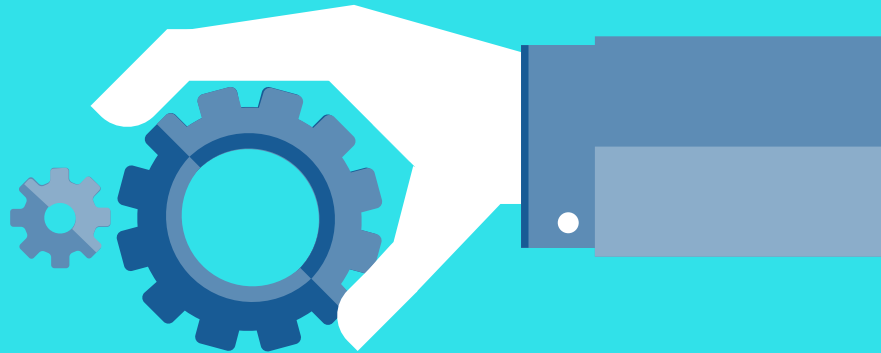


Kaatopaikkakaasun jatkojalostus – KAJASTUS

Kirjallisuuskatsaus ja
kyselytutkimuksen
tulokset



15.9.2026

M. Minna Laine, Satu Tiainen ja Sara Syvälahti
Hämeen ammattikorkeakoulu



Elinvoimakeskus



LOUNAIS-SUOMEN
JÄTEHUOLTO



Kiertokaari



HAMK
Hämeen ammatti-
korkeakoulu



Jätekukko



Euroopan unionin
osarahoittama

Sisällys

Johdanto.....	4
OSA 1: Kaatopaikkakaasun nykytilanne Suomessa ja Euroopassa	5
Suomalaiset kaatopaikat	5
Aikaisemmat kyselytutkimukset	5
Kunnat ja jäteyhtiöt vastuussa kaatopaikkojen hoidosta ja seurannasta	6
Kaatopaikkakaasun kasvihuonekaasupäästöt osana kunnan tai jätelaitoksen hiilijalanjälkeä ...	6
Euroopan kaatopaikat ja yhdyskuntajäte	8
Kaatopaikkakaasun ominaisuudet	12
Kaatopaikkakaasun muodostuminen	12
Kaatopaikkakaasun muodostumisen elinkaari.....	13
OSA 2: Kyselytutkimuksen tulokset: nykytila ja osaamistarpeet	15
Kaatopaikkakaasun määrän ja laadun seurantamenetelmät.....	16
Kaatopaikkakaasun koostumus	18
Kaatopaikkakaasun puhdistus.....	19
Kaatopaikkakaasun keräys ja hyödyntäminen	20
Kaatopaikkakaasun hyödyntämisen motivaattorit ja haasteet	23
OSA 3: Tulevaisuuden kaatopaikkakaasun käsittelymenetelmät ja hyödyntäminen ..	28
Kaatopaikkakaasun käsittelyvaihtoehdot; paras olemassa oleva teknologia (BAT) vanhentunutta?	28
Parhaat käytännöt kaatopaikkakaasun hallinnassa (BREFs) päivittyvät	28
Kaasun keräyksen teknologia	30
Kaatopaikkakaasun epäpuhtaudet ja niiden poisto.....	31
Jätelaji vaikuttaa kaatopaikkakaasun epäpuhtauksiin.....	31
Kaatopaikkakaasun puhdistaminen.....	32
Kaasunpesu (scrubbing)	32
Kemiallinen erotus (chemical scrubbing)	33
Absorptio.....	33
Kalvoerotus	33
Kryogeeninen tislauk	34
Adsorptio.....	34
Paineenvaihteluadsorptio Pressure Swing Adsorption (PSA)	35
Nelivaiheinen PSA	35
Molekyyliportti	35
Rikkivedyn biologinen poisto	35
Kaatopaikkakaasun metanointi	36

Hybridimenetelmät.....	37
Kaasun reformointi.....	37
Heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun hyödyntäminen	37
Yhdistelmäratkaisut.....	38
Kaatopaikkakaasun puhdistus epäpuhtauden mukaan	38
Kaasunpuhdistuksen ympäristövaikutukset	40
Yhteenveto.....	40
Ilmaan pääsyn esto biopeitteillä/metaanin hapetus	40
Kaatopaikkakaasun hyödyntäminen	42
OSA 4: Kyselytutkimuksen tulokset: Tulevaisuusnäkymät ja osaamistarpeet	44
Lähitulevaisuuden suunnitelmat.....	44
Pitkän tähtäimen suunnitelmat	46
Toimijoiden kiinnostus valtakunnalliseen kaatopaikkakaasufoorumiin	49
Asiantuntijahaastattelut	50
Asiantuntijahaastattelu 16.2.2026: Harri Laurila, Kiertokapula Oy.....	50
Asiantuntijahaastattelu 8.4.2026: Juha-Matti Herpiö, Sarlin Oy	51
Asiantuntijahaastattelu 9.4.2026: Mikko Saalasti, Doranova Oy.....	53
Viitteet.....	57

Johdanto

Kaatopaikkakaasun jatkojalostus - KAJASTUS on Euroopan unionin vuosina 2025–2027 osarahoittama hanke, joka keskittyy kaatopaikkakaasun käsittelyn haasteisiin ja ratkaisujen löytämiseen sekä tiedon laajempaan jakamiseen. Tavoitteena on varmistaa, että kaikki hyödynnettävissä oleva metaani saadaan talteen ja hyödynnettyä tehokkaasti, mikä edistää merkittävästi Suomen päästötavoitteiden saavuttamista. Hankkeeseen osallistuvat Kiertokaari Oy, Jätekuukko Oy, Lounais-Suomen Jätehuolto Oy sekä Hämeen ammattikorkeakoulu.

KAJASTUS-hanke vastaa kansallisiin ilmasto- ja energiatavoitteisiin ratkaisemalla kaatopaikkakaasun käsittelyyn liittyviä haasteita ja edistämällä sen kestävää hyödyntämistä energianlähteenä. Kaatopaikkakaasun talteenotto ja hyödyntäminen vähentävät riippuvuutta fossiilisista polttoaineista.

Hankkeessa laaditaan mittaus- ja säätötyökalu kaatopaikkakaasun talteenottoon, toteutetaan pilotteja kaasuntuotannon ja talteenoton parantamiseksi sekä luodaan tulevaisuuden kaasuntuotannon tiekartat jätehuoltoyrityksille. Hankkeen toimesta perustettiin valtakunnallinen kaatopaikkakaasuun erikoistunut foorumi ja työryhmä ratkomaan kaatopaikkakaasun jatkojalostuksen haasteita sekä jakamaan asiasta tietoa.

Osana hanketta selvitettiin kirjallisuuskatsausten avulla kaatopaikkakaasun nykytilannetta Suomessa ja laajemmin Euroopassa, sekä tulevaisuuden kaatopaikkakaasun käsittelymenetelmiä. Kirjallisuuskatsauksen yhteydessä toteutettiin kyselytutkimus suomalaisille jätehuoltoyrityksille ja kaatopaikkakaasua kerääville toimijoille sekä haastateltiin alan toimijoita nykytilanteesta, haasteista ja tulevaisuuden suunnitelmista sekä tehtiin kolme syvähaastattelua lisänäkökulman saamiseksi.

Tämä julkaisu kokoaa yhteen kirjallisuuskatsaukset ja haastattelututkimuksen tulokset.

OSA 1: Kaatopaikkakaasun nykytilanne Suomessa ja Euroopassa

Suomalaiset kaatopaikat

Tarkka Suomessa suljettujen ja käytöstä poistettujen kaatopaikkojen määrä ei ole selvillä, mutta se on ollut ennen jätelainsäädännön kehittymistä 1990-luvun alussa ja kaatopaikka-asetuksen voimaantuloa vuonna 2013 tuhansia, sekä asiallisia että laittomasti perustettuja kaatopaikkoja. Vuosina 1992–1998 Suomen noin 1800 virallisesta kaatopaikasta suljettiin 400 (Suomen virallinen tilasto 2000, Taulukko 1.1).

Taulukko 1.1 Suomalaisten kaatopaikkojen määrä vuosina 1992–1998. Taulukon lähde: Suomen virallinen tilasto 2000, taulukko 17; Suomen ympäristökeskus 2001, Taulukko 1, Ympäristö 6/2000.

vuosi	kaatopaikka		
	toimiva	lopetettu	yhteensä
1992	762	1015	1777
1993	691	1106	1797
1994	644	1170	1814
1995	639	1194	1833
1996	555	1272	1827
1998	366 ¹⁾	1475	1841
1999	327	1514	1841
2000	300	1541	1841

¹⁾ joista ongelmajätteen kaatopaikkoja 7 kpl

Aikaisemmat kyselytutkimukset

Suomen Kiertovoima KIVO:n vuonna 2023 järjestämään kaatopaikkakyselyyn osallistui 15 jätelaitosta. Vastanneiden jätelaitosten alueella oli noin 300 ha suljettuja ja 170 ha vielä avoimia jätteen loppusijoitusalueita. Näiltä alueilta arvioitiin vapautuvan kaatopaikkakaasua yhteensä noin 12 miljoonaa Nm³ vuodessa. (KIVO 2023.)

Kyselyyn vastanneista 15 jätelaitoksesta 14 keräsi kaasua talteen kyselyn aikaan. Kuuden jätekeskuksen toimialueella kaatopaikkakaasua soihdutettiin, mutta osalla oli tehty suunnitelmia hyötykäytölle. Neljä kaatopaikkakaasun kerääjää puhdisti ja/tai jalosti kaasua, ja seitsemän vastaajaa hyödynsi kaatopaikan kaasua sähkön ja lämmön tuotantoon ja/tai toimitti sitä energiayhtiölle. Eri loppusijoitusalueilla muodostui vaihteleva määrä kaatopaikkakaasua, joten kaasun hyödyntämismahdollisuudet vaihtelivat alueen ja jäteyhtiön mukaan. Ohjeistusta toivottiin muun muassa valmisteveron ja viranomais määräysten selvittämiseen. Vastaajien joukossa oli kiinnostusta yhteistyön tiivistämiseen kaatopaikkakaasun keruun tiimoilta ja halua kaasun parempaan hyödyntämiseen.

Kunnat ja jäteyhtiöt vastuussa kaatopaikkojen hoidosta ja seurannasta

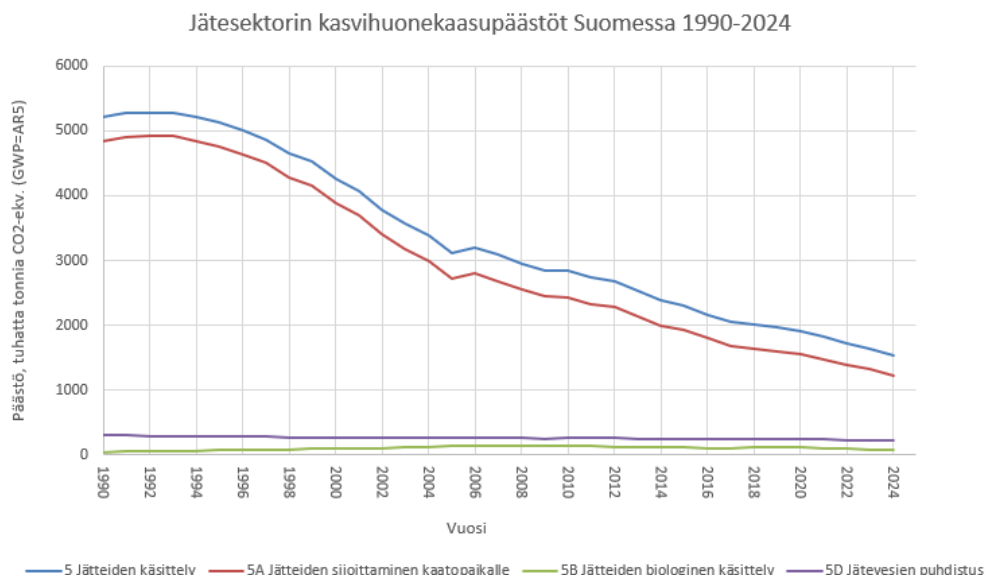
Kaatopaikka kuuluu yleensä kunnan tai teollisuusyhtiön omistukseen, joka on voinut siirtää hallinnoinnin paikalliselle jäteyhtiölle tai ulkopuoliselle yritykselle.

Suomessa biohajoavan jätteen vienti kaatopaikoille kiellettiin vuonna 2016 (VNa 331/2013), Tanskassa jo vuonna 1997 (Duan, 2021). Valtioneuvoston kaatopaikka-asetus (VNa 331/2013) määrää suljettujen kaatopaikkojen jälkiseurannasta, mutta jo valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista (VNp 861/1997) veloitettiin keräämään kaatopaikkakaasu talteen, hyödyntämään jos mahdollista, tai polttamaan. Käytännössä seuranta toteutetaan ympäristölupien kautta, joiden noudattamista ELY-keskukset ovat tähän asti valvoneet (Liesegang, 2018).

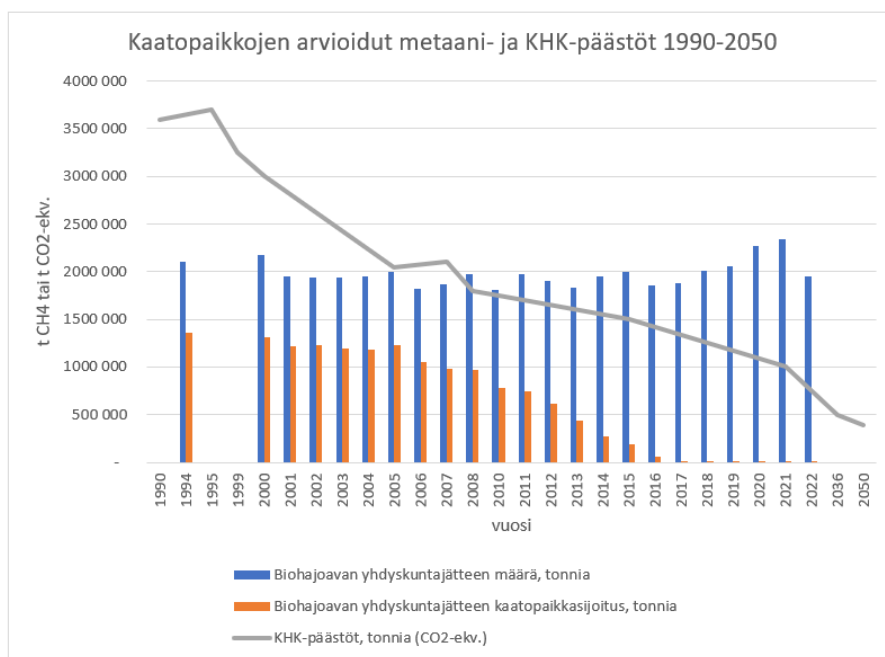
Varsinais-Suomen ja Satakunnan alueella selvitettiin suljettujen kaatopaikkojen tilaa pari vuotta biohajoavan jätteen kaatopaikkakiellon jälkeen. Tuolloin seurannassa oli puutteita, ja kaatopaikkakaasun suhteen oli epäselvyyttä, missä vaiheessa kaasun laatu on niin heikkoa tai määrä vähäistä, että seuranta voidaan lopettaa (Liesegang, 2018). Vastaavaa laajaa kaatopaikkakaasuja huomioivaa selvitystä ei ole julkaistu muiden nykyisten elinvoimakeskusten alueelta.

Kaatopaikkakaasun kasvihuonekaasupäästöt osana kunnan tai jätelaitoksen hiilijalanjälkeä

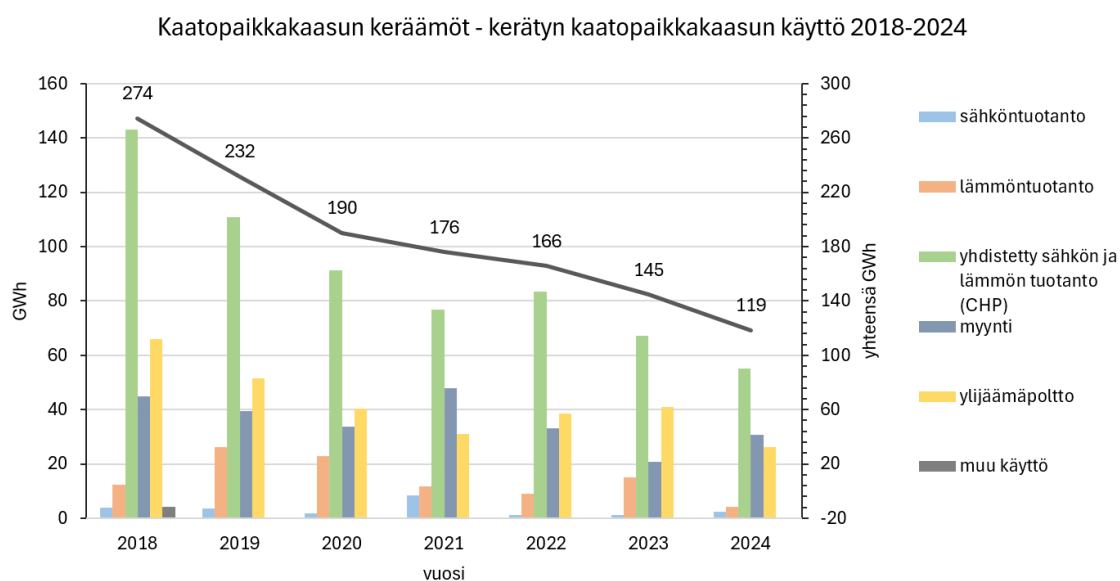
Tilastokeskuksen vuoden 2024 ennakkotietojen mukaan jätesektorin päästöjen osuus ilman maankäyttösektoria oli vajaat 4 % (1,6 miljoonaa tonnia CO₂-ekv.) 39,1 miljoonan tonnin kokonaispäästöistä. Jätteiden sijoittaminen kaatopaikalle on suurin hiilidioksidijalanjäljen aiheuttaja jätesektorilla, vuonna 2024 kaatopaikoista aiheutuneet KHK-päästöt olivat 1,2 miljoonaa tonnia CO₂-ekv. eli 3 % kokonaispäästöistä. Kasvihuonekaasupäästöt ovat pienentyneet tasaisesti vuodesta 1990, jätesektorilla laskua vuodesta 2023 oli 6 % (Suomen virallinen tilasto 2025).



Kuvio 1.1 Suomen kasvihuonekaasupäästöt jätesektorilla vuosina 1990–2024. Ennakkotiedot (vuosi 2024) on tuotettu karkeammilla menetelmillä kuin varsinainen inventaario (vuodet 1990–2023). Tämän takia vuoden 2024 tiedot eivät ole taulukossa samalla yksityiskohtaisuudella kuin aiempien vuosien tiedot. Lähde: Suomen virallinen tilasto 2025.



Kuvio 1.2 Kaatopaikkojen arvioidut metaanipäästöt 1990–2050 ja kaatopaikoille toimitettu biohajoava ja yhdyskuntajäte vuosina 1994–2024. Tulokset on koottu SYKE:n julkaisemista tilastoista kaatopaikkakaasudirektiiviä varten (kaikki vuosittaiset raportointitiedot sekä niitä koskevat laaturaportit ovat saatavilla Suomen ympäristökeskuksen metatietopalvelu CKAN:ista) (SYKE 2025a) ja ympäristöministeriön muistiosta jätelain uudistusta varten (Pfister 2013). Metaanipäästöt on arvioitu YM:n muistiossa käyttäen Petäjän (1985) mallia (Nikkari 2013).



Kuvio 1.3 Suomessa vuosina 2018–2024 kaatopaikoilta kerätty kaasu ja sen käyttömuodot. Lähde: Suomen virallinen tilasto 2025.

Noin puolet jäteyhtiöistä on laskenut kasvihuonekaasupäästönsä. Laskentatavoissa, rajauksissa ja käytetyissä standardeissa on kuitenkin eroja, mikä tekee tulosten vertailusta vaikeaa (Väyrynen, 2023). Kansallista kasvihuonekaasupäästöinventaariota varten kaatopaikkakaasujen kasvihuonekaasupäästöt lasketaan IPCC:n FOD (First Order Decay) -menetelmällä vaihtuvilla kertoimilla. FOD-menetelmä olettaa, että muodostuvan metaanin määrä riippuu jätteissä jäljellä olevan hiilen määrästä, kun olosuhteet pysyvät vakioina (SYKE 2025b).

Kaatopaikkojen metaaninpäästöjen keruu ja hyödyntäminen energiana pienentäisi merkittävästi jätesektorin KHK-päästöjä. Kaasun keruu ja käyttö voi kuitenkin olla kallista ja metaanin laatu huonoa kaatopaikan iästä riippuen; kaatopaikkakaasusta tulee poistaa epäpuhtaudet, ja sen liikenne- tai teollisuuskäyttöön olisi hyvä olla käytettävissä toimiva jakeluverkosto ja käyttäjäkunta.

Kaatopaikkakaasusta saadaan talteen keskimäärin 50–70 % mittaus- ja mallinnustavasta riippuen, vaihteluvälinä 20–85 % (Duan et al, 2022a; Giordano et al., 2024).

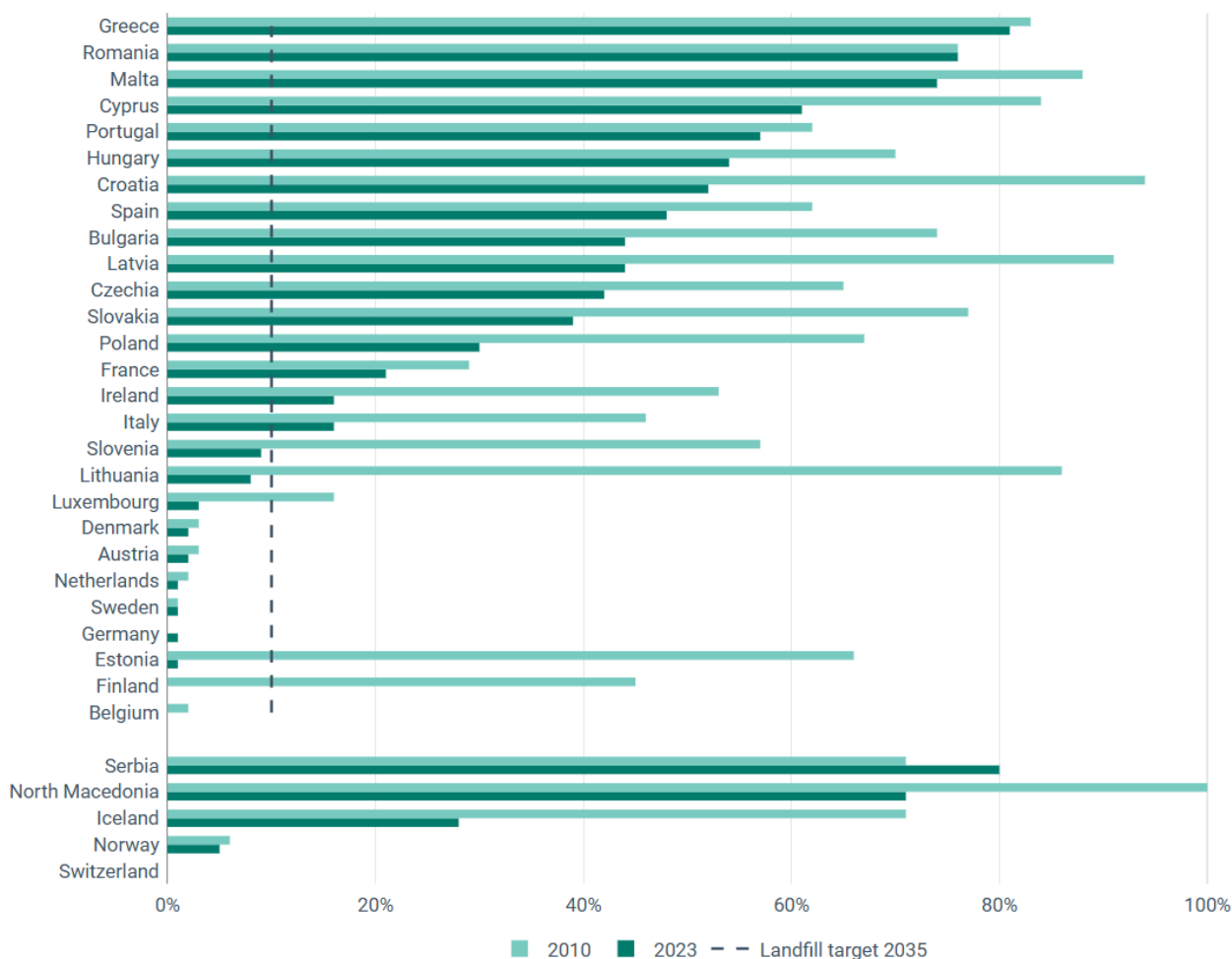
Biokaasulaitoskartaston mukaan Suomessa arviolta 1 800 suljetusta kaatopaikasta tällä hetkellä kerätään kaatopaikkakaasua 33 kohteessa, ja toimintaa harjoittaa 26 jäteasemaa, kuntaa tai yritystä (SBB 2025). Historiatietona kartaston tietojen mukaan 34 kaatopaikkakeräyksen pistettä tuottivat vuonna 2017 yhteensä 72 miljoonaa kuutiota kaatopaikkakaasua, jonka metaanipitoisuus oli keskimäärin 44 %, ja metaanista peräisin oleva energiapotentiaali oli 330 GWh (SBB 2025).

Euroopan kaatopaikat ja yhdyskuntajäte

EU:n kaatopaikkadirektiivin (2018/850, EU 2018) mukaan jäsenmaat saavat sijoittaa yhdyskuntajätteestä maksimissaan 10 % kaatopaikoille vuodesta 2035 eteenpäin. Vuonna 2023 11 EU:n jäsenvaltiota sekä kaksi EU:n ulkopuolista maata oli saavuttanut tavoitteen: Belgia, Suomi, Ruotsi, Saksa, Viro, Alankomaat, Itävalta, Tanska, Luxemburg, Liettua, Slovenia, Sveitsi ja Norja (kuvio 1.4). (European Environment Agency 2025.)

Vuonna 2023 EU-maat (27 jäsenvaltiota vuodelta 2020) sijoitti kaatopaikoille keskimäärin 22,4 % yhdyskuntajätteestään (Eurostat 2026).

