

Pro gradu -tutkielma

**Maastohiihdon aiheuttama ympäristön PFAS-kuor-
mitus Vuokatissa ja Lahdessa**

Salla Seger



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

12.11.2024

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Ympäristötieteen maisteriohjelma

Seger Salla Maastohiihdon aiheuttama ympäristön PFAS-
kuormitus Lahdessa ja Vuokatissa
Pro gradu tutkielma: 37 s., 2 liitettä
Työn ohjaajat: Prof. Tuula Tuhkanen ja Teemu Lemmettylä
Tarkastajat: Suvi Ruuskanen, Sami J. Taipale
Marraskuu 2024

Hakusanat: Fluoratut yhdisteet, fluorivoiteet, per- ja polyfluoratut
alkyyliyhdisteet, suksivoiteet

Per- ja polyfluoratut alkyyliyhdisteet (PFAS) on aineryhmä, johon kuuluu tuhansia kemikaaleja. PFAS-yhdisteitä on käytetty 1950-luvulta lähtien monilla eri teollisuuden aloilla sekä monissa kuluttajakäyttöön suunnatuissa tuotteissa kuten sammutusvaahdoissa, vettä ja likaa hylkivissä vaatteissa, paistinpannuissa sekä suksivoiteissa. PFAS-yhdisteiden haitallisuus perustuu erityisesti niiden pysyvyyteen ympäristössä. PFAS-yhdisteet ovat ominaisuuksiltaan biokertyviä. Ne liikkuvat ilmassa ja vedessä, jonka seurauksena ne leviävät helposti laajoille alueille. Tässä tutkimuksessa tutkittiin suksivoiteista lähtöisin olevien PFAS-yhdisteiden määrää ja laatua hiihtoladulla, ladun alaisessa maaperässä sekä ladun läheisissä pintavesissä. Tutkimus toteutettiin ottamalla lumi-, maa- ja pintavesinäytteitä Lahdessa ja Vuokatissa vuoden 2024 aikana. Lisäksi tutkittiin latukoneesta sekä fluorivoiteella voidellusta suksesta lumeen irtoavien PFAS-yhdisteiden määrää ja laatua. Näytteistä analysoitiin 17 PFAS-yhdistettä. Tutkimuksessa todettiin PFAS-yhdisteitä ladun alaisessa pintamaassa. Myös fluorivoiteella voidellusta suksesta irtosi lumeen PFAS-yhdisteitä. Helmi-maaliskuussa 2024 laduilta otetuissa luminäytteissä ei todettu PFAS-yhdisteitä, jonka perusteella voidaan todeta maaperässä todettujen pitoisuuksien kertovan historiallisesta kuormituksesta. PFAS-yhdisteitä on kertynyt pintamaahan aiempien vuosien käytön seurauksena. Yhdisteet hajoavat ympäristössä erittäin hitaasti, joten niitä on kertynyt maaperään vuosien saatossa. PFAS-yhdisteiden haitallisuuteen on reagoitu ja Kansainvälinen Hiihtoliitto on asettanut fluorivoiteiden käyttökiellon Kansainvälisen Hiihtoliiton alaiseen kilpailutoimintaan syksystä 2023 lähtien. Suomen Hiihtoliiton alaisessa kilpailutoiminnassa fluorivoiteiden käyttö on kiellettyä syksystä 2024 lähtien. Se että laduilta otetuista luminäytteistä ei todettu analysoituja PFAS-yhdisteitä määritysrajaa ylittävinä pitoisuuksina, kertoo fluoripitoisten voiteiden käytön olleen talven aikana vähäistä. Myös fluorivoiteiden määrä markkinoilla ja voiteiden koostumus on muuttunut fluorivoiteiden käyttökiellon myötä.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Mathematics and Science
Department of Biological and Environmental Science
Master's Degree Programme in Environmental Science

Seeger Salla Environmental PFAS load caused by cross-country
skiing in Lahti and Vuokatti

MSci Thesis 37 p., 2 appendices

Supervisors: Prof. Tuula Tuhkanen ja Teemu Lemmettylä

Tarkastajat: Suvi Ruuskanen, Sami J. Taipale

November 2024

Keywords: fluorinated compounds, fluor waxes, per- and polyfluoroalkyl
substances, ski wax

Per- and polyfluorinated alkyl compounds (PFAS) are a group of substances that include thousands of chemicals. Since the 1950s, PFAS has been used in many different industries and in many consumer products such as fire-fighting foams, water and dirt-repellent clothing, frying pans and ski lotions. The harmfulness of PFASs is based in particular on their persistence in the environment. PFAS compounds have bioaccumulative properties. They migrate in air and water, as a result of which they easily spread over large areas. This study examined the amount and quality of PFASs from ski waxes on the ski trail, in the soil under the trail, and in the surface waters near the trail. The study was carried out by taking samples from snow, soil and surface water in Lahti and Vuokatti during year 2024. Also the number and quality of PFASs released from the ski-track machine and ski with fluorinated skiwax into the snow was studied. 17 PFAS compounds were analysed from the samples. The study identified PFAS compounds in the subsoil under the skitrack. PFAS compounds were also released into the snow from the skiing with fluorine skiwax skis. Snow samples taken from the trails between February and March 2024 did not show any PFAS compounds, based on which the concentrations found in the soil indicate historical load. PFASs have accumulated in topsoil as a result of previous years of use. The compounds decompose very slowly in the environment, so they have been able to accumulate in the soil over the years. There has been a reaction to the harmfulness of PFAS compounds and the International Ski Federation has imposed a ban on the use of fluorine waxes for competitive activities under the International Ski Federation since autumn 2023. In competition activities under the Finnish Ski Association, the use of fluorine waxes is prohibited as of autumn 2024. The fact that no PFASs were detected from snow samples taken from the trails at concentrations above the limit of determination indicates that the use of fluorine-containing creams has been low during the winter. The amount of fluorine waxes on the market and the composition of the ski waxes have also changed with the ban on the use of fluorine waxes.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	PFAS-yhdisteet.....	2
1.2	PFAS-yhdisteiden käyttäytyminen ympäristössä.....	5
1.3	PFAS-yhdisteet suksivoiteissa	6
1.4	PFAS-yhdisteitä koskeva lainsäädäntö	9
2	AINEISTO JA MENETELMÄT	12
2.1	Tutkimuspaikka ja aika.....	12
2.2	Tutkimusmenetelmät	14
2.2.1	Luminäytteenotto.....	15
2.2.2	Maanäytteenotto.....	17
2.2.3	Vesinäytteenotto.....	18
3	TULOKSET	19
3.1	Luminäytteet	19
3.2	Maanäytteet	20
3.3	Vesinäytteet	22
4	TULOSTEN TARKASTELU	23
	LIITE 1. NÄYTTEENOTTOPISTEIDEN SIJAINTI LAHTI	31
	LIITE 2. NÄYTTEENOTTOPISTEIDEN SIJAINTI VUOKATTI	32

SANASTO JA LYHENTEET

Sanasto

Kokoomanäyte Näyte, jossa on yhdistetty useita osanäytteitä

Lyhenteet

PFAS	Per- ja polyfluorialkyyliyhdisteet
PFC	Lyhennettä on aiemmin käytetty tarkoittamaan PFAS- tai PFAA-yhdisteitä
PFCA-yhdisteet	Perfluorikarboksyylihapot
PFDA	Perfluoridekaanihappo
PFOA	Perfluorioktaanihappo
PFOS	Perfluorioktaanisulfonihappo
PSFA	Perfluorisulfonihapot

1 JOHDANTO

Per- ja polyfluoratut alkyyliyhdisteet (PFAS) on aineryhmä, johon kuuluu tuhansia kemikaaleja. PFAS-yhdisteet ovat hiilivetyketjuja, joissa osa tai kaikki vetyatomit on korvattu fluorilla (Terveiden ja hyvinvoinninlaitos 2024). PFAS-yhdisteitä on käytetty 1950-luvulta lähtien monilla eri teollisuuden aloilla sekä monissa kuluttajakäyttöön suunnatuissa tuotteissa kuten sammutusvaahdoissa, vettä ja likaa hylkivissä vaatteissa sekä paistinpannuissa (Suomen ympäristökeskus 2023). PFAS:n suurimmat ympäristöpitoisuudet liittyvät yleisesti palontorjuntatoimintaan, koska PFAS-yhdisteitä on käytetty laajasti palontorjunta-aineissa, erityisesti vaahtoja muodostavassa vesikalvossa (Reinikainen ym. 2022). PFAS-yhdisteitä käytetään runsaasti niiden ominaisuuksien takia, PFAS-yhdisteet kestävät korkeita lämpötiloja ja hylkivät vettä, rasvaa ja likaa. Yhdisteiden kulutusta kestävät ominaisuudet ovat myös syy yhdisteiden haitallisuuteen. PFAS-yhdisteitä käytetään kuluttajatuotteissa kestävien ominaisuuksien takia, mutta yhdiste säilyttää kestävänsä rakenteensa myös päätyessä luontoon. PFAS-yhdisteet hajoavat ympäristössä erittäin hitaasti. Hitaan hajoamisen vuoksi, yhdisteitä on kutsuttu myös ”ikuisuuskemikaaleiksi” (Pelch ym. 2019).

PFAS-yhdisteiden laajan käytön seurauksena niitä päätyy jatkuvasti ympäristöön kaikkialla maailmassa. Koska aine on ympäristössä hyvin pysyvä, aiheuttaa yhdisteiden jatkuvat päästöt niiden kertymistä ympäristöön. PFAS-yhdisteet rikastuvat ravintoketjussa, jonka seurauksena ihmiset ja eliöt altistuvat jatkuvasti yhä suuremmille PFAS-pitoisuuksille (Terveiden ja hyvinvoinninlaitos 2024).

PFAS-yhdisteitä käytetään myös osassa suksivoiteissa. PFAS-yhdisteitä on käytetty fluorihiihliipohjaisissa suksivoiteissa 1980-luvulta lähtien (Grønnestad 2021). Suksivoiteiden PFAS-yhdisteistä puhuttaessa käytetään usein termiä *fluoriyhdisteet* tai *fluorivoiteet*. Fluoriyhdisteitä käytetään suksivoiteissa parantamaan suksen luisto-ominaisuuksia erityisesti kostealla kelillä. Fluori estää likaa tarttumasta suksen pohjaan, jonka ansiosta se parantaa luistoa vähentämällä suksen ja lumen väliin syntyvää kitkaa. Hiihdettäessä suksien pohjassa oleva voide kuluu lumeen ja kulkeutuu latujen sulamisvesien mukana lähiympäristöön. Suksivoiteissa käytetyistä aineista, erityisesti fluori ja PFAS-yhdisteet (per- ja polyfluoratut alkyyliyhdisteet) voivat aiheuttaa luontoon päätyessään ympäristöriskejä sekä hengitettynä esimerkiksi suksien voitelutilanteessa terveyshaittoja. Kansainvälinen hiihtoliitto ja Kansainvälinen ampumahiihtoliitto ovat asettaneet fluorivoiteiden käyttökiellon hiihtokaudelle 2023–2024 tuotteiden terveys- ja ympäristöriskien vuoksi. Suomessa kansallisella tasolla fluorikielto tuli voimaan kaudelle 2024–2025. (Suomen Hiihtoliitto, ei pvm.)

