

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

Mahajäetud ja äsja taastatud freesturbaväljade õhukvaliteedi võrdlus peenosakeste näitel

Merilin Lõhmus

Juhendaja:
Prof. Kuno Kasak, PhD

Tartu 2026

Mahajäetud ja äsja taastatud freesturbaväljade õhukvaliteedi võrdlus peenosakeste näitel

Mahajäetud freesturbaväljad võivad olla olulised peenosakeste emissiooni allikad. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on võrrelda mahajäetud ja äsja taastatud freesturbaväljade õhukvaliteeti peenosakeste kontsentratsioonide põhjal. Töö sooritamiseks püstitati kaks hüpoteesi: 1) mahajäetud freesturbaväljadel on peenosakeste kontsentratsioon kõrgem kui äsja taastatud freesturbaväljal; 2) peenosakeste kontsentratsiooni ammendunud freesturbaväljadel mõjutavad ilmastikuolud ja ala taimestatus osakaal ning niiskustase. Uurimisaladeks olid Lavassaare mahajäetud freesturbaväli ning Ess-soo äsja taastatud freesturbaväli. Töös analüüsiti peenosakeste mõõtmistulemusi ning nende seoseid ilmastiku- ja keskkonnatingimustega. Tulemused näitasid, et suurimad peenosakeste kontsentratsioonid õhus esinevad kevadel ja suvel. Samuti ilmnes, et peenosakesed levivad enam kuivema ja hõredama taimestikuga alade suunas.

Märksõnad: mahajäetud freesturbaväljad, peenosakesed, õhukvaliteet, taastamine

CERCS: T270 Keskkonnatehnoloogia, keskkonnasaaste

Comparison of Air Quality at Abandoned and Recently Restored Peat Extraction Areas Using Fine Particulate Matter as an Indicator

Abandoned peat extraction areas can be significant sources of fine particulate matter emissions. The aim of this bachelor's thesis is to compare the air quality of abandoned and recently restored peat extraction area based on fine particulate matter concentrations. Two hypotheses were formulated for the study: 1) fine particulate matter concentrations are higher at abandoned areas than recently restored ones; and 2) fine particulate matter concentrations are influenced by weather conditions, vegetation cover, and moisture levels. The study was conducted at the Lavassaare abandoned peat extraction area and the recently restored Ess-soo peatland. The thesis analyzes fine particulate matter measurements and their relationships with meteorological and environmental conditions. The results showed that the highest fine particulate matter concentrations occur in spring and summer. It was also found that particulate matter tends to spread more toward drier areas with sparser vegetation.

Keywords: abandoned peat extraction area, fine particulate matter, air quality, peatland restoration

CERCS: T270 Environmental technology, environmental pollution

Sisukord

Lühendite loend	4
Sissejuhatus	5
1. TEOREETILINE TAUST	7
1.1 Peenosakesed	7
1.1.1 PM2.5.....	8
1.2 Eestis kehtivad normdokumendid.....	9
1.3 Peenosakeste seos kliimaga	10
1.4 Peenosakeste allikad	11
1.5 Tuuleerosiooni	12
1.6 Peenosakeste lendumine	14
1.7 Turbakaevandus	14
1.8 Turba kaevandamine	15
1.9 Mahajäetud freesturbaväljad	16
2.1 Uuringuala kirjeldus.....	18
2.2 Andmete kogumine ja analüüs.....	19
3. TULEMUSED	22
3.1 Peenosakeste kontsentratsiooni muutus ajas.....	22
4. ARUTELU	25
KOKKUVÕTE	28
Summary	29
Tänuavaldused	31
KASUTATUD KIRJANDUS	32

Lühendite loend

PM – peenosakesed, inglise keeles *particulate matter*

PM_{2.5} – osakesed, mille läbimõõt on 2,5 mikromeetrit või vähem

PM₁₀ – osakesed, mille läbimõõt on 10 mikromeetrit või vähem

PAH – polüaromaatsed süsivesinikud

AÕKS – Atmosfääriõhu Kaitse seaduse

µg/m³ - mikrogrammi kuupmeetri kohta

Sissejuhatus

Turba kaevandamine ja kasutamine on seotud mitmete keskkonna- ja tervisemõjudega, mis tulenevad nii tootmisprotsessist kui ka märgalade muutmisest (Tissari *et al.*, 2006). Turba tootmisel eraldub välisõhku erineva suurusega osakesi ehk turbatolmu, mis koosneb orgaanilisest ainest ning võib suurtes kontsentratsioonides põhjustada nii tervise- kui ka keskkonnaprobleeme (Keskkonnaamet, 2025; Tissari, 2006). Turvast kaevandatakse erinevate meetoditega ning see vajab edasist töötlemist (Eesti Turbaliit, külastatud 14.05.2026), kuid nende tegevustega kaasnevad olulised keskkonnamõjud (Keskkonnaamet, 2025).

Eriti problemaatiline on märgalade kuivendamine, mille tagajärjel kahjustatakse ökosüsteeme, soodustatakse kasvuhoonegaaside emissiooni ning vabastatakse atmosfääri turbasse tuhandete aastate jooksul talletunud süsinik (Eestimaa Looduse Fond, 2017). Lisaks sellele on kuivenduse tulemusel soode pindala Eestis viimase sajandi jooksul märkimisväärselt vähenenud ning alles on jäänud vaid 7–8% maismaast katvad soised alad (Leibak, 2021). Samal ajal leidub Eestis ligikaudu 9800 hektarit jääksood, mis toimivad märkimisväärselt kasvuhoonegaaside allikatena (Keskkonnaportaali, 2024), kuna nende looduslik taimestik on hävinud, veetase langenud ning alad on muutunud tuleohtlikuks (Karofeld, 2006). Looduslikud turbaalad seovad fotosünteesi käigus atmosfäärist süsinikdioksiidi ning talletavad seda pikaajaliselt turbas, samas kui kuivendamise ja kaevandamise tagajärjel degradeerunud turbaalad võivad muutuda kasvuhoonegaaside allikateks ning eraldada süsinikku atmosfääri (Järveoja *et al.*, 2016). Mahajäetud freesturbaalad on kuivendamise ja turba kaevandamise järgselt kasutusest välja langenud alad, kus looduslik turbasammaldest kujunenud soo ökosüsteem on häiritud, turba akumulatsioon on peatunud ning taimestik on sageli kas puudulik või aeglaselt taastuv (Järveoja *et al.*, 2016). Lisaks kasvuhoonegaasidele eraldub nii turba tootmisel kui ka mahajäetud freesturbaväljadelt peenosakesi, mis võivad mõjutada õhukvaliteeti ja inimeste tervist (Karofeld, 2006; Tissari, 2006). Seetõttu on üha olulisem keskenduda märgalade kaitsele ja taastamisele, mis aitab vähendada kliimamõjusid ning taastada elupaiku paljudele liikidele (Eestimaa Looduse Fond, 2017). Metsä Group, 2021 sõnul on märgala taastamine inimtegevusest kahjustatud või kuivendatud märgalade ökoloogiline taastamine, mille eesmärk on taastada looduslähedased hüdroloogilised ja ökoloogilised protsessid. Peamine rõhk on veerežiimi taastamisel, mis võimaldab ökosüsteemi funktsioonide, sealhulgas taimkatte ja süsiniku sidumise, osalist või täielikku taastumist (Metsä

Group, 2021). Taastatud turbaväljade mõju õhukvaliteedile, sealhulgas peenosakeste emissioonile, on aga endiselt vähe uuritud.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on uurida ja võrrelda peenosakeste kontsentratsioone mahajäetud freesturbaväljal ja äsja taastatud turbaväljal. Lisaks analüüsitakse tuule mõju peenosakeste levikule, kasutades selleks saasteroosi (ingl *pollution rose*) meetodit, mis võimaldab hinnata tuule suuna ja kiiruse seost osakeste kontsentratsioonidega.

Töö sooritamiseks püsitati hüpoteesid:

- Mahajäetud freesturbaväljadel on peenosakeste ($PM_{2.5}$) kontsentratsioon kõrgem kui äsja taastatud freesturbaväljal.
- Peenosakeste kontsentratsiooni ammendunud freesturbaväljadel mõjutavad kuivemad ja tuulisemad ilmastikuolud ning ala taimestatus osakaal ning niiskustase.

1. TEOREETILINE TAUST

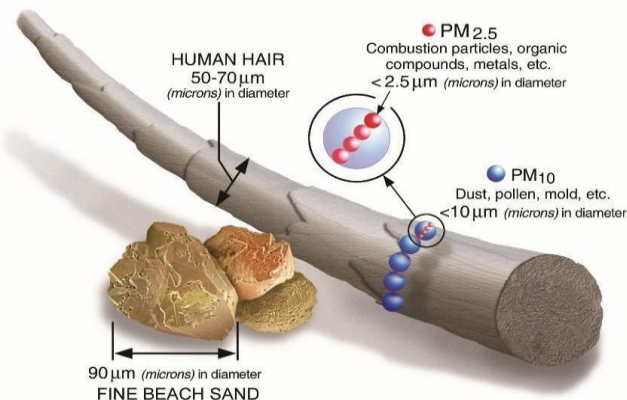
1.1 Peenosakesed

Inimene puutub igapäevaselt kokku peenosakestega ning suurimateks õhusaaste allikateks on energia tarbimine ja põllumajandus (Euroopa Liidu Nõukogu, 2025). Peenosakesed (*inglise keeles particulate matter*, lühend PM) kujutavad endast keerukat segu üliväikestest osakestest ning nendega seotud keemilistest ühenditest, sealhulgas metallidest ja polüaromaatsetest süsivesinikest (PAH-idest) (Energialalgud, külastatud 14.05.2026).

Õhus levivad väikesed tahked osakesed on kahjulikud nii inimese tervisele kui ka atmosfääri kiirgusbilansile (Bessagnet *et al.*, 2022). Peenosakesed on õhus leiduvad tahked osakesed ja vedelikutilkade segud (US EPA, 2016). Nende hulka kuuluvad tolmu, muld, tahm või suits, mis on silmaga nähtavad osakesed, kuid väiksemaid saab vaid elektronmikroskoobiga tuvastada (US EPA, 2016).