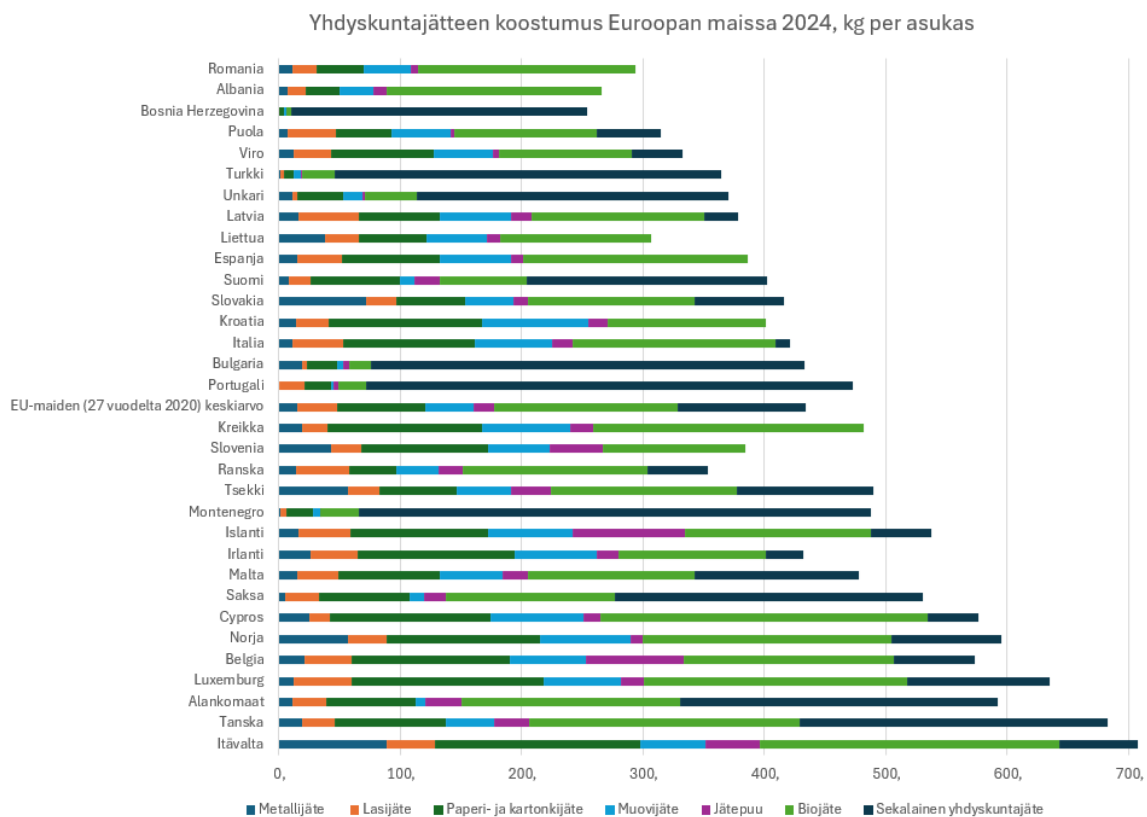
Merkittävimmän osan kaatopaikoille vietävän jätteen määrästä ovat vähentäneet Liettua, Slovenia, Viro, Suomi ja Islanti, jolla yhdyskuntajätteen kaatopaikkamäärä tosin on edelleen Pohjoismaiden suurin (European Environment Agency 2025). EFTA-maiden valvontaviranomainen ESA (EFTA Surveillance Authority) antoi Islannille maaliskuussa 2026 varoituksen, kun se ei ole saavuttanut jätteen vähennystavoitteita (EFTA Surveillance Authority ESA 2026).



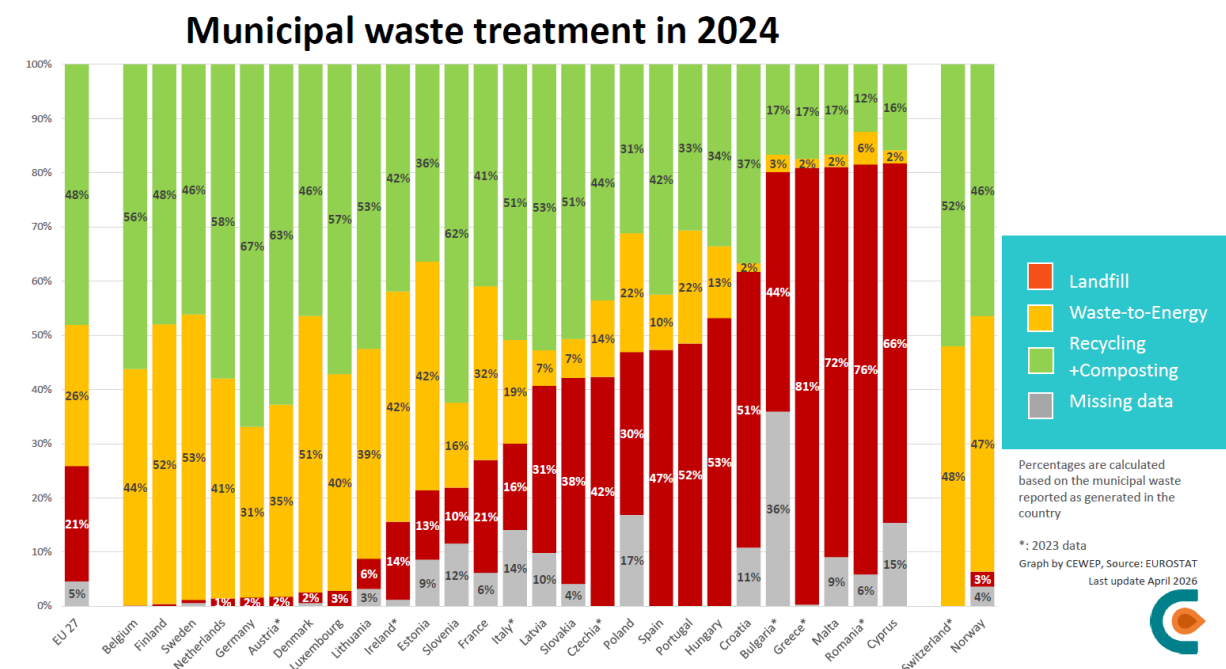
Kuvio 1.4 Yhdyskuntajätteen kaatopaikkamäärien kehitys Euroopassa maittain vuosina 2010 ja 2023. Katkoviiva = tavoite vuodelle 2035. Huomaa, että Latvian vuoden 2023 datan sijaan esitetään vuoden 2022 data, Tanskalla vuoden 2010 sijaan vuoden 2011 ja Irlannin vuoden 2023 sijaan vuoden 2020 data. Lähde: European Environment Agency 2025.

Vuonna 2023 biojäte muodosti suurimman osan raportoidusta EU:n yhdyskuntajätteen koostumuksesta 28,8 %:lla. Seuraavaksi tulivat sekajäte (20,3 %), muu jäte (14,5 %), paperi ja pahvi (13,9 %), muovi (7,5 %), lasi (6,3 %), puu (3,4 %) ja metallit (2,9 %). Vuonna 2023 yhdyskuntajätteen raportointivelvoitteen mukainen uudelleenkäyttöön valmistelun ja kierrätyksen aste oli EU-maissa keskimäärin 43,3 %. (Eurostat 2026, Kuvio 1.5 & CEWEP 2026, Kuvio 1.6)

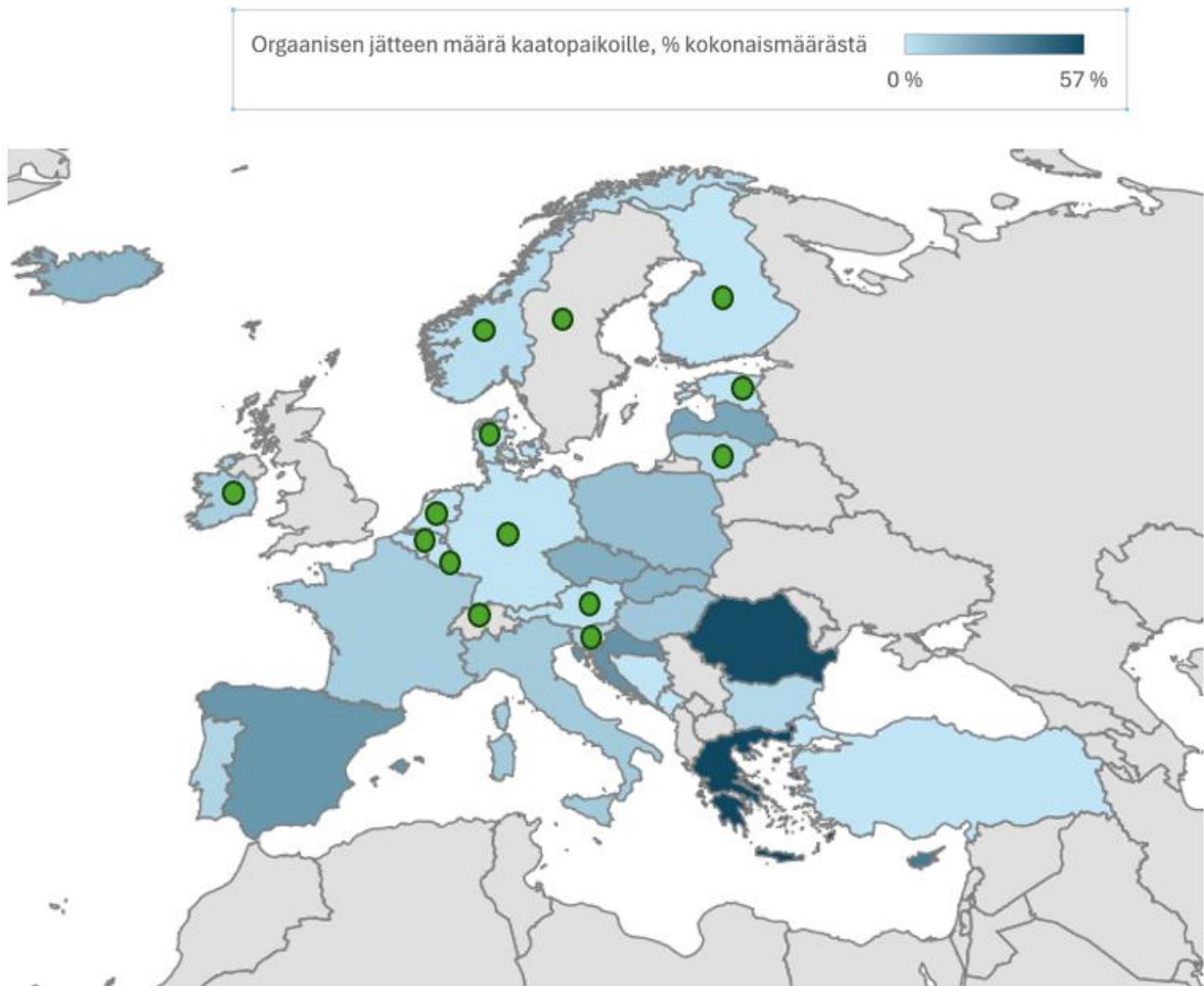
Vuonna 2024 EU:ssa tuotettiin 517 kg yhdyskuntajätettä henkeä kohti. Yhdyskuntajätteestä kierrätettiin 48 % (materiaalien kierrätys sekä kompostointi ja mädätys). Osalla Euroopan maista (Bosnia Hertsegovina, Turkki, Unkari, Bulgaria, Portugali ja Montenegro) sekajäte on suurin yhdyskuntajätteen jätelaji kertoen, että kierrätyksellä ja uudelleenkäytössä on vielä kehitettävää. (Eurostat 2026.)



Kuvio 1.5 Yhdyskuntajätteen koostumus Euroopan maissa vuonna 2024. Kuvaajasta puuttuvat Ruotsin, Serbian ja Sveitsin luvut. Datan lähde: Eurostat 2026.



Kuvio 1.6 Yhdyskuntajätteen kaatopaikoille päätyvä osuus Euroopassa vuonna 2024 (CEWEP 2026).



Kuvio 1.7 Arvio yhdyskuntajätteen sisältämän orgaanisen jätteen (biojäte, paperi- ja kartonkijäte, jätepuu) kaatopaikoille päätyvästä osuudesta koko yhdyskuntajättemäärästä. Vihreät pallot merkitsevät valtiot, jotka ovat saavuttaneet jätteen päästövähennystavoitteensa (10 %). Kuvaajasta puuttuvat Ruotsin, Serbian ja Sveitsin luvut. Kuvaaja on luotu yhdistämällä dataa ”Yhdyskuntajätteen kaatopaikkamäärien kehitys Euroopassa vuodelta 2023” (European Environment Agency 2025) ja ”Yhdyskuntajätteen koostumus vuonna 2023” (Eurostat 2026).

Tilanne kaatopaikoille päätyvän orgaanisen jätteen ja siitä myöhemmin syntyvän metaanin suhteen on hyvä 14 Euroopan maassa Suomi mukaan lukien (vuonna 2024 myös Irlanti saavutti tavoitteen). Eniten tehtävää on Ranskalla, Islannilla ja Kaakkois-Euroopan mailla, erityisesti Kreikalla, Kyproksella ja Romaniassa, joissa biojätteen osuus kaatopaikalle päätyvästä jätteestä on edelleen suuri (Kuviot 1.4–1.7). Vaikka Suomeen uusia biohajoavaa jätettä sijoittavia kaatopaikkoja ei enää tule, Euroopassa on vielä paljon tehtävää kaatopaikkakaasun keruussa ja hyödyntämisessä.

Kaatopaikkakaasun ominaisuudet

Kaatopaikkakaasun muodostuminen

Orgaanisen aineksen anaerobinen biologinen hajoaminen kaatopaikoilla muodostaa metaania. Metaanin muodostumiseen vaikuttavat mikrobeille suotuisat olosuhteet (lämpötila, kosteus), orgaanisen aineen määrä, laatu ja kaatopaikan ikä, sekä se, kuinka kaatopaikka on peitetty. Kaatopaikkakaasujen vapautumista edesauttavat myös fysikaaliset ja kemialliset olosuhteet, kuten haihtuminen ja kemialliset reaktiot.

Kaatopaikkakaasu sisältää parhaassa, IV-vaiheessa (Kuvio 1.8, Taulukot 1.2 ja 1.3) metaania noin 50–60 %, hiilidioksidia 40–50 %, typpeä 5–15 % ja erilaisia epäpuhtauksia pienempiä määriä (Mann et al., 2001).

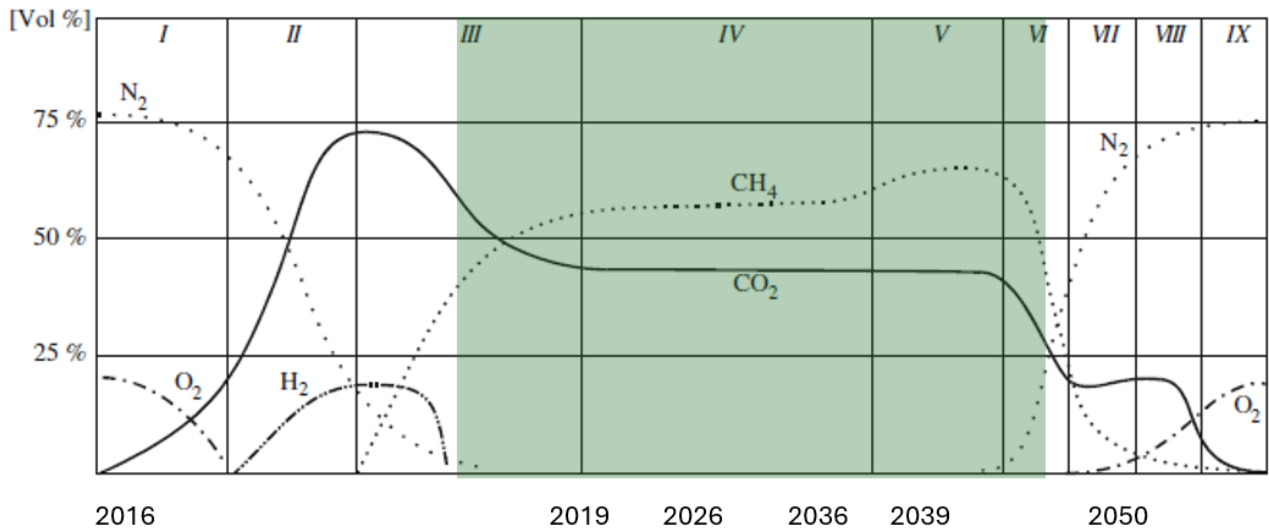
Taulukko 1.2 Kaatopaikkakaasun ja biokaasun koostumusten vertailua tilavuusprosentteina. Lähde: Lampinen ja Rautio, 2016; Mann et al, 2001²⁾; Tchobanoglous et al., 1993²⁾; EPA 1995²⁾.

	Raaka kaatopaikkakaasu	Raaka biokaasu
Metaani CH ₄	20–55 %	45–75 %
Hiilidioksidi CO ₂	25–50 %	20–55 %
Typpi N ₂	10–25 %	0–5 %
Rikkivety H ₂ S	< 3 %	< 0,8 %
Happi O ₂	0,1–1 % ²⁾	
Ammoniakki NH ₃	0,1–1 % ²⁾	
NMVOCS ¹⁾	0,01–0,6 % ²⁾	

1) Non-methane volatile organic compounds eli metaanittomat haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Kaatopaikkakaasun muodostumisen elinkaari

Bockreis ja Steinberg (2005) ovat koonneet yhteen ja kuvanneet kaatopaikkakaasun muodostumisen eri vaiheet. Kukaan kaatopaikka on toki erilainen, ja kuvaaja ja taulukko antavat yleisen esimerkin eri vaiheiden kestosta ja kaasun koostumuksesta, kun kaatopaikalle on tuotu esikäsittelemätöntä jätettä. Ensimmäiset neljä vaihetta kuvaavat biologista orgaanisen aineen hajoamista ja seuraavat viisi vaihetta perustuvat vanhan kaatopaikan mallinnukseen.



Kuvio 1.8 Kaatopaikkakaasun muodostumisen eri vaiheet. Kuvan lähde, muokattu Bockreis ja Steinberg (2005). Kuvan aikajänne on viitteellinen. Kaasun muodostuminen on ominaista kullakin kaatopaikalla ja kullakin penkalla jätteen laadusta, ympäristöolosuhteista ja penkan rakenteesta johtuen.

Suomalaiset kaatopaikat ja kaatopaikkojen lohkot ovat eri-ikäisiä. Nuorimmat (jos ei oteta huomioon poikkeuslupia) kaatopaikat, joille biohajoavaa jätettä on saanut viedä vuoteen 2016 asti, ovat nyt 9-vuotiaita, joten niiden aktiivinen metaanintuottovaihe voi kestää vielä 10 vuotta ja metaania voi vapautua ilmaan aina vuoteen 2066 asti.

Taulukko 1.3 Kaatopaikkakaasun muodostumisen vaiheet. Katso kaasujen muodostuminen myös kuvio 1.8. Taulukon lähteet: Bockreis ja Steinberg (2005); Tchobanoglous & Kreith, 2002.

vaihe	selitys	kaasun koostumus	vaiheen kesto
I	AEROBIVAIHE: Orgaanisen aineksen aerobinen hajoaminen hiilidioksidiksi (polymeerien eli pitkäketjuisten hiilihydraattien, lipidien ja proteiinien hajotus)	N ₂ , O ₂ , lisääntyvässä määrin CO ₂	tunneista viikkoihin
II	HAPPOVAIHE (HYDROLYYSI): Hapen kuluttua loppuun alkaa anaerobinen happovaihe, I-vaiheen yhdisteiden mikrobiologinen hajottaminen orgaanisiksi hapoiksi ja alkoholeiksi. pH laskee, ja suotovesiin pääsee metallia, ja niiden VFA- ja COD-pitoisuudet nousevat.	H ₂ , CO ₂ , N ₂	labiili vaihe, happi pysäyttää anaerobisen hajoamisen; yhdestä kuuteen kuukautta
III	ASIDOGENEESI: II-vaiheen orgaaniset hapot hajotetaan asetaatiksi, ja pH nousee. Metanogeenit arkeonit syntyvät penkkaan, metaanin tuotto lisääntyy, ja kaatopaikkakaasun tuotto on suurimmillaan.	CH ₄ (70 %) CO ₂ (70 % → 40 %)	3 kk:sta 2–3 vuoteen
IV	METANOGENEESI, STABIILI: Hidas metaanintuottovaihe, jolloin penkka pysyy anaerobisena ja metaania syntyy, mutta vähenevässä määrin. Kaatopaikkakaasun tuotto on tasaista, ja kaasuvirtauksen suunta säilyy penkasta ilmakehään.	CH ₄ :CO ₂ (50–60:40)	20 v →
V	KYPSYMISVAIHE: Suurin osa kaatopaikkakaasun vapautumisesta tapahtuu tässä vaiheessa, metaanin osuus kasvaa. Penkan ilmanpaine on edelleen ympäröivää ilmakehää suurempi, joten ilmakehän ilma ei pääse penkkaan.	CH ₄ :CO ₂ (80:20)	
VI	SUODATTUMISVAIHE: Penkan ilmanpaine laskee, ilmaa pääsee penkkaan, ja pintarakenteissa alkaa aerobisen hajotuksen vaihe, jolloin kaasun tuotto vähenee. Muutos tapahtuu eri aikaan eri kohdissa penkkaa.	CH ₄ :CO ₂ (38:62) [0,6:1]	
VII	Penkkaan suodattuneen hapen vaikutuksesta metaani hapettuu penkan sisäosissa. Kaatopaikan kaasupäästöt ovat pieniä. Muutos tapahtuu eri aikaan eri kohdissa penkkaa.		
VIII	HIILIDIOKSIDIVAIHE: Metaanin tuotto lakkaa, hiilidioksidin vapautuminen vähenee.	CH ₄ → 0 CO ₂ 20→5 % O ₂ 2 →17 % N ₂ → 78 %	
IX	ILMAVAIHE: Hapen ja typen määrä kaatopaikkakaasussa kasvaa.	CO ₂ alle 5 % O ₂ 17 % N ₂ 78 %	

OSA 2: Kyselytutkimuksen tulokset: nykytila ja osaamistarpeet

Kyselytutkimuksella kartoitettiin Suomessa toimivien loppusijoitusalueiden kaatopaikkakaasun nykytilannetta sekä jätehuoltoyritysten kokemuksia, käytäntöjä ja tulevaisuuden tarpeita kaatopaikkakaasun keräykseen, käsittelyyn ja hyödyntämiseen liittyen. Kysely lähetettiin 34 toimijalle, joista 26 vastasi. Kyselytutkimus sisälsi 36 kysymystä. Kaikki vastaajat eivät ole välttämättä vastanneet jokaiseen kysymykseen. Kyselyn neljä osa-aluetta käsittelevät taustatietoja ja nykytilannetta, kaatopaikkakaasun keruuta ja käsittelyä, hyödyntämisen motivaattoreita ja haasteita sekä tulevaisuuden näkymiä.

Kyselyyn vastanneilla jätteenkäsittelytoimijoilla on hallinnassaan yhteensä 64 kaatopaikka-aluetta, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on lähes 570 hehtaaria (Taulukko 2.1). Yksittäisten alueiden koko vaihtelee 0,5 hehtaarista 53 hehtaariin, ja keskimääräinen pinta-ala on noin 9 hehtaaria. Kaatopaikka-alueista 69 ha on avoimia, 343 ha suljettuja ja loput 156 ha osittain suljettuja.

Taulukko 2.1 Kaatopaikkojen pinta-alan jakautuminen avoimiin, suljettuihin ja osittain suljettuihin alueisiin.

Kaatopaikka-alueita yhteensä 568 ha	pinta-ala, ha	osuus kaatopaikoista, %
Avoimia	69	12 %
Suljettuja	343	60 %
Osittain suljettuja	156	27 %

Kyselyyn vastanneiden toimijoiden kaatopaikka-alueiden käyttöönottoajankohdat vaihtelevat vuodesta 1952 vuoteen 2019. Suuri osa näistä alueista (40 %) on otettu käyttöön 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä.

Suurimmalla osalla toimijoista (84 %) on olemassa dokumentaatiota siitä, mitä jätettä kaatopaikalle on loppusijoitettu. Pienellä osalla kaatopaikoista tiedot puuttuvat tai niiden olemassaolosta ei ole varmuutta.

Kaikki kaasua keräävät toimijat eivät ilmoittaneet kyselyssä kaatopaikkakaasun muodostumis- tai talteenottomääriä. Puuttuvia tietoja täydennettiin jätehuoltoyrityksien viimeisimmistä vuosikertomuksista saatavilla olevilla kaasumäärätiedoilla. Mikäli toimija oli ilmoittanut ainoastaan talteen otetun kaasun määrän, käytettiin tätä määrää myös kaatopaikkakaasun muodostumista kuvaavana arvona. Toimijoiden kyselyvastaukset ja vuosikertomuksien tiedot yhdistämällä voidaan arvioida, että tarkastelluilla kaatopaikka-alueilla muodostuu vuosittain vähintään 29,8 miljoonaa kuutiometriä kaatopaikkakaasua, josta noin 18,5 miljoonaa kuutiometriä otetaan talteen. Kaasusta hieman yli puolet syntyy osittain suljetuilla alueilla, noin 40 % suljetuilla alueilla ja vain noin 6 % avoimilla alueilla.

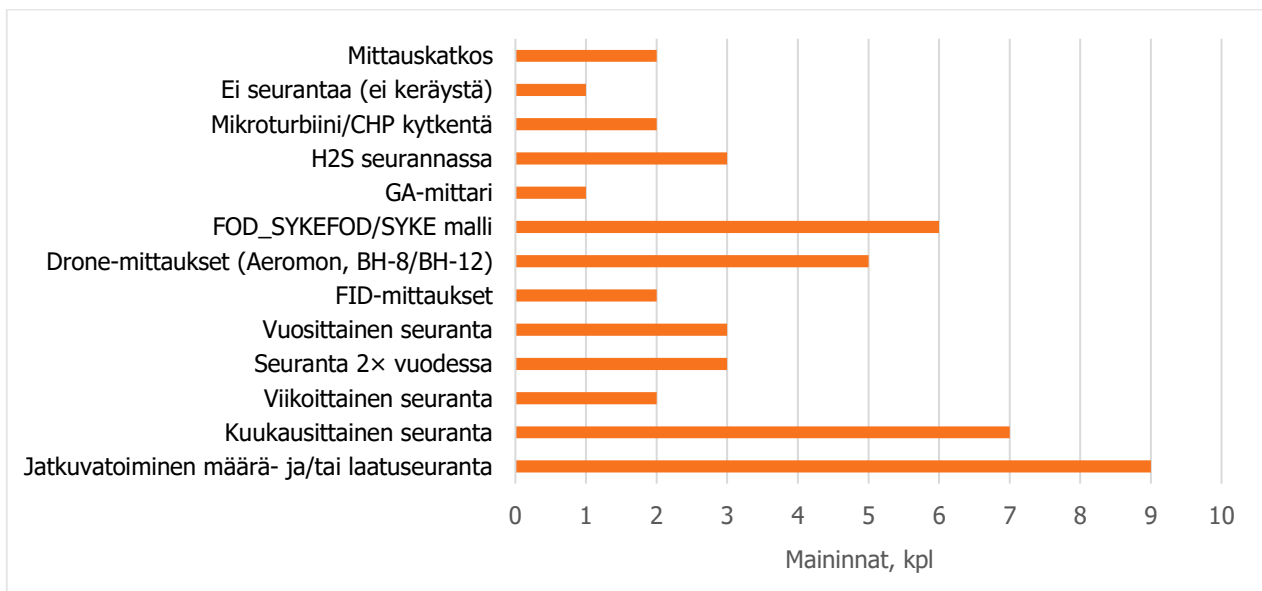
Kyselyssä ei selvitetty tuntikohtaista kaasunmuodostusta, mutta erillisten haastattelujen perusteella suurilla suljetuilla tai osittain suljetuilla alueilla kaasua muodostuu arviolta 600–1100 m³/h. Pienemmillä vastaavilla alueilla muodostus on tyypillisesti noin 100 m³/h.