Tässä tutkimuksessa ei tutkita fluorivoiteiden ihmiselle aiheuttamia suoria terveysvaikutuksia tai ympäristömyrkyllisyyttä, vaan tutkimus keskittyy

fluorivoiteiden käytön seurauksena ympäristöön päätyviin PFAS-yhdisteisiin ja niiden käyttäytymiseen ympäristössä. Suksivoiteet voidaan jakaa hiilivety- ja fuorihiihlopohjaisiin voiteisiin. Fluorihiihlopohjaiset voiteet ovat hiilivety-pohjaisia voiteita kalliimpia ja tästä syystä suosittumia aktiivi- ja kilpahiittäjien keskuudessa (Fang ym. 2020). Harrastehiihtäjät käyttävät suksissaan pääasiassa hiilivety-pohjaisia voiteita. Tämä tutkimus keskittyy vain suksivoiteissa olevien PFAS-yhdisteiden ympäristövaikutuksiin. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää (1) kuinka paljon fluorivoiteella voidelluista suksista irtoaa lumeen PFAS-yhdisteitä hiihtämisen seurauksena, (2) kuinka paljon yhden talven aikana ladun lumeen kertyy PFAS-yhdisteitä, (3) mihin PFAS-yhdisteet päätyvät lumen sulamisvesien mukana sekä (4) ympäristön PFAS-pitoisuutta aiemman fluorivoiteiden käytön seurauksena valituissa tutkimuskohteissa. Tutkimuksen hypoteesi on, että hiihtämisen seurauksena irtoaa lumeen PFAS-yhdisteitä, jotka kulkeutuvat latujen sulamisvesien mukana pintamaahan ladun läheisyyteen.

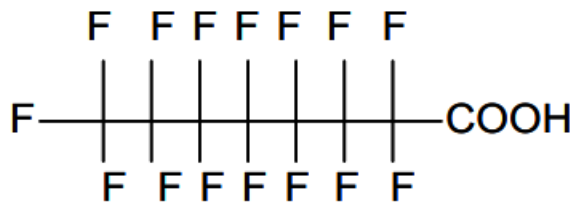
1.1 PFAS-yhdisteet

Per- ja polyfluoratut alkyylilyhdisteet (PFAS) on aineryhmä, johon kuuluu tuhansia kemikaaleja (Reinikainen ym. 2024). PFAS ryhmään kuuluvien kemikaalien ominaisuudet ja rakenne ei ole yhtenäinen, vaan ne vaihtelevat aineiden välillä (Kempisty ja Racz 2021). Kaikki PFAS-yhdisteet sisältävät hiili-fluorisidoksen, joka on orgaanisen kemian kestävimpiä kemiallisia sidoksia (European chemicals agency, ei pvm.). Tällaisen sidoksen sisältävät yhdisteet kestävät hyvin kulutusta ja hajoavat erittäin hitaasti ympäristössä. PFAS-yhdisteet ovat erittäin pysyviä ympäristössä pääasiassa niiden vahvan ja stabiilin hiili- ja fluoriatomin välisen kemiallisen sidoksen ansiosta (United states environmental protection agency 2017). Yhdisteiden ympäristöpysyvyys tarkoittaa, että vaikka kaikki PFAS-yhdisteiden valmistus ja käyttö lopetettaisiin, ihmiset ja eläimet altistuisivat jo nyt ympäristössä oleville PFAS-yhdisteille usean sukupolven ajan (European chemicals agency, ei pvm.). PFAS-yhdisteille ei ole luonnollisia lähteitä, vaan kaikki luonnossa esiintyvät PFAS-yhdisteet ovat ihmisen valmistamia (European chemicals agency, ei pvm.).

Per- ja polyfluorialkyylilyhdisteet ovat yhdisteitä, joissa joko kaikki hiileen sitoutuneet vedyt on korvattu fluorilla (perfluorialkyylilyhdisteet), tai osittain (poly-) fluorattuja yhdisteitä, jotka sisältävät vähintään yhden perfluoratun hiilen (-CF₃ tai -CF₂-) (SYKE, Perkola ym. 2023). PFAS-yhdisteet rakentuvat alifaattisesta hiilirungosta sekä funktionaalisesta ryhmästä (Swedish chemicals agency 2024).

Polyfluorialkyylilyhdisteet hajoavat ympäristössä muun muassa perfluorialkyylilyhdisteiksi (Swedish chemicals agency 2024). Erilaisia osittain tai kokonaan fluorattuja PFAS-yhdisteitä on tuhansia, joista vain osa tunnetaan. PFAS-yhdisteet ovat orgaanisia yhdisteitä. Ne ovat synteettisiä eli ihmisen valmistamia, eikä niitä esiinny luontaisesti ympäristössä (Swedish chemicals agency 2024). Ominaisuuksiltaan PFAS-yhdisteet ovat pysyviä, myrkyllisiä, biokertyviä, vesiliukoisia ja ympäristössä helposti kulkeutuvia (Suomen

ympäristökeskus 2019). PFAS-yhdisteiden käyttäytymiseen ympäristössä vaikuttavat yhdisteen hiiliketjun pituus ja fluorausaste sekä hiiliketjuun liittynyt funktionaalinen ryhmä (Suomen ympäristökeskus, 2019). Perfluoriyhdisteiden kokonaan fluorattu hiiliketju on rakenteeltaan hyvin vahva, eikä se hajoa ympäristössä biologisesti, kemiallisesti tai fysikaalisesti (Suomen ympäristökeskus, 2019, s. 9). Lisäksi perfluorattu hiiliketju hylkii sekä vettä että rasvaa (Suomen ympäristökeskus, 2019, s. 9).



Kuva 1. Perfluoro-oktaanihappo (PFOA) kemiallinen rakenne C₈H_F15O₂ (European chemical agency, 2013).

Kun tutkimus PFAS-yhdisteiden haitallisuudesta on lisääntynyt ja niiden käyttöä on alettu rajoittaa, on pitkäketjuisten PFAS-yhdisteiden kuten PFOS:n, PFOA:n (kuva 1) ja niiden johdannaisten käyttöä teollisuudessa ja kuluttajatuotteissa on korvattu asteittain lyhyempiketjuisilla PFAS-yhdisteillä ja fluorittomilla yhdisteillä (OECD 2013). Korvaavia yhdisteitä on pidetty ominaisuuksiltaan yleisesti pitkäketjuisia yhdisteitä vähemmän haitallisina (Buck ym. 2011). Korvaavat PFAS-yhdisteet sisältävät useimmiten lyhyempiä perfluorattuja hiiliketjuja, niiden perfluoratut hajoamistuotteet ovat vähemmän kertyviä, mutta yhtä pysyviä ja vähintään yhtä kulkeutuvia. Lisäksi joissakin tapauksissa lyhyketjuisia PFAS-yhdisteitä joudutaan käyttämään suurempia määriä, jonka seurauksena päästöt ovat suuremmat verrattuna pitkäketjuisiin PFAS-yhdisteisiin (Suomen ympäristökeskus 2023).

Suksivoiteet voidaan jakaa hiilivety- ja fuorohiilipohjaisiin voiteisiin. Suksivoiteet koostuvat pääasiassa normaaleista parafiineista. Fluoratut suksivoiteet sisältävät myös puolifluorattuja n-alkaaneja (SFA) tai perfluorihiiilivetyjä (PFC), viime aikoina voiteissa on havaittu myös PFCA-yhdisteitä, luultavasti fluorattujen raaka-aineiden valmistusprosessin sivutuotteina (Plassmann ja Berger 2013).

Jauheen muodossa olevat voiteet sisältävät pääasiassa per-fluorattuja alkaaneja. Näiden tärkeimpien fuorinoitujen ainesosien lisäksi on havaittu vaihtelevan hiiliketjun pituisia (4–22 hiiltä) perfluorialkyylikarbonsyylisäilyttäviä happoja (PFCA). PFCA-yhdisteiden oletetaan olevan valmistuksen jäännösepäpuhtauksia, eikä niillä ole varsinaista tehtävää voiteessa (Fang 2020).

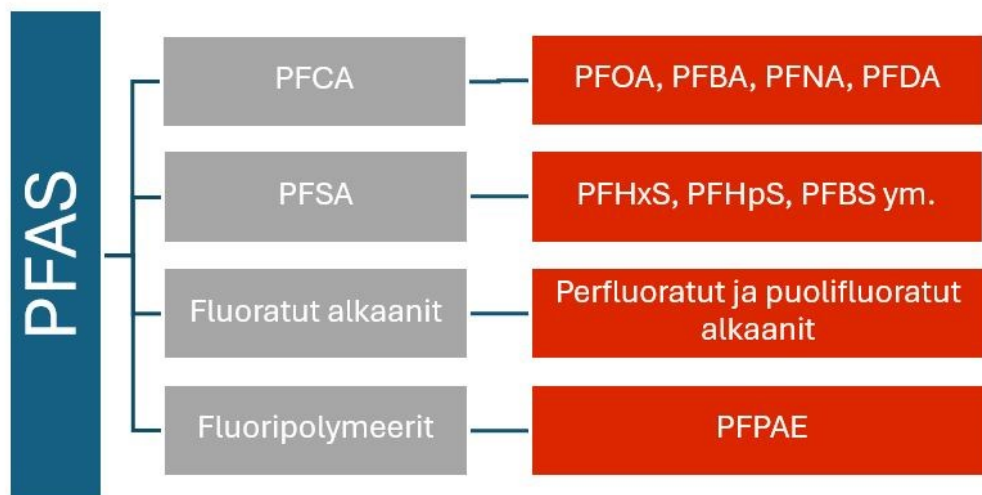
Plassmann ja Berger (2013) tutkimuksessa esitetään eri valmistajien suksivoiteiden sisältämiä PFCA ja PFOS pitoisuuksia (taulukko 1). Voiteissa esiintyy suurina pitoisuuksina erityisesti lyhyitä hiiliketjuja C₆-C₁₄.

Taulukko 1. Suksivoiteiden sisältämät PFCA ja PFOS pitoisuudet. (Plassmann ja Berger, 2013, s.4)

C6-C22 PFCA ja PFOS pitoisuudet suksivoiteissa ja raaka-aineissa (RM) ng g ⁻¹																
Suksi voide	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
Swix LF	9	9	64	119	7	5	2	1	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Toko LF	6	3	15	4	39	6	10	4	8	2	2	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SkiGo LF	8	5	12	4	11	5	5	0,3	0,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SkiGo HF	520	269	237	177	458	226	188	122	98	71	47	32	25	10	10	6
RM SFA	182	62	224	133	543	127	380	29	7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RM PFC	5890	957	7460	947	5830	771	3750	664	2170	108	390	12	86	4	18	n.d.

Fang ym. (2020) on tutkinut, onko markkinoilla yleisesti saatavilla olevien fuorohiilipohjaisten suksivoiteiden koostumuksessa ja siten PFAS-pitoisuudessa tapahtunut viime aikoina muutoksia. Tutkimuksessa ostettiin 11 eri suksivoidetta norjalaisesta urheilukaupasta, voiteista otettiin näytteet, jotka tutkittiin Tukholman yliopistossa. Vaikka suksivoiteiden valmistajat ovat ilmoittaneet toimittajille vaihtaneensa koostumuksen lyhyempiin perfluorialkyyliketjuihin perustuviin kemikaaleihin, tutkimuksen analyttiset tulokset osoittivat, että näin ei ole tapahtunut. PFOA-tasot yhdeksässä yhdestätoista analysoidusta hiihtovoidetuotteesta ylittivät EU:n raja-arvot 25 ng g⁻¹, jotka tulivat voimaan 4. heinäkuuta 2020.

Suksivoiteissa tyypillisimmin esiintyvät PFAS-aineet on esitetty kuvassa 2 (Heggelund 2021).



Kuva 2. Suksivoiteissa tyypillisimmin esiintyvät PFAS-aineet. (Heggelund 2021.)

1.2 PFAS-yhdisteiden käyttäytyminen ympäristössä

PFAS-kemikaalit eivät ole biohajoavia vaan ne kertyvät luontoon. Ne liikkuvat ilmassa ja vedessä, jonka seurauksena ne leviävät helposti laajoille alueille. PFAS-kemikaalit ovat ominaisuuksiltaan biokertyviä. Näistä syistä niitä esiintyy kaikkialla ympäristössä ja niiden pitoisuus kasvaa ajan myötä. (RISE Research Institutes of Sweden ei pvm.)

PFAS-yhdisteiden fysikaalis-kemialliset ominaisuudet niiden käyttäytyminen ympäristössä riippuvat niiden perfluorihiliketjujen pituudesta ja funktionaalisesta ryhmästä (taulukko 2) (Ullberg 2015). Lisäksi PFAS-yhdisteiden jakautumiseen maaperässä vaikuttaa saatavilla oleva orgaanisen aineen määrä (Milinovic ym. 2015).

