Oma mõõtmete tõttu valitakse tihti kõige kiirem marsruut tiivikute transpordiks. [91] Sellegipoolest võtab teekonna planeerimine aega ning rahalisi kulutusi, sest sageli pole võimalik tootmistehaseid püsti panna tuulikute püstitamisalade vahetus läheduses. Lisaks füüsilistest parameetritest põhjustatud raskendustele lisanduvad ka seadustest tulenevad nõuded. Riikidevaheliseks jäätmeveoks on vajalikud saatekirjad ja eelteavitused, et klaaskiududega tugevdatud plastjäätmeid vedada. [92] Eestis küll ei ole tuulikulabade jäätmetele enda jäätmekoodi, aga kõige tõenäolisemalt oleks hetkel kasutuselolevatest jäätmekoodidest sobilikum jäätmekood 17 09 04. Jäätmekood 17 09 04 tähistab ehituse ning lammutuse käigus tekkinud jäätmeid. Riigi jäätmekava aruande eelnõu kohaselt tekkis aastal 2019 hinnanguliselt 1,2 mln tonni ehitusjäätmeid [93]. Aastaks 2020 oli antud Euroopa Komisjoni poolt korraldus, mille kohaselt peab ehitus- ja lammutusjäätmetest 70% minema taaskasutusse [93]. Eestil on sihtarvud täidetud, aga arvestada tuleb asjaoluga, et selle tingib suuresti võimaluse kasutada ehitus- ja lammutusjäätmeid tagasitäitena, mis on tuulikulabade jäätmete puhul välistatud. Põhjus, miks aruandes pole käsitletud tuulikulabade jäätmeid, sest neid ei ole veel tekkinud.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös räägitakse lähemalt Eestis leiduvatest probleemtoodetest keskendudes kahele spetsiifilisele kategooriale – tuulikulabade jäätmetele ning laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmetele. Laskemoona kasutamisest tekkinud jäägid on aktuaalne murekoht, sest jäätmeid pole enam võimalik pikalt ladustada tekkekohas ning Päästeameti laod on end ammendanud. Põhiline probleem seisneb asjaolus, et militaarsele päritolule viitav kuju takistab jäätmeid üle andmast käitlejatele. Tuulikulabade jäätmete probleem käitlemisel tuleneb aspektist, et komposiitmaterjalide ümbertöötlemiseks on vaja kasutada spetsiifilisi meetodeid, mis lubaks hiljem teisest tooret turule suunata. Tuulikulabade jäätmete puhul on tegemist lähitulevikus tekkiva probleemiga, sest tuulikute elueaks loetakse 20-25 a.

Tööeesmärgiks on uurida, kas on olemas tehnoloogia, mis lubab käidelda nii laskemoonast tekkinud jäätmeid kui ka tuulikulabade jäätmeid. Teise eesmärgina on välja uurida, millised meetodid ja tehnoloogiad on eelmainitud jäätmete käitlemiseks kasutusel praegu.

Jäätmete käitlemisemeetodite kohta saadud informatsioon pärineb avalikest ja kinnistest dokumentidest ning töö käigus tehti ka intervjuu ettevõttega, kes oleks valmis käitlema laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmeid.

Uuritud materjalidest järeldus, et tuulikulabade ja laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmete käitlemiseks leidub mitmeid lahendusi. Laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmeid saaks ümber töödelda purusti abil, misjärel saaks need anda edasi metallikäitlejatele, kui eelnevalt on kaotatud spetsiifiline militaarkuju. Teise võimalusena saaks luua Ringmajanduskeskuse, mis on võimeline käitlema erinevaid probleemtooteid, sh laskemoona kasutamisest tekkinud jäätmeid. Riigi kaasfinantseerimisel saaks samamoodi kasutada purustit, mis võimaldaks purustada ka tuulikulabade jäätmeid. Tuulikulabasad saaks eellõikamise abil eksportida teistesse Euroopa riikidesse, kellel on võimekus neid ümber töödelda. Veel on võimalik tuulikulabasad ümbertööteldes suunata taaskasutusse, nt tsemendi tootmisse.