Kaatopaikkakaasun määrän ja laadun seurantamenetelmät

Miten seuraatte kaatopaikkakaasun määrää ja laatua? (esim. mihin kaasun määrän arviointi perustuu, mittausmenetelmät, seurannan tiheys)

Kaatopaikkakaasun määrän ja laadun seuranta rakentuu kokonaisuudessaan jatkuvatoimisten mittausjärjestelmien, säännöllisten käsimittausten ja laskennallisten arvioiden yhdistelmälle. Useimmilla kaatopaikoilla pumppaamoihin asennetut virtaus-, paine- ja lämpötilamittarit sekä kaasuanalysaattorit tallentavat tietoa automaatiojärjestelmään tuntitasolla. Tätä tietoa hyödynnetään sekä kaasunkeräysjärjestelmän ohjauksessa että ympäristötarkkailussa. Jatkuvatoimista mittausta täydennetään linja- ja kaivokohtaisilla kenttämittauksilla, joita tehdään tyypillisesti kuukausittain, huollon yhteydessä tai harvemmin suljetuilla täyttöalueilla.

Laadun seurannassa mitataan yleensä metaanin, hiilidioksidin ja hapen pitoisuuksia, ja joissakin kohteissa myös rikkivetyä. Mittaukset tehdään sekä kiinteillä analysaattoreilla että kannettavilla nelikaasumittareilla ja muilla siirrettävillä analysaattoreilla. Osassa kohteista käytetään mittauksiin kannettavaa kaasuanalysaattoria, jolla mitataan metaania, hiilidioksidia sekä rikkivetyä, jopa kaksi kertaa kuukaudessa. Myös pumppaamolinjojen virtausnopeuksia, ilmanpainetta, imulinjojen imupainetta ja kaasun lämpötilaa seurataan säännöllisesti, ja tarvittaessa tehdään imukaivojen säätöjä mittaustietojen perusteella.



Kuvio 2.1 Kaatopaikkakaasun mittausmenetelmien ja seurantatiheyksien esiintyvyys kyselyyn vastanneilla toimijoilla.

Metaanin määrän arvioinnissa käytetään virtausmittausten ohella Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) Kaatopaikkakaasujen metaanipäästöjen laskenta -laskuria, joka käyttää First order decay (FOD) -menetelmää. Laskentaperusteet täydentävät mittauksia etenkin kohteissa, joissa kaasunkeräystä ei ole tai se on vähäistä, tai silloin kun olosuhteet eivät mahdollista jatkuvaa laadunmittausta. Joillakin kaatopaikoilla kaasun laadun seuranta on ollut pitkiä jaksoja tekemättä laitevikojen vuoksi, jolloin vuosittainen arvio on perustunut yksinomaan mallinnuksiin.

Kaivokohtaiset ja pintakaasumittaukset muodostavat tärkeän osan etenkin suljettujen tai vanhojen täyttöalueiden tarkkailua. Kaivoja mitataan tavallisesti kaksi kertaa vuodessa, mutta käytännöt

vaihtelevat. Joillakin kohteilla suljetulta alueelta mitataan kahta tarkkailuputkea kahdesti vuodessa, kun taas toisissa mitataan suurempi määrä kaivoja. Pintakaasuvuotoja tarkkaillaan säännöllisesti, ja niiden arvioinnissa voidaan käyttää FID-mittauksia liekki-ionisaatiodetektorilla (FID = Flame Ionization Detector) tai lämpötilaan ja pintojen käyttäytymiseen perustuvia havaintoja, esimerkiksi lumipeitteen muutoksia talvikautena.

Hajapäästöjen ja vuotokohtien paikantamiseen käytetään sekä perinteisiä FID-mittauksia että drooni-mittaustekniikkaa, joka on otettu laajasti käyttöön erityisesti suurimmilla kaatopaikoilla. Mittauksia tehdään yleensä vuosittain tai 1–2 kertaa vuodessa, ja niitä täydennetään tilanteen mukaan, jos maastosta tai hajuhavainnoista ilmenee poikkeamia. Joillakin laitoksilla kaivokohtaisia mittauksia tehdään myös mikroturbiinilaitoksen yhteydessä, ja purkautuvan kaasun määrää arvioidaan FID-mittauksin energiantuotantoprosessin läheisyydessä.

Taulukko 2.2 Kaatopaikkakaasun määrän ja laadun seurannan yleisimmät menetelmät ja mittaustiheydet.

Seurantakohde	Tavallisimmat menetelmät	Tiheys
Kaasun määrä	Jatkuvatoiminen virtausmittaus, käsimittaukset, FOD-laskenta	Jatkuva / kk / 1 krt vuodessa
Kaasun laatu	CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S mittaus: IR-, paramagneettiset ja kannettavat analysaattorit	Jatkuva tai kk-mittaukset
Vuodot ja emissiot	FID-mittaukset, drooni-/Aeromon-mittaukset	1–2 krt vuodessa, tarpeen mukaan
Imukaivojen seuranta	Käsimitarit (kaasu + virtaus)	2 krt vuodessa – kk
Suljetut alueet	FOD-laskenta, pintakaasumittaukset	1 krt vuodessa tai tarpeen mukaan

Hyötykäyttökohteissa kaasu ohjataan CHP-laitoksille tai mikroturbiineille, ja näissä kohteissa jatkuvatoiminen määrä- ja laatusuranta on yleensä erittäin kattavaa. Joissakin laitoksissa kaatopaikkakaasun keskimääräiset pitoisuudet voivat perustua yksittäiseen siirrettävällä analysaattorilla tehtyyn mittaukseen, mikä korostaa kohdekohtaisten käytäntöjen eroja ja mittausdatan luotettavuuden vaihtelua.

Seuraatteko hallinnoimillanne kaatopaikoilla, missä elinkaaren vaiheessa kaatopaikkakaasun muodostuminen on?

Vastaajista 40 % ilmoittaa seuraavansa hallinnoimillaan kaatopaikoilla, missä elinkaaren vaiheessa kaatopaikkakaasun muodostuminen on, kun taas 44 % vastaajista ei seuraa asiaa. Loput vastaajista tarkentavat, että seuranta tehdään, mutta edellisestä tarkemmasta tarkastelusta on kulunut aikaa, esimerkiksi yhdessä tapauksessa viimeisin laajempi mallinnus on teetetty noin 10 vuotta sitten. Lisäksi todetaan, että mikrometeorologisten mittausten ohella muuta seuranta ei ole, eikä mikrometeorologisia mittauksia ole tehty kaikilla alueilla.

Kaatopaikkakaasun koostumus

Kaatopaikkakaasun koostumus vaihtelee huomattavasti eri kaatopaikka-alueiden välillä, mutta useimmilla alueilla havaitaan samankaltaisia päätrendejä.

- Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus (CH_4) on suurimmalla osalla kaatopaikka-alueista 37–55 prosenttia, mutta yksittäisillä alueilla se voi nousta jopa 62 prosenttiin tai laskea äärimmillään nolnaan.
- Rikkivedyn (H_2S) pitoisuuksissa vaihteluväli on vieläkin suurempi. Tyypillisesti pitoisuus sijoittuu 3–320 ppm:n välille, mutta joillakin kaatopaikoilla mitataan huomattavan korkeita arvoja, jopa 2000–3500 ppm, ja äärimmillään 12 000 ppm.
- Hiilidioksidin (CO_2) osuus kaasusta on useimmilla alueilla 25–35 prosentin välillä, ja yli 70 prosenttia kaatopaikoista asettuu tälle tasolle, vaikka pitoisuus vastausten perusteella voi vaihdella 0,55 ja 40 prosentin välillä.
- Happipitoisuus (O_2) puolestaan pysyy tyypillisesti hyvin alhaisena ja suurimmalla osalla kaatopaikoista se on 0–2 prosenttia, ja monilla alueilla lähes nolla, mutta joissakin tapauksissa voi yltää jopa 20,5 prosenttiin.

Kuukausittainen mittaus kannettavilla analysaattoreilla (Biogas5000, GA-mittari, Pitot-putkimittaus) on vastausten perusteella selvästi yleisin kaatopaikkakaasun mittaustapa. Joillakin kaatopaikoilla on myös jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä, jota mahdollisesti täydennetään säännöllisellä viikoittaisella käsimittauksella. Penkkakohtaisten mittausten lisäksi joillakin kaatopaikoilla ei ole penkkakohtaista analysointia, vaan kaasun koostumus määritetään kokoomanäytteiden keskiarvona. Useilla kohteilla mittauksia tehdään muutamia kaksi tai neljä kertaa vuodessa. Osa toimijoista tekee vain satunnaisia tai yksittäisiä kertamittauksia. Lisäksi muutamalla alueella mittauksia ei tehdä lainkaan, koska kaasua ei kerätä talteen, eikä näin ollen synny tarvetta mitata sen koostumusta.

Toimijoiden yleisimmät kaasunkoostumuksen mittausmenetelmät:

- kannettavat kaasuanalysaattorit (yleisin menetelmä)
 - Biogas 5000 1 krt/kk
 - GA-mittari 1–2 krt/kk
 - Pitot-putki-mittaus 1krt/kk
 - nimeltä mainitsemattomia siirrettäviä kaasuanalysaattoreita ja nelikaasumittareita
- jatkuvatoiminen mittaus

Oletteko huomanneet joidenkin tekijöiden vaikuttavan kaasun koostumukseen?

Vastausten perusteella kaasun koostumukseen vaikuttavat ennen kaikkea sää- ja ympäristöolosuhteet sekä kaatopaikan rakenteelliset ja operatiiviset tekijät. Useat toimijat kuvasivat ilmanpaineen, sademäärän, lämpötilan, sään ja vuodenaikojen vaihtelun näkyvän selvästi mitatuissa pitoisuuksissa. Esimerkiksi matalapaineiset ja kosteammat säätilanteet ("rönnäkelit") nostavat metaanipitoisuuksia, kun taas korkeapaine laskee niitä.

Keskeisiä vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi jätteiden ominaisuudet ja jätepenkan rakenne. Jätetäytön korkeus ja syvyys voivat heijastua metaanipitoisuuksiin, samoin loppusijoitetun jätteen laatu ja esimerkiksi kipsijätteen määrä, joka nähtiin rikkipitoisuuksia kohottavana. Joillakin alueilla kaasun muodostumiseen on vaikuttanut penkan kuivuminen. Erilliskastelun rajoitukset ovat johtaneet penkan "muumioitumiseen", mikä on vähentänyt kaasun muodostusta ja heikentänyt laatua.

Toiminnalliset tekijät, kuten imulinjojen säädöt ja asiakkaiden hyödyntämä kerätyn kaasun määrä, voivat myös selittää havaittuja vaihteluja. Osa vastaajista kertoi korkeina näyttäytyvien metaanipitoisuuksien johtuvan vähäisestä käyttöasteesta tai vähäisistä mittausmääristä, kun taas jatkuva imeminen voi heikentää kaasun laatua.

Kaikki vastaajat eivät kuitenkaan olleet havainneet selkeitä tekijöitä, jotka vaikuttaisivat kaasun koostumukseen, ja osa totesi, ettei asiaa ole tutkittu riittävästi johtopäätösten tekemiseksi.

Kaatopaikkakaasun puhdistus

Puhdistatteko kaatopaikkakaasuja?

Kolmannes kaatopaikoista puhdistaa kaatopaikkakaasuja, kun taas selvä enemmistö, 60 %, ei puhdistaa kaatopaikkakaasuja lainkaan. Lisäksi pieni ryhmä, 4 %, kertoo ettei puhdistusta tällä hetkellä tehdä, mutta tarve puhdistamiselle on. Tämä viittaa siihen, että vaikka puhdistus ei ole vielä yleinen käytäntö, kiinnostusta ja potentiaalista kysyntää menetelmälle on jonkin verran.

Miten puhdistatte kaatopaikkakaasuja?

Kaatopaikkakaasuja puhdistavista vastaajista valtaosa, 78 %, ilmoitti käyttävänsä puhdistusmenetelmänä aktiivihiilisuodatusta. Aktiivihiilen avulla poistetaan erityisesti siloksaanit ja rikkivety, ja käytössä on esimerkiksi Desotecin suodatinratkaisuja, joissa aktiivihiiltä on noin 10 tonnia. Lisäksi yksi kaatopaikkakaasua puhdistavista vastaajista kertoi hyödyntävänsä vesipesuun perustuvaa puhdistusmenetelmää, jota käytetään muun muassa hiilidioksidin ja rikkivedyn poistamiseen osana kaatopaikkakaasun jalostusprosessia. Adsorptiota, jossa reaktiivinen pintarakenne sitoo rikkiyhdisteitä, käyttää myös yksi kaasua puhdistavista vastaajista. Erillisiä muita menetelmiä, kuten rikkivetypesuria, ja biologista puhdistusta tai pintarakennetta, joka hapettaa biologisesti kaatopaikkakaasun hapeksi ja hiilidioksidiksi käyttää kolmannes vastaajista. Myös soihdussa polttaminen mielletään kaatopaikkakaasun puhdistamiseksi.

Miten huomioitte kaasun epäpuhtaudet (esim. rikkivety, hiilidioksidi, siloksaani) laitevalinnoissanne?

Vastausten perusteella kaasun epäpuhtaudet huomioidaan laitevalinnoissa vaihtelevasti, ja käytännöt riippuvat sekä kaasun laadusta että alueen toimintamallista. Osalla toimijoista epäpuhtauksilla ei ole merkittävää vaikutusta, koska kaasu ohjataan kokonaan soihdutukseen, eikä uusia laitehankintoja ole tekeillä. Joissakin kohteissa epäpuhtauksia ei ole todettu merkittävästi, minkä vuoksi erillisiä puhdistusratkaisuja ei ole katsottu tarpeellisiksi.

Useat vastaajat korostivat laitetoimittajien roolia: laitteistot on yleensä valittu tai mitoitettu siten, että ne kestävät kaatopaikkakaasun ominaispiirteet ja tyypilliset epäpuhtaudet. Tämä näkyy muun muassa korroosionkestävien materiaalien käytössä ja siinä, että toimittajat ovat huomioineet rikkivedyn ja muiden epäpuhtauksien vaikutukset jo suunnitteluvaiheessa. Joillakin kaatopaikoilla epäpuhtaudet hallitaan aktiivisesti, esimerkiksi käyttämällä mikroturbiinien edellä aktiivihiilisuodatusta rikkivedyn ja siloksaanien poistoon tai hyödyntämällä jalostuslaitoksen puhdistusprosesseja hiilidioksidille ja rikkivedylle.

Rikkivedyn osalta näkemykset vaihtelivat: muutamissa kohteissa sitä esiintyy vain vähän, eikä sen vuoksi ole tarvittu erityisiä puhdistusmenetelmiä, kun taas toisaalla kaasun korkea

rikkivetypitoisuus rajoittaa teknisiä vaihtoehtoja ja edellyttää laitteilta erityistä kestävyyttä tai johtaa jopa siihen, että ainoa vaihtoehto on soihtupoltto. Korkeat pitoisuudet lisäävät kulumisen ja syöpmisen riskiä sekä vaikuttavat huoltotarpeisiin, mikä on huomioitu materiaalivalinnoissa ja huoltosuunnittelussa.

Epäpuhtauksien huomiointi laitevalinnoissa perustuu siis joko laitetoimittajien asiantuntemukseen, kaasun laadun edellyttämiin materiaaliratkaisuihin tai kohteen tilanteeseen, jossa epäpuhtaudet ovat niin vähäisiä tai kaasun hyödyntäminen niin rajallista, ettei erityisiä toimenpiteitä tarvita.

Kaatopaikkakaasun keräys ja hyödyntäminen

Millainen kaatopaikkakaasun keruujärjestelmä teillä on käytössä?

Vastausaineiston perusteella kaatopaikkakaasun keruujärjestelmät Suomessa muodostuvat pääosin pysty- ja vaakakeruukaivoihin perustuvista imujärjestelmistä, joita ohjataan kaasupumppaamoiden, kompressorien tai kiertomäntäpuhaltimien avulla. Järjestelmät ovat rakenteellisesti monimuotoisia, ja niiden ikä, laajuus ja tekninen kehitys vaihtelevat huomattavasti eri kaatopaikkojen välillä.

Useimmilla vastaajilla on käytössään yksi pumppu tai kompressor, mutta joillakin kaatopaikoilla pumppaamoja on useampia, ja suurimmissa kohteissa linjoja voi olla jopa 40–50 tai kaivoja yli 200. Esimerkiksi Sarlinin toimittamia pumppaamoja/Robuschi-pumppuja esiintyy useissa vastauksissa, mikä kertoo kaupallisten vakioratkaisujen laajasta käytöstä.

Imujärjestelmät koostuvat tyypillisesti seuraavista elementeistä:

- pystyimukaivot (halkaisija 500–900 mm, usein louhe- tai sepelitäytöllä)
- vaakakeräyslinjat ja salaojat, joihin kaivot liitetään
- imulinjat, joiden määrä vaihtelee suuresti – joissakin kohteissa 6–10 linjaa, toisissa yli 30 linjaa per pumppaamo
- kaasupumppaamot, joiden hankintavuodet ulottuvat 1990-luvulta 2020-luvulle

Imulinjojen ja kaivojen säätö tehdään yleisesti noin kerran kuukaudessa, mutta suurilla järjestelmillä säätöjä tehdään myös viikoittain. Joissakin kohteissa säätö on harvempaa, esimerkiksi neljä kertaa vuodessa, mikä liittyy joko vähäiseen kaasuntuottoon tai järjestelmän rakenteelliseen yksinkertaisuuteen. Kerätty kaasu ohjataan joko hyötykäyttöön mikroturbiinilaitoksille, kaasumootoreille, kaukolämmön esilämmitykseen, teollisuudelle tai soihdulle poltettavaksi.

Useissa vastauksissa kuvataan kaasunkeräysjärjestelmän vaiheittaista laajentamista kaatopaikan kasvun ja ajan myötä. Laajennukset ovat sisältäneet uusien pystykaivojen, louhekaivojen ja vaakakeräyslinjojen rakentamista kaatopaikan eri kehitysvaiheissa. Järjestelmiä on myös modernisoitu automaatiopäivityksillä ja uusilla pumpuilla, joskin yhdessä vastauksessa automaatiopäivitys oli jäänyt toimimattomaksi.

Käyttöiät vaihtelevat kohteittain: osa järjestelmistä on edelleen toiminnassa 20 vuoden jälkeen, ja arvioitu käyttöikä joissain kohteissa on 10–20 vuotta eteenpäin. Kaivojen tuottokyky kuitenkin hiipuu ajan myötä, mikä näkyy useissa vastauksissa: alkuperäisistä kaivoista vain osa tuottaa edelleen kaasua.

Kokonaisuutena järjestelmät ovat rakenteeltaan monimuotoisia, mutta niitä yhdistää selkeä tavoite: ylläpitää riittävää alipainetta kaivoissa ja linjoissa, kerätä kaasu talteen tehokkaasti ja ehkäistä hallitsemattomia päästöjä. Järjestelmien ylläpidossa korostuvat säännölliset säädöt, kaivojen tilan seuranta ja pumppaamojen tekninen toimintavarmuus. Vastausaineistossa on myös kohteita tai yksittäisiä penkkoja, joissa kaatopaikkakaasua ei vielä kerätä tai joissa ei ole aktiivista kaasunkeräyslaitteistoa.

Kuinka tiheästi kaatopaikkakaasun keräyskaivoja on sijoitettu kaatopaikalle ja miten niiden paikat ovat valittu?

Kaatopaikkakaasun keräyskaivojen sijoittaminen vaihtelee kaatopaikan koon, rakenteen ja jätetäytön ominaisuuksien mukaan, mutta kokonaisuutena kaivot pyritään sijoittamaan kattavasti ja tasaisesti koko kaasua tuottavalle alueelle. Tyypillinen kaivotiheys on noin 1–2 kaivoa hehtaaria kohti, ja useilla kaatopaikoilla kaivot muodostavat 40–50 metrin välein sijoitetun ruudukon. Joillakin alueilla etäisyys voi olla suurempi, jopa 80–100 metriä, mutta tämä edustaa harvempaa poikkeusta. Eri kaatopaikoilta esitetyt esimerkit osoittavat kaivomäärien skaalautuvan pinta-alan ja jätetäytön rakenteen mukaisesti.

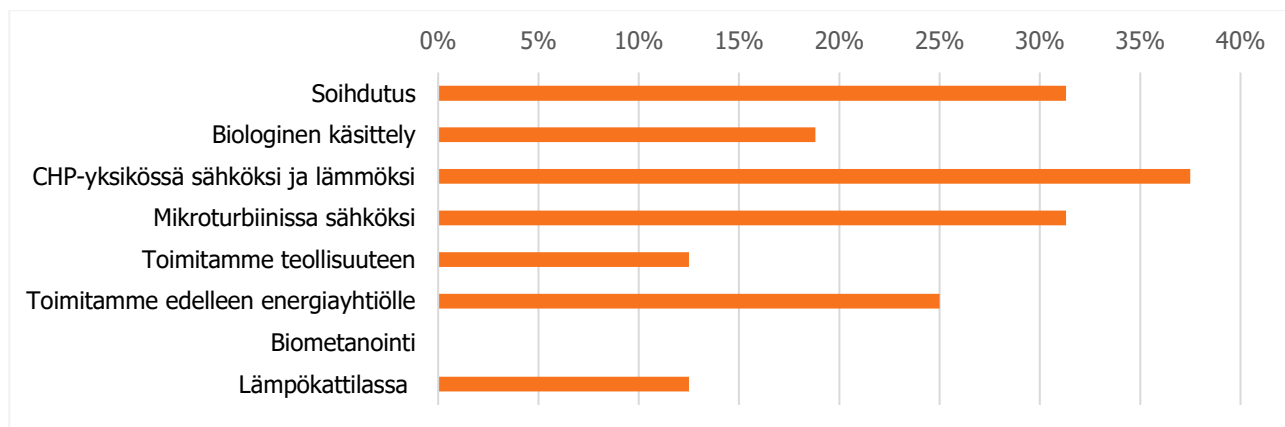
Kaivojen sijainnin valinta perustuu useimmiten asiantuntija- tai konsulttisuunnitteluun. Monilla kaatopaikoilla ulkopuolinen suunnittelija on määrittänyt paikat joko rakentamisen tai sulkemissuunnittelun yhteydessä. Joissakin tapauksissa kaivot on asetettu soveltuville alueille jätteen koostumuksen perusteella siten, että epäorgaanisia ja kaasua tuottamattomia täyttöjä sisältävät alueet on voitu jättää verkoston ulkopuolelle. Paikkoja on täydennetty kokemuksen karttuessa, esimerkiksi vuototutkimusten havaintojen perusteella, jolloin keräysjärjestelmän kattavuutta on parannettu.

Maaston ominaisuudet ja täyttöalueiden muoto vaikuttavat myös sijoitteluun. Osalla kaatopaikoista kaivot on asetettu korkeammille lakialueille kaasun virtausta tukemaan, ja vanhoilla kaatopaikoilla verkosto on laajentunut vaiheittain jätetäytön laajentumisen ja maisemointitöiden myötä. Aina kaivojen täsmällisiä valintaperusteita ei tiedetä, mutta yhtenäinen päälinja on, että tavoitteena on ollut tasainen peitto, toimiva kaasunkeruu ja rakenteiden sopeutuminen kaatopaikan jätetäytön vaihteluihin.

Keräyskaivojen sijoittaminen on pääosin systemaattista ja asiantuntijatyöhön perustuvaa. Tiheys ja sijoittelu mukautuvat kaatopaikan olosuhteisiin ja jätteen laatuun, ja järjestelmiä on kehitetty vaiheittain keräystehokkuuden parantamiseksi.

Hyödynnättekö kaatopaikkakaasut jollain tavalla ja miten käsittelette kerätyn kaasun?

Soihdutuksen tulkinta vaihteli vastaajien välillä. Osa toimijoista ilmoitti soihdutuksen kaasun hyödyntämiseksi, kun taas osa ei luokitellut soihdutusta hyödyntämiseksi. Kyselyyn vastanneista toimijoista 60 % kerää aktiivisesti kaatopaikkakaasuja. Kerättyä kaatopaikkakaasua käytetään useilla eri tavoilla, joista yleisin on CHP-yksiköissä tapahtuva muuntaminen sähköksi ja lämmöksi ja toiseksi yleisin on soihdutus sekä mikroturbiinien käyttö sähkön tuotantoon (Kuvio 2.2). Muita käyttökohteita ovat muun muassa biologinen käsittely, kaasun toimittaminen edelleen energiayhtiölle, hyödyntäminen lämpökattiloissa sekä kaasun toimittaminen teollisuuden tarpeisiin. Yksittäinen toimija saattaa käyttää tai käsitellä kerätyn kaasun yhdellä tai useammalla tavalla eri jätepenkoissa, minkä vuoksi kuvassa prosenttiosuuksien summa luonnollisesti ylittää 100 %. Lisäksi vastauksissa oli todettu, että vaikka alueelle on rakennettu valmius toimittaa kaasu teollisuuteen, tätä mahdollisuutta ei tällä hetkellä pystytä hyödyntämään, ja vaikka kaasun toimittaminen energiayhtiölle olisi teknisesti mahdollista, sitä ei tehdä heikon metaanipitoisuuden vuoksi.



Kuvio 2.2 Kaatopaikkakaasun hyödyntämis- ja käsittelytapojen yleisyys kaasua keräävien vastaajien (n = 15) keskuudessa. Prosenttiosuudet kuvaavat kunkin hyödyntämis- tai käsittelytavan ilmoittaneiden toimijoiden osuutta kaikista kaasua keräävistä vastaajista.