Taulukko 2. PFAS-yhdisteiden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia.

Yhdiste	Orgaanisen hiilen jakaantumiskerroin (Koc)	Vesiliukoisuus 25°C (mg/L)	Henryn lain vakio (atm·m ³ /mol)	Höyrynpaine 25°C (mm Hg)	Sulamispiste	Kiehumispiste
PFOA	2,06	9,5x10 ³	ei mitattavissa	0,525	54	192
PFOS	2,57	680	ei mitattavissa	0,002	ei tiedossa	258–260

PFAS-yhdisteisiin sisältyvät PFAA-yhdisteet (Perfluorialkyylihapot), joissa hiileen sitoutuneet vedyt on korvattu kokonaan fluorilla (Perkola ym. 2023). Kokonaan fluoratun hiiliketjun ansiosta PFAA-yhdisteet ovat vettä ja rasvaa hylkiviä ja rakenteeltaan hyvin vahvoja. PFAA-yhdisteet ovat vahvoja happoja, jotka eivät hajoa ympäristössä biologisesti, kemiallisesti tai fysikaalisesti. Ne esiintyvät ympäristössä tyypillisellä pH-alueella (pH 5–9) ionisoituneena, minkä seurauksena ne liukenevat veteen mutta eivät haihdu (Suomen ympäristökeskus 2019, s. 11). Monet PFAA-yhdisteet ovat biokertyviä ja osa niistä rikastuu ravintoketjussa (OECD 2002). Hiiliketjun pituus ja yhdisteen funktionaalinen ryhmä vaikuttavat PFAA-yhdisteiden ominaisuuksiin siten, että lyhytketjuiset ovat hyvin vesiliukoisia, kun taas pitkäketjuiset pidättyvät enemmän kiintoaineeseen ja kertyvät herkemmin eliöihin (Conder ym. 2008).

PFAS-yhdisteiden ympäristökäyttämisen arvioiminen on haastavaa muihin orgaanisiin yhdisteisiin verrattuna, johtuen niiden poikkeuksellisista ominaisuuksista. Ympäristöolosuhteet, kuten maaperän ja veden geokemia, vaikuttavat merkittävästi PFAS-yhdisteiden käyttäytymiseen (Hedlund 2016). Maaperässä PFAS-yhdisteiden kulkeutumista ja pysyvyyttä säätelevät muun muassa maaperän orgaanisen aineksen määrä, mineraalikoostumus, maapartikkeleiden pintavaraukset ja pH, jotka voivat vaihdella pienelläkin alueella (Helsing ym. 2016).

Vesifaasissa perfluoro-oktaanihappo (PFOA) on hydrolyyttisesti stabiili, eikä se hajoa luonnon vesissä. PFOA ei ole myöskään helposti biohajoava. Tutkimuksissa on todettu, että PFOA on ympäristön kannalta pysyvä, sen osoittavat yhdisteen suuri pysyvyys eri väliaineissa, kuten lietteessä, sedimentissä ja vedessä. On muun muassa tutkittu PFOA:n anaerobista biohajoavuutta teollisuusalueen sedimentissä. Tutkimuksessa ei hajonnut merkittävää määrää alkuperäisestä PFOA:sta 259 päivän aikana. (European chemical agency 2013.)

PFAS-yhdisteiden kulkeutuminen ilmassa ja pohjavedessä on merkittävä lähde sen esiintymiselle maaperässä. Erityisesti kaatopaikkojen kohonneita PFAS-pitoisuuksia sisältävät suotovedet ovat maaperän PFAS-yhdisteiden suuri lähde. PFAS-yhdisteitä siirtyy maaperään myös ilmasta. Erityisesti sateen aiheuttama laskeuma on merkittävä PFAS-yhdisteiden poistumareitti ilmakehästä. Laskeuman seurauksena PFAS-yhdisteet päätyvät pintamaan lisäksi pintaveteen ja kasvillisuuteen. (Wang ym. 2023.)

1.3 PFAS-yhdisteet suksivoiteissa

Hiihdossa käytettävät fluoripitoiset suksivoiteet sisältävät PFAS-yhdisteitä. Voiteen tarkoitus on edistää suksen luisto-ominaisuuksia vähentämällä suksen ja lumen välistä kitkaa. PFAS-yhdisteiden vettä hylkivä ominaisuus aiheuttaa otollisen alhaisen pintajännityksen sukselle lumella (Heggelund 2021). Korkeasti fluorattujen voiteiden avulla suksen suorituskyky nousee keskimäärin 4 % (Breitschädel ym. 2014). Pääasiassa suksivoiteissa esiintyvät PFAS-yhdisteet ovat perfluorialkaaneja sekä puolifluorattuja alkaaneita (Heggelund 2021). Suksivoiteita tuotetaan noin 120 tonnia vuodessa (Heggelund 2021). Ennen fluorivoidekieltoa vuonna 2021 tuotettavista suksivoiteista noin 70 % oli fluorittomia voiteita ja noin 30 % fluoripitoisia voiteita (Heggelund 2021).

PFAS-yhdisteiden esiintymistä hiihtoladuilla ja niiden ympäristössä on tutkittu kansainvälisesti, sekä muutamassa kotimaisessa tutkimuksessa. Kaikissa tutkimuksissa, joihin tämän työn aikana on tutustuttu, on löydetty tutkitulta alueelta hiihtämisen seurauksena ympäristöön päätyneitä PFAS-yhdisteitä. Nilivaara ym. (2021) tutkimuksessa on tutkittu hiihtokeskusten alueen lumessa esiintyviä haitta-aineita. Tutkimus keskittyy suurelta osin lumessa oleviin latukoneista ja moottorikelkoista lähtöisin oleviin haitta-aineisiin, mutta tutkimuksessa on tutkittu myös fluoriyhdisteiden esiintymistä hiihtoladun luminäytteissä. Tutkimuksessa selvitettiin Levin hiihtokeskuksen huleveden ja huleveden kertymäalueen lumessa esiintyviä haitta-aineiden pitoisuuksia. Tutkimuksessa otettiin kevättalvella 2019 luminäytteet kolmelta eri syvyydeltä, noin 5 senttimetrin paksuisista kerroksista, jotka yhdistettiin kymmenen litran kokoomanäytteeksi. Näytteistä analysoitiin muun muassa PFAA-, PAH-, PBDE- ja HBCD-yhdisteet ja öljyhiilivetyjen pitoisuudet. Tutkimuksessa havaittiin PFAA-yhdisteitä kaikissa otetuissa luminäytteissä. Tutkimuksessa todetut PFAS-yhdisteet ja niiden pitoisuudet on esitetty taulukossa 3. Lisäksi hiihtoladun näytteissä havaittiin erityisesti pitkäketjuisia perfluorikarboksyylihappoja (C8-

C18), α -HBCD-yhdistettä, PBDE-yhdisteitä (209-BDE), PAH-yhdisteitä, hiilivetyjen summapitoisuus C10-C40 (ladun luminäytteessä havaittiin poikkeuksellinen pitkäketjuinen hiilivetyprofiili C20-C49). (Nilivaara ym. 2021.)

Taulukko 3. Nilivaara ym. (2019) tutkimuksessa Hiihtokeskuksen hulevesien ja luminäytteiden haitta-aineet havaitut PFAS-yhdisteet ja niiden pitoisuudet.

Yhdiste	Todettu pitoisuus (ng/l)	Parametri	Näytteenottoaika
PFAA	21–38	hulevesi	hulevesien purkupiste
PFAA	32	lumi	kelkkareitti
PFAA	170	lumi	hiihtolatu
PFOS	0,49	lumi	kelkkareitti

Ensimmäinen pohjoismaiden ulkopuolella toteutettu tutkimus suksivoiteiden PFAS-yhdisteiden esiintymisestä ympäristössä on Amerikassa toteutettu tutkimus *Ski waxes use contributes to environmental contamination by per- and poly-fluoroalkyl substances* (Carlson ja Tupper 2020). Tutkimuksessa tutkittiin lumesta ja pintamaasta löytyviä haitta-ainemääriä ladun lähtöalueelta sekä ladulta etäämmältä lähtöalueesta. Tutkimuksessa kerättiin lumi-, vesi- ja maanäytteitä useasta paikasta latureitin varrelta. Lumi-, valumavesi- ja kaivovesinäytteet kerättiin tammikuussa 2020 muutama tunti alueella järjestetyn hiihtokilpailun jälkeen. Kaksi luminäytettä otettiin kilpailun lähtöviivan läheisyydestä ja yksi luminäyte ladulta 3,9 kilometrin etäisyydeltä lähtöviivasta. Luminäytteet otettiin 3–4 senttimetrin syvyydeltä suoraan näytepulloihin, ilman välineitä. Maaperänäytteet kerättiin toukokuussa 2020. Maanäytteet otettiin lähtöviivan kohdalta pintamaasta, noin kolmen senttimetrin syvyydeltä. Lisäksi otettiin kontrollinäyte latua korkeammalla sijaitsevasta maasta, jonne ei pitäisi kulkeutua ladulta haitta-aineita valuman seurauksena. Näytteistä tutkittiin 24 PFAS analyyyttiä. Carlson ja Tupper (2020) tutkimuksessa todettiin PFAS-kontaminaatiota kaikissa luminäytteissä, joissakin maanäytteissä sekä kaivovesinäytteessä (taulukko 4). Lähtöalueen luminäytteissä todettiin myös PFOS-esiintymiä. Kauempaa lähtöviivasta otetussa luminäytteessä pitoisuudet olivat alhaisempia kuin lähtöviivalta otetuissa näytteissä todetut pitoisuudet. (Carlson ja Tupper 2020.)

Taulukko 4. Carlson ja Tupper (2020) tutkimuksessa *Ski wax use contributes to environmental contamination by per- and polyfluoroalkyl substances* otetuissa näytteissä todetut yhdisteet ja niiden määrä.

Yhdiste	Pitoisuus (ng/l)	Parametri	Näytteenottoaikka
PFBA	97–311	Lumi	Lähtöalue
PFBA	4,8	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
PFBS	2,3	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
PFPeA	56–92	Lumi	Lähtöalue
PFPeA	5,7	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
PFHxA	255–427	Lumi	Lähtöalue
PFHxA	6,8	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
PFHpA	171–208	Lumi	Lähtöalue
PFHpA	4,5	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
PFOA	332–561	Lumi	Lähtöalue
PFOA	6,6	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
6:2 FTS	98–297	Lumi	Lähtöalue
PFOS	2,2	Lumi	Lähtöalue
PFOS	2,8 (ng/g)	Maa	Kontrollimaanäyte
PFOS	4,0	Vesi	Hiihtoalueen kaivo
PFNA	130–211	Lumi	Lähtöalue
PFDA	580–1 180	Lumi	Lähtöalue
PFDA	1,87	Lumi	Latu 3,9 km lähtöalueelta eteenpäin
PFDA	1,75 (ng/g)	Maa	Lähtöalue
8:2 FTS	4,1–7,2	Lumi	Lähtöalue
PFUnA	435–606	Lumi	Lähtöalue
PFDoA	1 530–1 800	Lumi	Lähtöalue
PFDoA	3,7	Lumi	Latu 3,9 km lähtöalueelta eteenpäin
PFDoA	4,1	Lumi	Vertailuluminäyte
PFDoA	2,8 (ng/g)	Maa	Lähtöalue
PFTTrA	944–1 000	Lumi	Lähtöalue
PFTTrA	2,4	Lumi	Latu 3,9 km lähtöalueelta eteenpäin
PFTTrA	3,6 (ng/g)	Maa	Lähtöalue
PFTeA	2 760–4 210	Lumi	Lähtöalue
PFTeA	12,9	Lumi	Latu 3,9 km lähtöalueelta eteenpäin
PFTeA	10,4	Lumi	Vertailunäyte
PFTeA	1,9–3,9 (ng/g)	Maa	Lähtöalue

Plassmann ja Berger (2013) ovat tutkineet fluorattujen suksivoiteiden käyttöä perfluorialkyylidikarbonsyilihappojen (PFCA) suorana syöttöreitteinä ympäristöön. Ruotsissa hiihtoalueelta otettiin luminäytteet hiihtokilpailun jälkeen ja vastaavasti maanäytteet lumen sulamisen jälkeen. Sekä lumi- että maanäytteissä havaittiin C6-22 PFCA:ta. PFCA pitoisuudet lumessa sekä maassa pienenevät edetäessä latua lähtöalueelta eteenpäin.