Peenosakeste allikaid on väga palju: ehitusplatsid, katmata teed, põllud, korstnad ja tulekahjud, samuti erinevad keemilised protsessid (US EPA, 2016). Chen *et al.* (2021) klassifitseerivad peenosakesed suuruse järgi väiksemateks ja keskmise suurusega osakesteks. Väiksema suurusega osakesi, mille läbimõõt on 0,01 - 0,1 μm , nimetatakse Atikeni moodiks. Need moodustavad suure osa osakeste koguarvust, kuid nende osakaal kogumassist jääb siiski mõne protsendi piiresse. Keskmise suurusega osakesed, mille läbimõõt on 0,1 - 1,0 μm , nimetatakse akumulatsiooni osakesteks (ingl *Accumulation mode particles*). Need annavad enamasti suure osa aerosoolide kogumassist ning neil on ka suurim pindala, mistõttu on nad atmosfääri keemiliste protsesside seisukohalt üks olulisemaid (Chen *et al.*, 2021).

Osakesed, mille läbimõõt on 10 mikromeetrit või vähem, nimetatakse lühidalt PM₁₀-ks ning neid seostatakse rohkem teedelt pärineva tolmu, ehitustööde ja teiste suuremate õhus lendlevate osakeste allikatega, mis sadestuvad enamasti ka kiiremini (Undark, 2018). Väiksemate osakeste, mille läbimõõt on 2,5 mikromeetrit või vähem (PM_{2.5}), on peamisteks allikateks põlemisprotsessid, nagu kivisüsi põletamine elektrijaamas või sõidukite heitgaasid (Undark, 2018). Joonisel 1 on PM_{2.5} ja PM₁₀ võrdluseks toodud inimese juuksekarva ja liivatera, et visualiseerida, kui väikesed peenosakesed on.



Joonis 1. Peenosakeste (PM_{2.5} ja PM₁₀) võrdlus inimese juuksekarva ja liivateraga (US EPA, 2016).

1.1.1 PM_{2.5}

Eriti peened osakesed (PM_{2.5}) on atmosfääriõhu kaitse seaduse (AÕKS) kohaselt osakesed, mis standardi EVS-EN 12341 või mõne teise samaväärsele rahvusvahelise või Euroopa standardiorganisatsiooni standardi tehtud proovivõtu ja mõõtmise korral läbivad 50% juhtudest mõõtmeseadme selektiivava, mille aerodünaamiline diameeter on 2,5 mikromeetrit.

Turba kaevandamise ja töötlemise käigus paiskub välisõhku erineva suurusega osakesi, mis suurtes kogustest võivad avaldada kahjulikku mõju nii keskkonnale kui ka inimeste tervisele. Need osakesed ehk turbatolm koosnevad peamiselt orgaanilisest materjalist, mis pärineb turvast moodustavate taimede lagununud jääkidest (Keskkonnaamet, 2025).

Õhus leiduvad tahked osakesed (PM) moodustavad keeruka segu, mis koosneb erineva suuruse, koostise ja päritoluga osakestest (Tucker, 2000). Tuckeri (2000) sõnul on peenosakesi seni suhteliselt vähe uuritud, mistõttu puuduvad täielikud teadmised nende täpse keemilise koostise, eriti metallide ja orgaaniliste ühendite sisalduse kohta. PM_{2.5} osakesi iseloomustatakse kui ülipeened osakesed, mis 50 protsendil läbivad 2,5 mikromeetri suuruse aerodünaamilise diameetriga mõõduselektiivse ava (Terviseamet, 2025).

PM_{2.5} peetakse kõige kahjulikumateks õhusaaste komponentideks, kuna nende väike suurus võimaldab osakestel tungida sügavale hingamisteedesse, jõuda kopsualveoolidesse ning sealt edasi vereringesse, põhjustades mitmesuguseid tervisekahjustusi (Euroopa Liidu Nõukogu, 2025).

Turbaaladelt on tuvastatud nii PM_{2.5} kui ka PM₁₀ osakesi (Tissari *et al.*, 2006). Käesolevas töös keskendutaks peamiselt PM_{2.5} osakestele, mille aerodünaamiline läbimõõt on kuni 2.5 mikromeetrit.

1.2 Eestis kehtivad normdokumendid

Peenosakeste sisaldus õhus on ülemaailmselt, sealhulgas Eestis, oluline keskkonnanäitaja. Nende kontsentratsiooni seiratakse regulaarselt paljudes riikides, et hinnata õhukvaliteeti ning selle mõju inimeste tervisele ja keskkonnale. Eestis reguleerivad õhukvaliteeti mitmed õigusaktid, millest keskse tähtsusega on Atmosfääriõhu kaitse seadus. Selle eesmärk on hoida ja parandada õhukvaliteeti ning reguleerida tegevusi, mis võivad seda kahjustada. (Riigikogu, 2016)

Lisaks seadusele on kehtestatud ka täpsemad normid välisõhu kvaliteedi kohta. Kliimaministeeriumi määrusega on sätestatud õhukvaliteedi piiri- ja sihtväärtused, samuti õhukvaliteedi hindamiskiirid ja muud piirnormid (Keskkonnaministeerium, 2019). Nendes dokumentides on määratud piirväärtused nii peenetele osakestele (PM₁₀) kui ka eriti peenetele osakestel (PM_{2.5}).

Keskkonnaministri 27.12.2016 määruse nr 75 alusel on peenosakeste kontsentratsioonidele sätestatud järgmised piirväärtused:

- eriti peenete osakeste (PM_{2.5}) piirväärtus on 25 µg/m³.
- peenete osakeste (PM₁₀) piirväärtus on 50 µg/m³.

Oluline on märkida, et PM₁₀ puhul on lubatud piirväärtuse ületamine kuni 35 korral aastas, samas kui PM_{2.5} osas ei ole aastakeskmise piirväärtuse ületamine lubatud.

Alates 2030. aastast hakkavad Euroopa Liidus kehtima uue sõnastusega õhukvaliteedi nõuded, mis tulenevad Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivist (EL) 2024/2881. Võrreldes varasemate direktiividega on uues õigusaktis saasteainete piirväärtused karmistatud ning viidud need vastavusse Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) õhukvaliteedi soovitusetega. Uute piirnormide

rakendamine toimub järk-järgult pikaajalise strateegia raames, mille eesmärk on saavutada täielik rakendamine aastaks 2050 (Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe (Recast), 2024; Keskkonnaamet, 2025). Kirjeldatud muudatusi on näha allolevas tabelis 1.

Tabel 1. Osakeste seatud õhukvaliteedi kehtivad piirväärtused ning muutused aastast 2030 (Keskkonnaamet, 2025).

Välisõhu saasteaine	Kuni aastani 2030			Alates 2030		
	Piirväärtus $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Keskministamise ajavahemik	Aastas lubatud ületamiste arv	Piirväärtus $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Keskministamise ajavahemik	Aastas lubatud ületamiste arv kalendriaastas
Peenosakesed (PM_{10})	50	24 tundi	35	45	24 tundi	18
	40	kalendriaasta	-	20	kalendriaasta	-
Eriti peened osakesed ($\text{PM}_{2.5}$)	Ei ole seatud			25	24 tundi	18
	25	kalendriaasta	-	10	kalendriaasta	-

Atmosfääriõhu kaitse seaduse kohaselt käsitatakse õhusaaste piirväärtust kui saasteaine suurimat lubatud sisaldust õhu ruumala- või pinnaühikus, mis on määratud teaduslikel andmete põhjal. Piirväärtuste kehtestamise eesmärk on kaitsta inimese tervist ja keskkonda, ennetades või vähendades saasteainete kahjulikku mõju. Kui mõõtmistulemused näitavad piirväärtuse ületamist, tuleb ettenähtud aja jooksul rakendada asjakohaseid meetmeid, et viia saastetase tagasi lubatud piiridesse. (Riigikogu, 2016.)

1.3 Peenosakeste seos kliimaga

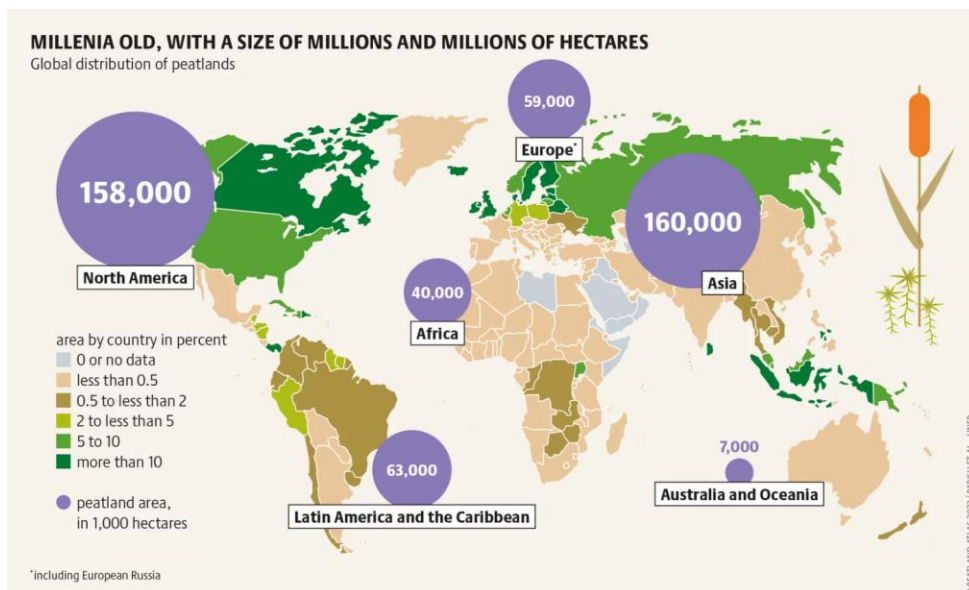
Globaalne kliimasoojenemine on kaasa toonud mitmed äärmuslikud ilmastikunähtused, nagu kuumalained ja pikaajalised põuaperioodid, aga samas ka külmemad talved ja tugevad tormid (Cohen *et al.*, 2018; Little *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2016). Atmosfääris leiduvad peenosakesed mängivad olulist rolli nii õhukvaliteedi kujunemisel kui ka kliimasüsteemis.