Taulukossa 2.3 tarkastellaan kerätyn kaatopaikkakaasun keskimääräisen metaanipitoisuuden ja käytettyjen hyödyntämis- tai käsittelytapojen mahdollista yhteyttä. Vastausten perusteella metaanipitoisuuden ja hyödyntämistavan välillä ei havaita selkeää yksiselitteistä riippuvuutta, sillä esimerkiksi energiakäyttöä esiintyy sekä matalammilla että korkeammilla metaanipitoisuuksilla. Korkeimmat metaanipitoisuudet liittyvät energiakäytön lisäksi kaasun toimittamiseen ulkopuolisille hyödyntäjille, mikä viittaa siihen, että korkea metaanipitoisuus voi parantaa kaasun hyödyntämismahdollisuuksia. Lisäksi hyödyntämistavan valintaan vaikuttavat esimerkiksi kaasun puhtaus sekä tekniset ja taloudelliset tekijät.

Taulukko 2.3 Kerätyn kaatopaikkakaasun keskimääräisen metaanipitoisuuden ja kaasun hyödyntämis- tai käsittelytavan välinen yhteys kyselyyn vastanneilla kaasua keräävillä toimijoilla (n = 15).

Kaasun käsittely- tai hyödyntämistapa	Kyselyyn vastanneet kaasua keräävät toimijat (15 kpl)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	kpl
Soihdutus																5
CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi																5
Mikroturbiinissa sähköksi																5
Toimitamme edelleen energiayhtiölle																4
Biologinen käsittely																3
Toimitamme teollisuuteen																2
Lämmöksi lämpökattilassa																1
Kerätyn kaatopaikkakaasun keskimääräinen metaanipitoisuus, %	40–60	30	32	32	33	39	39	40	43	45	45	47	48	49	51	

Onko teillä kokemusta teknologioista, joilla voidaan hyödyntää heikkolaatuista kaatopaikkakaasua? Jos on, mitä ja millaisin tuloksin?

Vastausten perusteella heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun hyödyntämisestä on kertynyt hyvin vähän kokemuksia ylipäänsä, saati myönteisiä kokemuksia. Useimmat toimijat ilmoittivat, ettei teknologisia ratkaisuja ole käytössä tai että niitä ei ole saatu toimimaan käytännössä. Monilla kaatopaikoilla heikkolaatuinen kaasu päättyy edelleen soihdutukseen, mikä on osoittautunut toimivimmaksi ratkaisuksi erityisesti silloin, kun metaanipitoisuus jää noin 30 prosentin tasolle.

Mikroturbiineja on kokeiltu useissa kohteissa, mutta kokemukset ovat ristiriitaisia: käynnistäminen heikkolaatuisella kaasulla on osoittautunut vaikeaksi, vaikka turbiinit voivat toimia, jos käyntiin saaminen onnistuu. Joissakin tapauksissa kaasun laatu on liian heikko toiminnan jatkuvuuden varmistamiseksi. Poistamalla jalostuslaitoksella hiilidioksidia kaatopaikkakaasusta, voidaan sen metaanipitoisuutta kasvattaa ja siten hyötykäyttömahdollisuudet paranevat.

Useat toimijat korostivat, että heikkolaatuisen kaasun hyödyntämistä hankaloittavat rakenteelliset ja prosessiin liittyvät tekijät: jätepenkan alipaine kaasua otettaessa voi vetää ilmaa penkkaan ja laimentaa kaasua, mikä entisestään heikentää hyödynnettävyyttä. Tämä tekee teknisestä hyödyntämisestä haastavaa tai jopa mahdotonta ilman merkittäviä rakenne- ja prosessimuutoksia. On myös korostettu, että penkkaa täytettäessä välipeitot olisi tärkeää tehdä materiaaleilla, jotka varmistetaan kaasutiiveys.

Onko kaatopaikan kastelu käytössä kaatopaikkakaasun lisäämiseksi? Oletteko huomanneet, että kastelulla olisi vaikutusta kaasun laatuun?

Vastausten perusteella kaatopaikan kastelu ei ole yleisesti käytössä kaasuntuoton lisäämiseksi: 64 % vastaajista ilmoitti, ettei kastelua käytetä, 16 % käyttää kastelua ja 20 % kuvasi vaihtoehtoisia käytäntöjä. Muiden vaihtoehtojen mukaan joillakin alueilla kastelua on ollut käytössä, mutta järjestelmä ei ole tällä hetkellä toimintakunnossa, tai vettä kierrätetään muista syistä, kuten vesienhallinnan vuoksi. Osa vastaajista kertoi avoimilla alueilla olevan vedenkäsittelyn rejektiveden jakokaivoja, ja yhdessä tapauksessa kastelu on ollut aiemmin käytössä. Kastelun vaikutuksista kaasun laatuun saatiin vaihtelevia havaintoja: vastaajista 45 % oli huomannut kastelulla olevan vaikutusta, 33 % ei havainnut vaikutuksia ja 22 % antoi muun vastauksen. Muiden vastausten mukaan kastelu saattoi alkuun parantaa kaasun muodostumista tai laatua, mutta vaikutus ei ollut pitkäaikainen, koska vesi löytää ajan myötä omat virtausreitinsä eikä kastelusta saada pysyvää hyötyä.

Kaatopaikkakaasun hyödyntämisen motivaattorit ja haasteet

Oletteko hakenut ja saanut Energiavirastolta päätöksen kaatopaikkakaasunne kestävyydestä (kestävyysjärjestelmä)? Maksatteko kaasusta valmisteveroa?

Vastausten perusteella enemmistö vastaajista ei ole hakenut eikä saanut Energiaviraston päätöstä kaatopaikkakaasun kestävyydestä. Useissa tapauksissa kestävyysjärjestelmä puuttuu kokonaan tai kaatopaikkakaasun hyödyntäminen on sisällytetty ulkopuolisen toimijan kestävyysjärjestelmään. Osa vastaajista on kuitenkin hakenut ja saanut päätöksen, ja näissä tapauksissa myös valmisteveroa maksetaan.

Valmisteveron osalta käytännöt vaihtelevat: monesti kaasun hyödyntäjä maksaa veron, jolloin vastaajaorganisaatio ei itse maksa sitä suoraan. Toisaalta osa maksaa veroa esimerkiksi tuotetusta

lämmöstä tai sähköstä, ja joissakin tapauksissa mainitaan myös sähkövero ja huoltovarmuusmaksu. Mukana on myös vastauksia, joiden perusteella tietoa ei ole saatavilla tai kaatopaikkakaasua ei synny lainkaan, jolloin veroa ei makseta. Kokonaisuutena vastaukset kuvaavat hajanaista tilannetta, jossa toimintamallit riippuvat erityisesti kaasun hyödyntämistavasta ja toimijoiden rooleista.

Käytättekö tai aiotteko käyttää ulkopuolisia konsultteja tai asiantuntijoita kaatopaikkakaasuun liittyvissä töissä? Jos kyllä, millaisissa?

Vastausten perusteella ulkopuolisten konsulttien ja asiantuntijoiden käyttö kaatopaikkakaasuun liittyvissä töissä on varsin yleistä, vaikka käytännöt vaihtelevat organisaatioittain. Suuri osa vastaajista hyödyntää ulkoisia toimijoita erityisesti huoltoon, ylläpitoon ja tekniseen operointiin, ja esimerkiksi laitetoimittaja (useimmin Sarlin) vastaa monin paikoin laitosten huollosta, käytöstä ja etävalvonnasta. Lisäksi ulkopuolisia asiantuntijoita käytetään mittauksissa, kuten kaasukoostumuksen, päästöjen ja vuotojen seurannassa, sekä laajemmin kaatopaikkakaasun määrän ja tuotannon kehittymisen selvittämisessä.

Konsultteja hyödynnetään myös suunnittelu- ja kehitystehtävissä, kuten uusien hankkeiden, kaasunkeräysratkaisujen ja penkan sulkemiseen liittyvien järjestelmien suunnittelussa sekä dokumentaation ylläpidossa. Joissakin tapauksissa asiantuntijoita käytetään erikoistuneisiin tehtäviin, kuten automaation päivityksiin, vikatilanteiden ratkaisuun tai kaasumoottoreiden ja muun laitteiston vuosihuoltoihin. Osa toimijoista käyttää konsultteja hyvin laajasti lähes kaikissa kaatopaikkakaasuun liittyvissä toiminnoissa, kun taas toiset tekevät perushuollon ja säädöt itse ja turvautuvat ulkopuoliseen osaamiseen lähinnä erityistilanteissa.

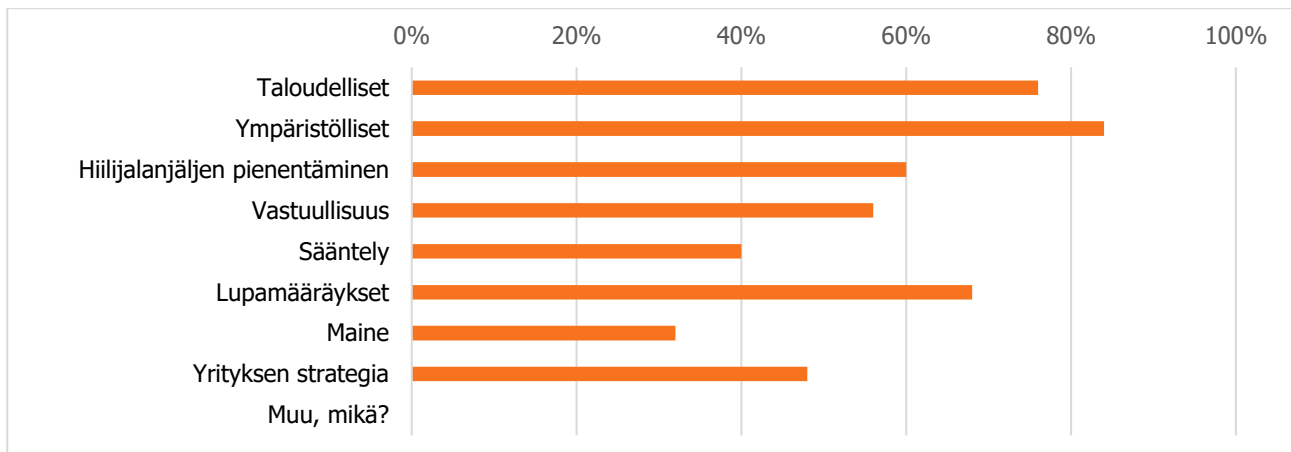
Toisaalta joukossa on myös useita toimijoita, jotka eivät tällä hetkellä käytä ulkopuolisia konsultteja tai joilla ei ole suunnitelmia niiden käyttöön, sekä joitakin, joissa päätöstä asiasta ei ole vielä tehty. Yksittäiset toimijat mainitsevat myös tavoitteen lisätä omaa osaamista tulevaisuudessa, erityisesti mittauksen ja operoinnin osalta, ja käyttää ulkopuolisia asiantuntijoita jatkossa enemmän huolto- ja kehitystehtäviin. Kokonaisuutena ulkopuolisten asiantuntijoiden rooli korostuu erityisesti teknisesti vaativissa, harvemmin toistuvissa tai erityisosaamista vaativissa tehtävissä.

Mitkä tekijät motivoivat tai motivoisivat teitä kaasun keräykseen ja hyödyntämiseen?

Vastausten perusteella kaatopaikkakaasun keräämistä ja hyödyntämistä ajavat ennen kaikkea ympäristösyöt ja velvoitteet, mutta mukana on myös taloudellinen näkökulma (Kuvio 2.3). Ympäristölliset syyt ovat ilahduttavasti tärkein motivaattori, jonka valitsee 84 % vastaajista. Hiilijalanjäljen pienentäminen, vastuullisuus ja yrityksen omat strategiset tavoitteet vaikuttavat päätöksiin. Kaatopaikkakaasu halutaan ottaa talteen, jotta päästöjä voidaan vähentää, hajuhaittoja hallita ja turvallisuutta parantaa. Lupamääräykset ja sääntely ovat myös monelle keskeinen syy toimia, ja joissakin tapauksissa ne ovat jopa tärkein motivaattori.

Taloudellisesti kaasua hyödynnetään esimerkiksi sähkön ja lämmön tuotannossa, mikä tekee toiminnasta kannattavaa tai ainakin tukee muuta toimintaa. Maineella on myös merkitystä, kukaan ei halua olla "metaanimörkö", vaan toimijat haluavat näyttäytyä vastuullisina ja ympäristövaikutukset huomioivina.

Kokonaisuutena motivaatio syntyy usean tekijän yhdistelmästä: velvoitteet laittavat liikkeelle, ympäristöhyödyt perustavat tekemisen, ja taloudellinen hyöty tukee sitä.



Kuvio 2.3 Kaatopaikkakaasun keräyksen ja hyödyntämisen motiivit toimijoiden keskuudessa (n = 25). Prosenttiosuudet kuvaavat kunkin motiivin valinneiden toimijoiden osuutta kaikista vastaajista, ja sama toimija on voinut valita useita motiiveja.

Millaiset tekniset, taloudelliset tai muut edellytykset määrittävät kaasun hyödyntämisen mahdollisuksianne?

Kaasun hyödyntämisen edellytykset vaihtelevat huomattavasti riippuen kaatopaikan koosta, sijainnista, kaasuntuoton määrästä sekä paikallisista teknisistä ja taloudellisista olosuhteista. Kaasun hyödyntämisen ensisijainen haaste liittyy siihen, ettei läheisyydessä ole sopivaa hyödyntäjää tai hyödyntämiskohdetta. Tämä yhdistettynä syrjäiseen sijaintiin ja rajallisiin myyntimahdollisuuksiin johtaa siihen, että kaasun taloudellisesti kannattava hyötykäyttö on vaikeaa ja monin paikoin järkevämpää on edelleen polttaa kaasu soihdussa.

Myös kaasun määrä ja laadun puutteellisuus nousee esiin. Pienen kaatopaikan rajallinen orgaanisen jätteen määrä tai pitkään voimassa ollut biojätteen lajitteluvaihtoehto on vähentänyt kaasuntuotantoa merkittävästi. Tämä vaikuttaa suoraan siihen, että teknisesti saatavilla oleva kaasumäärä ei riitä energiantuotantolaitteiden, kuten kaasumoottorien tai turbiinien, tehokkaaseen ja jatkuvaan käyttöön. Joillakin kaatopaikoilla suljettu penkka ei enää tuota kaasua lainkaan, mikä tekee hyödyntämisestä mahdotonta. Lisäksi kaasun heikko laatu tai vähäinen metaanipitoisuus rajoittaa käyttömahdollisuuksia entisestään ja ohjaa valintoja kohti yksinkertaisia käsittelymenetelmiä.

Taloudellisten edellytysten kannalta keskeinen tekijä on investointien suuruus suhteessa saatavaan hyötyyn. Useiden kaatopaikkojen näkemyksen mukaan kaasun hyödyntämisestä saatava taloudellinen hyöty ei kata kaasun keräämisen, käsittelyn tai energiantuotantoteknologian käyttökustannuksia. Erityisesti tilanteet, joissa lämpöä tai sähköä ei voida myydä eikä omassa toiminnassa ole riittävästi kulutusta, heikentävät kannattavuutta. Joillakin kaatopaikoilla kaasulla tuotettu sähkö riittää vain omiin tarpeisiin, eikä ulosmyynti ole teknisesti tai taloudellisesti mahdollista.

Teknisten edellytysten osalta nostettiin esiin muun muassa kaasuntuotantoa seuraavien laitteistojen soveltuvuus ja skaalautuvuus. Pienille kaatopaikoille suunniteltuja ratkaisuja pidetään rajallisina, ja suurempiin laitoksiin verrattuna osaamis- ja resurssipula voi vaikeuttaa järjestelmien suunnittelua, käyttöä ja ylläpitoa. Toisaalta hyvissä olosuhteissa, kuten teollisuusalueen läheisyydessä, kaasun hyödyntäminen voi olla sujuvampaa. Esimerkkinä mainittiin kaatopaikka, jolla on panostettu talteenottojärjestelmän laatuun, kunnossapitoon, mikä yhdistettynä kaasun puhtauteen on mahdollistanut kaasun käytön teollisuudessa ilman merkittäviä lisäkustannuksia.

Esiin nousseita tekijöitä olivat myös lupa-asiat sekä osaavan huoltoliikkeen saatavuus. Erityisesti lupatilanteet, jotka rajoittavat esimerkiksi jätepenkan kastelua kaasuntuoton lisäämiseksi, voivat estää kaasun tehokkaan hyödyntämisen. Lisäksi tekninen tuki ja huoltokumppanit ovat tärkeitä, jotta kaasujärjestelmät toimivat luotettavasti.

Kaasun hyödyntämisen mahdollisuudet kaatopaikoilla muodostuvat siis useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Ratkaisevia tekijöitä ovat kaasun määrä ja laatu, sijainti ja hyödyntämiskohteiden saatavuus, investointien ja ylläpidon kustannukset sekä tekninen osaaminen ja lupaehtojen asettamat rajat. Kaasua voidaan hyödyntää silloin, kun sen tuotanto on riittävän vakaata ja kun energialle löytyy teknisesti ja taloudellisesti mielekäs käyttökohde. Useissa tapauksissa kuitenkin rajalliset määrät ja taloudelliset realiteetit tekevät hyödyntämisestä haastavaa.

Mitkä ovat suurimmat haasteenne kaatopaikkakaasujen keräämisessä, käsittelyssä tai hyödyntämisessä?

Kaasujen kerääminen, käsittely ja hyödyntäminen on monella alueella teknisesti ja taloudellisesti vaativaa. Yleisimpiä haasteita ovat kaasun määrän ja laadun heikkeneminen, mikä näkyy erityisesti vanhenevissa tai pienissä jätetäytöissä. Metaanipitoisuuden lasku ja epäsäännöllinen tuotanto aiheuttavat käyttökatkoksia laitteistoissa, ja joissakin tapauksissa kaasua joudutaan keräämään pitkään, ennen kuin edes soihtupoltto voidaan käynnistää. Matalat kaasumäärät tekevät hyödyntämisestä usein kannattamatonta, ja osa toteaa, ettei teknistaloudellisesti järkevää hyödyntämiskohdetta tällä hetkellä ole.

Tekniset ongelmat liittyvät erityisesti keräys- ja pumppausjärjestelmien toimivuuteen. Keräysputkistot ja kaasukaivot rikkoutuvat ja liikkuvat jätetäytön painuessa, ja järjestelmiin kertyy vettä, mikä heikentää imua ja lisää kunnossapitotarvetta. Laitteistojen, kuten polttimien, pumppaamoiden ja jalostuslaitosten, toimintahäiriöt lisäävät kustannuksia ja voivat estää kaasun jatkuvan käsittelyn. Joillakin alueilla keräysverkostojen rapistuminen, esimerkiksi salaojien tukkeutuminen, heikentää kaasun talteenoton tehokkuutta. Osalla toimijoista osaaminen ja resurssit kaasujärjestelmien hallintaan ovat rajallisia, mikä on johtanut ulkoistamisen lisääntymiseen ja vaikeuteen ylläpitää kokonaiskuvaa järjestelmän toiminnasta ja kehittämistarpeista.

Syrjäinen sijainti korostaa haasteita niillä kaatopaikoilla, joilla ei ole läheisiä teollisia tai energiantuotannon kumppaneita. Kun hyödyntämiskohteita ei ole, kaasun käsittely jää tekniseksi velvoitteeksi ilman mahdollisuutta taloudelliseen hyötyyn. Toisinaan haasteena on myös se, ettei investointeihin ole saatavilla riittävästi rahoitusta, mikä estää toimintaa tukevien ratkaisujen käyttöönoton. Kaasujen hallinta vaatii jatkuvaa kunnossapittoa, teknistä osaamista ja taloudellisia resursseja, ja pienillä tai hiipuvilla kaatopaikoilla nämä edellytykset eivät aina täyty.

Miten haasteet näkyvät käytännössä (esim. tekniset ongelmat, kustannukset, luvat, muut resurssit?)

Käytännön tasolla kaatopaikkakaasujen hallintaan liittyvät haasteet ilmenevät ensisijaisesti teknisinä ongelmina, kasvavina kustannuksina sekä resurssi- ja lupaprosesseihin liittyvinä paineina. Tekniset ongelmat korostuvat erityisesti kaasunkeräysjärjestelmissä, joissa kaivojen ja putkistojen painuminen, rikkoutuminen ja veden kertyminen aiheuttavat tukoksia ja alentavat keräystehokkuutta. Laiterikot johtavat käyttökatkoksiin ja kalliisiin korjaustoimiin. Useat toimijat raportoivat myös siitä, että laitteisto (kompressorit ja soihtut) on mitoitettu suuremmalle

kaasuntuotannolle kuin mitä vanhenevat penkat kykenevät tuottamaan, mikä aiheuttaa toimintahäiriöitä ja alhaisia käyntiasteita.

Kustannukset nousevat monella tavalla: varaosien ja erikoisosien hinnat ovat korkeita, rikkivedyn poistaminen syö merkittävän osan kaasun hyödyntämisestä saadusta taloudellisesta hyödystä, ja vähenevä kaasuntuotanto pienentää tuloja samaan aikaan kun ylläpitokustannukset pysyvät korkeina tai kasvavat. Joillakin kaatopaikoilla kaasuntuotannon väheneminen ei mahdollista jatkojalostusta. Moni toimija joutuu käyttämään omaa henkilökuntaa tehtäviin, joihin ei ole helposti saatavilla ulkopuolisia osaajia. Tämä lisää työkuormaa ja vie resursseja muista tehtävistä.

Lupaprosessit ja viranomaisten vaatimukset näkyvät arjessa toistuvina selvityspyyntöinä ja vuosittaisina velvoitteina tuottaa selvityksiä kaasuntuotannosta ja hyödyntämismahdollisuuksista. Vaikka selvityksiä on tehty useita vuosia peräkkäin, tulokset ovat pysyneet samoina: kaasua on liian vähän tehokkaaseen hyödyntämiseen, vaikka kaasuntuottoa on kasvatettu laitteistoautomaatiikalla, aktiivisella seurannalla ja loppusijoitusalueiden pinnan tiivistämisellä. Silti viranomaisvaatimukset jatkuvat, mikä lisää hallinnollista työtaakkaa. Joillakin alueilla luvitus myös hidastaa päätöksentekoa ja estää toimivia muutoksia järjestelmien kehittämiseksi.

Kokonaisuudessaan heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun hyödyntämisen haasteet heijastuvat käytännössä järjestelmien jatkuvana ylläpitotarpeena, taloudellisen kannattavuuden heikkenemisenä ja henkilöstön kasvavana kuormituksena. Kaasuntuotannon vähäisyys ja teknisten ratkaisujen epäoptimaalisuus yhdistyvät tilanteeseen, jossa kaatopaikkakaasujen hallinta on monella toimijalla välttämätön mutta vaikeasti tehostettava osa toimintaa.

OSA 3: Tulevaisuuden kaatopaikkakaasun käsittelymenetelmät ja hyödyntäminen

Kaatopaikkakaasun käsittelyvaihtoehdot; paras olemassa oleva teknologia (BAT) vanhentunutta?

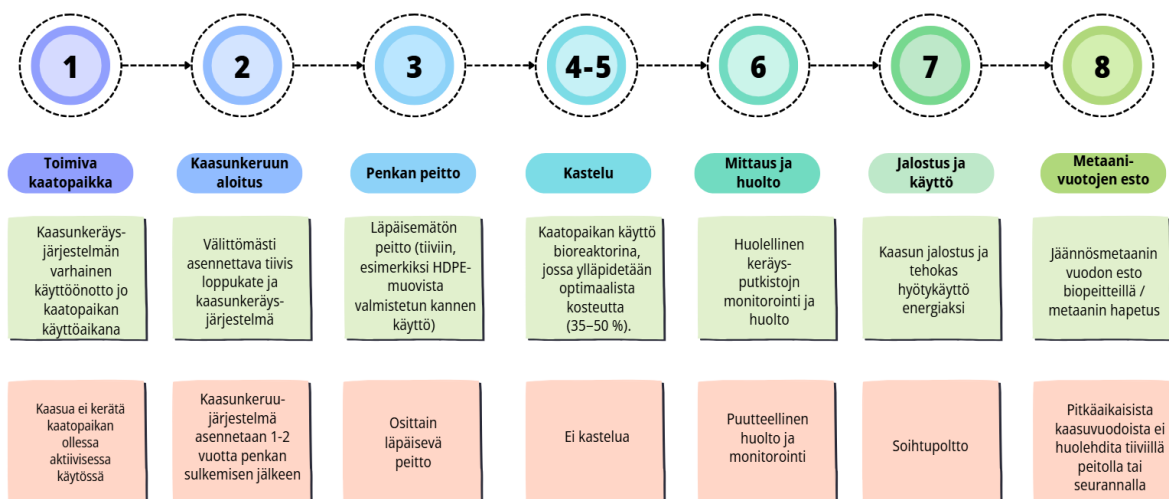
EU:n kaatopaikkadirektiivi 1999/31/EY (EU 1999) on vuodelta 1999, ja siinä on kuvailtu kaatopaikkojen kannalta tarvittavat perustamis-, seuranta- ja jälkihoidon toimenpiteet. Teknologian kehittyttyä lakia on uudistettu siten, että vuoden 2024 direktiivin 2024/1785 lainuudistuksen mukaan ajantasaisia parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa (BAT) koskevia vertailuasiakirjoja ja BAT-päätelmiä tulisi kehittää ja noudattaa (EU 2024).

Suomessa suurin osa kaatopaikoista, joille on viety orgaanista jätettä, on jo suljettuja. Sulkemisaikoihin SYKE julkaisi oppaita kaatopaikan sulkemiseen ja pohjan tiivistysrakenteille (Suomen ympäristökeskus 2001 & 2008; Leppänen (toim.), 2002). Varsinaista erillistä BAT-ohjetta kaatopaikoille ei ole julkaistu kuten biokaasulaitoksille (Latvala 2009), mutta BAT-päätelmiä (BREFs, BAT reference documents) ollaan paraikaa kokoamassa EU:n voimin. Kansainvälisen LAN BREF -työryhmän kick-off-kokous pidettiin tammikuussa 2026, mutta raportin valmistuminen vienee vuosia (EU 2026).

Parhaat käytännöt kaatopaikkakaasun hallinnassa (BREFs) päivittyvät

Ranskalaiset Lair ym. (2024) ovat listanneet ja vertailleet kahdeksaa erilaista hyvää käytäntöä, joilla kaatopaikkakaasun vuotoja ja kasvihuonekaasujen määrää voidaan pienentää (Kuvio 3.1).