Vogel ym. (2024) ovat todenneet 2020-luvun suksivoiteiden keskimääräisen fluori/PFAS-pitoisuuden olevan huomattavasti korkeampi kuin 1980-luvun suksivoiteissa. Voiteita on pyritty jatkuvasti kehittämään paremmiksi ja tämän tuloksen perusteella PFAS-yhdisteiden on todettu toimivan hyvin suksivoiteissa. Kaikki tutkimuksessa (Vogel ym. 2024) analysoidut suksivoiteet sisälsivät PFAS-yhdisteitä.

1.4 PFAS-yhdisteitä koskeva lainsäädäntö

PFAS-yhdisteitä koskevia rajoituksia tiukennetaan jatkuvasti, kun tutkimustieto niiden ominaisuuksista, käyttäytymisestä ja vaikutuksista ympäristössä lisääntyy. Helmikuussa 2023 Euroopan kemikaalivirasto (ECHA) julkaisi asiakirjan PFAS-yhdisteitä koskeville lisärajoituksille. PFAS-yhdisteet ovat joko itse hyvin pysyviä tai hajoavat ympäristössä hyvin pysyviksi PFAS-yhdisteiksi. Näin ollen, jos PFAS-yhdisteiden päästöjä ei saada minimoitua, ihmiset ja muut eliöt altistuvat asteittain kasvaville PFAS-pitoisuuksille. Tällaisessa tapauksessa altistukset ovat käytännössä peruuttamattomia, koska PFAS-yhdisteiden poistaminen ympäristöstä on teknisesti äärimmäisen vaikeaa, jos se on lainkaan mahdollista. ECHA:n helmikuussa 2023 esittämässä lisärajoituksissa halutaan estää rajoitettujen PFAS-yhdisteiden korvaaminen toisilla PFAS-yhdisteillä sekä sisällyttää rajoituksiin myös vielä tuntemattomat PFAS-yhdisteet. (ECHA, 2023.)

Euroopan Unioni (myöhemmin EU) säätelee PFAS-yhdisteitä muun muassa REACH-asetuksella sekä direktiiveillä (taulukko 5). Tukholman yleissopimuksen velvoitteet on sisällytetty Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukseen (EU) 2019/1021 pysyvistä orgaanisista yhdisteistä. Asetus on sellaisenaan voimassa Suomessa ja kaikissa EU-maissa. (Suomen ympäristökeskus 2023.)

Taulukko 5. PFAS-yhdisteet, joita on rajoitettu tai joiden rajoitus on valmisteltavana EU:ssa. (Lähde: Suomen ympäristökeskus. PFAS-yhdisteet ympäristössä - tietopaketti. 2023.)

PFAS-yhdiste	REACH-asetus tai muu EU:n rajoitus ja sen hyväksymis- tai voimaantulovuosi* tai vuosi, jolloin lisätty Tukholman sopimukseen
PFOS ja sen johdannaiset	EU 2006/2008 Tukholman POP-sopimus 2009
PFOA ja sen suolat	EU 2017/2020 Tukholman POP-sopimus 2019
C ₉ -C ₁₄ PFCA-yhdisteet ja niiden prekursorit	EU 2021/2023
PFHxS ja sen suolat	Tukholman POP-sopimus 2022
Koko PFAS-aineryhmä	EU, valmisteilla
PFAS-yhdisteet sammutusvaahdoissa	EU, valmisteilla
PFHxA	EU, valmisteilla

*rajoitusta on voitu laajentaa myöhemmin

Euroopan Unionissa PFOS-yhdisteiden käyttöä on rajattu monilla eri säädöksillä 2000-luvun alkupuolelta lähtien (kuva 2). Uuden POP-asetuksen

(2019/1021) mukaan PFOS-painoprosentti aineessa tai yhdisteessä on oltava alle 0,1 paino-%, jotta tuotetta on sallittua käyttää tai valmistaa EU-alueella. PFOS:a sisältävien sammutusvaahtojen käyttö on kielletty vuonna 2011. PFOS-yhdisteiden valmistus ja saattaminen markkinoille on nykyisin sallittu ainoastaan sumunestoaineissa, joita käytetään kromi-(VI) -kovakromauksessa suljetuissa järjestelmissä. EU:n ulkopuolella PFOS-yhdisteitä voi vielä käyttää Tukholman sopimuksen poikkeuksen nojalla muihinkin käyttötarkoituksiin. (Suomen ympäristökeskus 2023. s, 12.)

POP-asetus on voimassa kaikissa EU-maissa. Asetuksella on tarkoitus suojella ihmisten terveyttä ja ympäristöä POP-yhdisteiltä.



Kuva 2. PFOS-yhdisteitä koskeva EU-lainsäädäntö.

PFOS-yhdisteitä sisältyvät myös EU:n vesiputedirektiiviin (VPD, 2000/60/EY, 2013/39/EY), joka on Suomessa toimeenpantu valtioneuvoston asetuksella vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista (1022/2006). PFOS on toistaiseksi ainoa vesiputedirektiiviin sisältyvä PFAS-yhdiste, mutta EU-komissio on ehdottanut 26.10.2022 myös muita PFAS-yhdisteitä vesiputedirektiivin EU:n prioriteettiaineiksi (COM (2022) 540).

PFOS:n jälkeen POP-asetukseen ja Tukholman yleissopimukseen (2009) on lisätty PFOA ja perfluoroheksaanisulfonihappo (PFHxS) vuonna 2022. Elokuussa 2021 komissio päätti noin kahdensadan C9–C14 PFCA -yhdisteen käytön rajoittamisesta REACH-kemikaalilainsäädännöllä EU:n alueella 25.2.2023 lähtien. Rajoitus koskee pitkäketjuisia PFNA-, PFDA-, PFUnDA-, PFDoDA-, PFTTrDA- ja PFTTeDA-yhdisteitä sekä niiden prekursoreita. Vaikka kyseisiä yhdisteitä ei nykyään juurikaan käytetä, niitä esiintyy epäpuhtauksina lyhytketjuisten PFAS:ien valmistuksessa (ECHA 2018).

EU:ssa on rajoitettu PFOA-fluoriyhdisteen, sen suolojen ja samankaltaisten aineiden käyttöä. Samankaltaisilla aineilla tarkoitetaan aineita, jotka voivat hajota rajoituksen kohteena olevaksi aineeksi. Perfluorioktaanihapon (PFOA) valmistaminen sekä tuominen sellaisenaan käytettävänä aineena markkinoille on kielletty EU:ssa 4.7.2020. EU:n asetuksessa 2017/1000 asetetaan toisen tuotteen ainesosana olevalle perfluorioktaanihapolle (PFOA) raja-arvo 25 ppb. Käyttöä on rajoitettu terveys- ja ympäristöriskien takia. Rajoitus koskee aineiden ja niitä sisältävien seosten ja esineiden valmistusta, myyntiä ja maahantuontia Euroopan unioniin. Rajoitus koskee suksivoiteiden ja -pulvereiden lisäksi muitakin tuoteryhmiä, kuten vaatteita ja pesuaineita. (Valtioneuvosto, 2020).

PFOS:lle on asetettu hetkellisen pitoisuuden ympäristölaatu­normit (MAC-EQS) sisävesille (36 µg/l) sekä merivedelle (7,2 µg/l) (direktiivi 2013/39/EU). Vuotuinen veden keskiarvopitoisuuden ympäristölaatu­normi (AA-EQS) PFOS:lle on sisävesissä 0,65 ng/l ja merivesissä 0,13 ng/l, mutta näitä direktiivin 2013/39/EU AA-EQS-arvoja ei ole asetettu kansallisesti asetukseen 1022/2006. Muita EU:ssa sekä Suomen lainsäädännössä PFAS-yhdisteille asetettuja raja-arvoja on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. EU:ssa ja Suomessa PFAS-yhdisteille asetettuja raja-arvoja.

Säädös	Yhdiste	Raja-arvot (µg/l)	Sovellus kohde
Juomavesidi­ rektiivi 1352/2015	PFAS-aineiden summa	0,10	Juomavesi
EU 2013/39	PFOS	6,5x10 ⁻⁴ (Vuosikeskiarvo)	Sisämaan pintave­ det
EU 2013/39	PFOS	36 (Sallittu enimmäispitoisuus)	Sisämaan pintave­ det
POP-asetus (Liite 1)	PFOS		
SGI 2015	PFOS	0,045	Pohjavesi (oh­ jearvo pohjaveden suojelu) Ruotsissa
Säädös	Yhdiste	Raja-arvot yhdisteessä	
POP-asetus (Liite 1)	PFOS ja sen johdannaiset	10 mg/kg 0,1 paino-%	
POP-asetus (Liite 1)	PFOA ja sa­ mankaltaiset yhdisteet	0,025 mg/kg	
POP-asetus (Liite 1)	PFHxS ja sa­ mankaltaiset yhdisteet	0,025 mg/kg	
SGI 2055	PFOS	3 µg/kg	Ohjearvo herkkä maankäyttö esim. asuinrakennusten piha-alueet
SGI 2015	PFOS	20 µg/kg	Ohjearvo, epä­ herkkä maankäyttö (esim. teollisuusalu­ eet)

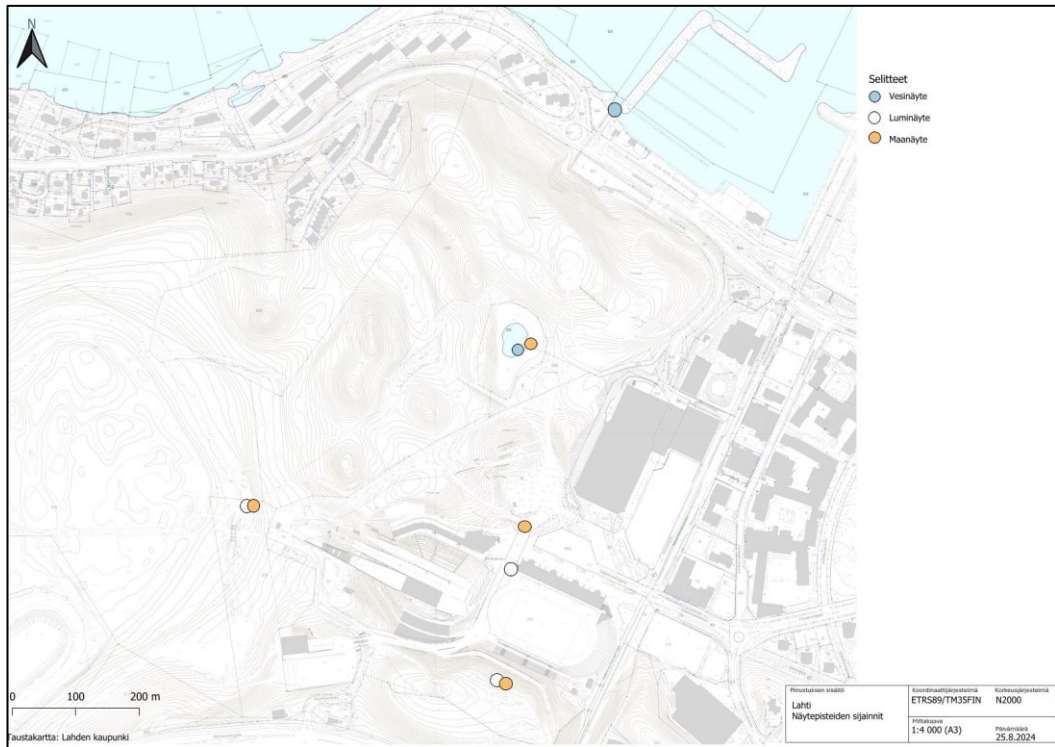
2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkimuspaikka ja aika

Näytteenotto toteutettiin Lahdessa sekä Vuokatissa sijaitsevilla laduilla ja niiden ympäristössä vuonna 2024. Kohteet valikoituivat tutkimuksen näytteenottopaikoiksi niiden pitkän hiihtohistorian ja vuosittaisen kansainvälisen sekä kansallisen hiihtokilpailutoiminnan perusteella. Taustatietojen perusteella näissä paikoissa arvioitiin olevan Suomen suurimpia fluorivoidekuormituksia.