Suur osa peenosakestest tekib atmosfääris erinevate keemiliste ühendite, näiteks vääveldioksiidi (SO_2) ja lämmastikoksiidide (NO_x), omavaheliste keerukate reaktsioonide tulemusel (US EPA, 2016). Neid ühendeid paiskavad õhku peamiselt elektrijaamad, tööstusettevõtted ja transpordisektor (US EPA, 2016). Lisaks tekivad peenosakesed ka otseselt erinevate inimtegevuste, näiteks kütuse põletamise, tulemusel (Euroopa Liidu Nõukogu, 2025).

Chen *et al.* (2021) leidsid, et inimtegevuse tagajärjel tekkinud mõjutavad negatiivselt õhukvaliteeti ja Maa kiirgusbilanssi. Selle uuringu käigus selgus, et peenosakestelt hajunud päikesekiirgus suurendab Maa albeedot, mis omakorda mõjub planeedile jahutava efektina. Paljud inimtekkelised peenosakesed koosnevad peamiselt sulfaatidest ja nitraatidest. Samuti on leitud, et ka sulfaadiühendid suudavad teatud määral soojuskiirgust neelata, kuid nende mõju globaalsele kliimale on suhteliselt väike (Chen *et al.*, 2021).

1.4 Peenosakeste allikad

Lisaks inimtegevusele paiskuvad peenosakesed atmosfääri ka freesturba tootmisel, mida tehakse suuremahuliselt näiteks Soomes kütmisallika ja aianduse tarbeks (Tissari *et al.*, 2006). Maailmas leidub üle 480 miljoni hektari turbaalasid (joonis 2) ning üle 50 miljoni hektari kuivendatud turbaalasid, mille ulatus on kasvutrendis (Barthelmes, 2023). Samas kasutatakse globaalselt vaid 0,05 % turbaaladest (Selin, 1999). Suurimad turbaväljad, mis on kuivendatud ja töödeldud põllumajandustootmise või turba kaevandamise eesmärgiks, asuvad peamiselt Kanadas ja Põhja-Euroopas (Lappalainen, 1996).



Joonis 2. Ülemaailmne turbaalade levik (Barthelmes, 2023).

Turbatolmu paiskub õhku turbaväljadel tööde käigus, kuid samuti on oluline faktor ka tuul (Chen *et al.*, 2021). Tissari *et al.* (2006) uuringu eesmärgiks oli välja selgitada, millised on heitkoguse tasemed freesturba tootmisel. Uuringust selgus, et õhus levivate osakeste kontsentratsioon sõltub nii tuule suunast, algsest õhukvaliteedist, tööde intensiivsusest, kaugusest tegevuskohast kui ka ilmast ja ümbritsevast keskkonnast. Lisaks leidsid selle uuringu autorid, et turbaaladel võib ka tuuleerosioon tekkida, kui tuule kiirus ületab teatud lävitaseme. Lävitaseme väärtus sõltub erinevatest teguritest, nagu turba pinnase omadustest, mille hulka kuuluvad veesisaldus ja lagunemisaste (Tissari *et al.*, 2006). Seega sõltub tuuleerosioon turba kvaliteedist, ilmastikutingimustest ja tööetapist.

1.5 Tuuleerosiooni

Tuuleerosioon on eriti märgatav aladel, kus puudub taimestik ning suured turbaalad on avatud ja siledad (Campbell *et al.*, 2002). Sellistes tingimustes võivad tuule mõjul pinnasest eralduda ja atmosfääri kanduda erineva suurusega osakesed. Tissari *et al.*, (2006) leidsid oma uuringus, et vihmasel suvel, kui turvas on niiske, on ka osakeste emissioonid väiksemad. Samuti selgus, et hästi lagunenenud turbast vabanevad peenosakesed atmosfääri kergemini kui halvasti lagunenenud turba mullaosakesed. Uuringus eeldati, et tuulise ilmaga lenduvad peenosakesed kõige kergemini õhku,

mis leidis kinnitust enam kui pooltel juhtumitel, kuid tuulekiirused ei olnud alati väga suured (Tissari *et al.*, 2006).

Campbell *et al.* (2002) läbi viidud tuuletunneli katsed näitasid, et kuiv ja lahtine freesturvas erodeerub tuule mõjul rohkem kui niiskem pinnas. Katse tulemused viitasid sellele, et erinevate lagunemisastmega turvaste puhul ei esinenud märkimisväärsed erinevusi osakeste liikumise alustamiseks vajaliku tuulekiiruse läviväärtustes. Samas väidavad Tissari *et al.* (2006), et tuulekiirus peab saavutama kindla läviväärtuse, et saaks tekkida tuuleerosioon. Uuringute tulemuste erinevused võivad tuleneda turba erinevast koostisest ja omadustest ning asjaolust, et tuule liikumine on ajas varieeruvad ega ole püsiv ega ühtlased (Lee *et al.*, 2018).

Clausnitzer ja Singer (2000) täheldasid, et peenosakeste hulk õhus on väiksem, kui pinnas on niiskem. Mulla niiskus suurendab osakeste massi ning tugevdab nendevahelisi sidemeid, mistõttu on osakestel raskem tuule mõjul õhku sattuda. Samal ajal võib kõrgem õhutemperatuur soodustada pinnase kuivamist ning seeläbi suurendada peenosakeste eraldumist atmosfääri (Clausnitzer & Singer, 2000).

Mahajäetud freesturbaväljad on sageli aerodünaamiliselt siledad, mistõttu võib seal tugeva tuule korral esineda märkimisväärset tuuleerosiooni (Campbell *et al.*, 2002). Tuuleerosioon tekib atmosfääri ja maapinna vastastikuse mõju tulemusel (Campbell *et al.*, 2002). Maapinna lähedal aeglustub tuule liikumist õhu hõõrdejõu tõttu, mis tekib tuule liikumisel üle ebatasase pinnavormi (Campbell *et al.*, 2002). See hõõrdumine tekitab nihkepinge, mille tugevus sõltub tuule kiirusest, õhu tihedusest ja maapinna karedusest (Campbell *et al.*, 2002).

Igal ühtlasel pinnal on iseloomulik kareduspikkus, mida määratakse tuule vertikaalprofili järgi (Campbell *et al.*, 2002). Mida siledam on pind, seda väiksem on selle kareduspikkus ning seda järsem on tuulekiiruse muutus kõrguse kasvades, eriti tuulepuhangute ajal (Campbell *et al.*, 2002). Sellistel siledatel pindadel olevatele peenosakestel mõjuvad kolm peamist jõudu: tuule suunas toimiv õhutakistus, osakeste ümber telje pöörlemisel tekkiv jõud ja üleslükkejõud (Greeley & Iversen, 1985). Osakeste liikumine algab siis, kui eelmainitud jõud ületavad osakese massi ja kohesioonijõu, mis seovad osakesi omavahel (Campbell *et al.*, 2002).

Tuuleerosiooni käigus võivad osakesed liikuda mitmel viisil: suspensioonis ehk õhus hõljudes, saltatsiooni teel (tõustes ja naastest pinnale) või pinnarullumise kaudu (ingl *surface creep*) (Campbell *et al.*, 2002).

1.6 Peenosakeste lendumine

Välisõhu kvaliteedi seisukohalt on oluline eristada, millist osa emissioonist käsitatakse tegeliku heitena. Heite suuruse arvutuslikud näitajad on aluseks keskkonnaloa vajaduse, loa tingimuste ning keskkonnatasude määramisel (Keskkonnaamet, 2025).

Keskkonnaõiguse kohaselt loetakse keskkonda mõjutavateks tegevusteks need, millel on potentsiaal põhjustada keskkonnasaastet, hõlmates nii tootmispiirkonda kui ka seda ümbritsevat keskkonda (Riigikogu, 2011; Keskkonnaamet 2025). Atmosfääriõhu kaitse seaduse (AÕKS) kohaselt annab keskkonnaluba õiguse saateainete väljutamiseks välisõhku paiksest heiteallikast. Lubatud heitekogus määratakse selliselt, et oleks tagatud õhukvaliteedi piirväärtuste järgimine.

Turba tootmisel ei pasiku kogu lenduv materjal välisõhku, kuna osa osakestest sadestub tootmisterritooriumil (Keskkonnaamet, 2025). Seetõttu kujuneb tegelik välisõhu saastamise potentsiaal üksnes osast lenduvatest osakestest.

1.7 Turbakaevandus

Eesti kuulub maailma sooderikkaimate riikide hulka, mis on ka kujundanud pikaajalise turba kaevandamise traditsiooni (ERR, 2015). Enne 1950. aastaid kaevandati turvast käsitsi rabade servadest ilma eelneva kuivendamiseta, mistõttu olid keskkonnamõjud suhteliselt väikesed ning turbaalad suutsid kiiresti taastuda (ERR, 2015). Alatest 20. sajandi keskpaigast arenes freestehnoloogia, mis nõuab ulatuslikku kuivendamisi ning mille kasutamine võib oluliselt kahjustada piirkonna elurikkust (ERR, 2015).

Pärast turba kaevandamist kasutatakse turbaalasid mõnikord põllumajanduse või metsanduse eesmärgil, kuid sageli jäävad need alad taastamata ning neile ei leita uut rakendust (Triisberg, 2014). Turba kaevandamisega kaasnevad mitmed keskkonnamõjud: looduslike elupaikade hävimine, veerežiimi muutumine, suureneb tuleoht ning kasvuhoonegaaside emisioode kasv (ERR,

2015). Eestis on suurim CO₂ emissiooni allikas põlevkivitööstus, kuid juba teisel kohal on turbakaevandusalad, mis mõjutavad märkimisväärselt kasvuhoonegaaside kogust ning seeläbi ka kliimat (Ilomets, 2001).