Tärkeimpiä toimia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ovat kaasunkeräysjärjestelmän rakentaminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, penkkujen peitto läpäisemättömällä kerroksella, penkan säilyttäminen kosteana ikään kuin se olisi bioreaktori; kaasunkeruun ja päästöjen täsmällinen seuranta ja putkistojen ja peiton huolto, kerätyn kaasun tehokas hyödyntäminen sähköksi, lämmöksi ja biometaaniksi, sekä lopulta jäännösmetaanin pitkäaikaispäästöistä huolehtiminen metaania hapettamalla tai biosuotimilla.



Kuvio 3.1 Parhaat käytännöt (vihreällä) kaatopaikkakaasun hallinnassa ja hyödyntämisessä. Kuvio mukailtuna Lair et al., 2024, Kuva 1.

Kaatopaikalta vapautuu metaania asidogeneesivaiheessa (3 kk -> 2-3 vuotta) runsaasti (Taulukko 1.3) orgaanisen aineksen hajotessa. Niinpä varhainen kaatopaikkakaasun keruu mahdollistaa metaanin talteenoton silloin, kun metaanin tuotto on suurimmillaan. Jotta metaani saadaan talteen, täytyy penkan päällä olla tiivis pintakerros ja kaasunkeräysputkisto asennettuna jo penkkaa perustettaessa. Parhaiten lopullisessa penkan peitossa toimii hienojakoinen maa-aines ja geosyntetinen HDPE (high density polyethylene) -kalvo, joka suojaa sekä metaanin pääsystä ilmakehään että suotovesien synnystä. Lair et al. arvioivat hyvälaatuisen peitteen perustuskustannuksen olevan noin 109 000 euroa ja horisontaalisen kaasuputkiston asentamisen 59 000 euroa kaatopaikan mallinnettua lohkoa (landfill cell) kohti, mutta maksavan itsensä takaisin seuraavissa vaiheissa. (Lair et al., 2024.)

Pintaeristyksenä voidaan alkuvaiheessa käyttää myös kevyempää väliaikaista pintarakennetta, jolloin painavien massojen läjittäminen ei aiheuta penkkaan painumia ja tiivistymiä aktiivisen orgaanisen aineen hajoamisen aikana (Suomen ympäristökeskus, 2001).

Hiljattain on kehitetty metaani- ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi uusia biogeokemiallisia pintarakenteita, joissa kaatopaikan penkkaa peittää ensin esimerkiksi riisinkuoren tai männyn biohiilestä ja maa-aineksesta sekoitettu biosuodin, joka hapettaa metaanin, ja sen päällä on toinen emäksisistä teollisuuden sivuvirroista kuten sementin poltosta syntyvästä pölystä koottu kerros, joka sitoo hiilidioksidia itseensä (Verma et al., 2025).

Penkan sopiva kosteus pitää sen anaerobisena ja mahdollistaa mikrobien toiminnan, jolloin kaatopaikka toimii kuin bioreaktori, eikä liika vesimäärä huuhtelee kaatopaikan ainesta suotovesiin. Käytännössä kosteus ylläpidetään noin 35–50 prosentissa kierrättämällä suotovettä läpäisemättömän päällysteen alla aktiivisen kaatopaikan käyttöajan ja sen sulkemisen jälkeen.

Suotoveden koostumusta ja määrää kontrolloidaan ja ruiskutetaan automaattisesti maksimaalisen tehokkuuden varmistamiseksi, kunnes kaatopaikkakaasua ei enää synny. Hyvä kosteustasapaino nopeuttaa orgaanisen aineksen stabiloitumisajan ja vähentää jälkitarkkailun tarvetta. Lairin ja kumppanien mukaan tämä investointi ”bioreaktoriin” maksaa noin 40 600 euroa. (Lair et al., 2024.)

Kosteustasapaino tulee pysyä yllä, eikä kertaalleen kuivunutta penkkaa yleensä saada enää kastetulla toimimaan. Käytännössä penkan pintarakennetta voi olla vaikea saada niin tiiviiksi ja suotovesien määrää optimaaliseksi, että penkan kosteus pysyisi haluttuna; joko sadevedet kastelevat penkkaa liikaa, tai kuivuuden aikana suotovettä ei ole kierrätettäväksi penkassa. Joissakin tapauksissa penkan kastelulle voi olla ympäristöluvassa määritettyjä rajoituksia esimerkiksi lähistöllä olevien vesialueiden suojelemiseksi kaatopaikan valumilta (katso kyselytutkimuksen tulokset ja asiantuntijahaastattelut).

Aktiivisen kaasunkeruun ja metaanintuoton ylläpidon lisäksi tarvitaan myös huolellista monitorointia ja kunnossapitoa. Ideaalitulanteessa jokaiseen keräyslinjaan asennettaisiin oma kaasumittarinsa ja paineensäätönsä kaasunkeruun optimoimiseksi mallinnuksen avulla. Markkinoilla on järjestelmiä, jotka tällaista seuranta- ja säätöpalvelua tarjoavat (HydriX, 2026). Kustannukset voivat kuitenkin nousta suuriksi samalla kun säätötarve kasvaa metaanin laadun ja määrän vähentyessä, ja kerätyn metaanin hyödyntäminen vaikeutuu. Mallinnukseen perustuvan kaasunkeruun ohjausjärjestelmän vuosikuluiksi Lair ja kumppanit arvioi noin 26 000 euroa per kaatopaikan lohko (Lair et al., 2024), mutta kulu saattaa olla keräyskaivojen määrästä riippuen huomattavasti suurempikin.

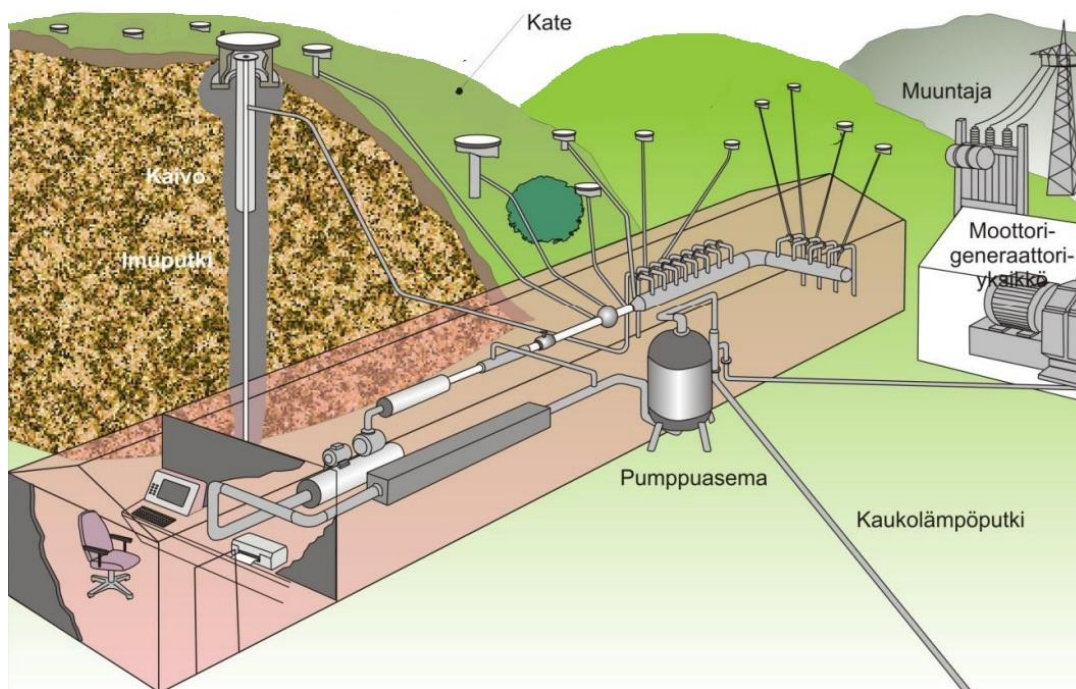
Lairin ja muiden kirjoittajien mukaan metaanista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt vähenevät hyödynnettäessä kaatopaikkakaasu ensisijaisesti biometaanina, toissijaisesti lämpönä, ja kolmantena vaihtoehtona sähkön tuotantoon (Lair et al., 2024). Heidän mukaansa hyvistä käytännöistä syntyvät kulut voidaan kattaa myymällä kaatopaikkakaasu energiaksi. Tämä toki kaatopaikan sulkemisen alkuvaiheessa onkin mahdollista, kun hyvälaatuista metaania syntyy aluksi paljon, mutta esimerkiksi Suomessa ja Tanskassa erityisesti ennen 2000-lukua suljetut kaatopaikat alkavat olla metaanintuottonsa hiipumisvaiheessa.

Viimeisenä hyvänä käytäntönä kaatopaikkojen hallinnassa Lair ja kumppanit nostavat esiin jäännösmetaanin hapettamisen biosuotimella. Tähän palaamme myöhemmässä luvussa.

Kaasun keräyksen teknologia

Kaatopaikkakaasun keruuta varten kaatopaikan perustamisen ja sulkemisen aikana penkkaan on asennettu pysty- ja vaakaputkistoja kaasun keruuta varten. Suljetun penkan päälle on usein läjitetty maa-aineksia jopa kymmenen metrin korkuinen kerros. Tämä kerros voi tiivistää alempia rakenteita ja heikentää kaatopaikkakaasun kulkeutumista penkasta keruuputkistoihin.

Keruuputkisto yhdistetään pumppuasemille, joista erillisiä linjoja ohjataan ja niiden kaasun pitoisuuksia voidaan seurata. Pumppuasemilta kaasu johdetaan joko soihtuun, kattilaan, kaasun pesuysiköihin tai puhdistuksen ja jatkojalostuksen jälkeen kaasuverkkoon kaasun määrästä, laadusta ja tarjolla olevista jatkokäyttövaihtoehdoista riippuen (Kuvio 3.2). Kaasun keräyksen käytännön toteutuksesta, katso Osa 2: kyselytutkimuksen tulokset.



Kuvio 3.2 Kaatopaikkakaasun keräysjärjestelmä. Kuva muokattu alkuperäisestä, lähde: Alakangas et al, 2016, kuva 12.3, s 194.

Kaatopaikkakaasun epäpuhtaudet ja niiden poisto

Jätelaji vaikuttaa kaatopaikkakaasun epäpuhtauksiin

Kaatopaikkakaasu voi sisältää yli sataa erilaista epäpuhtautta, tärkeimpinä mainittakoon rikkivety, siloksaanit, BTEX-yhdisteet, halogenoidut hiilivedyt (Pera et al, 2024) ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) (Duan et al., 2021, Hirvonen, 2010). Happi vaikuttaa yhdisteiden hajoamiseen. Karkeasti voidaan sanoa, että anaerobisessa metaanintuottovaiheessa myös kaasumaisten epäpuhtauksien määrä on suurin, osin kaasun keruun aiheuttaman imun vuoksi, osin siksi, että anaerobihajoamisessa syntyy useita hapettuneita metaboliitteja, kuten ketoneja, haihtuvia rasvahappoja ja asetaatteja, jotka vapautuvat kaatopaikkakaasun mukana ilmaan (Duan et al., 2021).

Epäpuhtauksien määrään ja laatuun vaikuttaa orgaanisen jätteen alkuperä ja kaatopaikan ikä. Kaatopaikoilla, joille on läjitetty murskattua autonromua, BTEX-yhdisteet ovat vallitseva kaasumainen epäpuhtaus, kun taas vanhoilla yhdyskuntajätteen kaatopaikoilla esiintyy enemmän rikkivetyä ja alifaattisia hiilivetyjä (Duan et al., 2021).

Siloksaaneja vapautuu kaatopaikoille pesuaineista, rakennusmateriaaleista ja kosmetiikasta. Siloksaanit rikkovat palaessaan kaasukäyttöisiä moottoreita, joten ne täytyy poistaa kaatopaikkakaasusta ennen liikennepolttoainekäyttöä.

Jos kaatopaikalle on läjitetty kipsiä rakennus- tai purkujätteen mukana, kaatopaikkakaasussa esiintyy suuria määriä rikkivetyä. Sulfaattia pelkistävät bakteerit hyödyntävät kipsilevyn

kalsiumsulfaattia ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) elektronin vastaanottajana ja muodostavat rikkivetyä (H_2S) kaatopaikkapenkan anaerobisissa olosuhteissa (Lee et al, 2006).

Kaatopaikkakaasun puhdistaminen

Kaatopaikkakaasu sisältää epäpuhtauksia, joiden poistamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi aktiivihillisuodatusta, adsorptiota, biologista puhdistusta, kryotislausta, kaasun pesua tai paineen ja lämpötilan vaihteluihin perustuvia erotusmenetelmiä. Seuraavassa esitellään yleisimmät kaasunpuhdistusmenetelmät lyhyesti, ja luvun lopussa on kokoomataulukko, jossa puhdistusmenetelmät on jaettu erotettavan epäpuhtauden mukaan.

Erinomainen kaatopaikkakaasun jalostus- ja hyödyntämiskatsaus löytyy vuodelta 2015 (Lampinen ja Rautio, 2015). Tässä luvussa käsitellään kyseistä katsausta päivittävää ja täydentävää tietoa.

Hiilidioksidi ja typpikaasu ovat inerttejä kaasuja, joita ei lasketa epäpuhtauksiksi. Niiden poistamista kutsutaan kaasun jalostamiseksi, ja sillä on tarkoitus nostaa kaasun energiatiheyttä (Lampinen ja Rautio, 2015). Koska puhdistus- ja jalostusmenetelmät usein yhdistetään, ne käsitellään tässä yhdessä.

Kaasunpesu (scrubbing)

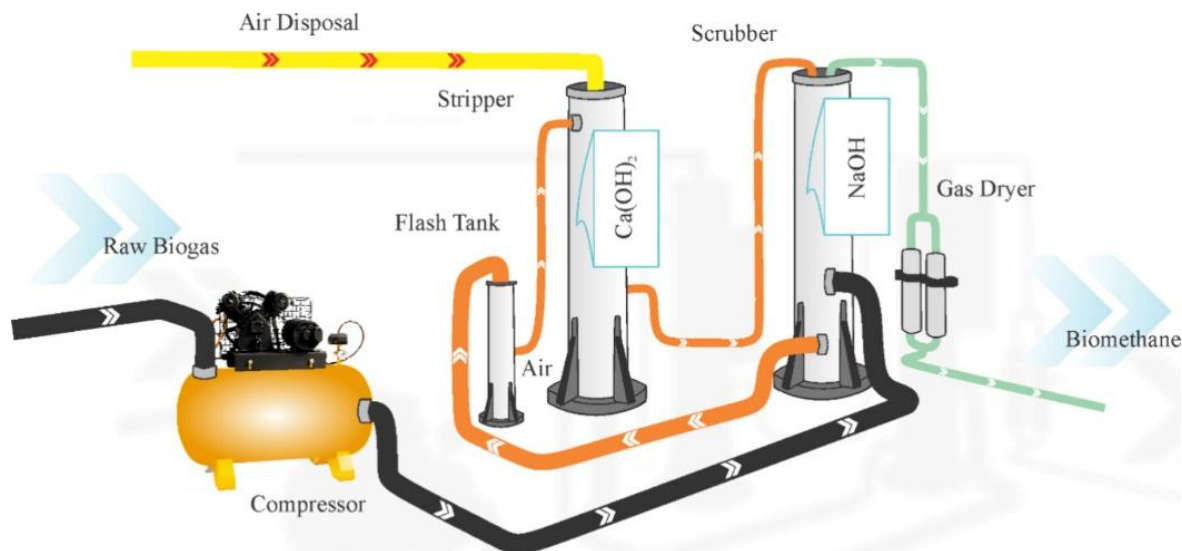
Kaasu johdetaan ilmakuplituksen avustamana veden läpi, jolloin hiilidioksidi ja rikkivety siirtyvät veteen ja metaani jatkaa kaasumuodossa, koska on veteen heikkoliukoisempi. Menetelmä on edullinen ja ympäristöystävällinen, mutta veden hallinnasta on huolehdittava (Cesar et al., 2024; Kuvio 3.3).



Kuvio 3.3 Kaasunpesu (water scrubbing). Kuvan lähde: Energy Fuels 2025, 39, 1, 39–71.

Kemiallinen erotus (chemical scrubbing)

Veden sijaan käytetään kemiallista pesua, esimerkiksi amiinia, joka erottaa hiilidioksidin metaanista tehokkaammin kuin vesi (Cesar et al., 2024; Kuvio 3.4).



Kuvio 3.4 Kemiallinen erotus (chemical scrubbing). Kuvan lähde: Energy Fuels 2025, 39, 1, 39–71.

Absorptio

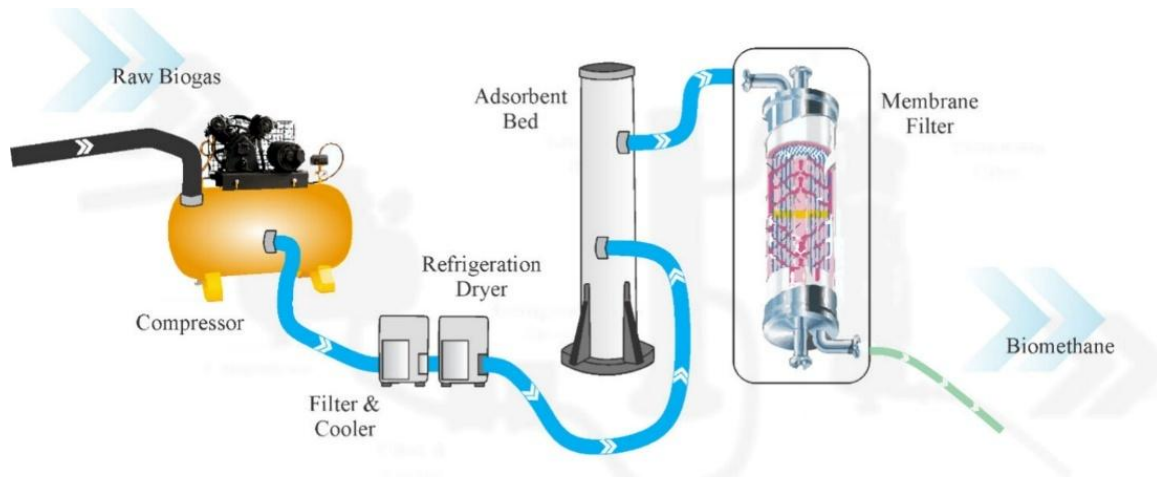
Kaasut sidotaan kemialliseen katalyyttiin, kuten SULAFER, joka on rautahydroksidi, joka muuntaa esimerkiksi rikkivedyn ja rikkidioksidin alkuaineraudaksi ja rikiksi (Gazpack 2026).

Kalvoerotus

Kalvoon tarttuvat suuremmat molekyylit kuten metaani, ja pienet pääsevät seulan läpi. Erilaiset kalvot erottelevat eri yhdisteitä; typen, hiilidioksidin ja veden erotukseen toimivia kalvomateriaaleja ovat esimerkiksi polyimidit ($\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ -erotus), polysulfonit ja selluloosa-asetaatti (CO_2/CH_4 -erotus) ja polyamidit (N_2/CH_4 -erotus) (Fatima et al., 2024, taulukko 1; Cesar et al., 2024, Kuvio 3.5)).

Uusimmat kalvotekniikat hyödyntävät useiden polymeerien ja erilaisten täyteaineiden, kuten zeoliitit, MOF:t (metal organic framework), ja grafeenioksidi, seoksia (MMMs, Mixed Matrix Membranes) selektiivisyyden ja läpäisevyyden parantamiseksi (Fatima et al., 2024). Myös keraamisia kalvoja on kehitetty (Ogunlode et al., 2022).

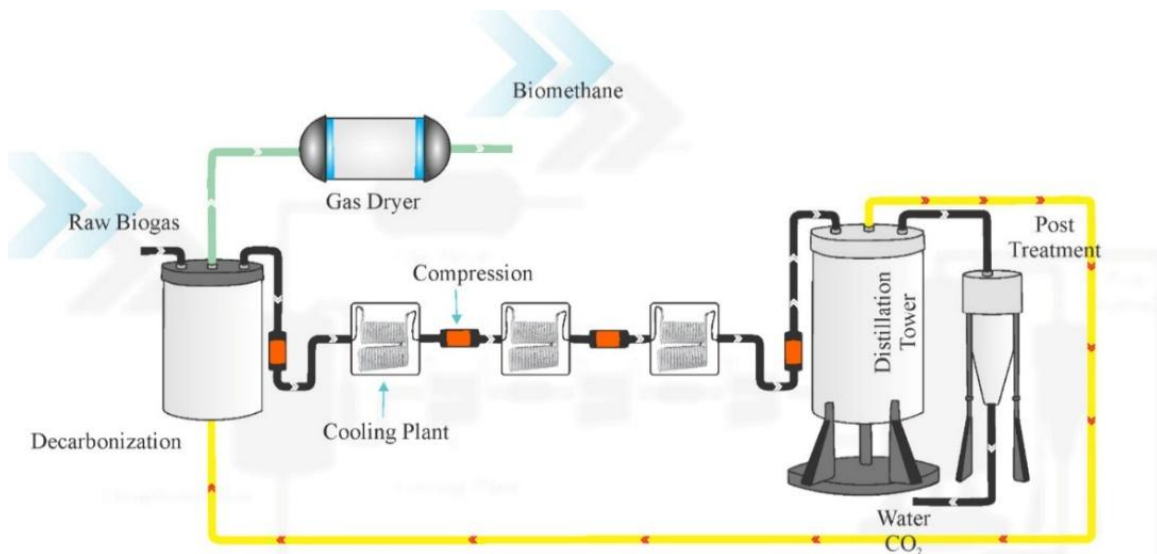
Toinen erotusta tehostava membraanityyppi ovat komposiittimembraanit, joissa membraaneissa on ohut selektiivinen kerros (usein polyimidi tai polyamidi) huokoisen tukikerroksen (kuten polysulfonin) päällä. (Fatima et al., 2024.)



Kuvio 3.5 Kalvoerotus. Kuvan lähde: Energy Fuels 2025, 39, 1, 39–71.

Kryogeeninen tislauk

Kaasu jäädytetään erittäin kylmäksi, jolloin eri yhdisteet kondensoituvat eri lämpötiloissa ja voidaan erotella (Cesar et al., 2024, Kuvio 3.6). Metaani pysyy pisimpään kaasumaisena, jolloin se saadaan erotettua kaasun epäpuhtauksista, myös typpikaasusta. Kryogeenisen tislauksen olosuhteet ovat $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja paine 15–30 bar (Brandani et al. 2021). Kylmempäänkin reaktiolämpötilaan päästään nestemäisellä typpellä.



Kuvio 3.6 Kryogeeninen tislauk. Kuvan lähde: Energy Fuels 2025, 39, 1, 39–71.

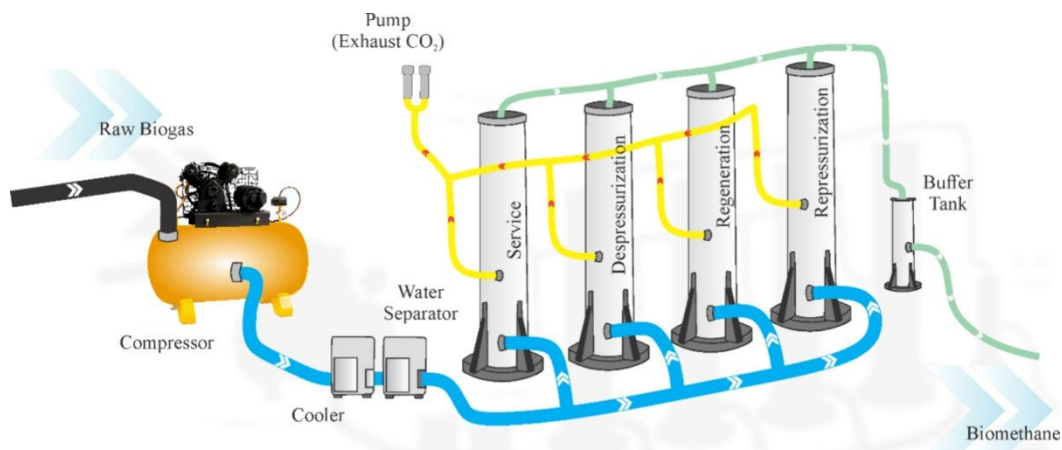
Adsorptio

Epäpuhtaudet kuten siloksaani tai rikkivety sitoutuvat aktiivihiileen. Aktiivihiilen sijaan voidaan käyttää biohiiltä tai ladattua biohiiltä.

Siloksaanit vaikeuttavat kaasun keruuta ja tuovat kustannuksia, koska tarvitaan adsorbenttia, esimerkiksi aktiivihiiltä, biohiiltä, lasimursketta tai klinoptiloliittia (zeoliittiyhdiste). Kemikaali itsessään voi aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä, ja käytetyn adsorbenttin asianmukaisesta hävittämisestä ja/tai regeneroinnista pitää huolehtia. (Amaraihi et al., 2024.)

Paineenvaihteluadsorptio Pressure Swing Adsorption (PSA)

Kaasu kuivataan ja paineistetaan ja ohjataan kolonnin läpi, jonka sisällä on adsorbenttia, johon hiilidioksidi, rikkivety, typpi ja muut epäpuhtaudet sitoutuvat, ja metaani jatkaa matkaansa (Cesar et al., 2024, Kuvio 3.7). Rikkiyhdisteet ja vesi voidaan poistaa myös esikäsittely-yksikössä ennen adsorptiota. Kaasut erotetaan adsorbentista painetta alentamalla ja adsorbentti regeneroidaan ennen seuraavaa kierrosta. Kaatopaikkakaasun puhdistuksessa adsorbenttina toimii esimerkiksi aktiivihili, zeoliitti tai hiilimolekyyli-seula.



Kuvio 3.7 Paineenvaihteluadsorptio PSA. Kuvan lähde: Energy Fuels 2025, 39, 1, 39–71.

Nelivaiheinen PSA

Kaatopaikkakaasun jatkokäytön kannalta myös typpiyhdisteet ovat ongelmallisia. Biokaasureaktoreiden kaasun koostumuksesta poiketen kaatopaikkakaasussa esiintyy paljon typpiyhdisteitä. Pidemmälle kehitettyjä menetelmiä typpikaasun poistoon on neljävaiheinen paineen vaihteluun perustuva PSA-prosessi (Brandani et al., 2021), jossa adsorbenttina voidaan käyttää boorilla ja raudalla kationivaihdettua Engelhardin titaanisilikaatti-4:a (ETS-4) (Maghsoudi et al. 2025).