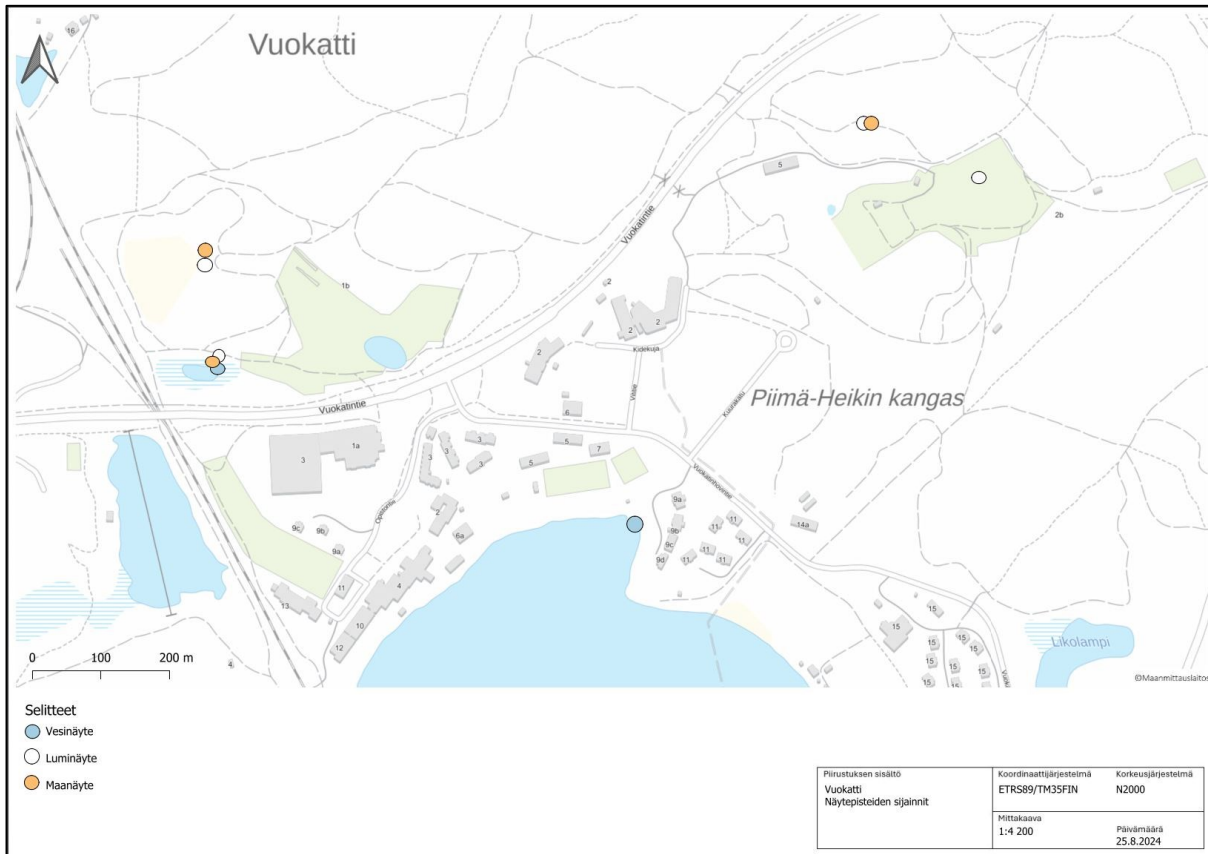
Näytteenotto toteutettiin Lahden Salpausselällä sekä Vuokatissa, Vuokatin Urheiluopiston laduilla. Luminäytteenotto toteutettiin helmi-maaliskuun vaihteessa 2024, kun päivän lämpötila oli noussut 0 celsius-asteen ylä puolelle päivittäin viikon ajan ja lumet alkoivat sulaa auringon sekä ilman lämpötilan vaikutuksesta. Näytteenotto toteutettiin loppupalvella, jotta ladun näyte edustaa mahdollisimman tarkasti koko yhden talven aikaista kuormitusta. Luminäytteet otettiin Lahdesta 27.2.2024 ja Vuokatista 2.3.2024. Sulan maan aikaan toteutettu maa- ja vesinäytteenotto toteutettiin Lahdessa 13.7.2024 ja Vuokatissa 14.7.2024. Näytteenottopisteet on esitetty liitteiden 1 ja 2 kartoissa.

Näytteenotto ajoitettiin toteutettavaksi Lahdessa järjestettävän Finlandia-hiihto -tapahtuman jälkeen. Finlandia-hiihdossa oli voimassa fluorivoiteiden käyttökielto, mutta tapahtumassa ei järjestetty fluoritestausta. Tapahtumaan osallistui noin 3200 hiihtäjää. Lisäksi laduilla on hiihdetty talven 2023-2024 aikana kansallisia hiihtokilpailuja, joissa ei ole ollut voimassa fluorivoiteiden käyttökieltoa. Lahdesta otettiin yhteensä kolme luminäytettä, joista kaksi otettiin ladulta ja yksi vertailunäyte luonnonlumesta (kuva 3). Vertailunäytteinä toimivat luonnonluminäytteet on otettu latua korkeammasta kohdasta, ne kertovat alueen muusta PFAS-kuormituksesta, esimerkiksi ilman mukana kulkeutuneesta kuormituksesta. Vertailunäytteet eivät sisällä hiihtämisestä tai latujen sulamisvesistä aiheutuneita PFAS-yhdisteitä



Kuva 3. Lahden näytteenottopisteiden sijainnit.

Vuokatissa on hiihdetty talven 2023-2024 aikana ennen näytteenoton ajankohtaa muun muassa veteraanien MM-kilpailut sekä hiihdon Suomen Cup -osakilpailu. Vuokatista otettiin yhteensä kuusi luminäytettä; vertailunäyte luonnonlumesta, luminäyte säilölumikasasta ja neljä näytettä eri kohdista ladulta (kuva 4). Säilölumikasasta on edellisenä talvena lumitykin avulla tehtyä lunta, joka on säilötty purulla peitettynä kesän yli. Lumen tykytyksessä käytettävä vesi otetaan säilölumikasan eteläpuolella sijaitsevasta järvestä (Särkinen).



Kuva 4. Vuokatin näytteenottopisteiden sijainnit.

Latunäytteiden ja vertailunäytteiden lisäksi Vuokatissa tutkittiin latukoneesta sekä fluoripulverilla voidellusta suksesta lumeen irtoavia PFAS-yhdisteitä ja niiden määrää.

Näytteenotossa noudatettiin ALS-laboratorion laatimaa ohjeistusta PFAS-näytteenottoon (Sampling Recommendations for PFAS to Maximize Data Quality).

2.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa toteutettu näytteenotto aloitettiin laatimalla näytteenottosuunnitelma. Näytteenottosuunnitelma laadittiin tutkimuksen tavoitteen (tutkimuskysymykset) sekä saatavilla olevan kirjallisuuden ja aiemman tutkimustiedon pohjalta. Näytteenottosuunnitelman sisälsi käytettävissä olevan budjetin perusteella toteutettavan näytemäärän, näytteiden jakautumisen lumi-, maa- ja vesinäytteiden välillä, näytteenottopisteiden sijainnit, näytteenottovälineet sekä näytteenotto-ohjeistuksen. Näytteenotto toteutettiin laaditun näytteenottosuunnitelman mukaisesti. Kaikki tutkimuksessa otetut näytteet toimitettiin analysoitavaksi ALS Finland ympäristölaboratorioon, jossa niistä analysoitiin 17 PFAS-yhdisteen analyysipaketti (taulukko 7).

Taulukko 7. Näytteistä analysoidut PFAS-yhdisteet.

Analyytti	CAS-numero	Raportointiraja
PFHpA (perfluoriheptaanihappo)	375-85-9	0.0005 mg/kg k.a
PFBA (perfluoributaanihappo)	375-22-4	0.0005 mg/kg k.a
PFPeA (perfluoripentaanihappo)	2706-90-3	0.0005 mg/kg k.a
PFHxA (perfluoriheksaanihappo)	307-24-4	0.0005 mg/kg k.a
PFOA (perfluorioktaanihappo)	335-67-1	0.0005 mg/kg k.a
PFNA (perfluorinonaanihappo)	375-95-1	0.0005 mg/kg k.a
PFDA (perfluoridekaanihappo)	335-76-2	0.0005 mg/kg k.a
PFUnDA (perfluoriundekaanihappo)		0.0005 mg/kg k.a
PFDoDA (perfluoridodekaanihappo)		0.0005 mg/kg k.a
PFBS (perfluoributaanisulfonihappo)	375-73-5	0.0005 mg/kg k.a
PFHxS (perfluoriheksaanisulfonihappo)	355-46-4	0.0005 mg/kg k.a
PFHpS (perfluoriheptaanisulfonihappo)	375-92-8	0.0005 mg/kg k.a
PFOS (perfluorioktaanisulfonihappo)	1763-23-1	0.0005 mg/kg k.a
PFDS (perfluoridekaanisulfonihappo)	335-77-3	0.0005 mg/kg k.a
6:2 FTS (6:2 fluoritelomeerisulfonaatti)	27,619-97-2	0.0005 mg/kg k.a
8:2 FTS (8:2 fluoritelomeerisulfonaatti)	39,108-34-4	0.0005 mg/kg k.a
PFOSA (perfluorioktaanisulfonamidi)	754-91-6	0.0005 mg/kg k.a

Laboratorion käyttämät analyysimenetelmät on esitetty taulukossa 8. Perfluoratut ja bromatut yhdisteet on määritetty nestekromatografilla ja MS/MS-detektioinnilla.

Taulukko 8. Laboratorion näyteenalyyseissä käytetyt analyysimenetelmät eri matriiseille.

Näytematriisi	Analyysimenetelmä
Vesi (sulatettu lumi)	W-PFCLMS02
Pintavesi	W-PFCLMS02
Maa	S-PFCLMS02

2.2.1 Luminäytteenotto

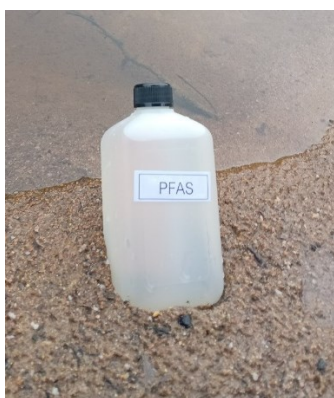
Luminäytteenotto toteutettiin Suomen ympäristökeskuksen laatiman luminäytteenotto ohjeistuksen mukaisesti. Näytteenottimena käytettiin puhdasta vesinäytteenottoon tarkoitettua bailer-näytteenotinta, joka oli sahattu alaosasta avonaiseksi putkeksi (kuva 5). Putken ulkopuolelle tehtiin mitta-asteikko, lumen paksuuden mittaamiseksi. Ladulla lumi oli niin kovaa, ettei

näytettä saatu otettua näytteenottoputkella. Ladulta näyte otettiin lapiolla ja apuna lumen irroittamisessa käytettiin puhdasta puukkoa.



Kuva 5. Luminäytteenottimena käytettiin bailer-noudinta, jonka toinen pää oli leikattu avoimeksi putkeksi.

Luminäytteenotto toteutettiin kokoomanäytteenä. Lunta kerättiin isompaan astiaan, jossa ne sulatettiin yhden vuorokauden ajan jääkaappilämpötilassa vedeksi. Vesi siirrettiin laboratoriosta saatuihin PFAS-analyysille tarkoitettuihin näytepulloihin (kuva 6) ja toimitettiin pullottamista seuraavana päivänä laboratorioon. Näytteet analysoitiin ALS Finland laboratoriossa. Ennen laboratorioon toimittamista, näytteet säilytettiin alle +4 °C lämpötilassa valolta suojattuna.