SUMMARY

In this thesis, we discuss the problematic products found in Estonia, focusing on two specific categories - wastes from wind blades and from the use of ammunition. Residues from the use of ammunition are a timely concern, because it is no longer possible to store waste for a long time at the place of origin, and the Rescue Board's warehouses have exhausted themselves. The main problem lies in the fact that the shape indicating military origin prevents waste from being handed over to handlers. The problem of waste handling wind blades comes from the aspect that it is necessary to use specific methods for the reprocessing of composite materials, which would later allow the secondary raw material to be diverted to the market. In the case of wind turbine blade waste, it is a problem that will arise in the near future, because the lifetime of wind turbines is considered to be 20-25 years.

The aim of the work is to investigate whether there is a technology that allows the handling of waste from ammunition as well as waste from wind blades. Another goal is to find out which methods and technologies are currently in use for handling the aforementioned waste.

The information obtained about waste management methods comes from public and closed documents, and during the work an interview was also conducted with a company that would be willing to handle waste from the use of ammunition.

The conclusion from the studied materials is that there are several solutions for handling the waste generated from the use of wind blades and ammunition. The waste from the use of ammunition could be reprocessed using a shredder, after which it could be passed on to metal handlers, once the specific military shape had been removed. Alternatively, a Circular Economy Center could be created, which is capable of handling various problem products, including waste from the use of ammunition. In the case of state co-financing, a shredder could be used in the same way, which would also enable the shredding of wind blade waste. Wind blades could be exported by pre-cutting to other European countries that have the capacity to process them. It is also possible to reprocess wind turbines and direct them to recycling, e.g. cement production.

VIITED

- [1] Global Climate Change: Vital Signs of the Planet: Global Warming vs. Climate Change: <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/> (01.08.2022)
- [2] University Corporation for Atmospheric Research: The Greenhouse Effect: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/greenhouse-effect> (23.08.2022)
- [3] United States Environmental Protection Agency (EPA): Renewable Fuel Standard Program <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program> (23.08.2022)
- [4] European Commission: Renewable energy directive: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (23.08.2022)
- [5] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: Advantages and Challenges of Wind Energy: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy> (23.08.2022)
- [6] Tuuleenergia Assotsiatsioon: Riik avalikustas Eesti-Läti meretuulepargi ühisprojekti asukoha: <https://tuuleenergia.ee/riik-avalikustas-eesti-lati-meretuulepargi-uhisprojekti-asukoha/> (07.11.2022)
- [7] Martin, C., 2020. Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills. Bloomberg : <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills?leadSource=verify%20wall> (25.08.2022)
- [8] EUR-Lex: EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2008/98/EÜ: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=celex:32008L0098> (25.08.2022)
- [9] United States Environmental Protection Agency (EPA): Energetic Hazardous Wastes: <https://www.epa.gov/hwpermitting/energetic-hazardous-wastes#obod> (01.09.2022)
- [10] Liu, W.G., 2014, Introduction to Energetic Materials, Thesis chapter: https://thesis.library.caltech.edu/8390/13/Chapter%201_revise1.pdf (10.09.2022)
- [11] Talvari A., Ohtlikud Ained, Sisekaitseakadeemia, 2006