Molekyyliportti

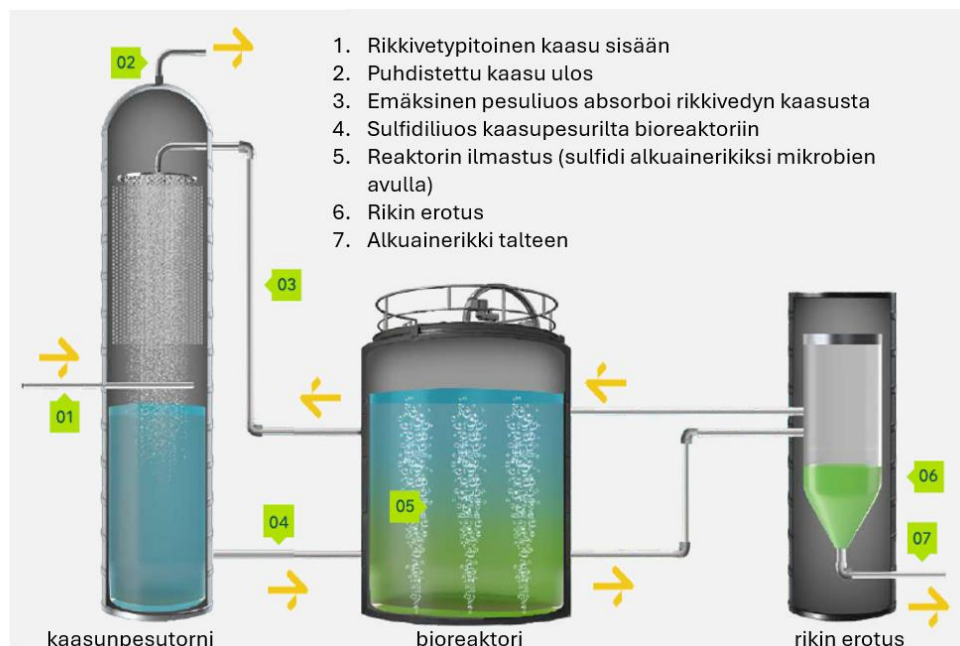
Erityisesti typen ja metaanin erotusta voidaan parantaa käyttämällä molekyyliportti-menetelmää (the "Molecular Gate" technology), jossa adsorbenttina toimii Engelhard titaanisilikaattiyhdiste (ETS-4), joka erottaa typen ja metaanin molekyylikokoon perustuvalla kinetiikalla (3.8 Å CH₄ vs. 3.64 Å N₂). ETS-4-adsorbentin huokoisuutta voidaan hienosäätää siirtymämetallien (rauta, barium ja kromi) lisäyksellä (Maghsoudi et al., 2025).

Rikkivedyn biologinen poisto

Rikkivetyä voidaan puhdistaa biologisesti johtamalla kaatopaikkakaasu laimean emäsluoksen (pH 8–9, 25 % NaOH:lla) läpi ja ilmastamalla bioreaktorissa liuokseen absorboituneita sulfideja, jolloin luontaiset rikkiä hapettavat bakteerit hajottavat sulfidin alkuainerikiksi, joka puolestaan saostetaan seuraavassa reaktorivaiheessa ja erotetaan selkeyttimessä (Kuvio 3.8, Paques 2026). Emäksinen pesuvesi regeneroidaan biologisesti ohjaamalla se pesurista takaisin bioreaktoriin. Laitte puhdistaa rikkivedyn valmistajan mukaan alueelta aina 200 000 ppm:stä alle 100 ppm:iin. Vaikka biologinen rikkivedyn poisto on tehokasta myös suurissa rikkivedyn pitoisuuksissa ja vaihtelevassa kaasun

syöttömäärässä ja laadussa, menetelmän käyttöön voi liittyä operatiivisia ongelmia, mm tukkeutumista ja vaahdon muodostusta. (Cho et al., 2024).

Biologinen puhdistus vaatii bakteerien toimimisen vuoksi seurantaa, jotta operoidaan optimaalisesti oikealla lämpötila-alueella, tasaisella syötöllä ja oikeilla bioreaktorin olosuhteilla. Korealaisen vuoden kestäneen seurantatutkimuksen (Cho et al., 2024) mukaan yli 95 %:n rikkivedyn puhdistusteho saavutettiin, kun olosuhteet pidettiin vakaina niin, että alkaliniteetti oli 700–800 mEq/L, sähkönjohtavuus 40–55 mS/cm ja pH 8,0–8,5. Kyseinen ThioPaq-järjestelmä oli mitoitettu 7 000 Nm³/h kaatopaikkakaasun virtaamalle, ja puhdistamaan H₂S-pitoisuudet 300–8000 ppm. Kyseisellä kaatopaikalla H₂S-pitoisuudet olivat seurantajakson aikana 2500–3900 ppm, ja puhdistuksen jälkeen kaasun rikkivetypitoisuus oli 40–130 ppm (Cho et al., 2024).



Kuvio 3.8 Biologisen ThioPaq-menetelmän kuvaus. Kuvan lähde: Paques 2026

Kaatopaikkakaasun metanointi

Ghafoori ja kumppanit (2022) arvioivat biometaanin tuotannon teknis-taloudellista toteuttamiskelpoisuutta kaatopaikkakaasusta. Tarkastelussa vertailtiin perinteisiä biokaasun jalostusmenetelmiä Power-to-Gas -ratkaisuihin, joissa hyödynnetään metanointia sekä hiilidioksidin hyötykäyttöä. Vertailussa oli neljä tapausta: 1) vesipesu, 2) kalvoerottelu, 3) suora metanointi ja 4) metanointi yhdistettynä kalvoteknologiaan. Kussakin tapauksessa kaatopaikkakaasusta esipuhdistettiin rikkivety ja typpikaasu omissa osaprosesseissaan ennen hiilidioksidin poistoa ja muuttamista metaaniksi. Vesipesu ja kalvoerottelu olivat edullisimpia menetelmiä, sillä ne eivät tarvitse ja ovat vähiten riippuvaisia sähkön ja elektrolyysilaitteiston hinnasta, kun taas metanointi sellaisenaan tai membraanikäsittelyn kanssa, vaikka olivatkin tehokkaita menetelmiä, vaativat pidemmän takaisinmaksuajan ja riittävän metaanipitoisen kaasun, sillä metanointivaihe lisäsi 60–64 % tuotantokustannuksia. Kaikki menetelmät olivat kustannustehokkaita kuuden vuoden

takaisinmaksuajalla kaatopaikkakaasuille, joiden metaanipitoisuus oli vähintään 45 %, ja kaasun virtaus 500 Nm³/h. (Ghafoori et al., 2022.)

Vaikka elektrolyysilaitteistojen hintakehitys tulevaisuudessa on tulossa alaspäin (Alitalo 2026, henkilökohtainen tiedonanto) ja sähkön hinta on muuttunut, kustannustarkastelun perusteella energiaa ja investointeja vaativat jalostusmenetelmät eivät ole paras ratkaisu heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun, jonka metaanipitoisuus on pysyvästi alle 40 %, hyödyntämiselle.

Suomessa on pilotoitu epäpuhtauksia sisältävän kaatopaikkakaasun metanointia hyvällä menestyksellä. Tässä tapauksessa kaasua ei tarvinnut esikäsittää, vaan metanointi onnistui suoraan. Vetyä käytettiin pilot-kokeessa pullokaasua. Testatun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus oli 40–56 %, ja hetkellisesti rikkivetyä esiintyi jopa 5000 ppm. Kaasun sisältämä hiilidioksidi (27–36 %) muunnettiin biologisessa prosessissa metaaniksi niin, että käsitellyn kaasun metaanipitoisuus rikastui jopa 90 %:ksi. (QPower, 2023; Alitalo, 2026, henkilökohtainen tiedonanto.)

Hybridimenetelmät

Hybridimenetelmillä voidaan rikastaa ja erotella yhtäaikaisesti hiilidioksidi ja metaani. Tähän tarkoitukseen Tabar et al. ovat kehittäneet membraani-vakuumi-paineenvaihtelujärjestelmän, jossa hiilidioksidin ja metaanin saanto ja puhtaus ovat yli 90 %. Membraanina tutkimuksessa käytettiin polyimidikalvoa. (Tabar et al., 2025.)

Kaasun reformointi

Uusia kehitettyjä kaatopaikkakaasun hyödyntämismenetelmiä ovat biometaanin käyttö vedyn valmistukseen höyry- tai kuivareformoinnilla eli SMR (Steam Methane Reforming) ja DMR (Dry Methane Reforming, Singh et al., 2025). Nämä ovat kuitenkin energiantensiivisiä prosesseja, jotka vaativat 800–1000 °C lämpötilan ja 30 barin paineen sekä sen, että kaasu on esipuhdistettu. DMR hyödyntää myös hiilidioksidin eikä vapauta sitä ilmaan kuten SMR, mutta vaatii enemmän energiaa, reilun 70 kWh per tuotettu vetykilo, ja tuottaa noin 100–130 grammaa vetyä normikuutiometriä kohti biokaasua (Singh et al., 2025).

Heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun hyödyntäminen

Yleisesti kaatopaikkakaasu, jonka metaanipitoisuus on pudonnut alle 40 %, palaa huonosti soihdussa, ja sisältää enemmän epäpuhtauksia, jolloin sen hyödyntämisestä tulee kallista ja haastavaa. Heikkolaatuisen kaasun hyödyntämistä voidaan parantaa yksinkertaisimmillaan johtamalla kaasu parempilaatuisen kaasun mukana polttokattilaan. Kaasun palamista voidaan lisäksi parantaa lisäämällä apukaasuja, nostamalla kaasun alkulämpötilaa tai kehittämällä poltinteknologiaa. Tutkimuksissa heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun palamisvarmuutta ja tehoa on parannettu lisäämällä vetyä huokoisille polttimille (Tan et al., 2026; Chen et al., 2025) tai happea plasma-avusteiselle polttimelle (Bykov et al., 2026). Vedyn lisäys (30 til.-%) huonon polttoarvon kaatopaikkakaasuun toimii parhaiten polttimissa, joissa hyödynnettiin korkeaa alkulämpötilaa ja pientä painetta (Kahangamage et al., 2024).

Hiilidioksidin poisto kaatopaikkakaasusta ja metaanin samanaikainen väkevöinti parantaa kaatopaikkakaasun hyödynnettävyyttä energianlähteenä. Hiilidioksidin poistoa voidaan tehostaa yhdistämällä kemialliseen adsorptioon diglykoliamiinin kanssa kaasu-neste-kontaktorien avulla (Spinning Fluids Reactor, SFR, Aranowski, 2025), jossa kaasun ja liuoksen välinen erottelu tapahtuu energiatehokkaasti.

Yhdistelmäratkaisut

Latviassa on kehitetty kokonaisratkaisu ja modulaarinen puhdistusjärjestelmä kaatopaikkakaasulle (Zemite et al., 2025b). Kokonaisratkaisu sisältää kaatopaikkakaasun kemiallisen kokoonpanon selvittämisen, alueen kartoituksen ja mallinnuksen ja edellisten perusteella suunnitellun viisivaiheisen modulaarinen epäpuhtauksien puhdistamisjärjestelmän, johon kuuluu rikinpoisto, jäähdytys, kosteudenpoisto, siloksaanien ja haihtuvien yhdisteiden käsittely ja aktiivihillisuodatus poistamaan loput epäpuhtaudet (Kuva 3.1). Järjestelmän prototyyppiä on testattu Getlinin kaatopaikalla Latviassa (Zemite et al., 2025a).

Viisiosaisessa puhdistusjärjestelmässä rikkivedyn poistoon käytetään kemiallista pesua ja hapetusta. Rikkivedyn määrä pienenee 95 % tuhansista ppm:stä alle 30 ppm:ään (alle 40 mg/m³). Seuraavassa vaiheessa kaasu jäähdytetään noin 5 °C-asteeseen ja vesihöyry kondensoidaan eroon. Jäähdytys- ja kosteudenpoistoyksiköstä kaasu jatkaa pumppuasemalle, joka ylläpitää kaasun tasaista syöttöä ja puhdistumista. Neljäs yksikkö on kaksi rinnakkaista adsorptiotankkia, joiden täytemateriaalin avulla siloksaanit ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet erotetaan kaasusta. Viidennessä yksikössä aktiivihilli sitoo ammoniakkin ja loput epäpuhtaudet itseensä. (Zemite et al., 2025a.)

Rikkivety, ammoniakki, siloksaanit ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet poistuvat tehokkaasti, ja jäljelle jää metaania ja hiilidioksidia sisältävä kaasu, joka voidaan hyödyntää yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotantoyksikössä (Zemite et al., 2025a). Hiilidioksidia järjestelmä siis ei poista, eikä siten varsinaisesti väkevöi metaania.



Kuva 3.1 Modulaarisen kaatopaikkakaasun epäpuhtauksien puhdistusjärjestelmän prototyyppi. Puhdistusjärjestelmä hyödyntää kaatopaikka-alueen olemassa olevaa infrastruktuuria, sähkö-, viemäri- ja vesijohtoverkkoa. Kuvan lähde: Zemite et al., 2025a.

Toinen vastaava, kaupallinen modulaarinen ratkaisu sisältää tarvittavat osat rikkivedyn, hiilidioksidin ja siloksaanien poistoon ja hyödyntää rautahydroksidia (SULAFER) rikkivedyn, ja silikageeliä siloksaanien poistoon (Gazpack 2026).

Kaatopaikkakaasun puhdistus epäpuhtauden mukaan

Seuraavan sivun taulukkoon on koottu kaatopaikkakaasun yleisimmät epäpuhtaudet ja inertit kaasut ja niihin soveltuvia puhdistus- ja jalostusmenetelmiä (Taulukko 3).

Taulukko 3.1 Kaatopaikkakaasun eri epäpuhtauksille ja inerteille kaasuille soveltuvia käsittelymenetelmiä.

soveltuvat käsittelymenetelmät eri epäpuhtauksille ja inerteille kaasuille				
epäpuhtaus käsittely	rikkivety H ₂ S	siloksaanit	hiilidioksidi CO ₂	typpikaasu N ₂
pesu (scrubbing)	vesipesu, laimea emäsluos, amiinit	vesipesu		
adsorptio, PSA	aktiivihiihi, biohiili, raudalla ladattu biohiili ⁵⁾	aktiivihiihi, biohiili, hydrohiili, zeoliittiyhdisteet ¹⁾ amiinit, silikageeli		monivaiheinen PSA ³⁾ , adsorbenttina ETS-4
kryotislaus				kryotislaus (-170°C, 30-40 bar) ³⁾
biologinen käsittely	ThioPaq ^{®2)}		metanointi	
kaasu-neste-kontaktorit			Spinning Fluids Reactor, SFR yhdistettynä glykoliamiiniin ⁴⁾	
kemiallinen absorptio (wet scrubbing)	saostus rautasuolojen avulla, rauta-katalyytti (SULAFER ^{®5)})			
kalvosuodatus			polysulfonit ja selluloosa-asetatti-kalvot	polyamidikalvo

1) Amaraibi et al., 2024

2) Cho et al., 2024; Paques, 2026

3) Brandani et al., 2021

4) Aranowski, 2025

5) Choudhury & Lansing, 2021

Kaasunpuhdistuksen ympäristövaikutukset

Kaasun puhdistus voi aiheuttaa ympäristökuormitusta, erityisesti kemiallisessa adsorptiossa käytetyt liuottimet, kuten monoetanoliamiini (MEA) ja metyyliidietanoliamiini (MDEA), jotka lisäävät energiankulutusta regeneroinnin aikana ja voivat johtaa päästöihin liuottimia regeneroitaessa ja käytettyjä materiaaleja hävitettäessä (Cesar et al., 2025). Ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja olisivat biosuodatus (Zemite et al. 2025b), ionisten nesteiden (Elmobarak et al. 2023) tai kaliumkarbonaatin (Borhani et al., 2015) hyödyntäminen kemiallisen adsorption erottelussa ja esimerkiksi keraamiset kalvot, joiden elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt ovat 25 % pienemmät ja vedenkulutus 20 % vähäisempää kuin monoetanoliamiinia käytettäessä (Cesar et al., 2025).

Menetelmät, joissa käytetyt reagenssit voidaan regeneroida uudelleen, jotka eivät käytä suurissa määrin energiaa, tai joissa ei synny sivuvirtoja tai jätettä, ovat varteenotettavia vaihtoehtoja. Modulaarisuus ja skaalautuvuus sekä kustannustehokkuus auttavat vaihtuvien epäpuhtauksien ja metaanipitoisuuksien hallinnassa. Vastaavasti biopohjaisten raaka-aineiden kuten biohiilen, tai jättemateriaalien kuten lasimurskan hyödyntäminen voisi osaltaan pienentää kaatopaikkakaasun puhdistusprosessin hiilijalanjälkeä.

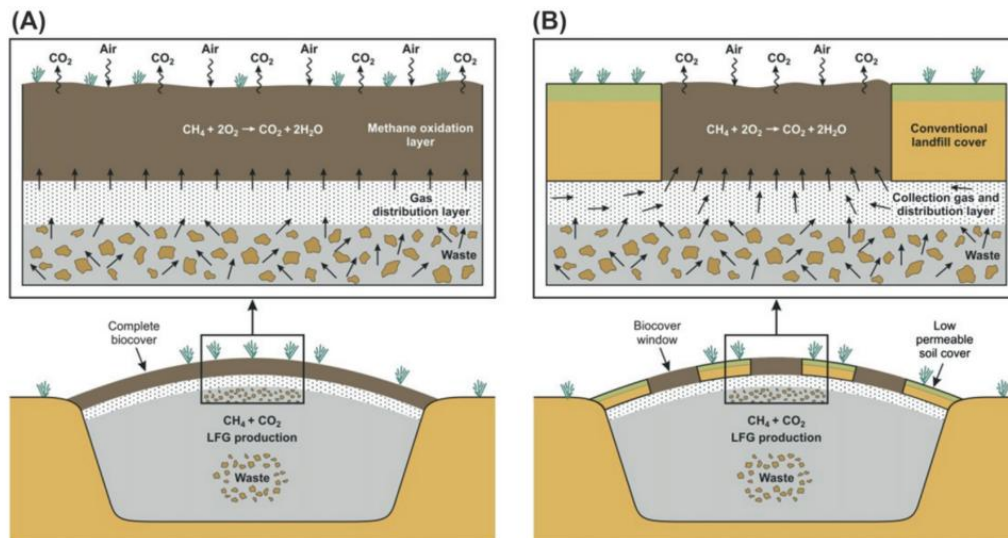
Yhteenveto

Rikkivetyä esiintyy kaatopaikkakaasussa suuria määriä. Se on myrkyllistä ja aiheuttaa syöpymistä ja korroosiota pinnoille, joten jotta kaatopaikkakaasua voidaan hyödyntää, rikkivedyn määrää tulee saada alas. Rikkivety voidaan poistaa esimerkiksi kaasun vesipesulla, adsorptiolla aktiivihiileen, kemiallisella saostuksella rautasuolojen avulla tai muuntaa mikrobien avulla alkuainerikiksi. Aktiivihiileen tai muuhun materiaalin adsorptio toimii silloin, kun rikkivedyn määrä on riittävän pieni; suurissa pitoisuuksissa adsorptiomateriaali kyllästyy nopeasti ja esimerkiksi aktiivihiiltä kuluu suuria määriä. Hankalin jalostettava on tyyppi, jonka poistaminen onnistuu membraaneilla, kryotislauksella tai paineenvaihteluadsorptiolla.

Kaatopaikkakaasun jalostus- ja puhdistusmenetelmät ovat pysyneet samanlaisina koko 2000-luvun. Uutta ovat lähinnä hybridimenetelmät, kuten monivaiheinen PSA-käsittely. Jotkin uudemmat, ehdotetut käsittelytavat ovat hyvin energiasäästöisiä, ja osassa näistä menetelmistä kaatopaikkakaasun hiilidioksidi päästetään ilmaan, mikä nykyajattelun mukaan ei ole kestävän kehityksen mukaista. Nykyään keskitytään entistä enemmän myös hiilidioksidin talteenottoon hiilen sitojana eikä niinkään metaanin sivutuotteena.

Ilmaan pääsyn esto biopeitteillä/metaanin hapetus

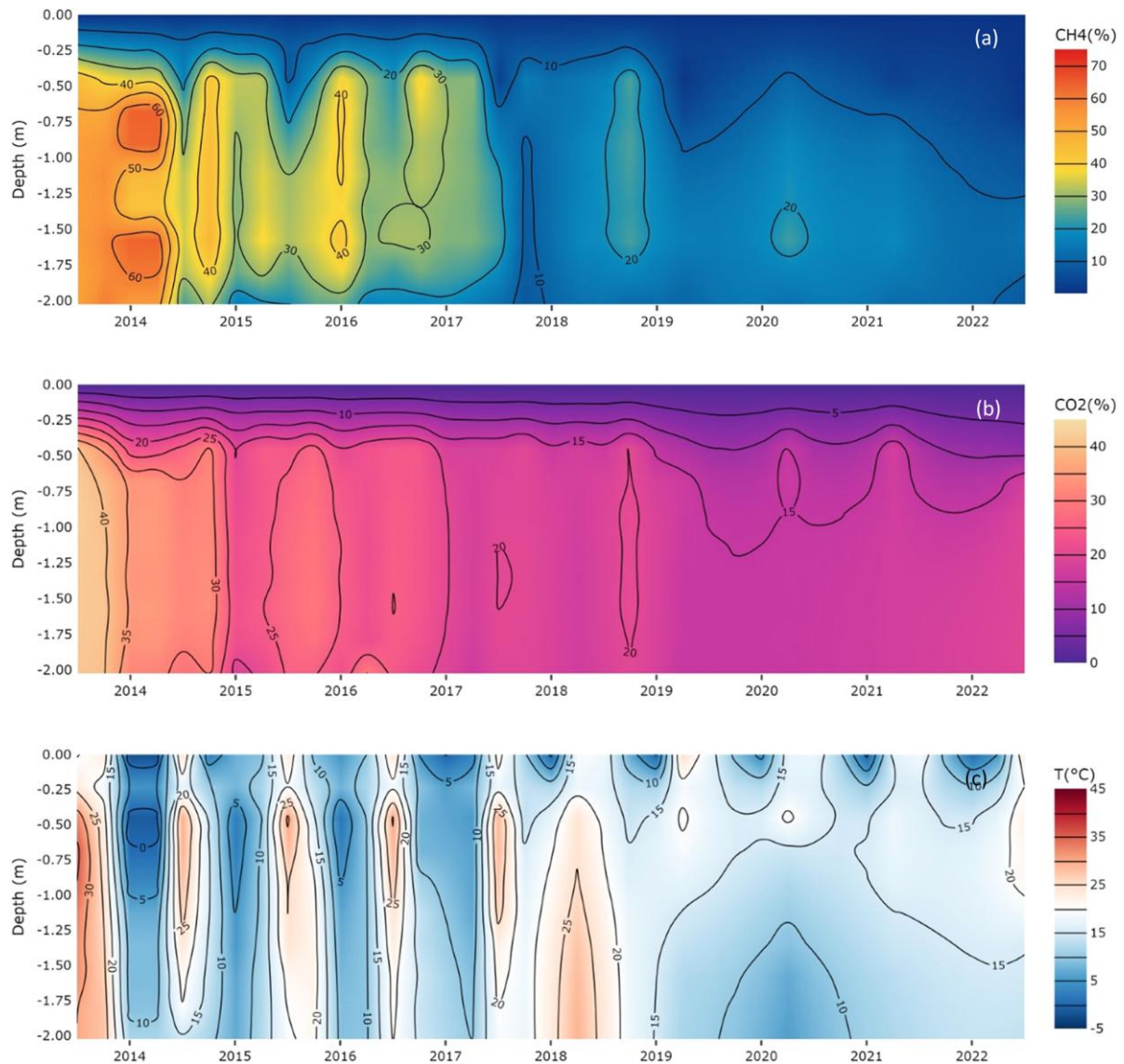
Kun kaatopaikkakaasun määrä pienenee niin, ettei sen keräys enää kannata, metaania hapettavalla orgaanisella penkan peittokerroksella (biocover) voidaan välttää jopa 90 % metaanipäästöistä (Duan et al., 2022b). Biopeitteina voidaan käyttää esimerkiksi aktiivista tai passiivista yhtenäistä tai osin läpäiseviä kohtia sisältävää (ikkunamalli) metaania tuottavan penkan peittävää maakerrosta (Kuvio 3.8, Kjeldsen & Scheutz, 2018). Peittomateriaalina on käytetty lehtikompostia, kompostoidun lietteen ja turpeen sekoitusta (Einola et al. 2009) tai erilaisia jättemassoja. Myös biohiilen käyttöä on tutkittu (Reddy et al., 2024). Metaanin hapettumista voi vahvistaa ilmastamalla biopeittokerrosta (Huang et al. 2020).



Kuvio 3.8 Kaatopaikan metaanin hapettamiseksi voidaan rakentaa koko penkan peittävä biokerros tai bioikkuna, jonka läpi kaasu kulkiessaan hapettuu mikrobien toimesta. Bioikkuna on ratkaisu silloin, kun kaatopaikan peittona jo on läpäisemätön kalvo. Bioikkunan huokoisilla, hyvin vettä pidättävillä materiaaleilla kuten kypsä komposti, hake tai karkea maa-aines luodaan metanotrofeille suotuisat olot. Esimerkkikuvissa kyseessä on avoin biosuodin, johon happi tulee ilmakehästä. Kuvan lähde: Kjeldsen ja Scheutz, 2016.

Virolaisen kaatopaikan, jolle asennettiin biopeitoksi hienojakoista kaatopaikan massojen käsittelyssä (landfill mining) syntyneitä maa-ainesta, jätevesilietekompostia ja mineraalimaata, metaanin hapetusta seurattiin kymmenen vuoden ajan. Penkoissa oli läjitetyn jätteen päällä noin puolimetrisen kaasunohjauskerros (gas distribution layer). Penkoista seurattiin hapen, hiilidioksidin ja metaanin pitoisuuksia ja lämpötilaa. Neljän hehtaarin kaatopaikka-alueella esiintyi jätteen heterogeenisuudesta johtuen vaihtelua metaanin synnyn ja päästöjen määrissä. Kolme mittauspistettä edusti erilaisia penkan olosuhteita: optimaalista tilannetta, hot spot -kohtaa ja vähäistä metaanipitoisuutta. (Kriipsalu et al., 2023.)