Kuva 6. Vesi- ja luminäytteille käytettiin laboratoriosta saatuja PFAS-näytteenottoon tarkoitettuja 250 ml muovipulloja.

Vuokatissa tutkittiin latunäytteiden lisäksi latukoneesta ja fluorivoiteella voidellusta suksesta lumeen irtoavia PFAS-yhdisteitä. Näytteenotto toteutettiin ajamalla latukoneella latu luonnonlumelle maastoon, jossa ei ole aiemmin

samana vuonna ollut latua. Lumesta otettiin näyte, jonka avulla tutkittiin latukoneesta lumeen mahdollisesti irtoavien PFAS-yhdisteiden määrä. Näytteenoton jälkeen samalla ladulla hiihrettiin kahden metrin pituisella matkalla edestakaisin yhteensä 100 kertaa. Hiihtämisessä käytettiin suksia, jotka oli voideltu Rex TK-50 fluoripulverilla. Näyte otettiin hiihdetystä kohdasta pintalumesta ja näytteen avulla saadaan tieto, kuinka paljon voidellusta suksesta irtoaa tutkittuja PFAS-yhdisteitä lumeen hiihtämisen ensimmäisen 200 metrin aikana.

Latukoneen ajaman ladun näyte sekä fluorisuksella hiihdetty näyte otettiin pintalumesta 0-0,5 cm paksuudelta. Muut ladulta otetut näytteet pyrittiin ottamaan koko lumen paksuudelta, mutta jäisen lumen johdosta, näytettä ei saatu ulotettua ladun pohjaan saakka.

2.2.2 Maanäytteenotto

Maanäytteenotossa hyödynnettiin Suomen ympäristökeskuksen Hyvät käytännöt pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksissa -ohjeistusta (2014). Näytteet otettiin kokoomanäytteenä pintamaasta 0 - 1,5 cm syvyydeltä n. 0,5 m² kokoiselta alueelta. Pintamaata kerättiin ämpäriin, jossa se sekoitettiin ja otettiin näytepussiin arviolta 600g suuruinen näyte. Näytepussina käytettiin kaasutiivistä Rilsan-pussia, joka suljettiin tiiviisti nippusiteellä (kuva 7). Näytteenotto välineenä käytettiin metallista lapiota. Näytteenottovälineet puhdistettiin mekaanisesti jokaisen näytepisteen välillä. Näytteet säilytettiin näytteenoton ajan valolta suojassa kylmäkallein varustetussa kylmälaukussa. Ennen laboratorioon toimittamista, näytteitä säilytettiin jääkaapissa.



Kuva 7. Maanäytteet otettiin kaasutiiviisiin pusseihin.

Maanäytteitä otettiin yhteensä seitsemän kappaletta. Näytteenottopisteet on esitetty liitteiden 1 ja 2 kartoissa. Maanäytteet otettiin samoista paikoista, joista oli otettu talvella luminäytteet. Lahden hiihtosilta on asfalttipäällysteinen, joten maanäytteen näytteenottopaikka siirrettiin otettavaksi sillan jälkeisestä soramaasta. Etäisyys Lahdessa hiihtosillan lumi- ja maanäytteen näytteenottopaikkojen välillä on noin 50 metriä. Vuokatissa ensilumenlatu kulkee rullahiihtoradalla, joka on asfalttipintainen. Ensilumenladun maanäyte,

joka oli tarkoitus ottaa samasta paikasta, kuin luminäyte, otettiin otettiin samasta kohdasta, mutta ladun keskikohdan sijaan asfaltin reunasta pintamaasta. Pintamaa alueella on hiekkaa. Etäisyys Vuokatin latunäytteen lumi- ja maanäytteen näytteenottopisteiden välillä on noin yksi metri.

2.2.3 Vesinäytteenotto

Vesinäytteenotto toteutettiin pintavesistä. Sekä Lahdesta että Vuokatista otettiin kaksi pintavesinäytettä. Näytteet otettiin laboratoriosta saatuihin PFAS-analyysipulloihin. Näytteet otettiin ottamalla vesi suoraan näytepulloon 30 cm syvyydeltä. Näytteet säilytettiin valolta suojattuna, näytteenoton ajan kylmäkallein varustetussa kylmälaukussa ja ennen laboratorioon toimittamista jääkaapissa alle +4 asteen lämpötilassa. Vesinäytteet toimitettiin ALS Finland laboratorioon analysoitavaksi.

Sekä Lahdessa että Vuokatissa otettiin yksi vesinäyte ladun välittömässä läheisyydessä olevasta kosteikosta/lammesta, johon ladun sulamisvesiä päätyy (kuvat 8 ja 9). Toinen vesinäyte otettiin etäämmällä (Lahti 250m, Vuokatti 500m) ladusta sijaitsevan järven rannasta pintavedestä. Näytteenottopisteet on esitetty liitteiden 1 ja 2 kartoissa.



Kuva 8. Vuokatin vesinäytteen näytteenottoaika. Kosteikko ladun vieressä.



Kuva 9. Lahti vesinäytteen näytteenottoaika. Lampi ladun läheisyydessä.

3 TULOKSET

3.1 Luminäytteet

Tutkimuksessa otetuista luminäytteistä analysoitiin ALS Finland Oy laboratoriossa PFAS-analyysipaketti, joka sisälsi 17 PFAS-yhdistettä (taulukko 7). Luonnonluminäytteissä (vertailunäytteet), ladulta otetuissa luminäytteissä sekä latukoneen ajon jälkeisessä näytteessä ei todettu laboratorion analyysimenetelmän määrittämisen ylittäviä pitoisuuksia analysoitua aineita. Fluorivoiteella voidellusta suksella irtosi lumeen kahta analysoitua PFAS-yhdistettä yli analyysimenetelmän määrittämisen (taulukko 9). Kaikki luminäytteiden analyysitulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 9. Fluorivoiteella suksella hiihdetyistä lumesta todetut yhdisteet ja niiden pitoisuudet.

Parametri	Tulos	Yksikkö	Mittausepävarmuus
PFOA (perfluorioktaani-happo)	0,0304	µg/l	± 0,0091
PFDA (perfluoridekaani-happo)	0,012	µg/l	± 0,005

Todetut pitoisuudet ovat pieniä. Lumessa tai maaperässä esiintyville PFAS-yhdisteille ei ole asetettu suoraa raja-arvoa. Esimerkiksi Euroopan Unionin

asetuksessa EU 2013/39 on asetettu PFOS suurimmaksi sallituksi pitoisuudeksi sisämaan pintavesissä 36 µg/l. Lumesta löytyneet pitoisuudet ovat huomattavasti asetettua arvoa alhaisempia.

3.2 Maanäytteet

Tutkimuksessa otetuista maanäytteistä analysoitiin ALS Finland Oy laboratoriossa PFAS-analyysipaketti, joka sisälsi 17 PFAS-yhdistettä (taulukko 7). Kolmessa maanäytteessä todettiin analysoituja PFAS-yhdisteitä laboratorion analyysimenetelmän määrittämissä ylittävänä pitoisuutena (taulukko 10). Muissa näytteissä ei todettu laboratorion analyysimenetelmän määrittämissä ylittäviä pitoisuuksia tutkittuja aineita.

Taulukko 10. Lumi- ja maanäytteiden analyysitulokset.

Analyyssi	Mittausepävarmuus	Näyte	Lahti luonnonlumi (vertailunäyte)	Lahti latu stadion/hiihtosilta	Lahti latu ensilumenlatu	Lahti ladun ympäröimä suppa (kosteikko)	Vuokatti luonnonlumi (vertailunäyte)	Vuokatti säilölumikasa	Vuokatti latukone	Vuokatti fluorisuksi	Vuokatti latu (lammen vierestä) *luminäyte ladulta, maanäyte lammen pohjasta	Vuokatti latu (ensilumenlatu ladun notkelma)
PFOS (perfluorioktaani sulfonihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.0100	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFOA (perfluorioktaani happo)	µg/l	±0,0091 Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	0.0304	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFDA (perfluoridekaani happo)	µg/l	±0,005 Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	0.012	<0.010	<0.010
		±0,0002 Maa	<0.00050	0.00060	0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	0.00120
PFBA (perfluoributaani happo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFPeA (perfluoripentaa nihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00150	<0.00100	-	-	-	<0.00050	<0.00150
PFHxA (perfluorihexaani happo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFHpA (perfluoriheptaa nihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFNA (perfluorinonaani happo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFUnDA (perfluorundeka anihappo)	µg/l	±0,0002 Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	0.00066	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFDoDA (perfluoridodeka anihappo)	µg/l	±0,0006 Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	0.00216	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFBS (perfluoributaani sulfonihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFHxS (perfluorihexaani nisulfonihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFHpS (perfluoriheptaa nisulfonihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
PFDS (perfluoridekaani sulfonihappo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
FOSA (perfluorioktaani sulfonamidi)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
6:2 FTS (6:2 fluoritelomeerisu lfoni-happo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050
8:2 FTS (8:2 fluoritelomeerisu lfoni-happo)	µg/l	Lumi	<0.010	<0.010	<0.010	-	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
		Maa	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	-	-	-	<0.00050	<0.00050

Todetut pitoisuudet ovat pieniä. Lumessa tai maaperässä esiintyville PFAS-yhdisteille ei ole asetettu suoria raja-arvoja. Esimerkiksi Euroopan Unionin asetuksessa EU 2013/39 on asetettu PFOS suurimmaksi sallituksi pitoisuudeksi sisämaan pintavesissä 36 µg/l.

3.3 Vesinäytteet

Tutkimuksessa otetuista vesinäytteistä analysoitiin ALS Finland Oy laboratoriossa PFAS-analyysipaketti, joka sisälsi 17 PFAS-yhdistettä (taulukko 7). Vesinäytteistä ei todettu analyysimenetelmän määrittämissä määritysrajan ylittäviä pitoisuuksia tutkittuja yhdisteitä (taulukko 11).

Taulukko 11. Vesinäytteiden analyysitulokset.

Analyyysi	Näyte	Vuokatti järvi	Vuokatti kos-teikko	Lahti lampi	Lahti järvi
PFOS (perfluorioktaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFOA (perfluorioktaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFDA (perfluoridekaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFBA (perfluoributaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFPeA (perfluoripentaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFHxA (perfluoriheksaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFHpA (perfluoriheptaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFNA (perfluorinonaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFOA (perfluorioktaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFUnDA (perfluoriundekaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFDODA (perfluoridodekaanihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFBS (perfluoributaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFHxS (perfluoriheksaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFHpS (perfluoriheptaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFDS (perfluoridekaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
FOSA (perfluorioktaanisulfonamidi)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
6:2 FTS (6:2 fluoritelomeerisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
8:2 FTS (8:2 fluoritelomeerisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFPeS (perfluoripentaanisulfonihappo)	µg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
PFDODS (perfluoridodekaanisulfonihappo)	µg/l	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025

4 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimus toteutettiin hiihtokaudella 2023–2024, jolloin fluorikielto oli ensimmäistä vuotta voimassa kansainvälisen hiihtoliiton alaisissa kilpailuissa. Fluorivoiteiden käyttö oli kuitenkin edelleen Suomessa sallittua kansallisissa hiihtokilpailuissa.

Lahdessa sekä Vuokatissa otettiin vertailunäytteet luonnonlumesta ja kesällä pintamaasta, ladun läheisyydestä mutta latua korkeammalla sijaitsevasta kohdasta, johon ei kulkeudu PFAS-yhdisteitä hiihtämisen tai latujen sulamisvesien seurauksena. Tutkimuksessa otettujen vertailunäytteiden tulosten perusteella voidaan todeta, ettei analysoituja PFAS-yhdisteitä kulkeudu tutkimuksen kohteena oleville alueille ilman välityksellä esimerkiksi liiketeestä tai teollisuudesta. Vertailunäytteiden avulla voidaan todeta näytteissä esiintyvien pitoisuuksien olevan alueen käytöstä johtuvia eikä kaukokulkeumaa. Latukoneesta ei irronnut lumeen ladun ajamisen seurauksena PFAS-yhdisteitä, joten jos latua on käytetty sen käyttötarkoituksen mukaisesti vain hiihtämiseen, ladun lumesta löytyvät PFAS-yhdisteet ovat lähtöisin suksissa käytetyistä fluoripohjaisista voiteista.