- [12] Carton, G., Jagusiewicz, A., 2009. Historic Disposal of Munitions in U.S. and European Coastal Waters, How Historic Information Can be Used in Characterizing and Managing Risk. Marine Technology Society Journal 43
https://www.researchgate.net/publication/233654291_Historic_Disposal_of_Munitions_in_US_and_European_Coastal_Waters_How_Historic_Information_Can_be_Used_in_Characterizing_and_Managing_Risk (27.08.2022)
- [13] HELCOM: Sea-Dumped Chemical Munitions: <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/hazardous-substances/sea-dumped-chemical-munitions/> (14.05.2023)
- [14] Đurić, S., Nedic, B., Baralić, J., Miljković, A. 2019. Pyrotechnic Safety in the Process of Demilitarization of Explosive Ordnance from the Aspect of Application of New Technologies. 13th International Quality Conference: https://www.researchgate.net/figure/Contamination-during-the-open-detonation-The-investigation-of-the-possibility-of-cutting_fig1_339457990 (29.08.2022)
- [15] Ross, D. 2017. Why the Military is Still Allowed to Use Open Burning and Detonation to Destroy Hazardous Waste Explosives in the U.S. Newsweek Magazine: <https://www.newsweek.com/2017/06/16/open-burning-military-toxic-hazardous-waste-explosives-detonation-environment-609619.html> (01.09.2022)
- [16] Finnish Ministry of Defence. Protection of Heavy Weapon Ranges: Technical and Practical Solutions, executive summary (2019): [https://www.defmin.fi/files/4739/EPHW_FINAL_\(003\).pdf](https://www.defmin.fi/files/4739/EPHW_FINAL_(003).pdf) (28.08.2022)
- [17] Hamad, R., Balzter, H., Kolo, K. 2019. Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq. Environmental Science and Pollution Research : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6331749/> (04.09.2022)
- [18] OSCE. 2008. OSCE Handbook of Best Practices on Conventional Ammunition: <https://www.osce.org/files/f/documents/5/5/33371.pdf> (03.09.2022)
- [19] United States Environmental Protection Agency (EPA). 2019. Alternative Treatment Technologies to Open Burning and Open Detonation of Energetic Hazardous Wastes, final report.: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-12/documents/final_obod_alttechreport_for_publication_dec2019_508_v2.pdf (04.09.2022)

- [20] United States Environmental Protection Agency (EPA). 2023. Requirements for Miscellaneous Hazardous Waste Units: <https://www.epa.gov/hwpermitting/requirements-miscellaneous-hazardous-waste-units> (05.09.2022)
- [21] Buht, H. Kokkuvõtte tegevustest. Tallinn. 2023 (02.04.2023)
- [22] Dave, P. 2022. Understanding Bulletsizes | Bullet Sizes. OpticsPlanet: <https://www.opticsplanet.com/howto/how-to-understanding-calibers-bullet-sizes.html> (13.09.2022)
- [23] Nordic Ammunition Company (NAMMO): Demilitarization: <https://www.nammo.com/nammo-com-front-page/services/demil/>
- [24] Tuuleenergia Assotsiatsioon. Wind energy in Estonia. 2023: <https://tuuleenergia.ee/wind-energy-in-estonia/?lang=en> (17.09.2022)
- [25] Eesti Taastuenergia Koda. Renewable energy in Estonia. Tallinn: <http://www.taastuenergeetika.ee/en/renewable-energy-estonia/#1482064822137-68deb403-141b> (17.09.2022)
- [26] List of wind energy developments in Estonia. 2012. Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon: <https://tuuleenergia.ee/wp-content/uploads/Märts-2012-Tuuleenergia-arendamisel-Eesti.xls> (18.09.2022)
- [27] Šipilov, V. 2021. Miks venib meretuuleparkide rajamine? TGSBaltic: <https://www.tgsbaltic.com/ee/artiklid/miks-venib-meretuuleparkide-rajamine/> (22.09.2022)
- [28] Petrone, J. 2021. Estonia's hydrogen energy sector scales up to meet future need. E-Estonia: <https://e-estonia.com/estonias-hydrogen-energy-sector-scales-up-to-meet-future-need/> (20.09.2022)
- [29] Nõlvak, L. 2017. Hiidlased tuulepargi vastu: "Miks me peame Hiiumaaga riskima?". Õhtuleht: <https://www.oh tuleht.ee/820721/hiidlased-tuulepargi-vastu-miks-me-peame-hiiumaaga-riskima> (22.09.2022)
- [30] Aljareh, T. The A to Z of Constructing a Wind Turbine. Tacticalprojectmanager: <https://www.tacticalprojectmanager.com/wind-turbine-construction> (22.09.2022)