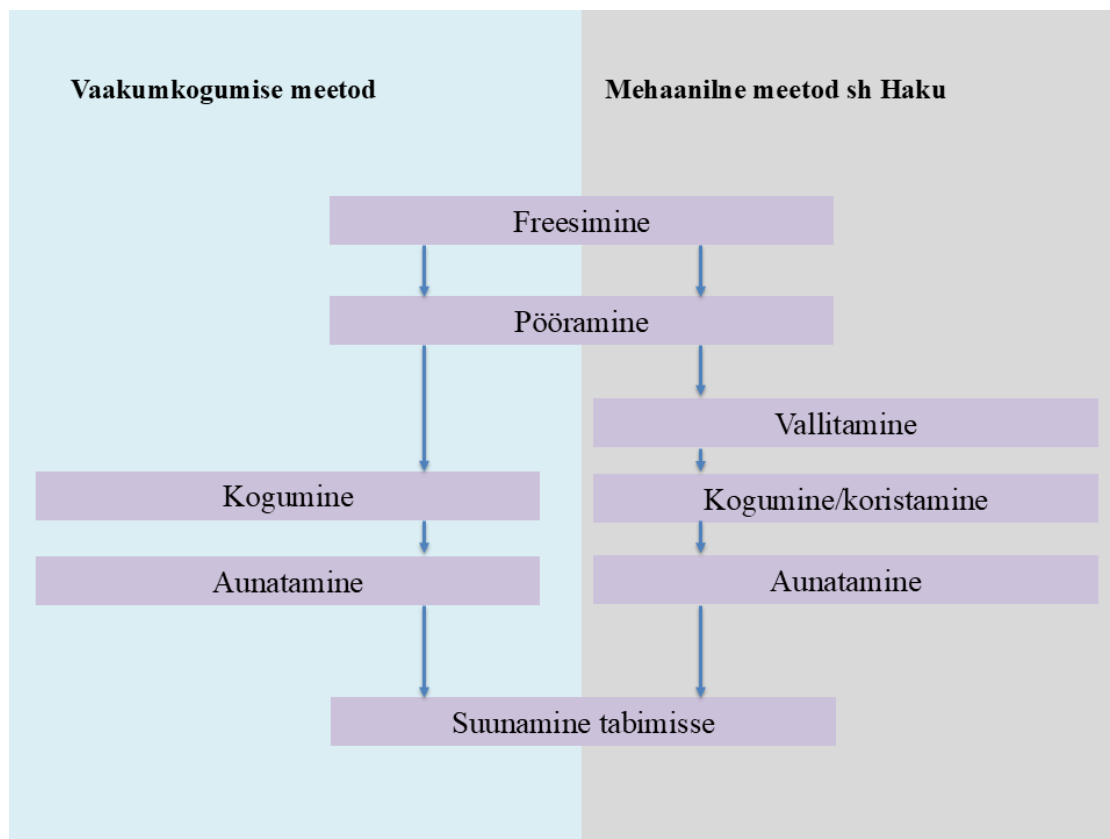
2023. aasta seisuga on Eestis 280 maardlat, mille peamiseks maavaraks on turvas (Maa-amet, 2024). Maa-ameti andmetel kaevandati Eestis 2023. aastal turvast kokku 897,2 tuhat tonni, millest 375,3 tuhat tonni moodustas hästilagunenud turvas ning 521,9 tuhat tonni vähelagunenud turvas. 2023. aastal kaevandati turvast 19 % vähem kui eelneval aastal (2022) ning enamus kaevandatud turbast kasutatakse aianduses ja väiksemas mahu ka kütusena (Maa-amet, 2024).

1.8 Turba kaevandamine

Turba tootmine algab tootmisala ja tootmisväljakute ettevalmistusega. Selle etapi käigus lendub osakesi minimaalselt, mistõttu sellele faasile käesolevas töös tähelepanu ei pöörata (Keskkonnaamet, 2025).

Turvast kaevandatakse enamasti freesimise teel ning juhul, kui turvast kasutatakse energia tootmiseks, siis vajab see täiendavat töötlemist (Tissari *et al.*, 2006). Freesturba tootmisel kasutatakse ligikaudu 90% ulatuses harvester-meetodit, mille puhul kogutakse turvast vaakum- ja mehhaanilise koguriga ning ümbervallitamise meetodit (Peco meetod) (Keskkonnaamet, 2025). Kütteturba tootmiseks kasutatakse Haku meetodit, kuid Eestis seda enam ei rakendata, kuna kütteturba tootmine on oluliselt vähenenud (Keskkonnaamet, 2025).

Turba kaevandamiseks kuivendatakse turbavälja kraavide abil, mis asetsevad 20 - 40 meetri vahedega (Campbell *et al.*, 2002). Pärast freesimist kobestatakse turbapind (ingl *harrowing*), et muuta turbakiht võimalikult homogeenseks (Tissari *et al.*, 2006). Sellele järgneb vallide moodustamine (ingl *ridging*), turba kogumine ja varumine ehk aunatamine ning seejärel saagikoristus ja transport (Tissari *et al.*, 2006). Allpool esitatud joonisel (joonis 3) on näidatud freesturba tootmise tehnoloogilised etapid. Eestis on peamiseks kogumismeetodiks pneumaatiline meetod, mille puhul kasutatakse vaakumkogureid (Keskkonnaamet, 2025).



Joonis 3. Freesturba tootmistsükkel, tootmise tehnoloogilised etapid erinevate tootmistehnoloogiate korral (Tissari, 2006).

Suurim tõenäosus peenosakestel õhku kandumiseks on ajavahemikul freesimisest kuni turba koristuseni, sest sellel ajal kuivab turvas kõige enam (Tissari *et al.*, 2006).

Kaevandamise lõpetamise järel taastuvad freesturbaväljad sageli halvasti – taimkate ei taastu või taastub väga aeglaselt, mille põhjuseks peetakse turbapinna ebastabiilsust (Campbell *et al.*, 2002). Lisaks võivad peenosakesed tugeva tuule korral liikuma hakata, eriti kui mahajäetud freesturbavälja pind on kuiv (Campbell *et al.*, 2002).

1.9 Mahajäetud freesturbaväljad

Pärast turbakaevandamise lõpetamist tekkinud jääksood on negatiivse keskkonnamõjuga, kuna need muutuvad süsihappegaasi allikaks (ERR, 2015). Eestis on ligikaudu 9600 hektarit mahajäetud jääksoid ja erinevad uuringud on näidanud, et lisaks kasvuhoonegaaside emissioonile mõjutavad need alad ka negatiivselt elurikkust: looduslikud elupaigad hävivad, veerežiim muutub ning

suureneb tuleohtu (ERR, 2015). Seetõttu on jõutud järeldusele, et mahajäetud jääksoid tuleb taastada. Eesti õigusaktid kohustavad neid alasid rekultiveerima ja korrastama, mida siiski pole kõikjal tehtud (ERR, 2015).

Mahajäetud freesturbaväljade spontaanne taastumine on väga aeglane protsess (Lavoie *et al.*, 2003), kuna ala on varasema kuivendamise tõttu hüdroloogiliselt muutunud ning turbakaevandamise käigus eemaldatakse suur osa taimkattest ja pindmisest turbakihtidest, mille tulemusena väheneb oluliselt idanemisvõimeliste diaspooride ehk seemnepanga hulk (Tuittila *et al.*, 1999, Egawa *et al.*, 2009). Taimed on jääksoodes võimelised idanema vaid juhul, kui tuulega saabuvad diaspoorid (Salonen, 1987) ning need suudavad moodustada püsivaid taimekooslusi (Egawa *et al.*, 2009). Jääksoodes esineb aga mitmeid taimestumist pärssivaid keskkonnategureid, nagu ebastabiilsed niiskustingimused, tuuleerosioon ja külmakerge (Price *et al.*, 1998; Campbell *et al.*, 2002; Groeneveld & Rochefort, 2002).

Kõik Eestis paiknevad jääksood toodavad kokku 400 000 tonni CO₂ aastas ning turba mineraliseerumise tõttu on jääksood olulised kasvuhoonegaaside allikaid (Ilomets, 2003). Sobivate taastamismeetmete rakendamisel oleks võimalik jääksoid taastada ning sellega oluliselt vähendada kasvuhoonegaaside emissiooni (ERR, 2015).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Uuringuala kirjeldus

Uuringualadeks on Lavassaare asula lähedal asuv mahajäetud freesturbaväli ning äsja taastatud Ess-soo.

Lavassaare jääb Pärnust loodesse ning seal asuvad Eesti kõige ulatuslikumad turbakaevandusalad (Eestimaa Looduse Fond, 2024). Enamik aladest on kuivendatud ning neil puudub taimkate. Ala, kus asub kasutatav sensor, on taimkate osaliselt taastunud. Mõõtesensor asub täpsemalt Pitsalu külas. Läheduses paiknevad suured turbakaevandusalad. Joonisel 4 on kujutatud taastamata freesturba uurimisala, kus on näha seirejaama asukoht Eesti kaardil, ortofoto seirejaama ümbrusest ning foto seirejaamast.



Joonis 4. Lavassaare uurimisala (allikad: Maa-amet ja QGIS 3.44 tarkvara).

Ess-soo raba on 2019 aastatl taastatud turbaväli ning asub Ruhingu külas Võru maakonnas (X-GIS 2.0, külastatud 14.05.2026). Ess-soo raba on valdavalt kaitse all olev ala (212 ha). Raba ida osas, kus kuni 1994. aastani toimus veel turba kaevandamine, jäeti pärast tegevuse lõpetamise maha.

Joonisel 5 on illustreeritud Ess-soo asukoht eesti kaardil, ortofoto seirejaama ümbruskonnast ning foto seirejaamast.



Joonis 5. Ess-soo uurimisala (allikad: Maa- ja Ruumiamet).