Tutkimuksessa todettiin, fluorivoiteella voidellusta suksesta irtoavan lumeen ensimmäisen hiihdetyn sadan metrin aikana 0,034 µg/l perfluorioktaanihappoa (PFOA) ja 0,012 µg/l perfluoridekaanihappoa (PFDA). Testituksessa käytettiin voiteena Rex:in fluoripitoista voidetta. Kysyimme voidevalmistaja Rexin edustajalta, tietoa voiteen sisältämistä yhdisteistä, mutta heillä ei ollut antaa tietoa voiteen tarkemmasta koostumuksesta. Jos voiteessa käytetyt aineet ja yhdisteet olisivat tiedossa, voisi saadun tuloksen perusteella päätellä, mitkä voiteessa käytetyistä aineista irtoavat käytön aikana lumeen ja missä suhteessa verrattuna niiden määrään voiteen koostumuksessa.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että fluorattujen voiteiden käyttö tutkimuksen kohteena olevissa paikoissa oli vähäistä talvella 2023–2024, sillä laduilta kerätyissä luminäytteissä ei todettu laboratorion analyysimenetelmän määrittämissä ylittäviä pitoisuuksia tutkittuja 17:ää PFAS-yhdistettä. Tulos oli tutkimukselle asetetun hypoteesin mukainen, sillä kuntohiihtäjät suosivat fluorattujen voiteiden sijaan hinnaltaan edullisempia, fluorittomia voiteita ja kansainvälisissä kilpailuissa oli jo voimassa Kansainvälisen hiihtoliiton (FIS) asettama fluoripitoisten voiteiden käyttökielto.

Carlson ja Tupper 2020 tutkimuksessa "Ski wax use contributes to environmental contamination by per- and polyfluoroalkyl substances" todettiin PFAS-yhdisteitä kaikissa tutkimuksessa otetuista luminäytteistä sekä osassa maa- ja vesinäytteistä. Tutkimuksessa luminäytteet otettiin alueella järjestetyn hiihtokilpailun jälkeen. Lähtöalueen luminäytteissä todettiin suurimmat PFAS-pitoisuudet ja pitoisuudet laskivat latua lähtöalueesta eteenpäin siirryttäessä. Vastaava tulos on saatu Plassmann ja Berger (2013) tutkimuksessa. Carlsonin ja Tupperin tutkimuksessa (2020) todettiin kilpailun lähtöviivalta otetussa

luminäytteessä PFOA ja PFDA pitoisuus, kuten tämänkin tutkimuksen luminäytteessä. Lisäksi Carlson ja Tupper tutkimuksessa lähtöalueelta otetussa näytteessä todettiin 11 muuta PFAS-yhdistettä. Aiemmat tutkimukset on toteutettu ennen Kansainvälisen hiihtoliiton asettamaa fluorivoiteiden käyttökieltoa. Kyseisessä tutkimuksessa fluoripitoisilla voiteilla voideltujen suksien määrä on ollut suuri ja todennäköisesti joukossa on ollut useita eri suksivoidevalmistajien valmistamia tuotteita, joka aiheuttaa useiden eri yhdisteiden löytymisen luminäytteistä.

Tässä tutkimuksessa Lahden hiihtosillalta otetusta maanäytteestä todettiin kolmea eri PFAS-aineisiin sisältyvää yhdistettä (PFDA, PFUnDA, PFDoDA). Hiihtosilta sijaitsee kansallisten ja kansainvälisten hiihtokilpailuiden kilpailureitin alkupäässä noin sadan metrin etäisyydellä lähtöalueesta. Kilpailuladun alussa voidetta on suksen pohjassa runsaammin, kun etäämmällä lähtöalueesta, sillä voide ei ole vielä kulunut pois suksen pohjasta. Tästä syystä tutkimuksissa todetaan korkeimpia PFAS-pitoisuuksia lumessa hiihtoladun alussa kuin etäämmällä lähtöalueesta. Vaikka hiihtosillan luminäytteestä ei löytynyt analysoituja PFAS-yhdisteitä, hiihtosillan jälkeisestä pintamaasta todettiin PFAS-yhdisteitä. Löytyneet yhdisteet kertovat suksivoiteiden aiheuttamasta pitkän aikavälin kuormituksesta latujen alueella. Lisäksi voidevalmistajien välillä voi olla eroja fluorivoiteiden sisältämissä ainesosissa ja voiteissa käytetyt yhdisteet voivat olla vaihtuneet vuosien aikana tehdyn kehitystyön seurauksena. Müller ym. (2023) tutkimuksessa on todettu PFAS-profiilin vaihtelevan eri suksivoiteiden välillä. Tästä johtuen, Lahden hiihtosillan pintamaasta todettiin eri PFAS-yhdisteitä, kuin fluorivoidellulla suksella hiihdetystä luminäytteestä.

Tulokset ovat osin yhtäläisiä Norjassa toteutetun tutkimuksen (Grønnestad ym. 2019) kanssa. Sekä tässä, että norjalaisessa tutkimuksessa hiihtoalueen maanäytteissä todettiin PFDA pitoisuuksia. Pitoisuus on alhainen verrattuna muihin vastaaviin tutkimuksiin hiihtolatujen alueilla. Esimerkiksi Oslolla sijaitsevalla hiihtoalueella on todettu vuonna 2016 maaperän PFAS-pitoisuus 10,3 ng/g.

Tässä tutkimuksessa ja Carlson ja Tupper (2020) tutkimuksessa hiihtoalueen maaperässä todettujen PFAS-yhdisteiden määrät ovat keskenään samaa suuruusluokkaa (taulukko 12).

Taulukko 12. Tässä tutkimuksessa maaperästä todettujen PFAS-pitoisuuksien vertailu Carlson ja Tupper (2020) tutkimuksessa saatuihin tuloksiin. (Mikäli yhdiste on analysoitu, mutta se ei ole ylittänyt analyysin määrittämissä rajaa merkintä <)

	Tämän tutkimuksen tulokset (ng/l)	Carlson & Tupper 2020 tulokset (ng/l)
PFDA	0,5–1,2	1,75
PFUnDA	0,66	<
PFDoDA	2,16	2,82

Maanäytteissä todetut PFAS-yhdisteet kertovat hiihtämisen pitkällä ajanjaksolla ympäristölle aiheuttamasta PFAS-kuormituksesta. Tutkimuksessa todettiin, ettei latukoneella ajaminen aiheuta PFAS-päästöjä lumeen eikä alueella ole vertailunäytteiden perusteella ilmajäljiteistä PFAS-kuormitusta. Reitti, jota latu kulkee, on sulan maan aikaan Lahdessa sora- ja purupäälysteinen ja Vuokatissa asfalttipäälysteinen ulkoilureitti. Lahdessa alueella kuljetaan sulan maan aikaan polkupyörällä ja kävellen ja Vuokatissa lisäksi rullasuksilla. Vettä hylkivissä vaatteissa käytetään PFAS-yhdisteitä mutta ei ole tiedossa, käytetäänkö yhdisteitä myös kenkien ja polkupyörän renkaiden valmistuksessa, jolloin yhdisteitä voisi irrota pintamaahan myös alueen kesäkäytön seurauksena.

Tutkimuksessa ladun alaisesta pintamaasta todetut PFAS-pitoisuudet ovat pieniä, eivätkä ole lähellä ympäristössä esiintyville PFAS-yhdisteille asetettuja raja-arvoja. Hiihtoladuilla otetuissa luminäytteissä ei todettu laboratorion analyysimenetelmän ylittäviä pitoisuuksia analysoituja PFAS-yhdisteitä. Tulos kertoo fluoripitoisten suksivoiteiden käytön vähäisyydestä talvella 2023–2024. Tulokseen vaikuttaa myös saatavilla olevien fluorivoiteiden määrän väheneminen fluorivoiteiden käyttökiellon seurauksena. Voidevalmistajat ovat vähentäneet ja lopettaneet fluorivoiteiden valmistamista ja myyntiä ja tilalle on kehitetty entistä parempia fluorittomia voiteita. Fluorivoiteiden käyttökiellon voimaantumisen seurauksena, suksivoidevalmistajat ovat kehittäneet uusia tuotteita korvaamaan aiempia fluoripitoisia voiteita. Esimerkiksi ruotsalaisessa tutkimuksessa on kehitetty biopohjaisia suksivoiteita, jotka sisältävät vain luonnosta saatavia ainesosia (RISE Report 2024). Fluorivoidekielto koskee kilpailutoimintaa, fluorivoiteiden käyttö on siis edelleen sallittua kilpailutoiminnan ulkopuolella. Harrastehiihtäjät useimmin kuitenkin suosivat edullisempia hiilivetyypohjaisia voiteita kalliimpien fluorivoiteiden sijaan (Fang ym. 2020).

Tutkimus tuo lisää tietoa Suomessa toistaiseksi vain vähän tutkittuun aiheeseen. Fluorivoiteiden käyttökiellon seurauksena, hiihtämisen aiheuttamien luontoon päätyvien PFAS-yhdisteiden määrä pienenee. Suksivoiteen koostumuksesta riippumatta, voidetta irtoaa hiihdettäessä suksen pohjasta lumeen ja päätyy lumen sulamisen seurauksena ympäristöön. Vaikka lumeen irtoavat määrät kerta-annoksina ovat pieniä, tämäkin tutkimus osoittaa, yhdisteitä kertyvän ajan kuluessa hiihtoladun maastoon. Lisää tutkimustietoa tarvittaisiin siitä, millä yhdisteillä fluoratut yhdisteet suksivoiteissa korvataan ja millainen on uusien, suksivoiteissa käyttöön otettavien yhdisteiden käyttäytyminen ympäristössä ja mahdolliset haittavaikutukset maaperässä sekä vesistöissä.

KIITOKSET

Ohjaajat

Tuula Tuhkanen (Jyväskylän yliopisto)

Teemu Lemmettylä (Hiihtoliitto, Jyväskylän yliopisto)

Tutkimuksen rahoituksesta

Maa- ja vesitekniikan tuki ry

Maaperän tutkimus ja kunnostus ry

Jyväskylässä 8.11.2024

Salla Seger

KIRJALLISUUSLUETTELO

- ALS. 2023. Sampling Recommendations for PFAS to Maximize Data Quality. Saatavissa: https://www.alsglobal.it/media-it/pdf/enviromails/enviromail_02_europe_sampling-recommendations-for-pfas-to-maximize-data-quality.pdf
- Buck R.C., Franklin J., Berger U., Conder J.M., Cousins I.T., de Voogt P., Jensen A.A., Kannan K., Mabury S.A. & van Leeuwen S.P.J. 2011. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. Integrated Environmental Assessment and Management. Volume 7, Issue 4. Saatavissa: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ieam.258>
- Breitschädel F., Haaland N., Espallargas N. 2014. A tribological study of UHMWPE ski base treated with nano ski wax and its effects and benefits on performance. The 2014 conference of the International Sports Engineering Association. Procedia Engineering 72 (2014) 267 - 272. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814005645>
- Carlson G. L., Tupper S. 2020. Ski waxes use contributes to environmental contamination by per- and polyfluoroalkyl substances. Saatavissa: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33113667/>
- Conder J. M., Hoke R. A., Wolf W. D., Russell M. H., Buck R.C. 2008. Are PFCAs bioaccumulative? A critical review and comparison with regulatory criteria and persistent lipophilic compounds. Environmental Science & Technology, 42, 4, 995–1003. Saatavissa: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es070895g>
- Direktiivi 39/2013. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi direktiivien 2000/60/EY ja 2008/105/EY muuttamisesta vesipolitiikan alan prioriteettiaineiden osalta. EUVL 266/1, 24.8.2013. Saatavissa <https://eurlex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=OJ:L:2013:226:TOC> [virallislähde: EU-direktiivi]
- Direktiivi 2020/2184. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi ihmisten käyttöön tarkoitetun veden laadusta. EUVL L 435/1, 23.12.2020. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32020L2184> [virallislähde: EU-direktiivi]
- ECHA 2018. Annex XV Restriction Report - Proposal for a Restriction of C9-C14 PFCAs -including their salts and precursors. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/documents/10162/2ec5dfdd-0e63-0b49-d756-4dc1bae7ec61>
- European chemical agency. 2013. Member state committee support document for identification of pentadecafluorooctanoid acid (PFOA). Saatavissa <https://echa.europa.eu/documents/10162/8059e342-1092-410f-bd85-80118a5526f5>
- European Chemicals Agency. (ei pvm.) Perfluoroalkyylikemikaalit. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/fi/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>