- [31] Velling, S., Vaasma, T. Kuidas tuuleturbiin töötab?: https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/27902/kuidas_tuuleturbiin_ttab.html (24.09.2022)
- [32] MatMatch: Materials Used in Wind Turbines: <https://matmatch.com/learn/material/materials-used-in-wind-turbines> (20.09.2022)
- [33] Vetrotex: Wind Energy Fiberglass Applications: <https://www.vetrotextiles.com/applications/wind-energy> (25.09.2022)
- [34] Iberdrola: WIND TURBINES What is a wind turbine and how does it work?: <https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-turbines-blades> (26.09.2022)
- [35] Gignac, J. 2020. Wind Turbine Blades Don't Have to End Up in Landfills. The Equation: Union of Concerned Scientists: <https://blog.ucsusa.org/james-gignac/wind-turbine-blades-recycling/> (26.09.2022)
- [36] Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Heerden, D-J., Kuiper, P. 2012. Chemical Engineering and Processing 51: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270111002029> (27.09.2022)
- [37] Iberdrola: Wind blade recycling, a new challenge for wind energy: <https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-blade-recycling> (27.09.2022)
- [38] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2019. "solvolysis". Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/solvolysis> (28.09.2022)
- [39] Mattsson, C., André, A., Juntikka, M., Tränkle, T and Sott, R. 2020. Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 942: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/942/1/012013/pdf> (28.09.2022)
- [40] Heng, H., Meng, F. McKechnie, J. 2021. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. Waste Management 133: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X21004104> (01.10.2022) (05.10.2022)
- [41] Kalkanis, K., Psomopoulos, C.S., Kaminaris, S., Ioannidis, G., Pachos, P. 2019. Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods. Energy Procedia 157: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218312542> (03.10.2022)

[42] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: How a Wind Turbine Works - Text Version: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version> (05.10.2022)

[43] Collins, B. 2021. Wind Turbine Blades Get Recycled into Auto Parts and Sports Gear. Bloomberg: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-20/wind-turbine-blades-get-re-spun-as-auto-parts-sports-gear-bnef?leadSource=uverify%20wall> (05.10.2022)

[44] Press Release. 2019. Global Fiberglass Solutions Becomes the First US-Based Company to Commercially Recycle Wind Turbine Blades into Viable Products. Markets Insider : <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/global-fiberglass-solutions-becomes-the-first-us-based-company-to-commercially-recycle-wind-turbine-blades-into-viable-products-1027906087> (07.10.2022)

[45] Global Fiberglass Incorporation: <https://www.globalfiberglassinc.com/post/wind-energy-aerospace-and-maritime-fiberglass-waste-is-no-longer-put-to-waste-thanks-to-gfs-1> (06.10.2022)

[46] Reciclalia: <https://reciclaliacomposite.com/products/> (06.10.2022)

[47] Press Release. 2022. Revolutionary RecyclableBlades: Siemens Gamesa technology goes full-circle at RWE's Kaskasi offshore wind power project. Siemens Gamesa: <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/newsroom/2022/08/siemens-gamesa-press-release-recycle-wind-blade-offshore-kaskasi-germany.pdf> (11.10.2022)

[48] Press Release. 2021. New coalition of industry and academia to commercialise solution for full recyclability of wind turbine blades. Vestas: <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/new-coalition-of-industry-and-academia-to-commercialise-c3347473#!NewsView> (13.10.2022)

[49] New Shredding Technology Shreds Old Wind Turbine Blades. 2010. PollutionSolutionsOnline: <https://www.pollutionsolutions-online.com/news/waste-management/21/anlagenbau-umwelttechnik/new-shredding-technology-shreds-old-wind-turbine-blades/12521> (14.10.2022)

[50] Epoxy Resin Committee. 2015. Epoxy Resins In Wind Energy Applications Assessment Of Potential BPA Emissions: https://epoxy-europe.eu/wp-content/uploads/2015/07/epoxy_erc_bpa_whitepapers_wind-energy-2.pdf (19.10.2022)