2.2 Andmete kogumine ja analüüs

Uuringus kasutati automaatselt õhukvaliteedi seirejaamast Pitsalus ja Ess-soost pärinevaid andmeid perioodil 01.01.2025 - 31.12.2025. Seirejaamas mõõdetakse peenosakeste kontsentratsiooni madala kuluga optilise õhukvaliteedi sensori PurpleAir abil. PurpleAir seadmed kasutavad laseroptilist osakeste loendamise meetodit, mille käigus suunatakse õhuvool läbi laserkiire ning osakeste hajutatud valguse põhjal määratakse nende suurus ja arvukus. Nende andmete põhjal arvutatakse algoritmiliselt peenosakeste massikontsentratsioon, sealhulgas $PM_{2.5}$. (PurpleAir, 2022; Kelly *et al.*, 2017)

PurpleAir kuulub *low-cost* sensorite hulka, mida kasutatakse laialdaselt reaalajas õhukvaliteedi jälgimiseks ning teadusuuringutes, kuigi nende mõõtmistäpsus võib sõltuda keskkonnatingimustest ja kalibreerimisest (Kelly *et al.*, 2017).

Käesolevas töös analüüsiti PM_{2.5} massikontsentratsiooni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), mis iseloomustab läbimõõduga alla 2,5 μm osakesi. Tegemist on tervisemõjude seisukohalt olulise õhusaaste näitajaga, kuna sellised osakesed suudavad tungida sügavale hingamisteedesse (WHO, 2021).

Andmeid analüüsiti 30-minutilise ajalahutusega. Selline ajaintervall võimaldab vähendada üksikmõõtmiste juhuslikku varieeruvust ning sobib lühiajaliste õhukvaliteedi muutuste uurimiseks (Kelly *et al.*, 2017). Lisaks peenosakestele mõõdeti ka tuule kiirus- ja tuule suund kasutades Gill Windmaster PRO anemomeetrit .

Andmete analüüsimisel koostati ajagraafikud, et võrrelda peenosakeste kontsentratsioonide muutusi taastatud ja taastamata alal 2025. aasta jooksul. Ess-soo ajagraafikul puuduvad andmed aprilli kohta tehnilise rikke tõttu seirejaamas. Lisaks koostati mõlema ala kohta saasteroosid, et hinnata peenosakeste levikut eri tuulesuundade korral, ning boxplot-diagrammid, et võrrelda peenosakeste kontsentratsioonide jaotust uurimisaladel.

Andmete analüüs viidi läbi statistikaprogrammis RStudio. Ajagraafikute koostamiseks kasutati funktsiooni *geom_point*, et visualiseerida mõõdetud parameetrite ajalisi muutusi. Saasteainete levikusuundade hindamiseks koostati *pollution rose* diagrammid, kasutades paketti *openair* (Byers, 2016). Mõlema uuritava ala PM-kontsentratsioonide võrdlemiseks loodi box-plot tüüpi graafikud. Andmete jaotuse varieeruvusest tulenevalt viidi lõppanalüüsis läbi mitteparameetiline Wilcoxon test, et hinnata kontsentratsioonide erinevuste statistilist olulisust (STHDA, külastatud 14.05.2026). Wilcoxon rank-sum testi kasutati selleks, et hinnata, kas kahe uuritava ala PM_{2.5} kontsentratsioonide jaotused erinevad teineteisest. Tegemist on mitteparameetrilise testiga, mida rakendatakse olukorras, kus andmed ei vasta normaaljaotuse eeldustele või kui rühmade jaotused võivad olla asümmeetrilised. Test võrdleb kahe sõltumatu valimi mediaane ning hindab, kas rühmade paiknemise erinevus on statistiliselt oluline (Statistics Solutions, külastatud 14.05.2026). Käesolevas töös näitas Wilcoxon test, et kahe ala PM_{2.5} kontsentratsioonide tase erineb oluliselt, mis viitab mõõtepiirkondade keskkonnatingimuste statistiliselt eristatavale erinevusele.

Analüüsi raames valiti PM_{2.5} kontsentratsioonide arvutamiseks alternatiivne algoritm, mida PurpleAir API tähistab kui *pm2.5_alt* (tuntud ka kui ALT3.4). See algoritm arvutab massikontsentratsiooni sensori toorandmete põhjal, võimaldades seeläbi vältida tootja sisemiste arvutusmeetodite läbipaistmatust ja sellega seotud ebakindlust (Wallace & Zhao, 2023). Võrreldes tootja standardsete CF1 ja ATM algoritmidega on alt-algoritmi kasutamine kirjanduse järgi

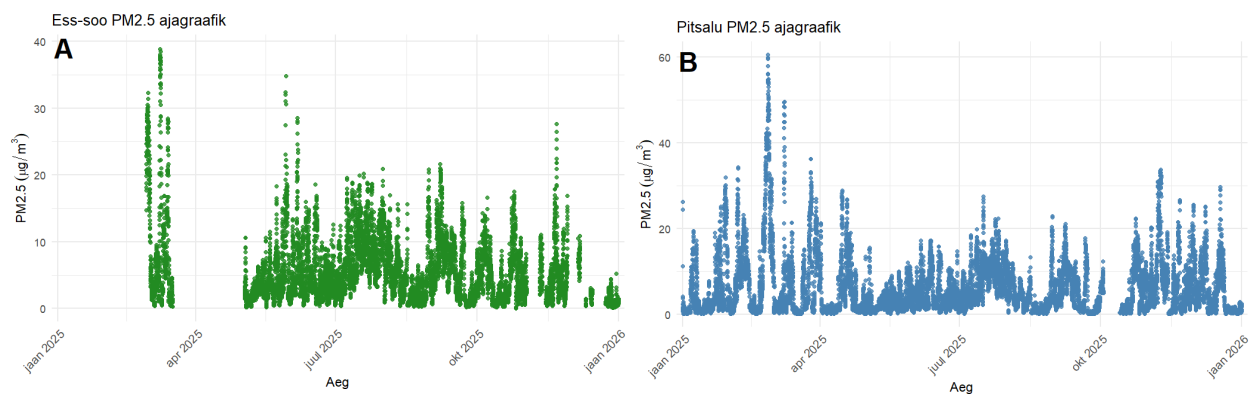
osutunud täpsemaks ja stabiilsemaks: CF1 väärtused kipuvad oluliselt üle hindama PM_{2.5} kontsentratsioone ning vähendavad kahe sensori vastavust samas mõõteseadmes, samas kui alt-algoritm pakub rangemat tuvastuspiiri ja paremat vastavust võrdlusmonitooringutega (Wallace, 2023). Seetõttu otsustati antud töös kasutada ALT3.4 (pm2.5_alt) varianti, et saada usaldusväärsemaid PM_{2.5} kontsentratsiooni hinnanguid, mis sobivad paremini statistiliseks võrdluseks ja tulemuste tõlgendamiseks.

Seirejaamade asukohtade visualiseerimiseks kasutati tarkvara QGIS 3.44 ning selleks andmeid saadi Maa- ja Ruumiametist. OpenAI rakendust ChatGPT kasutati vaid R-koodi parandamiseks ja üksikute teemade lahtimõtestamiseks. Tehisaru ei rakendatud tekstiloomeks ega andmete analüüsiks.

3. TULEMUSED

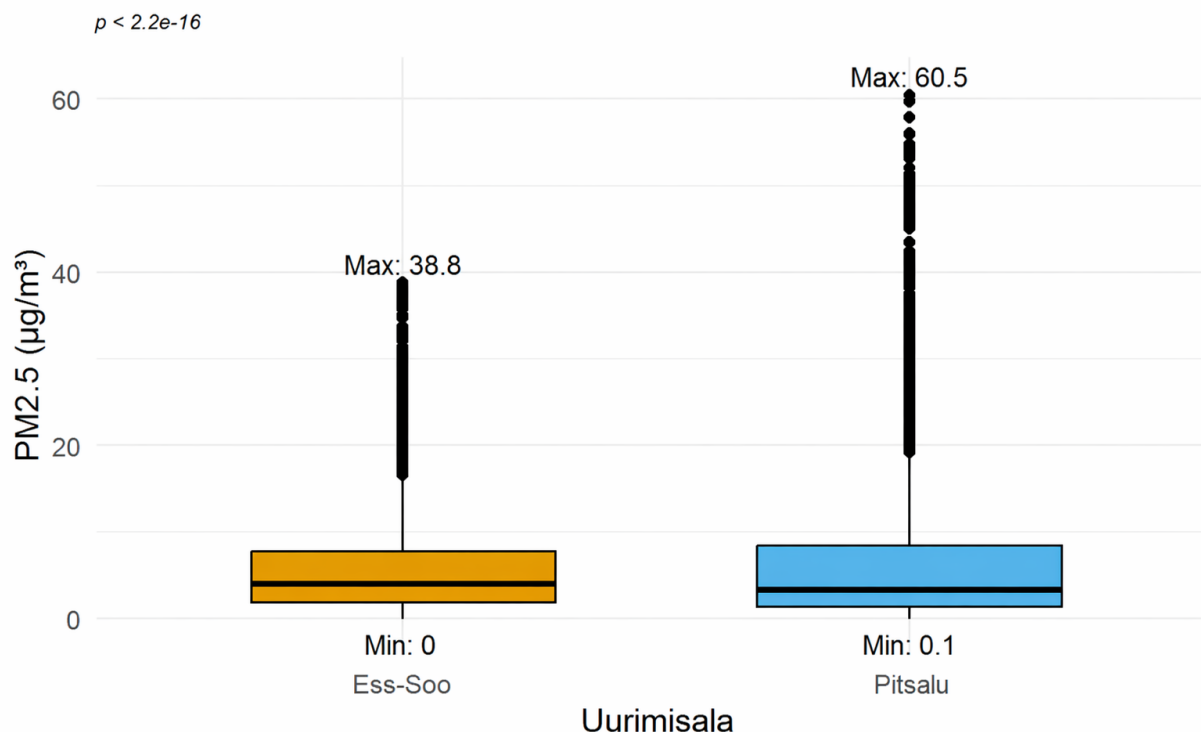
3.1 Peenosakeste kontsentratsiooni muutus ajas

Ess-soo, ehk äsja taastatud jääksoos olid peenosakeste kontsentratsioonid vahemikus 0,0 - 38,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (joonis 6A). Kõrgeimad väärtused registreeriti varakevadel ja suvel, samas kui madalaimad kontsentratsioonid olid talvel. Mahajäetud freesturbavälja mõõtepunktis Lavassaarel (Pitsalu külas) (joonis 6B) ulatus maksimaalne kontsentratsioon 60,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -ni, mis on oluliselt kõrgem kui taastatud alal. Kontsentratsioonid kõikusid vahemikus 0,1 - 60,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Taastamata turbaalal ilmnesisid suurimad kontsentratsioonid eelkõige varakevadel ning madalamad väärtused talvekuudel.