Alussa kaikissa tutkimuskaivoissa näkyi mikrobitoiminnan synnyttämä lämpötilan nousu, ja myöhemmin vuodenaikavaihtelusta johtuvat lämpötilamuutokset olivat selvästi havaittavissa. Optimaalisessa seurantapistteessä metaanin ja hiilidioksidin pitoisuudet vähenivät tasaisesti (Kuvio 3.9). Metaanin hapetuksen biokerroksessa havaittiin stabiloituvan 5-6 vuoden kuluttua biopeitteen asentamisesta, noin 10 vuotta kaatopaikan sulkemisen jälkeen. Vanhasta kaatopaikan penkasta lajiteltu ja seulottu hienoaines toimii biosuotimena jäännösmetaanin hallinnalle hyvin, joten kaatopaikkakaivostoiminta tarjoaa järkevän vaihtoehdon biopeitemateriaalien tuottamiseen kaatopaikoilla, ja on edullinen ja kiertotalouden mukainen materiaali kaatopaikan jälkihoitoon. (Kriipsalu et al., 2023.)



Kuvio 3.9 Kaatopaikkapenkan biosuotimen toiminta: ylinnä metaanin, keskellä hiilidioksidin ja alinna lämpötilan vaihtelu 10 vuoden seurantajakson aikana optimaalisesti toimineessa keräyskaivossa. Kuvan lähde: Kriipsalu et al., 2023, Kuva 3a-c.

Kaatopaikkakaasun hyödyntäminen

Kuten kyselytutkimuksesta ja asiantuntijahaastatteluista selvisi, kaatopaikkakaasua voidaan hyödyntää sähkön, lämmön ja biometaanin tuotantoon. Penkan metaani voidaan ohjata jalostuksen jälkeen suoraan kaasuverkkoon tai teollisuudelle. Samoin liikennepolttoaineeksi ja usein myös mikroturbiineja varten kaasua tulee puhdistaa ja jalostaa käyttöä haittaavien epäpuhtauksien ja kosteuden poistamiseksi. Epäpuhtauksien määrä lisääntyy kaatopaikkapenkan vanhetessa ja kaatopaikkakaasun laadun heikentyessä ja metaanipitoisuuden pienentyessä. Mikäli kaatopaikkakaasu sisältää niin paljon epäpuhtauksia, että sen puhdistaminen ei ole taloudellisesti järkevää, kaasun hyödyntämisvaihtoehtoiksi jää polttaa se tukipolttoaineen kanssa kattilassa tai soihduttaa esilämmitetyllä soihdulla.

Lair ja kumppanit (2024) ovat arvioineet metaanipäästöjen vähenemistä eri hyödyntämisvaihtoehdoilla, kun energiaa tuotetaan uusiutuvana kaatopaikkakaasusta (Taulukko 3.2).

Taulukko 3.2 Kasvihuonekaasupäästöjen vähenemiseen eri kaaatopaikkakasun hyödyntämistavoilla (Lair et al. 2024).

energiatyyppi	saanto, %	vältetty päästökerroin kg CO ₂ ekv/MWh
biometaani/uusiutuva maakaasu	85	244
CHP (lämpö)	35	125
CHP (sähkö)	25	57

Kaatopaikkakaasun keruu ja hyödyntäminen mahdollisimman tarkkaan on suotavaa, mutta kustannukset ja ympäristötekijät tulee kuitenkin huomioida. Vertailtaessa vanhan kaatopaikan kaasun keruuta ja hyötykäyttöä siihen, että metaani hapetettaisiin biopeittoon, elinkaarianalyysi osoitti metaanin hapetuksen penkkaan olevan monin verroin tehokkaampi tapa metaanipäästöjen vähentämiseen, sillä hyvä biosuodin pidättää parhaimmillaan 90 % metaanista, kun taas energiakäytössä ja kaasunkeräyksessä metaania karkaa ilmakehään ja sen hyödyntämisaste on 50–80 %. (Scheutz et al., 2023.)

OSA 4: Kyselytutkimuksen tulokset: Tulevaisuusnäkymät ja osaamistarpeet

Tässä kyselytutkimuksen osiossa tarkastellaan kaatopaikkakaasujen keräyksen ja hyödyntämisen tulevaisuuden näkymiä. Vastaajilta on tiedusteltu heidän suunnitelmistaan sekä mahdollisista osaamis- ja resurssitarpeista, jotta voidaan tunnistaa keskeisiä kehityssuuntia ja edistää kaatopaikkakaasujen tehokasta ja kestävää hallintaa.

Vastausten perusteella suurimmat osaamis- ja resurssitarpeet liittyvät tekniseen osaamiseen, mittauksiin sekä henkilöstöresursseihin. Monissa organisaatioissa osaaminen on tällä hetkellä muutamien henkilöiden varassa, ja tulevat eläköitymiset lisäävät tarvetta varmistaa osaamisen jatkuvuus ja siirtäminen uusille tekijöille.

Teknisellä puolella korostuvat erityisesti kaasun määrän ja laadun mittaus, keräysjärjestelmien optimointi sekä laitteistojen huoltoon ja päivittämiseen liittyvä osaaminen. Lisäksi kaivataan parempaa ymmärrystä kaasun muodostumisesta, siihen vaikuttavista tekijöistä sekä siitä, miten tuotannon laskiessa kaasu kannattaa käsitellä ja hyödyntää taloudellisesti. Myös suunnitteluosaamista tarvitaan esimerkiksi uusien hyödyntämisratkaisujen, mitoituksen ja rakenteiden suunnittelussa.

Useat vastaajat nostavat esiin huolen laite- ja toimittajaosaamisen vähenemisestä sekä kenttätyötä tekevän henkilöstön rajallisuudesta. Samalla korostuu tarve kehittää omaa osaamista, vaikka ulkopuolisia asiantuntijoita hyödynnetäänkin. Osa toimijoista kokee nykyisten resurssien riittävän toistaiseksi, mutta tulevaisuuden tarpeita ei osata täysin ennakoida. Kokonaisuutena tarve kohdistuu sekä käytännön kenttätyöhön että syvempään tekniseen ja suunnitteluun liittyvään osaamiseen.

Kaatopaikkakaasun tulevaisuuden synnyn mallinnus ei ole vielä vakiintunut käytäntö, mutta kiinnostusta ja tarvetta siihen on olemassa, ja osa toimijoista on jo lähtenyt kehittämään asiaa. Suurin osa vastaajista (60 %) ei ole tehnyt tai teettänyt kaatopaikkakaasun synnyn mallinnusta. Noin kolmannes on tehnyt mallinnusta, ja pieni osa suunnittelee sen tekemistä jatkossa.

Lähitulevaisuuden suunnitelmat

Arvionne kaatopaikkakaasun tuotannosta vuonna 2030

Kyselytutkimuksessa kysyttiin toimijoiden arviota kaatopaikka-alueidensa metaanituotosta vuonna 2030. Vaihtoehtoina oli valita, kuinka suuri osuus hallinnassa olevista kaatopaikka-alueista tuottaa hyvin metaania, lähestyy kaasun loppumisen vaihetta tai tuottaa liian vähän kaasua, jotta sitä olisi mahdollista kerätä ja hyödyntää.

Vastausten perusteella metaanintuotannon tilanne vuonna 2030 vaihtelee merkittävästi sekä vastaajien että yksittäisten kaatopaikka-alueiden välillä. Keskimäärin arviolta noin kolmannes alueista tuottaa vielä hyvin metaania, mutta hajonta on suurta: osa vastaajista raportoi vain yksittäisiä hyvin tuottavia alueita, kun taas yksi vastaaja arvioi jopa 27 % alueistaan kuuluvan tähän luokkaan. Tämä kertoo siitä, että osalla toimijoista on edelleen varsin aktiivisia kaatopaikkoja, kun taas toisilla tuotanto on jo pitkällä laskussa.

Selvästi suurin osa alueista sijoittuu kuitenkin vaiheeseen, jossa kaasuntuotanto on hiipumassa. Tätä kuvaa se, että keskimäärin noin puolet alueista arvioidaan siirtyvän kohti tuotannon

laskuvaihetta. Tämä on monelle toimijalle tyypillinen tilanne: kaasua syntyy vielä, mutta määrät pienenevät ja hyödyntämisen edellytykset heikkenevät.

Lisäksi merkittävä osa alueista (46 %) on jo tilanteessa, jossa kaasua syntyy niin vähän, ettei sen kerääminen ja hyödyntäminen ole enää kannattavaa. Tässäkin vaihtelu toimijoiden välillä on suurta, sillä joillakin toimijoilla tällaisia alueita on vain vähän, kun taas toisilla ne muodostavat huomattavan osan kokonaisuudesta.

Osa toimijoista siis hallinnoi edelleen metaania hyvin tuottavia kaatopaikkoja, mutta suurella osalla painopiste on siirtymässä tai jo siirtynyt tuotannon hiipumisvaiheeseen. Erot johtuvat todennäköisesti kaatopaikkojen iästä, käytöstä poistamisen ajankohdasta ja jätteen koostumuksesta, mikä näkyy suurena hajontana vastausten välillä. Vaihtelua voivat osaltaan selittää myös kaatopaikoilla toteutetut kaasunmuodostuksen tehostamistoimenpiteet. Joillakin kaatopaikoilla kaasuntuottoa on pyritty ylläpitämään tai lisäämään esimerkiksi jätetäytön kastelulla, mikä voi edistää biohajoamisprosessien jatkumista ja metaanin muodostumista. Toisaalta osalla kaatopaikoista ei ole toteutettu kaasunmuodostusta tehostavia toimenpiteitä, jolloin jätetäyttö on voinut kuivua ja niin sanotusti muumioitua. Tällöin biologinen aktiivisuus ja kaasuntuotto voivat jäädä merkittävästi alhaisemmiksi kuin vastaavan ikäisillä, aktiivisesti hallinnoiduilla kaatopaikoilla.

Mitkä ovat tulevaisuuden suunnitelmanne kaatopaikkakaasujen keräämisessä ja hyödyntämisessä vuonna 2030?

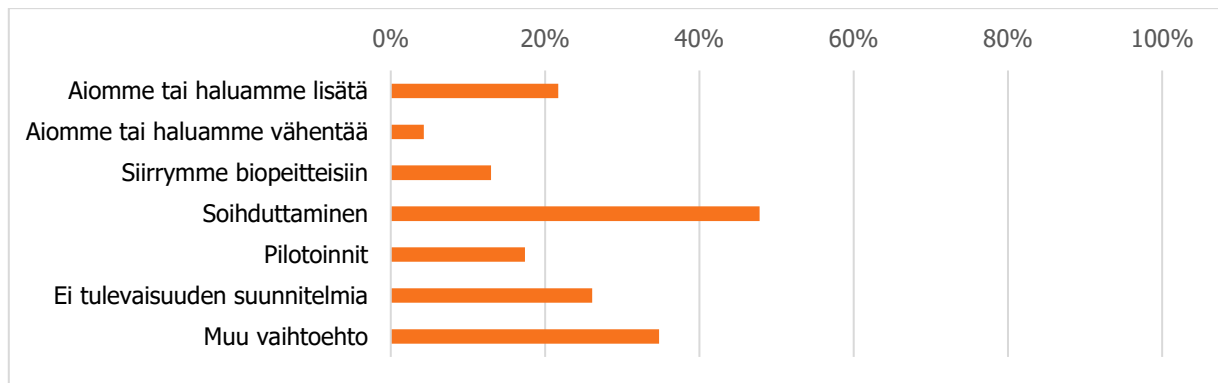
Kysyttäessä tulevaisuuden suunnitelmia vuodelle 2030 oli mahdollista valita useampi vaihtoehto (Kuvio 4.1). Vastausten perusteella tulevaisuuden suunnitelmat jakautuvat useisiin vaihtoehtoihin, ja kyselytutkimuksessa kerätyt lisäkommentit selittävät hyvin valintojen taustaa. Yleisimmin valittu vaihtoehto on soihduttaminen, mikä liittyy suoraan siihen, että kaasun määrä ja metaanipitoisuus laskevat ajan myötä. Useissa kommentteissa todetaan, että kaasu joudutaan polttamaan silloin, kun sitä ei enää ole teknistaloudellisesti järkevää hyödyntää.

Niissä vastauksissa, joissa kaasun hyödyntämistä aiotaan lisätä, taustalla on selkeästi taloudellinen kannattavuus tai oletus siitä, että kaasua syntyy vielä riittävästi. Lisäksi mainitaan mahdollisuudet tehostaa keräystä tai löytää uusia hyödyntämiskohteita, kuten energian tuotanto tai kaasun ohjaaminen muihin prosesseihin, kuten viereisen biokaasulaitoksen tuottaman mädättämökaasun sekaan. Vastaavasti vähentämistä koskeva yksittäinen vastaus perustuu siihen, että kaasuntuotanto vähenee luonnostaan, eikä hyödyntäminen ole enää samalla tavalla mahdollista.

Biopeitteisiin siirtymistä koskevat valinnat liittyvät tilanteisiin, joissa kaatopaikkakaasua syntyy vain vähän, jolloin aktiivinen keräys ei ole enää järkevää ja biologinen käsittely nähdään sopivampana ratkaisuna. Pilotointeihin liittyvät vastaukset puolestaan kuvaavat halua kehittää uusia menetelmiä, kuten biologista käsittelyä tai keräyksen optimointia erityisesti matalan tuotannon alueilla.

”Muu vaihtoehto” -vastaukset täydentävät kuvaa siitä, että monilla toimijoilla suunnitelmat eivät ole yksiselitteisiä. Näissä korostuvat nykyisen toiminnan jatkaminen, kaasumäärien tarkempi selvittäminen, erilaisten hyödyntämisreittien kartoittaminen sekä kaasun ohjaaminen muihin järjestelmiin, kuten jätteenpolttoon tai yhdistäminen muihin kaasuihin. Lisäksi osa vastaajista etenee varovaisemmin ilman tarkkoja suunnitelmia tai seuraa tilanteen kehittymistä ennen päätöksiä.

Kokonaisuutena vastaukset osoittavat, että tulevaisuuden ratkaisut riippuvat vahvasti kaasun määrän vähenemisestä: kun kaasua on riittävästi, sitä pyritään hyödyntämään, mutta määrän laskiessa siirrytään soihduttamiseen, biopeitteisiin tai muihin vaihtoehtoihin käsittelytapoihin.



Kuvio 4.1 Kyselyyn vastanneiden toimijoiden tulevaisuudensuunnitelmat kaatopaikkakaasun keräykseen ja hyödyntämiseen liittyen vuoteen 2030 mennessä (n = 25). Prosenttiosuudet kuvaavat kunkin vaihtoehdon valinneiden vastaajien osuutta kaikista vastaajista, ja sama vastaaja on voinut valita useita vaihtoehtoja.

Pitkän tähtäimen suunnitelmat

Mitkä ovat tulevaisuuden suunnitelmanne kaatopaikkakaasujen keräämisessä ja hyödyntämisessä vuonna 2040?

Vastausten perusteella vuoteen 2040 mennessä kaatopaikkakaasujen keräyksen ja hyödyntämisen rooli muuttuisi passiivisemmaksi kuin vuonna 2030, ja vuosien välisissä suunnitelmissa on suurta eroa (Kuvio 4.2).

Puolella toimijoista ei ole vielä selkeitä suunnitelmia vuodelle 2040. Tilannetta pidetään epävarmana ja päätökset halutaan tehdä myöhemmin, esimerkiksi sulkemisvaiheessa tai kun kaasun tuotannon kehitys tarkentuu. Vuoden 2030 arviossa suunnitelmia oli selvästi useammalla toimijalla, mutta mitä pidemmälle tulevaisuuteen mennään, sitä harvemmillä on valmiita suunnitelmia ja sitä epävarmemmaksi tilanne koetaan.

Soihduttaminen säilyy edelleen keskeisenä vaihtoehtona. Lisäkommenteissa korostetaan, että soihduttaminen tehdään tarvittaessa tai silloin kun muita hyödyntämismahdollisuuksia ei ole sekä pohditaan uutta vaihtoehtoa hiilidioksidin talteen ottamiseksi.

Kaasun hyödyntämisen lisäämistä suunnittelevien osuus on pienempi kuin vuonna 2030, mikä heijastaa metaanintuotannon vähenemistä. Niissä vastauksissa, joissa hyödyntämistä harkitaan, se on sidottu ehtoihin, kuten lupiin tai taloudelliseen kannattavuuteen. Tämä jatkaa vuodelle 2030 arvioitua linjaa, mutta korostaa enemmän epävarmuutta hyödyntämisen edellytyksistä.

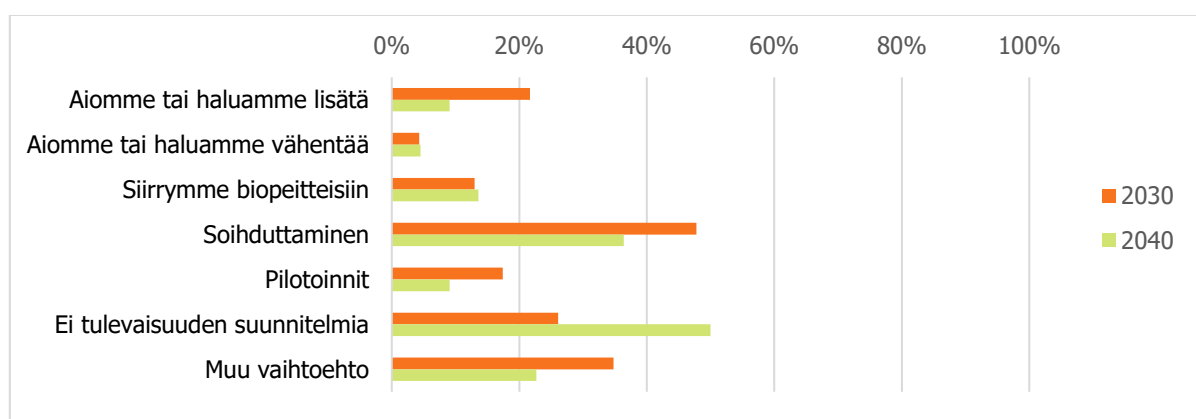
Biopeitteisiin siirtyminen ja muut passiivisemmat ratkaisut, kuten passiivikeräys tai keräyksen sovittaminen kaasuntuotannon tasoon, korostuvat enemmän kuin aktiivinen kehittäminen. Tämä on linjassa sen kanssa, että yhä useamman alueen ajatellaan siirtyvän tuotannon loppuvaiheeseen.

Pilotointien osuus on myös pienempi kuin vuonna 2030, mikä viittaa siihen, että kehittämispainopiste siirtyy kokeiluista käytännön hallintaan ja jälkivaiheen ratkaisuihin. Lisäkommenteissa pilotoinnit liittyvät lähinnä uusiin teknologioihin, mutta niitä ei nähdä laajasti keskeisenä ratkaisuna.

”Muu vaihtoehto” -vastaukset korostavat tilannekohtaista toimintaa eli kaasua hyödynnetään energiantuotannossa, jos se on mahdollista, tai jos sitä voidaan yhdistää muihin kaasuihin, esim. biokaasuun. Keräystä on ajateltu suhteuttaa syntyvän metaanin määrään.

Kokonaisuutena verrattuna vuoteen 2030 nähdään selkeä muutos: aktiivisen hyödyntämisen ja kehittämisen sijaan painopiste siirtyy epävarmuuden hallintaan, tuotannon laskuun sopeutumiseen ja passiivisempiin ratkaisuihin. Lisäksi niiden toimijoiden joukko kasvaa, joilla ei ole vielä selkeitä suunnitelmia, mikä kuvastaa pitkän aikavälin ennakkoinnin haastavuutta kaatopaikkakaasun osalta.

Vuodelle 2030 sijoittuvissa arvioissa kaatopaikkakaasua vielä pyrittiin hyödyntämään ja kehittämään uusia ratkaisuja, mutta vuoteen 2040 mennessä keskitytään enemmän siihen, miten pärjätään tilanteessa, jossa kaasua syntyy koko ajan vähemmän. Samalla yhä useammalla toimijalla ei ole vielä tarkkoja suunnitelmia, mikä kertoo siitä, että näin pitkälle tulevaisuuteen on vaikea ennakoida.



Kuvio 4.2 Kyselyyn vastanneiden toimijoiden tulevaisuudensuunnitelmat kaatopaikkakaasun keräykseen ja hyödyntämiseen liittyen vuosina 2030 ja 2040 (n = 23). Prosenttiosuudet kuvaavat kunkin vaihtoehdon valinneiden vastaajien osuutta kaikista vastaajista, ja sama vastaaja on voinut valita useita vaihtoehtoja.

Arviota kaatopaikka-alueiden metaanituotosta kysyttiin myös vuodelle 2040, jota koskevat arviot korostavat entisestään metaanintuotannon vähenemistä ja eroja eri kaatopaikka-alueiden välillä. Vastausten perusteella vain noin neljänneksen kaatopaikka-alueista arvioidaan tuottavan edelleen hyvin metaania. Tämä osuus on selvästi pienempi kuin vuoden 2030 arvioissa, ja yksittäisillä vastaajilla metaania hyvin tuottavien alueiden osuus jää usein melko alhaiseksi.

Suurin osa alueista (59 %) sijoittuu arvioiden mukaan kuitenkin tilanteeseen, jossa kaasuntuotanto olisi hiipumassa eli monilla toimijoilla valtaosa alueista olisi tuolloin jo siirtymävaiheessa. Tässä ryhmässä metaania syntyy vielä, mutta määrät ovat pienentyneet merkittävästi ja jatkavat laskuaan.

Lisäksi erittäin suuri osuus alueista (62 %) arvioidaan olevan jo vaiheessa, jossa kaasua syntyy liian vähän kerättäväksi ja hyödynnettäväksi. Monilla toimijoilla jopa puolet tai enemmän alueista kuuluisi tuolloin tähän luokkaan. Joissakin yksittäisissä vastauksissa tämä osuus on vieläkin suurempi, mikä korostaa alueiden välisiä eroja.

Toimijoiden arvion mukaan kehityssuunta on, että vuoteen 2040 mennessä metaanintuotanto olisi useimmilla kaatopaikka-alueilla jo pitkällä laskussa tai lähes loppunut. Samalla arvioidut erot

toimijoiden välillä säilyvät suurina eli osalla on vielä jonkin verran aktiivisia alueita, mutta monilla painopiste on selvästi siirtynyt vähäisen tuotannon tai tuotannon loppuvaiheen hallintaan.

Onko teillä kokemuksia tai halukkuutta siirtymisestä uusiin kaasun käsittelytapoihin, kun kaasun määrä ja laatu muuttuvat ajan kuluessa tai muusta syystä? Mitä siirtyminen on vaatinut tai vaatisi (esim. kriteerit, luvat, investoinnit)?

Kokemusta toimijoille uusista kaatopaikkakaasun käsittelytavoista on vielä melko vähän, mutta kiinnostusta muutoksiin löytyy monilla toimijoilla. Useat vastaajat kertovat, ettei konkreettisia kokemuksia ole, mutta uusia ratkaisuja pidetään tarpeellisina erityisesti silloin, kun kaasun määrä ja laatu heikkenevät.

Halukkuus siirtyä uusiin menetelmiin liittyy usein passiivisempiin ratkaisuihin, kuten biosuodattimiin tai passiivikeräykseen, sekä kaasun ohjaamiseen jätteenpoltoon tai energian tuotantoon. Lisäksi osa näkee tulevaisuudessa mahdollisuuksia kehittyneemmille teknologioille, kuten hiilidioksidin hyödyntämiselle tai metanoinnille. Uusia ratkaisuja ajatellaan otettavaksi käyttöön pääasiassa silloin, kun nykyinen toimintatapa ei enää toimi tai kannata.

Siirtymistä uusiin käsittelytapoihin rajoittavat erityisesti kustannukset ja investointitarpeet. Useat vastaajat nostavat esiin, että muutokset vaativat merkittäviä investointeja, ja päätökset riippuvat vahvasti siitä, onko toiminta taloudellisesti kannattavaa. Kannattavuuteen vaikuttavat muun muassa kaasun määrän kehitys, energian hinta ja tukipolitiikka. Lisäksi kaivataan varmuutta siitä, että kaasua syntyy riittävästi ja riittävän pitkään, jotta investoinnit olisivat perusteltuja.

Muutokset käsittelytavoissa edellyttävät usein luvituksen päivittämistä, ja toisaalta säädökset voivat myös ohjata tai pakottaa siirtymään uusiin ratkaisuihin. Moni vastaaja korostaa, että lisätietoa ja osaamista uusista teknologioista tarvitaan ennen päätöksentekoa.

Siirtyminen uusiin kaasun käsittelytapoihin on siis useimmiten vielä suunnittelu- tai harkintavaiheessa. Päätöksiä ohjaavat ennen kaikkea taloudellinen kannattavuus, kaasuntuotannon kehitys ja sääntely, ja käytännössä muutoksiin ryhdytään vasta, kun siihen on selkeä tarve tai riittävät edellytykset.

Kyselytutkimuksessa esitettiin vastaajille myös pidemmän aikavälin tarkasteluun liittyviä kysymyksiä, joissa pyydettiin arvioimaan esimerkiksi sitä, mitkä ovat suurimmat pullonkaulat kaasunkeruun kehittämiseksi alueilla, joilla metaania syntyy riittävästi, aikovatko toimijat panostaa myös huonommin kaasua tuottaviin alueisiin sekä millaista kaasumäärää pidetään vielä taloudellisesti kannattavana kerätä. Nämä kysymykset jäivät vielä avoimiksi.

Se, ettei näihin teemoihin otettu kantaa, viitanee siihen, että näiden teemojen tarkempi arviointi on monille toimijoille vaikeasti ennakoitavaa tai kesken tai niihin ei ole muodostunut selkeää näkemystä. Erityisesti kannattavuusrajat ja investointien kohdentaminen heikompiin kohteisiin näyttävät olevan kysymyksiä, joihin ei ole muodostunut selkeää näkemystä. Vastauksissa korostuu epävarmuus pitkän aikavälin kehityksestä ja päätösten sitominen tulevaan kaasuntuotantoon, teknologian kehitykseen ja taloudellisiin reunaehtoihin.

Vastaajat ilmaisivat kaipaavansa konkreettisia esimerkkejä toimijoista ja ratkaisuista, joiden avulla kaasumäärien mittaamista voisi tehdä kustannustehokkaasti. Lisäksi toivottiin perusteltua aineistoa siitä, millaisia hyötyjä kaatopaikkakaasun keräämisellä saavutetaan suhteessa kerättyyn määrään, jotta tätä tietoa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi tarkkailuvelvoitteiden kehittämisessä. Kiinnostus kaatopaikkakaasun hyödyntämiseen säilyy jatkossakin, vaikka pitkän aikavälin linjaukset ovat vielä monilta osin avoimia. Nämä aiheet tarjoavat hyvän lähtökohdan alan tulevalle kehittämistyölle ja

toimijoiden väliselle yhteiselle keskustelulle. Niiden tarkempi tarkastelu toimijoiden kesken voisi auttaa toimijoita varautumaan kaasuntuotannon vähenemiseen sekä tunnistamaan uusia mahdollisuuksia kaasunkeruun kehittämiseen. Edellä mainittuja kysymyksiä voidaan tulevaisuudessa pohtia ja hakea niihin ratkaisuja yhteisesti vaikkapa kaatopaikkakaasufoorumin kautta.