- [62] Cooperman, A., Eberle, A., Lantz, E. 2021. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. Resources, Conservation and Recycling: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134492100046X> (25.10.2022)
- [63] Hale Trailer Brake and Wheel. 2022. Wind turbine blade sizes and transport. UtilityDive: <https://www.utilitydive.com/spons/wind-turbine-blade-sizes-and-transport-a-guide/623444/#:~:text=On%20average%20wind%20turbine%20blades,blades%20approaching%20200%20feet%20long> (25.10.2022)
- [64] TechniWaterjet: How Thick Can A Waterjet Cut?, J. Schlick, 10.10.2022: <https://www.techniwaterjet.com/how-thick-can-waterjet-cut/#:~:text=Cutting%20Thickness%20for%20Hard%20Materials&text=Waterjet%20cutter%20can%20make%20cuts,with%20a%20water%20jet%20cutter> (27.10.2022)
- [65] Schlick, J. 2022. How Thick Can a Waterjet Cut? TechniWaterjet: <https://www.tmcwaterjet.co.uk/news-blog/water-jet-cutting-advantages-and-disadvantages/> (28.10.2022)
- [66] PubChem. Dry Ice. National Library of Medicine: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Dry-Ice> (30.10.2022)
- [67] PubChem. Nitrogen. National Library of Medicine: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/947> (02.12.2022)
- [68] Dohmeyer Construction: Land EOD: <https://dohmeyer.com/land-eod/> (03.12.2022)
- [69] General Atomics: Demilitarization – Cryofracture: <https://www.ga.com/demilitarization-cryofracture> (06.12.2022)
- [70] Đurić, S., Nedic, B., Bajić, Z., Bogdanov, J., Živković, B. 2020. Overview, Analysis and Research of the Possibilities of Application of New Technologies in The Process of Demilitarization of the Explosive Ordnance. Scientific Technical Review https://www.researchgate.net/figure/Procedure-for-deletion-of-EO-by-cryofracture-49_fig5_342882452
- [71] Department of Defense. Autoclave Meltout of Cast Explosives. Las Vegas, Nevada. 1996: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA506422.pdf> (08.12.2022)

[72] United States Environmental Protection Agency (EPA): Fact Sheet – 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), 08.2021: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-10/documents/ffrrofactsheet_contaminants_tnt_9-15-17_508.pdf (11.12.2022)

[73] Maves. Kaitseväe harjutusväljade pinna- ja põhjavee seire 2022. aastal. Riigi Kaitseinvesteeringute Keskus. Tallinn. 2022 (27.03.2023)

[74] Riigiteataja: Ohtlike ainete põhjavee kvaliteedi piirväärtused: <https://www.riigiteataja.ee/akt/106092019031> (25.03.2023)

[75] Riigiteataja: Prioriteetsete ainete ja prioriteetsete ohtlike ainete nimekiri, prioriteetsete ainete, prioriteetsete ohtlike ainete ja teatavate muude saasteainete keskkonna kvaliteedi piirväärtused ning nende kohaldamise meetodid, vesikonnaspetsiifiliste saasteainete keskkonna kvaliteedi piirväärtused, ainete jälgimisnimekirjaga seotud tegevused: <https://www.riigiteataja.ee/akt/131122021003> (26.03.2023)

[76] Elias, K. 2021. Aidu põlekivikarjääri fjarde kimbutab liiga kõrge nikli sisaldus. Novaator: <https://novaator.err.ee/1608208651/aidu-polekivikarjaari-fjarde-kimbutab-liiga-korge-nikli-sisaldus> (16.12.2022)

[77] OÜ Inseneribüroo STEIGER. Männiku harjutusvälja ja 600 m lasketiiru pinnase uuring plii sisalduse määramiseks. Riigi Kaitseinvesteeringute Keskus. Tallinn. 2020. (27.03.2023)

[78] Eesti Entsüklopeedia: Liivik: <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/liivik2> (20.12.2022)