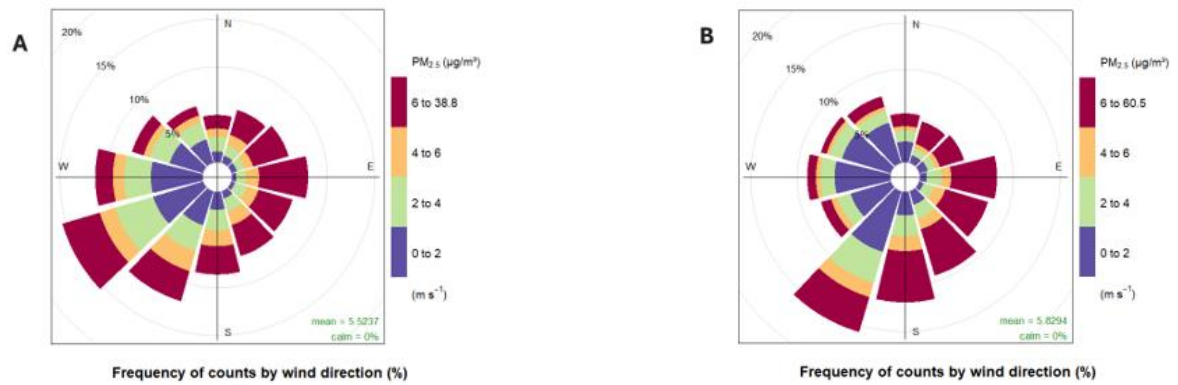
Joonis 6. PM_{2.5} kontsentratsioonide dünaamika 2025. aasta jooksul. A - taastatud freesturbaväli ja B - mahajäetud freesturbaväli.

Boxplot diagrammidelt on näha, et mahajäetud alal (Lavassaarel) esineb suurem kontsentratsioonide varieeruvus ning maksimaalne väärtus on märkimisväärselt kõrgem võrreldes taastatud alaga (Ess-soo). Lisaks näitasid tulemused, et taastatus ala kontsentratsioonid olid oluliselt kõrgemad ($p < 0.001$; joonis 7) Ess-Soo, ehk taastatud turbaala keskmine peenosakeste kontsentratsioon ($\pm$ standardhälve) oli $5,52 \pm 5,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lavassaarel, ehk taastamata turbaala peenosakeste kontsentratsioon oli $5,83 \pm 6,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mediaanväärtus oli taastatud turbaala $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja taastamata turbaalal $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Joonis 7. Taastatud ja mahajäetud freesturbavälja peenosakeste kontsentratsioonide võrdlus. *Boxplot* diagrammidel tähistab horisontaalne joon mediaani, *Boxplot* alumine ja ülemine serv vastavalt 25 ja 75% kvartiilid ning miinimum ja maksimum kontsentratsioonide väärtused. Rühmade erinevust hinnati *Wilcoxon rank sum test*-iga, mille tulemus näitab statistiliselt olulist erinevust alade vahel ($p < 0.001$).

Peenosakeste kontsentratsiooni jaotuse hindamiseks sõltuvalt tuule suunast koostati mõlema uurimisala kohta *pollution rose*'i diagrammid (Joonis 8A ja 8B). Nii taastatud, kui ka mahajäetud freesturbaväljal ilmnes, et domineerivaks tuule suunaks oli edelatuul. Ess-soos on edelasuunas (joonis 8A) kõige halvemini taastunud piirkond, mis on enim põuatundlik ning ka kõige halvemini taimestikuga kaetud. Põhja- ja idasuund on vastavalt tihedama taimestikuga ja märkimisväärselt niiskem. Mahajäetud ala puhul (joonis 8B) esinesid samuti kõrgeimad vood edela- ja lõunasuunas, kus asub ka kruusatee, mida mööda toimub aktiivne turba väljavedu.



Joonis 8. Freesturbavälja PM_{2.5} esinemissagedus vastavalt ilmakaarele. A - taastatud freesturbaväli ja B - mahajäetud freesturbaväli.

4. ARUTELU

Ajaline peenosakeste kontsentratsioonide muutuse dünaamika näitas, et mõlema ala kontsentratsioonid on suurimad samadel aastaegadel. Madalamaid väärtusi esinesid nii taastatud kui ka taastamata freesturbaväljadel talvekuudel. Peenosakeste kontsentratsioon sõltub otseselt ilmastikutingimustest (Tissari *et al.*, 2006). Tissari *et al.* (2006) uuringus selgus samuti, et õhku paiskunud peenosakeste hulka mõjutavad eelkõige tuul ja turba veesisaldus. Seetõttu varieeruvad kontsentratsioonid vastavalt aastaegadele.

Campbell *et al.* (2002) uuringus täheldati, et tuuleerosioon on suurem aladel, kus turba pinnal puudub taimestik, kuna osakesed eralduvad pinnast kergemini. Taastatud freesturbaväljal olid kõrgemad peenosakeste kontsentratsioonid peamiselt lääne- ja kagusuunas, kus suvisel perioodil on tingimused kuivemad ning taimkate hõredam. Madalaimad kontsentratsioonid registreeriti põhjasuunal, kus taimestikku on tihedam ning osa alast on püsivalt veega kaetud.

Taastamata turbaalalt kandub tuulega rohkem peenosakesi lõuna- ja edelasuunas. Lõunasuunas olevate kõrgemate kontsentratsioonide põhjuseks on lisaks turbale ka tõenäoliselt krusatee mida kasutatakse turbaväljaveoteena töös olevatelt freesturbaväljadelt (Järveoja *et al.*, 2016). Põhjasuunas esineb emissioone kõige vähem, kuna ala on paremini taimestikuga kaetud ning niiskematel pindadel eraldub vähem peenosakesi. Ka taastatud turbaväljal kinnituvad Campbell *et al.* (2002) tulemused, mille kohaselt taimestiku puudumine suurendab tuuleerosiooni.

Käesolevas uuringus oli peenosakeste mediaanväärtused $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (taastatud freesturbaväljal) ja $5,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (taastamata freesturbaalal), mis vastavad $0,0055 \text{ mg}/\text{m}^3$ -le ja $0,0058 \text{ mg}/\text{m}^3$ -le. Aktiivsetes turbakaevanduste piirkondades võib peenosakeste kontsentratsiooni mediaanväärtus ulatuda kuni $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, mis on ligikaudu 1000 korda kõrgem (Tissari *et al.*, 2006). Seega on nii mahajäetud kui ka taastatud turbaalade $\text{PM}_{2.5}$ kontsentratsioonid oluliselt madalamad võrreldes aktiivsete kaevanduspiirkondadega, kus peenosakeste emissioonid võivad olla kordi suuremad.

2019. aastal Indoneesias toimunud ulatuslikud turbaväljade tulekahjude ajal, mõõdeti tulekahjude hooajal keskmiseks $\text{PM}_{2.5}$ kontsentratsiooniks $0,097 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Grosvenor *et al.*, 2024), mis on ligikaudu 20 korda kõrgem kui selles töös käsitletud taastatud freesturbaväljal (Ess-soo) mõõdetud kontsentratsioon. Ekstreemsete tulekahjude esinemist soodustab selles piirkonnas El Niño, mis põhjustab põuda ning võimaldab põlengutel püsida mitu kuud (Grosvenor *et al.*, 2024). Kuigi

Indoneesia paikneb Eestist kaugel, esineb turbapõlenguid ka Eestis. 2020. aastal põles Maima külas, Lavasaare turbaala (Pärli, 2019) ning hiljutine põleng toimus Viljandi vallas, Parika raba turbatootmisalal (Loide & Suurmägi, 2026).

Granath *et al.* (2016) uuring tõi esile, et eriti probleemsed on kuivendatud ja kaevandatud turbaväljad, kus inimtegevus on muutnud vee- ja süsinikuringet ning kahjustanud sambla ja turba võimet reguleerida niiskust. Kliimamuutus süvendab neid mõjusid, suurendades kuivaperioodide sagedust. Seetõttu võivad Põhja-Euroopa kuivendatud turbaalad olla praegustes kliimatingimustes eriti haavatavad ulatuslike ja sügavate põlengute suhtes, mille käigus võib eralduda üle 200 tonni süsinikku hektari kohta (Granath *et al.*, 2016). Uuringud viitavad, et tulekahju riski vähendamiseks on oluline turbaalade taastamine, eelkõige veerežiimi taastamine turbasambla kihi kujundamise kaudu. Turbapõlengud kujutavad endast tõsist keskkonnaprobleemi põhjustades elurikkuse vähenemist ja ökosüsteemide toimimise halvenemist (Granath, *et al.*, 2016). Lisaks avaldavad turbapõlengud märkimisväärset mõju inimeste tervisele, kuna neist pärinev õhusaaste võib lühiajaliselt suurendada hingamisteede ja südame-veresoonkonna haiguste ägenemist ning enneaegset suremust, pikaajalisel kokkupuutel aga tõsta krooniliste haiguste ja üldise suremuse riski (Grosvenor *et al.*, 2024 ;WHO, 2021).

Peenosakeste kontsentratsioonide hindamisel tuleb arvestada ka nende mõjuga inimestele. Keskkonnaministri 27.12.2016 määruse nr 75 alusel on peenosakeste (PM_{2.5}) aastakeskmise piirväärtus 25 µg/m³. Käesoleva töö tulemused näitavad, et aastakeskmise kontsentratsioon jääb piirväärtuse lähedale, kuid maksimaalsed väärtused (38,8 µg/m³ ja 60,5 µg/m³) ületavad seda selgelt. Samas on tegemist lühiajaliste tipuväärtustega. Aktiivse turbakaevanduse puhul (Tissari *et al.*, 2006) ületatakse vastavat piirväärtust aga oluliselt ja püsivamalt.