- European Chemicals Agency. 2023. Annex XV restriction report – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). Versio 2. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/documents/%2010162/f605d4b5-7c17-7414-8823-b49b9fd43aea>
- Fang S., Plassmann M. M., Cousins I. T. 2020. Levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in ski wax products on the market in 2019 indicate no changes in formulation. *Environmental science: process and impacts* 22, 2142. Saatavissa: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/em/d0em00357c>
- Grønnestad R. 2021. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in ski products: Environmental contamination, bioaccumulation and effects in rodents. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor. Norwegian University of Science and Technology. Saatavissa: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2788090/Randi%20Gr%c3%b8nnestad_PhD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Grønnestad R., Vázquez B. P., Arukwe A., Jaspers V. L. B., Jenssen B. M., Karimi M., Lyche J. L., Krøkje Å. 2019. Levels, Patterns, and Biomagnification Potential of PerfluoroalkylSubstances in a Terrestrial Food Chain in a Nordic Skiing Area. Saatavissa: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31691564/>
- Hedlund J. 2016. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in Swedish waters. Master's thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Aquatic Sciences and Assessment. Saatavissa: https://stud.epsilon.slu.se/9187/7/hedlund_j_160610.pdf
- Heggelund A. 2021. PFAS in the treatment of skis – Use, Emissions and alternatives. Saatavissa: <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2021/april-2021/pfas-in-the-treatment-of-skis/>
- Hellsing M. S., Josefsson S., Hughes A. V., Ahrens L. 2016. Sorption of perfluoroalkyl substances to two types of minerals. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653516307676>
- Hiihtoliitto. Kansallista fluorikieltoa valmistellaan kaudelle 2024-2025. Saatavissa <https://hiihtoliitto.fi/kansallista-fluorikieltoa-valmistellaan-kaudelle-2024-2025/>
- Kempisty D. M., Racz L. 2021. Forever Chemicals: Environmental, Economic, and Social Equity Concerns with PFAS in the Environment. CRC Press, 28.7.2021
- Komission asetus (EU) 2017/1000. 2017. Saatavissa <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1000&from=EN>
- Milinic J., Lacorte S., Vidal M., Rigol A. 2015. Sorption behaviour of perfluoroalkyl substances in soils. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714017197?via%3Dihub>

- Müller V., Costa L. C. A., Rondan F. S., Matic E., Mesko M. F., Kindness A., Feldmann J. 2023. Per and polyfluoroalkylated substances (PFAS) target and EOF analyses in ski wax, snowmelts, and soil from skiing areas. Saatavissa: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37853802/>
- Nilivaara R., Perkola N., Postila H., Lehosmaa K., Pirttilä A. M., Wäli P., Ruotsalainen A. L., Ronkanen A-K., Visuri M. 2021. Hiihtokeskuksen hulevesien ja luminäytteiden haitta-aineet. Ympäristö ja Terveys -lehti 8.2021: 38-44.
- OECD. 2013. Synthesis paper on per and polyfluorinated chemicals pfc. <https://issuu.com/oecd.publishing/docs/synthesispaper-on-per-and-polyfluo>
- Pelch K. E., Reade A., Wolffe T. A. M., Kwiatkowski C. F. 2019. PFAS health effects database: Protocol for a systematic evidence map. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019305380>
- Plassmann M. M., Berger U. 2013. Perfluoroalkyl carboxylic acids with up to 22 carbon atoms in snow and soil samples from a ski area Chemosphere <https://www.sciencedirect.com/journal/chemosphere/vol/91/issue/6>
- Reinikainen J., Perkola N., Takala M., Äystö L., Ahkola H. 2019. Suomen ympäristökeskus. Perfluorattujen alkyylilyhdisteiden ympäristötutkimukset ja riskinarviointi. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/items/8dd1f95b-0304-4008-ba3b-1771c0a0d1a4>
- Reinikainen J., Bouhoule E., Sorvari J. 2024. Inconsistencies in the EU regulatory risk assessment of PFAS call for readjustment. Saatavissa: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38583295/>
- RISE Report 2024:53. 2024. Bio-based ski wax prototype, development, hydrophobicity, hardness, biodegradation and glide performance on snow. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1893432/FULLTEXT02.pdf>
- RISE Research Institutes of Sweden. Saatavissa: <https://www.ri.se/en/popfree/why-should-you-phase-out-pfas>
- Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskus. 17.11.2015/1352 <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20151352>
- Suomen ympäristökeskus. 13.10.2023. PFAS-yhdisteet ympäristössä -tietopaketti. Perkola, N., Mehtonen, M., Junttila, V., Reinikainen, J., Ahkola, H., Seppälä, T., Fjäder, P., Juvonen, J. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/PFAS_tietopaketti
- Suomen ympäristökeskus (Syke). 2023. Per- ja polyfluoratut alkyylilyhdisteet (PFAS). Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Saatavissa <https://www.ymparisto.fi/fi/saasteettomuus-ja>




[ymparistoriskit/kemikaalien-ymparistoriskit/ja-polyfluoratut-alkyyliyhdisteet-pfas](#)

- Swedish chemicals agency. 2024. PFAS. Saatavissa: <https://www.kemi.se/en/chemical-substances-and-materials/pfas>
- Terveysten ja hyvinvoinninlaitos. 2024. PFAS-yhdisteet. Saatavissa: <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/pfas-yhdisteet>
- Ullberg M. 2015. Effects of pH and Cation Composition on Sorption of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) to Soil Particles. Saatavissa: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3214619/>
- United states environmental protection agency. 2017. Technical fact sheet – perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA). Saatavissa: <https://19january2021snapshot.epa.gov/fedfac/technical-fact-sheet-perfluorooctane-sulfonate-pfos-and-perfluorooctanoic-acid-pfoa-0.html>
- Valtioneuvosto. 2020. Fluoriyhdisteen PFOA ja samankaltaisten aineiden käyttöä rajoitetaan monissa tuotteissa terveys- ja ympäristösyistä. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-//1410903/fluoriyhdisteen-pfoa-jasamankaltaisten-aineiden-kayttoa-rajoitetaan-monissa-tuotteissa-terveys-jaymparistosyista>
- Vogel C., Roesch P., Wittwer P., Sommerfeld T., Riedel M., Leube P., Kalbe U., Schoknecht U., Simon F-G. 2024. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in Ski waxes and snow from cross-country skiing in Germany - Comparative study of sum parameter and target analysis. Journal of Hazardous Materials Advances , Volume 16, November 2024, 100484 <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-hazardous-materials-advances>
- Wang Y., Munir U. & Huang Q. 2023. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in soil: Sources, fate and remediation. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949919423000043>

LIITE 1. NÄYTTEENOTTOPISTEIDEN SIJAINTI LAHTI



Selitteet

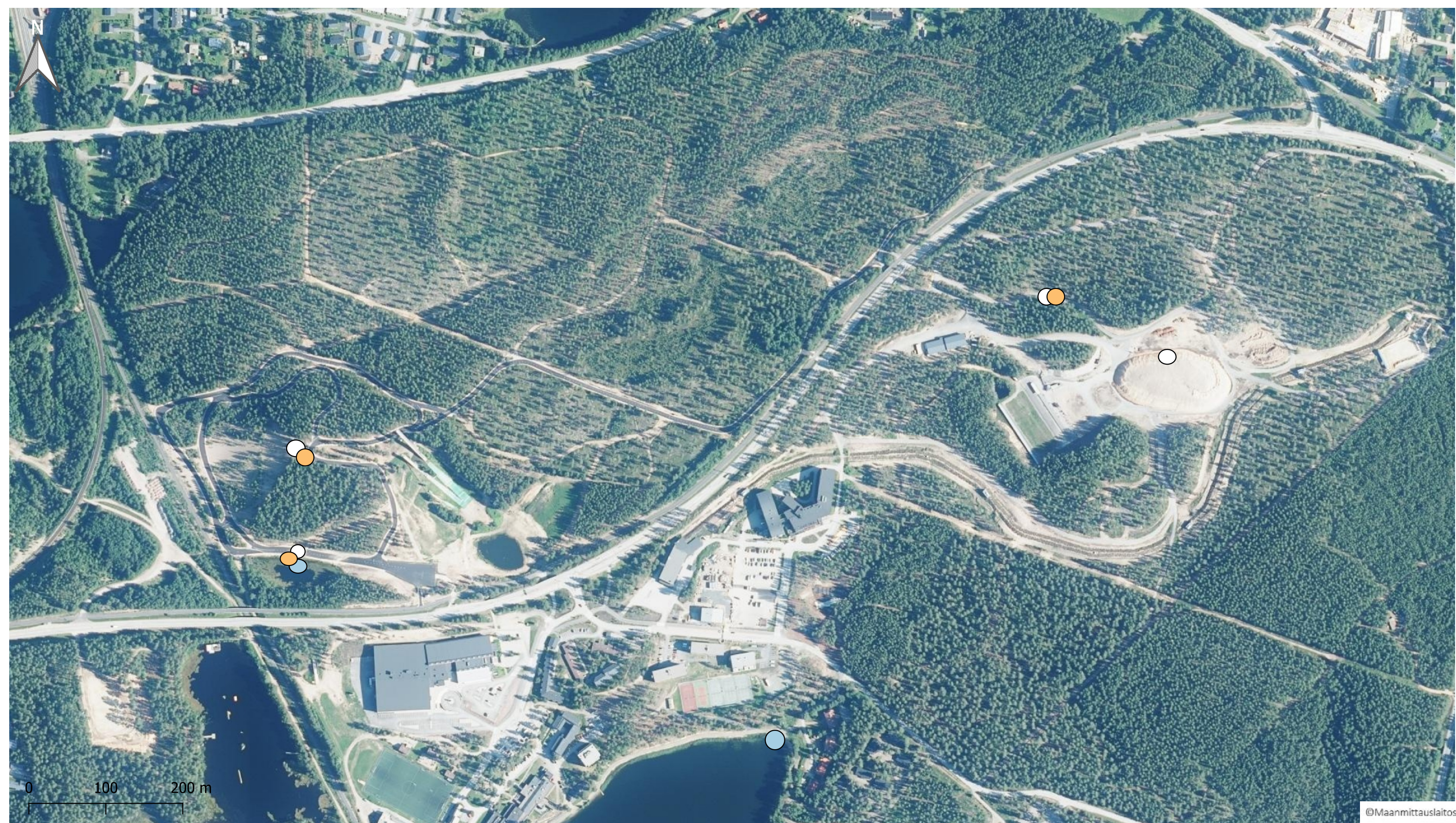
-  Vesinäyte
-  Luminäyte
-  Maanäyte



Taustakartta: Lahden kaupunki

Piirustuksen sisältö	Koordinaattijärjestelmä	Korkeusjärjestelmä
Lahti Näytepisteiden sijainnit	ETRS89/TM35FIN	N2000
	Mittakaava	Päivämäärä
	1:4 000	25.8.2024

LIITE 2. NÄYTTEENOTTOPISTEIDEN SIJAINTI VUOKATTI



Selitteet

- Vesinäyte
- Luminäyte
- Maanäyte

Piirustuksen sisältö Vuokatti Näytepisteiden sijainnit	Koordinaattijärjestelmä ETRS89/TM35FIN	Korkeusjärjestelmä N2000
	Mittakaava 1:4 500	Päivämäärä 25.8.2024