[79] Skepast ja Puhkim. Kaitseväe keskpõlügeni eriplaneeringu detailse lahenduse keskkonnamõju strateegiline hindamine, aruande eelnõu. Kaitseministeerium. Tallinn. 2020: https://www.kaitseministeerium.ee/sites/default/files/Planeeringud/kvkv_rep_ksha_2020-12-17.pdf (24.12.2022)

[80] Riigiteataja: Keskkonnaministri 28.06.2019 määrus nr 26 „Ohtlike ainete sisalduse piirväärtused pinnases“ LISA: <https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1040/7201/9006/Lisa.pdf> (03.01.2023)

[81] Keskkonnaministeerium: Ringmajandus: Tootjavastutus ja probleemtooted: <https://envir.ee/ringmajandus/ringmajandus/tootjavastutus-ja-probleemtooted> (10.01.2023)

[82] Riigiteataja: Jäätmeseadus: <https://www.riigiteataja.ee/akt/117032023035?leiaKehtiv> (25.03.2023)

- [83] Cidetec: 3R leading technology; Reprocessable, Repairable and Recyclable: materials with an endless lifespan: <https://www.cidetec.es/en/top-achievements/3r-leading-technology> (14.01.2023)
- [84] TWI Ltd. 2023. How Long Do Wind Turbines Last? Can Their Lifetime Be Extended?: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/how-long-do-wind-turbines-last#:~:text=However%2C%20the%20maintenance%20costs%20will,subjected%20to%20throughout%20their%20lives> (16.01.2023)
- [85] Siemens Gamesa Renewable Energy. 2021. Recyclable Blade, Taking responsibility. Blade by blade. Siemens Gamesa: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/sustainability/environment/siemens-gamesa-recyclableblade-infographic-en.pdf> (22.01.2023)
- [86] Wegman, T., Dierckx, A., Ramon, N. G., Schmid, M. 2020. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf> (25.01.2023)
- [87] Girard, J. 2012. Factors that Affect the Strength of GFRC Pieces. Concrete Countertops 12: <https://www.concretedecor.net/departments/concrete-countertops/success-with-concrete-countertops-factors-that-affect-the-strength-of-gfrc-pieces/#:~:text=On%20average%2C%20GFRC%20has%20two,a%20load%20of%20835%20pounds> (28.01.2023)
- [88] Kodous, K. 2021. GREEN REBAR - The Environmental Advantages of GFRP Reinforcement [over Steel]. LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/green-rebar-environmental-advantages-gfrp-over-steel-kerolos-kodous> (03.02.2023)
- [89] Composite Recycling: <https://composite-recycling.ch/our-solution/> (05.02.2023)
- [90] Mason, H. 2021. Anmet installs first recycled wind turbine blade-based pedestrian bridge. Compositeworld: <https://www.compositesworld.com/news/anmet-installs-first-recycled-wind-turbine-blade-based-pedestrian-bridge> (10.02.2023)
- [91] WorldWindtechnology. 2020. The trouble with transport: <https://www.windpower-international.com/features/featurethe-trouble-with-transport-7741736/> (15.02.2023)
- [92] Arabsolgar, D., Musumeci, A. 2021. FiberEUse: Large-Scale Demonstration of New Circular Economy Value Chains Based on the Reuse of End-of-Life Fiber-Reinforced

Composites. A Circular It Platform to Manage Innovative Design and Circular Entities. Proceedings. 65. 23 (20.02.2022)

[93] Skepast&Puhkim OÜ. Riigi jäätmekava 2022-2028 keskkonnamõju strateegiline hindamine (KSH), KSH aruande eelnõu. Keskkonnaministeerium. Tallinn 2023. (24.03.2023)

[94] Đurić, S., Nedic, B., Bajić, Z., Bogdanov, J., Živković, B. 2020. Overview, Analysis and Research of the Possibilities of Application of New Technologies in the Process of Demilitarization of the Explosive Ordnance. Scientific Technical Review: https://www.researchgate.net/figure/Procedure-for-deletion-of-EO-by-cryofracture-49_fig5_342882452