Uuringutulemused näitasid, et taastamata freesturbavälja peenosakeste mediaanväärtus oli mõnevõrra madalam kui taastatud alal, kuigi eeldatavalt võiks olukord olla vastupidine. See võib viidata sellele, et Ess-soo turbaala taastumine ei ole piisavalt edukas (Tamm *et al.*, (käsikiri ajakirja esitatud). Kirjanduse põhjal on mahajäetud freesturbaväljade spontaanne taastumine väga aeglane (Yildiz *et al.*, 2025), kuna kuivendamine ja kaevandamine eemaldavad taimkatte ning kahjustavad pealmist turbakihti ja seemnepanka (Egawa *et al.*, 2009). Samuti näitavad taastamisuuringud, et edukas taastumine eeldab püsivalt kõrget veetaset ja tiheda taimkatte kujunemist (Tuittila *et al.*, 1999).

Kui veerežiim ei ole täielikult taastunud ning taimkate jääb hõredaks, on ala kuivem ja erosioonitundlikum, mis suurendab peenosakeste emissiooni. See rõhutab, et turbaalade taastamisel ei piisa üksnes esmastest taastamismeetmetest, vaid vajalik on ka pikaajaline seire ja hooldus, et tagada ökosüsteemi toimiv taastumine ning vähendada keskkonna- ja terviseriske.

KOKKUVÕTE

Jääksoode taastamine on oluline, kuna see aitab vähendada nii kasvuhoonegaaside emissioone kui ka peenosakeste levikut õhus. Mõlemad mõjutavad negatiivselt nii keskkonda kui ka inimese tervist. Käesolevas töös käsitleti mahajäetud ja äsja taastatud freesturbaväljade peenosakeste näitel. Töö eesmärk oli hinnata peenosakeste kontsentratsioonide erinevusi mahajäetud ja taastatud freesturbaväljadel ning selgitada, kuidas jääksoo taastumisaste neid mõjutab.

Töö käigus otsiti tõestusi järgnevatele hüpoteesidele:

- Mahajäetud freesturbaväljadel on peenosakeste ($PM_{2.5}$) kontsentratsioon kõrgem kui äsja taastatud freesturbaväljal.
- Peenosakeste kontsentratsiooni ammendunud freesturbaväljadel mõjutavad kuivemad ja tuulisemad ilmastikuolud ja ala taimestatuse osakaal ning niiskustase.

Uurimisaladeks olid Lavassaare mahajäetud freesturbaväli ja äsja taastatud Ess-soo freesturbaväli. Analüüsis kasutati PurpleAir õhukvaliteedi mõõteseadmetega kogutud andmeid, mida töödeldi statistikaprogrammis R. Töös püstitatud hüpoteesid leidsid osaliselt kinnitust. Selgus, et peenosakeste kõrgemad kontsentratsioonid esinesid kuivemate ja tuulisemate ilmastikutingimuste korral ning peamiselt kevadel ja suvel. Samuti mõjutas osakeste levikut ala niiskus ja taimestatus – ilmakaartest, kus ala oli niiskem või rohkem taimestunud, levis vähem peenosakesi. Lavassaare uurimisalal avaldas peenosakeste kontsentratsioonile lisamõju ka läheduses paiknev kruusatee, mis on Eesti suurima turbakaevanduse logistika jaoks vajalik tee.

Kuigi eelduslikult pidanuks taastatud Ess-soo alal olema madalamad peenosakeste kontsentratsioonid, näitasid mediaanväärtused vastupidist tulemust. See viitab sellele, et Ess-soo taastumine ei ole olnud veel piisavalt edukas. Tulemused kinnitavad, et soode taastamine on aeglane protsess, mis sõltub mitmest tegurist, nagu piisav veetase, toitainete olemasolu ja taimestiku taastumine.

Soode taastamine on hädavajalik, kuna edukalt taastunud sood muutuvad taas süsiniku sidujateks ning aitavad vähendada nii kasvuhoonegaaside kui ka peenosakeste hulka õhus. Igal märgalal ja jääksool on oma keskkonnatingimused, mis võivad varieeruda ka ala siseselt, muutes kogu turbaala taastamise keeruliseks. Kuivendatud ja degradeerunud turbaalad on sageli suurema

tuleohuga ning põlengute korral võib õhku paiskuda kõrges kontsentratsioonis peenosakesi, mis halvendavad õhukvaliteeti ja ohustavad inimtervist. Lisaks võivad turbapõlengud levida ümbritsevatele metsaaladele ning põhjustada elupaikade kahjustumist ja elurikkuse vähenemist. Kuigi kõik taastamisprojektid ei anna kiiresti soovitud tulemusi, näitavad positiivsed näited mujalt, et järjepideval taastamisel on oluline roll keskkonna ja inimtervise kaitsel.

Comparison of Air Quality at Abandoned and Recently Restored Peat Extraction Areas Using Fine Particulate Matter as an Indicator

Merilin Lõhmus

Summary

The restoration of cutover peatlands is important because it helps reduce both greenhouse gas emissions and the spread of fine particulate matter in the air. Both have negative impacts on the environment as well as human health. This thesis examined the issue through the example of fine particulate matter on abandoned and recently restored milled peat extraction fields. The aim of the study was to assess differences in fine particulate matter concentrations between abandoned and restored milled peat fields and to explain how the degree of peatland recovery influences them.

During the study, evidence was sought for the following hypotheses:

- Fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations are higher on abandoned milled peat fields than on recently restored milled peat fields.
- Fine particulate matter concentrations on exhausted milled peat fields are influenced by drier and windier weather conditions, as well as by the proportion of vegetation cover and the moisture level of the area.

The study areas were the abandoned Lavassaare milled peat field and the recently restored Esssoo milled peat field. The analysis used data collected with PurpleAir air quality sensors, which were processed using the statistical software R. The hypotheses proposed in the study were partially confirmed. It was found that higher concentrations of fine particulate matter occurred under drier and windier weather conditions, mainly during spring and summer. Particle dispersion was also affected by the moisture level and vegetation cover of the area – fewer fine particles

spread from directions where the land was wetter or more vegetated. At the Lavassaare study site, fine particulate matter concentrations were additionally influenced by a nearby gravel road, which is required for the logistics of Estonia's largest peat extraction area.

Although the restored Ess-soo site was expected to have lower fine particulate matter concentrations, median values showed the opposite result. This suggests that the restoration of the site has not yet been sufficiently successful. The results confirm that peatland restoration is a slow process that depends on several factors, such as adequate water levels, nutrient availability, and vegetation recovery.

The restoration of peatlands is essential because successfully restored bogs once again become carbon sinks and help reduce both greenhouse gas emissions and particulate matter in the air. Each wetland and cutover peatland has its own environmental conditions, which can also vary within a site, making the restoration of entire peatland areas challenging. Drained and degraded peatlands are often more prone to wildfires, and in the event of fires, high concentrations of particulate matter can be released into the air, deteriorating air quality and posing risks to human health. In addition, peat fires may spread to surrounding forest areas, causing habitat damage and a decline in biodiversity. Although not all restoration projects yield rapid results, positive examples from elsewhere show that consistent restoration efforts play an important role in protecting the environment and human health.

Tänuavaldused

Käesoleva töö autor soovib tänada oma juhendajat Kuno Kasakut suure toetuse, abi ning mõistva suhtumise eest. Autor soovib tänada ka keskkonnatehnoloogia uurimisrühma liikmeid, kes edastasid uurimisalade andmeid ning kes õpetasid välitöödel mõõtmisi läbi viima. Lisaks soovib autor tänada oma lähedasi ja kursusekaaslasi suure toetuse eest.

Käesoleva bakalaureusetöö läbiviimist toetas Eesti Teadusagentuur (PSG714) ja Haridus- ja teadusministeerium Kestliku maakasutuse tippkeskuse (FutureScapes) kaudu.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Atmosfääriõhu kaitse seadus. Riigikogu. (2016) <https://www.riigiteataja.ee/akt/126062018026> (viimati vaadatud 10.05.2026).
- Barthelmes, A. (2023, September 11). *Peatlands around the world: Under threat almost everywhere*. Heinrich Böll Stiftung. <https://eu.boell.org/en/2023/09/11/peatlands-around-world-under-threat-almost-everywhere>
- Bessagnet, B., Allemand, N., Putaud, J.-P., Couvidat, F., André, J.-M., Simpson, D., Pisoni, E., Murphy, B. N., & Thunis, P. (2022). Emissions of carbonaceous particulate matter and ultrafine particles from vehicles—A scientific review in a cross-cutting context of air pollution and climate change. *Applied Sciences*, 12(7), 3623. <https://doi.org/10.3390/app12073623>
- Byers, N. (2016). *Plotting with openair*. Rpubs (viimati vaadatud 02.04.2026) <https://rpubs.com/natebyers/openair>
- Campbell, D. R., Lavoie, C., & Rochefort, L. (2002). Wind erosion and surface stability in abandoned milled peatlands. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(1), 85–95. <https://doi.org/10.4141/S00-089>
- Chen, S.-L., Chang, S.-W., Chen, Y.-J., & Chen, H.-L. (2021). Possible warming effect of fine particulate matter in the atmosphere. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 208. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00278-5>
- Clausnitzer, H., & Singer, M. J. (2000). Environmental influences on respirable dust production from agricultural operations in California. *Atmospheric Environment*, 34(11), 1739–1745. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00385-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00385-4).
- Cohen, J., Pfeiffer, K., & Francis, J. A. (2018). Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States. *Nature Communications*, 9(1), 869. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02992-9>

- Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe (Recast), EP, CONSIL (2024). <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj>
- Eesti Turbaliit, s.a. *Kaevandamine*. <https://turbaliit.ee/kaevandamine/> (viimati vaadatud 14.05.2026).
- Eestimaa Looduse Fond 2024. *Taastamisalad*. <https://www.elfond.ee/waterlands/taastamisalad> (viimati vaadatud 10.05.2026).
- Egawa, C., Koyama, A., & Tsuyuzaki, S. (2009). Relationships between the developments of seedbank, standing vegetation and litter in a post-mined peatland. *Plant Ecology*, 203. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9536-5>
- Energiatalgud s.a. *Peenosakesed*. <https://energiatalgud.ee/moisted/peenosakesed> (viimati vaadatud 14.05.2026).
- ERR. (2015). *Turbakaevandamisest tekkinud keskkonnakahjulike soode korrastamine vähendab kasvuhoonegaaside eraldumist*. ERR. <https://novaator.err.ee/258083/turbakaevandamisest-tekkinud-keskkonnakahjulike-soode-korrastamine-vahendab-kasvuhoonegaaside-eraldumist>
- Euroopa Liidu Nõukogu. (2025). *Õhusaaste Elis: faktid ja arvud*. (viimati vaadatud 18.03.2026) <https://www.consilium.europa.eu/et/infographics/air-pollution-in-the-eu/>
- Granath, G., Moore, P. A., Lukenbach, M. C., & Waddington, J. M. (2016). *Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration*. Scientific Reports, 6, 28498. <https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Greeley, R., & Iversen, J. D. (1985). *Wind as a Geological Process: On Earth, Mars, Venus and Titan*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511573071>
- Groeneveld, E. V. G., & Rochefort, L. (2002). Nursing plants in peatland restoration: On their potential use to alleviate frost heaving problems.
- Grosvenor, M. J., Ardiyani, V., Wooster, M. J., Gillott, S., Green, D. C., Lestari, P., & Suri, W. (2024). Catastrophic impact of extreme 2019 Indonesian peatland fires on urban air quality and health. *Communications Earth & Environment*, 5, Article 649. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01813-w>

- Ilomets, M. (2001). Mis saab jääksoodest? Mis maksab soo taastamine? *Eesti Loodus*.
http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/EL/vanaweb/0106/mati.html
- Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Teemusk, A., & Mander, Ü. (2016). Full carbon and greenhouse gas balances of fertilized and nonfertilized reed canary grass cultivations on an abandoned peat extraction area in a dry year. *GCB Bioenergy*, 8(5), 952–968. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12308>
- Karofeld, Edgar 2006. *Jääksood soodeks tagasi*. Eesti Loodus.
http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/artikkel1513_1508.html (viimati vaadatud 13.04.2026).
- Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., Martin, R., & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental Pollution*, 221, 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039>
- Keskkonnaamet. (2025). Turba tootmiselt osakeste heide välisõhku: Hindamismetoodika (lõpparuanne, versioon 1). <https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/files/documents/2025-03/V%C3%A4lis%C3%B5hu%20saasteainete%20heite%20arvutusmetoodika-turvas%20V1%2C%201%C3%B5pparuanne%202025.03.03.pdf>
- Keskkonnaministeerium. (2019). *Õhukvaliteedi piir- ja sihtväärtused, teavitamis- ja häiretasemed ning kriitilised tasemed (Lisa 1)*. Riigi Teataja. (viimati vaadatud 14.05.2026)
https://www.riigiteataja.ee/akt/1060/3201/9012/KKM_m8_lisa1.pdf
- Keskkonnaministeerium. (2019). *Õhukvaliteedi piir- ja sihtväärtused, õhukvaliteedi muud piirnormid ning õhukvaliteedi hindamispriid* (määrus nr 75). (viimati vaadatud 04.03.2026)
<https://www.riigiteataja.ee/akt/129122016044?leiaKehtiv>
- Keskkonnaportaal. (2024). *Sood*. <https://keskkonnaportaal.ee/et/sood> (viimati vaadatud 10.05.2026).
- Lappalainen, E. (1996). *Global peat resources*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/512568>
- Lavoie, C., Grosvernier, P., Girard, M., & Marcoux, K. (2003). Spontaneous revegetation of mined peatlands: An useful restoration tool? *Wetlands Ecology and Management*, 11(1), 97–107.
<https://doi.org/10.1023/A:1022069808489>

- Lee, J. C. Y., Fields, M. J., & Lundquist, J. K. (2018). Assessing variability of wind speed: Comparison and validation of 27 methodologies. *Wind Energy Science*, 3(2), 845–868. <https://doi.org/10.5194/wes-3-845-2018>
- Leibak, E. (2021, detsember). *Kui palju on Eestis soid?* Eesti Loodus, 72, 80–83.
- Little, C. M., Horton, R. M., Kopp, R. E., Oppenheimer, M., Vecchi, G. A., & Villarini, G. (2015). Joint projections of US East Coast sea level and storm surge. *Nature Climate Change*, 5(12), 1114–1120. <https://doi.org/10.1038/nclimate2801>
- Loide, T. & Suurmägi, M. 2026. *Päästjad said Parika raba suurpõlengu kontrolli alla*. Sakala, 8. mai. <https://sakala.postimees.ee/8464469/galerii-ja-video-paastjad-said-parika-raba-suurpolengu-kontrolli-alla>
- Maa-amet. (2024). *Maavaravarude koondbilanss 2023*. https://geoportaal.maaamet.ee/docs/geoloogia/koondbilanss_2023_seletuskiri.pdf
- Metsä Group. (2021). *Ecological restoration of peatlands*. <https://julkaisut.metsa.fi/wp-content/uploads/sites/2/2021/02/ecolres-peatlands-1.pdf>
- Märgalad. (2017). Elfond. (viimati vaadatud 13.04.2026) <https://elfond.ee/tegevus/margalad>
- Price, J., Rochefort, L., & Quinty, F. (1998). Energy and moisture considerations in peatlands. *Ecological Engineering*, 10(4), 293–312. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00046-9)
- PurpleAir. (2022, juuni 3) *Our Technology—General*. PurpleAir Community. (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://community.purpleair.com/t/our-technology/804>
- Pärli, M. (2019, juuni 23). *Pärnumaal Maima külas põleb 80 hektarit turbaraba*. ERR. <https://www.err.ee/1096691/parnumaal-maima-kulas-poleb-80-hektarit-turbaraba>
- Riigikogu. (2011). *Keskkonnaseadustiku üldosa seadus (KeÜS)*. Riigi Teataja. (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://www.riigiteataja.ee/akt/KeÜS> (viimati vaadatud 10.05.2026).
- Salonen, V. (1987). Relationship between the Seed Rain and the Establishment of Vegetation in Two Areas Abandoned after Peat Harvesting. *Holarctic Ecology*, 10(3), 171–174.

- Selin, P. (1999). *Turvevarojen teollinen käyttö ja suopohjien hyödyntäminen Suomessa*. [Doctoral dissertation, University of Jyväskylä]. JYX Digital Repository. https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/76785/1/Selin_Pirkko_screen.pdf
- Statistics Solutions. (s.a.). *Wilcoxon Sign Test*. (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://www.statisticssolutions.com/free-resources/directory-of-statistical-analyses/how-to-conduct-the-wilcoxon-sign-test/>
- STHDA. (s.a.) *Unpaired Two-Samples Wilcoxon Test in R*. (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://www.sthda.com/english/wiki/unpaired-two-samples-wilcoxon-test-in-r>
- Zhang, R., Sun, C., Zhu, J., Zhang, R., & Li, W. (2020). Increased European heat waves. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 7. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0110-8>
- Terviseamet. (2025). *Lisa 3. Saasteainete aastakeskmiste sisalduste modelleerimine*. https://www.terviseamet.ee/sites/default/files/documents/2025-01/Lisa_3-Saasteainete_aastakeskmiste_sisalduste_modelleerimine.pdf
- Tissari, J. M., Yli-Tuomi, T., Raunemaa, T. M., Tiitta, P. T., Nuutinen, J. P., Willman, P. K., Lehtinen, K. E. J., & Jokiniemi, J. K. (2006). Fine particle emissions from milled peat production. *Boreal Environment Research*, 11, 283–293. <https://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber11/ber11-283.pdf>
- Triisberg, T. (2014). Factors influencing the re-vegetation of abandoned extracted peatlands in Estonia (Doctoral dissertation, University of Tartu). University of Tartu Digital Archive. <https://dspace.ut.ee/items/eec9f3ed-1646-4cd3-be9d-a692d961efad>
- Tucker, W. G. (2000). Overview of PM_{2.5} sources and control strategies. *Fuel Processing Technology*, 65–66, 379–392. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00105-8)
- Tuittila, E.-S., Komulainen, V.-M., Vasander, H., & Laine, J. (1999). Restored cut-away peatland as a sink for atmospheric CO₂. *Oecologia*, 120, 563–574. <https://doi.org/10.1007/s004420050891>
- Undark. (2018). The Weight of Numbers: Air Pollution and PM_{2.5} (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://undark.org/breathtaking/>

- US EPA, O. (2016, aprill 19). *Particulate Matter (PM) Basics* [Overviews and Factsheets]. (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Wallace, L. (2023). Testing a New “Decrypted” Algorithm for Plantower Sensors Measuring PM2.5: Comparison with an Alternative Algorithm. *Algorithms*, 16(8), 392. <https://doi.org/10.3390/a16080392>
- Wallace, L., & Zhao, T. (2023). Spatial Variation of PM2.5 Indoors and Outdoors: Results from 261 Regulatory Monitors Compared to 14,000 Low-Cost Monitors in Three Western States over 4.7 Years. *Sensors*, 23(9), 4387. <https://doi.org/10.3390/s23094387>
- Wang, L., Yuan, X., Xie, Z., Wu, P., & Li, Y. (2016). Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific Reports*, 6(1), 30571. <https://doi.org/10.1038/srep30571>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
- X-GIS 2.0 [maainfo]. (s.a.). (viimati vaadatud 14.05.2026) <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>
- Yildiz, K., Okiti, I., Tamm, I., Pindus, M., Kohv, M., Matejuk, D., & Kasak, K. (2025). Ruumilise heterogeensuse ja taimestiku arengu mõjul mahajäetud turbakaevandusala süsinikubilanss. *Agricultural and Forest Meteorology*, 375, 110872. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110872>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Merilin Lõhmus,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Mahajäetud ja äsja taastatud freesturbaväljade õhukvaliteedi võrdlus peenosakeste näitel“, mille juhendajad on Kuno Kasak, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Merilin Lõhmus

10.05.2026