Toimijoiden kiinnostus valtakunnalliseen kaatopaikkakaasufoorumiin

Kajastus-hankkeessa perustettiin valtakunnallinen kaatopaikkakaasuun erikoistunut työryhmä, joka jatkaa toimintaansa hankkeen päätyttyä. Kyselyn perusteella kiinnostus kaatopaikkakaasufoorumia kohtaan oli melko vahvaa. Vastaajista 44 % ilmoitti olevansa halukas liittymään foorumin jäseneksi, kun taas 36 % ei ollut kiinnostunut ja 20 % ei osannut vielä ottaa kantaa asiaan. Huomattava osuus kielteisiä ja epävarmoja vastauksia osoittaa, että kaikkien toimijoiden tarpeet tai odotukset foorumia kohtaan eivät ole vielä selkiytyneet.

Kuitenkin lähes puolet vastaajista näkee tarpeellisena alan yhteisen asiantuntijafoorumin, joka kokoaisi yhteen kaatopaikkakaasun parissa toimivia organisaatioita ja tarjoaisi mahdollisuuden tiedonvaihtoon sekä yhteistyön kehittämiseen. Foorumin tavoitteena olisi muun muassa jakaa kokemuksia kaasunkeruun ja kaasun hyödyntämisen käytännöistä, seurata lainsäädännön muutoksia, arvioida niiden vaikutuksia toimialaan sekä välittää tietoa uusista teknologioista ja toimintamalleista. Lisäksi foorumi voisi toimia kanavana yhteisten näkemysten muodostamiseen, lausuntojen valmisteluun sekä vuoropuheluun viranomaisen, päättäjien ja muiden sidosryhmien kanssa. Alan toimijoiden verkostoituminen ja parhaiden käytäntöjen jakaminen voisivat osaltaan tukea myös kaasunkeruun tehokkuuden, ympäristövaikutusten hallinnan ja kustannustehokkuuden kehittämistä.

Myös jäsenmaksuun liittyvät vastaukset osoittavat valmiutta osallistua foorumin toiminnan rahoittamiseen, mikä tukee ajatusta pysyvästä ja hankkeen päättymisen jälkeenkin toimivasta asiantuntijaverkostosta. Toimijoista 70 % piti sopivana vuosimaksuna 100–500 euroa, kun taas 30 % katsoi sopivaksi tasoksi 0–100 euroa vuodessa. Jäsenmaksun hyväksyttävyyttä näyttää olevan yhteydessä siihen, millaista hyötyä foorumi pystyy jäsenilleen tarjoamaan. Tätä tukee myös erään vastaajan kommentti, jonka mukaan jäsenmaksu voisi olla nykyistä arviota korkeampikin, jopa 500–1000 euroa vuodessa, riippuen siitä, mitä foorumi mahdollistaa, selvittää ja tekee jäsentensä eduksi. Toimijat ovat valmiita sitoutumaan foorumin toimintaan taloudellisesti, mikäli sen toiminta koetaan hyödylliseksi ja jäsenille lisäarvoa tuottavaksi.

Avoimissa vastauksissa nousi esiin tarve käytännönläheiselle tiedolle. Yksi vastaajista toivoi perusteltua aineistoa kaatopaikkakaasun keräämisen hyödyistä suhteessa kerättyyn kaasumäärään. Tällaiselle tiedolle nähtiin olevan käyttöä erityisesti tilanteissa, joissa pyritään arvioimaan nykyisten tarkkailuvelvoitteiden tarkoituksenmukaisuutta tai perustelemaan mahdollisia muutostarpeita. Lisäksi vastaajat toivoivat saavansa jatkossakin tietoa toimijoista, jotka voivat tarjota kustannustehokkaita menetelmiä kaatopaikkakaasun määrän arviointiin.

Asiantuntijahaastattelut

Asiantuntijahaastattelu 16.2.2026: Harri Laurila, Kiertokapula Oy

Haastateltavana Harri Laurila, työnjohtaja, Kiinteistöt ja kunnossapito, Kiertokapula Oy, haastattelija Satu Tiainen, HAMK.

Haastateltava on nähnyt haastattelun yhteenvedon ja tarkistanut sen ja myöntänyt sille julkaisuoikeuden osana KAJASTUS-hankkeen kirjallisuuskatsausta.

Viranomaisvaatimukset

Kiertokapula toimii kolmen eri ELY-keskuksen alueella. Vaikka lainsäädäntö on valtakunnallisesti yhtenäistä, eri alueiden ohjeet ja vaatimukset käytännössä eroavat toisistaan. Tämä johtuu ennen kaikkea paikallisista olosuhteista: esimerkiksi alueen pohjavesialueet, vesistöt, maaperän rakenne, jätteenkäsittelyalueen koko, kaatopaikkakaasun määrä ja lähiympäristön asutus vaikuttavat siihen, millaisia tarkkailu- ja suojatoimia ELY-keskus edellyttää. Jokainen ELY arvioi riskit omalla alueellaan erikseen, jonka vuoksi ne voivat painottaa valvonnassa hieman eri asioita. Myös alueelliset resurssit ja valvontakohteiden määrä vaihtelevat, mikä voi vaikuttaa tarkastusten tiheyteen ja siihen, kuinka yksityiskohtaisesti ELY edellyttää tiettyjä selvityksiä. Vaikka periaatteet ovat samat, käytännön toteutus muotoutuu aina paikallisten ympäristöriskien ja olosuhteiden mukaan. Lisäksi viranomaishenkilön kokemusvuodet vaikuttavat selvästi siihen, kuinka paljon selvityksiä tulee tehdä. Kokenut viranomaisosaaja usein suoralta kädeltä hyväksyä jätehuoltoyhtiön uudet ehdotukset, kun taas kokematon viranomaisosaaja vaatii useita laajoja selvityksiä ennen hyväksyntää.

Haastattelija toteaa, että lainsäädäntö on toimijasta riippumaton, riippumatta siitä, onko jätteenkäsittelyalueen toimija kunnallinen vai yksityinen. Valvonnan ero syntyy toiminnan riskitasosta, laajuudesta ja lupamääräyksistä. Jos jätteenkäsittelyalueella (jolla toimii sekä kunnallinen että yksityisiä jätteenkäsittelijöitä) syntyy esimerkiksi hajuhaittoja tai kuormittuneita vesiä, kunnalliselta jäteyhtiöltä vaaditaan perusteellista syiden selvittämistä ja investointeja ratkaisuihin, kun taas yksityinen toimija saattaa välttyä vastuulta, vaikka olisi päästön lähde.

Varautuminen tulevaisuuteen ja tulevaisuuden viranomais- ym. vaatimuksiin

Kaikkiin tarvikkeisiin on yleensä hyllyssä saatavilla varaosia. Jos esimerkiksi viranomaiset ilmoittavat hajuhaitasta, tilanteeseen reagoidaan välittömästi (pl. viikonloppu) ja rikkoutunut osa vaihdetaan nopeasti uuteen varaosaan. Alueella tuotetaan tällä hetkellä sähköä kaatopaikkakaasusta kahdella toiminnassa olevalla mikroturbiinilla.

Kiertokapulan Karanojan jätteenkäsittelyalueen kaikki toiminnassa syntyvät jätevedet kerätään tasausaltaisiin, josta ne johdetaan HS-Veden puhdistamolle käsiteltäviksi. Hyvinkään Kapulan jätteidenkäsittelyalueelta tulevat jätevedet johdetaan putkia pitkin Hyvinkään Veden jätevedenpuhdistamolle käsiteltäviksi. Hyvinkäällä haetaan lupaa käsitellä jätevesi paikallisesti biohiilisuotimen läpi, jonka jälkeen puhdistetun veden voisi laskea maahan.

Parhaillaan tehdään selvitystä mm. siitä, johtuuko kaatopaikkakaasun väheneminen kastelun puutteesta ja tutkitaan mahdollisuutta pumpata vettä pystykaivoon kaasun tuoton parantamiseksi.

Tulevaisuuden jalostus- ja käsittelymenetelmät ja visiot?

Tällä hetkellä penkan 2 kaasussa on korkea rikkivetypitoisuus, joka estää kaasun hyödyntämisen mikroturbiinilla energiaksi. Ainoa vaihtoehto on polttaa kaasua soihdussa, jolloin lämpöenergia menee hukkaan. Tulevaisuudessa olisi hyvä päästä hyödyntämään tätä kaasua. Korkeaan rikkivetypitoisuuteen on ehdotettu aktiivihiilen käyttöä, mutta näillä pitoisuuksilla sitä kuluisi noin 3

m3/vrk, mikä ei ole järkevää. Tulevaisuudessa penkan 2 rikkivetypitoisuus ehkä putoaa, jolloin sitä voisi sekoittaa penkan 1 kaasuun, jolloin rikkivety laimenisi pitoisuuteen (<2000 ppm). Tällöin yhdistelmäkaasua voisi hyödyntää energiaksi esim. jäteveden haihdutukseen, tilojen lämmitykseen tai vaikka kipsin kuivaukseen.

Jätehuolto-yhtiöissä (ml. Kiertokapula) on havaittavissa kiinnostusta markkinoille tulleeeseen uuteen toimijaan (Hydryx), joka yhtiön oman ilmoituksen mukaan tarjoaa kaatopaikkojen metaaninhallintaan reaaliaikaiseen, automaatio- ja mittaustietoon perustuvan ratkaisun. Yhtiön mukaan heidän järjestelmänsä optimoi kaatopaikkakaasun talteenoton kaivokohtaisesti, mikä voi parantaa kaasun talteenottoa ja energiantuotannon kannattavuutta sekä vähentää metaanipäästöjä. Lisäksi järjestelmän kerrotaan tarjoavan reaaliaikaista seurantaa ja raportointia sekä tukevan operatiivista tehokkuutta, sillä automaatio vähentää manuaalisen valvonnan tarvetta ja mahdollistaa henkilöstön keskittymisen keskeisiin ylläpitotehtäviin.

Tulevaisuudessa jätehuolto-yhtiöiden on toivottavaa ja tärkeää panostaa enemmän yhteistyöhön ja yhteisöllisyyteen esimerkiksi järjestämällä tapaamisia ja jakamalla tietoa. Koska kaikki yhtiöt työskentelevät samojen tavoitteiden eteen, olisi hyödyllistä vaihtaa kokemuksia toimivista ratkaisuista sekä jakaa uutta tietoa tekniikoista ja alan toimijoista. Haastattelija toteaa, että Kajastus-hankkeen myötä tätä helpotettiin perustamalla yhteistyöfoorumi, jonka tavoitteena on tehostaa kaatopaikkojen kaasujen hyödyntämistä ja osaamisen kehittämistä yhdessä. Foorumia koordinoi Suomen Biokaasu ja Biokierto ry, joka toimii myös sihteerinä työryhmässä, joka muodostetaan foorumin alaisuuteen operatiiviseksi elimeksi.

Asiantuntijahaastattelu 8.4.2026: Juha-Matti Herpiö, Sarlin Oy

Haastateltavana Juha-Matti Herpiö, Head of Sales, Kaasu & Energia, Paineilma, Sarlin Oy, haastattelija M. Minna Laine, HAMK.

Haastateltava on nähnyt haastattelun yhteenvedon ja tarkistanut sen ja myöntänyt sille julkaisu-oikeuden osana KAJASTUS-hankkeen kirjallisuuskatsausta.

Juha-Matti Herpiö on työskennellyt Sarlinilla vuodesta 2007, tällä hetkellä myyntipäällikkönä projekteissa.

Ensimmäiset kaatopaikkakaasun pumppaamot on asennettu 31 vuotta sitten. Keräilyvelvoitteen myötä 2000-luvun alussa suljettiin muutamia, enää yksittäisiä kaatopaikkoja jäi, jotka käsiteltiin vuoden 2010 jälkeen.

Tällä hetkellä revisioidaan olemassa olevia kaatopaikkoja, joilla kaasun määrä on pienentynyt, mutta kaasu palaa vielä soihdussa. Vanhoja alueita on päivitetty pienemmälle kapasiteetille.

Sarlin toimittaa pumppaamot ja säätää kaivot, tilaaja peittää penkat ja rakentaa imulinjat. Jätteen hautaajalla on paras tietämys siitä, minne imuputkistot kannattaa sijoittaa, jälkikäteen on mahdoton tietää, mitä mihinkin penkkaan on läjitetty.

Uusien kaasunkerualueiden kartoittamiseksi voidaan tehdä koepumppauksia (Sarlin ei tee), joilla arvioidaan keräyspotentialiaalia ja voidaan avata uusia kaivoja.

Alan business on hiljaista, koska uusia kaatopaikkoja ei ole tulossa. Jäljellä on jokaisella kaatopaikalla sijaitsevat hätä/erikoisjäteaumat, joista tulee syntymään kaatopaikkakaasua, kun ne suljetaan. Näille alueille suunnitellut ja esivalmistellut kaivot ovat jo olemassa.

Kysyttäessä, voisiko kaasunkeräystä olemassa olevilla penkoilla tehostaa, Juha-Matti Herpiö toteaa, että sattumia on voinut jäädä, mutta uusia taskuja ei enää synny. Penkkaan voi muodostua kanavia, jotka johtavat kaasun väärään paikkaan. Joillakin alueilla on hyvät ja toimivat keräysjärjestelmät, mutta joillakin alueilla vertikaalikeräys ei enää toimi, sillä putket voivat olla kaikki lytyssä, ja keräys onnistuu vain pistemäisesti.

Hän ei näe uusien pystyputkistojen asentamisella kuin hetkellistä iloa, sillä penkkojen kaasuntuotto hiipuu, ja uusien putkien asentaminen tai vanhojen korjaaminen on kallista.

Kaatopaikkakaasun määrän ja metaanipitoisuuden pienentyessä pumppaamot ovat ylimitoitettuja, ja kaasun palaminen soihdussa heikkenee ja lakkaa. Heikkolaatuista kaatopaikkakaasua on vaikea saada syttymään ja pysymään palamassa. Kun metaanipitoisuus laskee 25 %:iin, kaasu ei enää pala, ja soihdun käyttö on käsityötä. Lisäksi hiilidioksidi ja typpi, joiden määrät suhteessa lisääntyvät, ovat inerttejä kaasuja, jotka voivat tuoda lisähaastetta kattilalle.

Ratkaisuksi Herpiö mainitsee apupolttoainekäytön, eli kaatopaikkakaasun polton sivupolttoaineena kattila- tai voimalaitoksissa tai biokaasulaitoksessa paremman polttoaineen joukossa.

Kysyn, mitä mieltä Juha-Matti Herpiö on hiilidioksidin talteenotosta. Sitä hän pitää mielenkiintoisena, muttei ongelmattomana. Metaanin saa hyvin väkevöityä ja hiilidioksidin (muttei typpeä) erikseen kaatopaikkakaasusta, mutta hiilidioksidille pitäisi olla käyttökohde.

Investointi on kallis, ja kaatopaikkakaasua ei lasketa Herpiön mukaan biogeeniseksi hiilidioksidiksi, joten tukipolitiikka puuttuu. Kaatopaikkakaasusta eristetyn hiilidioksidin puhdistus elintarvikekelpoiseksi on todella kallista. Jos vähemmän jalostetulle hiilidioksidille löytyy käyttökohde, oikein hyvä.

Sarlinilla on menetelmät (membraanitekniikka ja kaasunpuhdistusjärjestelmät), jos joku asiakas haluaa ottaa hiilidioksidin talteen.

Kysyn, mikä asiantuntijasta on lupaavin kaasunkäsittelymenetelmä. Vastaukseksi Herpiö totesi, että jos olisi pakko tai haluttaisiin saada talteen myös pienet metaani- ja hiilidioksidimäärät, kaasunkeräys, puhdistus, hiilidioksidin erotus ja metaanin rikastaminen olisi paras ratkaisu.

Myös metanointi on hyvä tapa rikastaa metaania kaatopaikkakaasusta. Kustannuksiltaan se on lähellä hiilidioksidin talteenottoa, mikäli CO₂ ei tarvitse kuljettaa vaan sidotaan vetyyn, ja jos vetyä ei tarvitse tuoda kaukaa.

Hiilidioksidin hyödyntämiselle Herpiö ei näe monia vaihtoehtoja tällä hetkellä, lähinnä käytön betonin valmistuksessa.

Haastattelun edetessä Juha-Matti Herpiö innostuu suunnittelemaan konseptia, jossa hiilidioksidin talteenotto olisi rinnakkainen menetelmä metanoinnin kanssa. Membraanilla metaanin saa väkevöityä helposti lähes kaksinkertaiseksi (30 % → 60 %); metanointiin voisi ohjata valmiiksi eroteltua hiilidioksidia kaasun koostumuksen ja laadun mukaan optimoiden.

Seuraavaksi kysyn haastateltavalta optimoidun kaasunkeräyksen ja jatkuvan mittauksen hyödyistä vähenevän kaatopaikkakaasun "tiristelyyn".

Näitä on Suomessa kokeiltu jo 2000-luvun alussa hyvin, mutta lyhytaikaisin tuloksin. Pitkällä tähtäimellä kaasua syntyy sen, minkä syntyy kultakin kasalta.

Imuvoima ei vaikuta metaanin muodostumisprosessiin, mutta keruuseen vaikuttaa; suuremmalla imuvoimalla kerätään enemmän kaikkea kaasua, ja liian kovalla imuvoimalla voi käydä niin, että ilmakehän kaasut imeytyvät tiivistyskankaan läpi, jolloin penkkaan pääsee ilmaa ja metaanintuotto heikkenee. Kuitenkin fysikaaliset seikat eivät muuta kaatopaikkakaasun synnyn biologiala.

Megavaikutuksena kaatopaikkaakaasun keräykseen toimivat lämpötila, ilmanpaineet ja sateet. Lämpötila vaikuttaa jälkijättöisesti (ikään kuin meri lämmitessään tai vanha kivitalo, haastattelijan huomio). Tärkein merkitys on pintarakenteilla; jos ne vuotavat, kaasunkeräys on tehotonta. Juha-Matti Herpiön mielestä säätötyökaluilla on pieni vaikutus kokonaisuuteen eli kerättyyn kaasumäärään ja sen laatuun.

Seuraavaksi siirryimme haastattelussa käymään läpi kirjallisuudesta löytyneitä, kirjallisuuskatsauksessa lyhyesti kuvattuja kaasun käsittelymenetelmiä. Kryogeeninen tislaukset ei ole Suomessa käytössä, eikä Herpiö pitänyt sitä realistisena vaihtoehtona. Eniten käytössä olevat menetelmät ovat aktiivihilisuodatin erilaisilla suodatinaineilla epäpuhtauksien, hajukaasujen ja hajuhaittojen poistoon.

Sarlin on testannut kenttämittakaavassa PSA:ta, jossa metaanin väkevöinti toimi hyvin, molekyyliseula erotteli vain metaanin, joten myös typen kaasuista päästiin eroon. Metaani väkevöityi 99 %:ksi. Menetelmä ei kuitenkaan edennyt kaupalliseksi, mahdollisesti operaattorien kiinnostuksen puutteen vuoksi.

Kaatopaikkakaasu täytyy puhdistaa ennen PSA:ta, mutta tämä on pieni kustannus koko PSA-menetelmästä.

Molekyyliportti, nelivaiheinen PSA ja kaasun reformointi eivät olleet lainkaan tuttuja menetelmiä haastateltavalle.

Seuraavaksi keskustelimme siitä, mikä olisi paras ratkaisu hiipuvan kaatopaikkakaasun mahdollisimman hyvään keruuseen ja käyttöön.

Herpiön mukaan penkkakaasu on vuosien varrella hiipunut, ja metaanin ja hiilidioksidin pitoisuudet pikkuhiljaa laskevat. Jäteyhtiöillä on 5–10 vuotta aikaa kerätä kaatopaikoilta sellaista kaasua, joka palaa jossakin (soihdussa).

Jos halutaan vähentää työtä,

- metaanin rikastus
- kalvopuhdistus ja
- hiilidioksidin erotus

ovat relevantteja vaihtoehtoja.

Säädöt eivät pitkällä aikavälillä muuta tilannetta.

Hän myös painotti, että Suomessa kaatopaikkakaasua saadaan talteen enemmän kuin tanskalaisen tutkimuksen keskiarvo, 50 %; penkkamittausten perusteella kaatopaikkakaasun hukka on 5–15 %.

Esiteltyäni kaatopaikkakaasun elinkaaren keskiarvokäyrän hän totesi, että 10–20 vuoden hyvän metaanin keräysjakso laskee kuvaajaa jyrkemmin, ja käytännössä käyrä olisi enemmän S-mallinen.

Asiantuntijahaastattelu 9.4.2026: Mikko Saalasti, Doranova Oy

Haastateltavana Mikko Saalasti, toimialajohtaja, biokaasuratkaisut, Doranova Oy. Haastattelijana M. Minna Laine, HAMK.

Haastateltava on nähnyt haastattelun yhteenvedon ja tarkistanut sen ja myöntänyt sille julkaisu-oikeuden osana KAJASTUS-hankkeen kirjallisuuskatsausta.

Haastattelun aiheena oli kaatopaikkakaasun keruun ja hyödyntämisen tekniset haasteet ja niiden taklaaminen.

Doranovan liiketoiminta-aluetta ovat päästömittaukset ja päästöjen seuranta sekä selvittää se päästön osuus, joka vapautuu penkoille lainsäädännön veloitteen mukaisesti.

Sulkemattomilla kaatopaikoilla tehdään arviointeja kaasun muodostumisesta, ja tehdään toimintaselvityksiä Suomessa. Ulkomailla selvitetään kaasun muodostumisen potentiaalia.

Kaatopaikkakaasupäästöjä mitataan keväisin noin 10–15 suomalaisella kaatopaikalla, osalla vuosittain, osalla päästöä arvioidaan ilman mittauksia.

Doranova käyttää omaa kaasupäästöjen laskuria, lähinnä uusien sulkemattomien penkkojen kaasumäärän arvioon ennen mahdollista mittausta, joka pohjautuu IPCC:n ja USEPA:n FOD-malliin. Laskurit eivät kuitenkaan ole tarkkoja, vaan syntyy kymmenien prosenttien heitot todellisuudesta. Laskureissa olevat neljä erilaista ilmastovyöhykettä eivät riitä kuvaamaan kaikkia erilaisia penkkaolosuhteita.

Myöskään tilastot eivät ole tarkkoja siitä, mitä jätemassoja kaatopaikoille on tuotu, miten penkka on peitetty ja kuinka sitä on hoidettu.

Penkkoihin voidaan porata koekaivoja, jolloin päästään lähemmäs totuutta, mutta siltikin päästölukuihin jää virhettä.

Tarkimmat lukemat saadaan suljetuilla penkoilla, joissa määritetään pintamittauksilla läpi tulevan kaasun määrä ja pitoisuus, ja arvioidaan sitten tämän perusteella laskennallisesti vuosipäästöjen määrä. Vaihtelua tulee toki päivien ja vuodenaikojen suhteen, sekä penkan kosteuden perusteella, mutta tarkkuus riittää kasvihuonekaasupäästöjen määrän arviointiin.

Afrikassa kaatopaikkakaasun synty on hyvin erilainen prosessi. Kuumassa kosteassa ilmastossa kaasumäärät ovat merkittävästi paljon suurempia ja kaasua tulee huomattavasti vähemmän aikaa, joten afrikkalainen prosessi on nopeampi.

Suomessa prosessi on hitaampaa, eikä afrikkalaisia kaasumääriä vastaavaa piikkiä saavuteta. Talvella on kuivempaa, ja vaikka prosessi pitää penkkaa lämpimänä, penkan pintakerros toki jäätyy.

Doranovan mittaus tehdään FID-mittarilla 20 metrin välein penkan pinnasta. Todellinen päästö saadaan pintakerroksen läpi tulevasta lukemasta. Jos lukema menee alueelle 100–1000 ppm, mitataan kohdasta tiheämpään. Koko kaatopaikka-alue käydään läpi, jolla tavalla saadaan kaatopaikalle eräänlainen pintamallinnus, missä kohdin kaasu tulee penkasta läpi. Toki kaasut voivat kulkeutua paljonkin sivuttaissuunnassa ja kanavoitua sitä kautta muualle.

Kokonaiskaasumäärä saadaan sitten pumppaamon mittausten ja pintamittausten summana.

Yleensä pintamittaukset pyritään tekemään keväällä. Vuodenaikavaihteluista tulee varmaankin suurin virhemarginaali kasvihuonekaasupäästöjen osalta, sillä päästö ei ole läpi vuoden sama.

Laki määrää raportoimaan päästömittaukset, viranomaisesta riippuen yleensä 2–3 vuoden välein. Tuloksia on parinkymmenen vuoden ajalta (tätä olisi mielenkiintoista tutkia; Doranovalla on pitkän ajan (kymmeniä vuosia) seurantatuloksia eri jäteyhtiöiden penkoilta, joita voisi pyytää katsottavaksi). Vuodenaikavaihtelut näkyvät pitkään seuratuilla suljetuilla kaatopaikoilla, laskeva trendi ei ole mittausdatassa täysin tasainen.

Jos pumppausta vähennetään niin päästöjen määrä pinnan läpi kyllä kasvaa. Mutta ajan myötä kaasun muodostuminen vähenee minkä takia monesti pumppausta joudutaan vähentämään, kun

kaasun määrä tai laatu ei ole polttoon riittävä. Tällöin pintapäästön määrä voi ainakin hetkellisesti kasvaa, kun kaasu vapautuu hallitsemattomasti ilman kaasun pumppausta.

Keskusteltaessa kaasun jalostusmenetelmistä Saalasti toteaa, että PSA on mahdollinen, mutta kohtuullisen hintava menetelmä. Membraaniteknologialla onnistuu metaanin väkevöinti, mutta typpikaasu jää ongelmaksi.

Tärkeimpänä kaasunkeruun tehostamiskeinona Saalasti pitää sitä, että ensimmäiseksi laitetaan keruulinjat kuntoon, sillä siirtolinjat ovat usein lytyssä ja/tai vettyneet, jolloin vesilukkoja syntyy mutkiin. Linjat pystytään kuvaamaan, ja linja kerrallaan sulkemalla paineista selviää, mikä linjoista on tukossa.

Pumppaamon ja soihdun toiminnan kannalta aktiivinen kaatopaikan pumppuasemien hoito tarvitaan, jos kaatopaikalla on 10–30 kaivoa, säätö ja mittaaminen pitäisi tehdä ja hoitaa pumppaamoa ja kaatopaikkaa aktiivisesti.

On mahdollista, mutta kallista asentaa kaasupumppaamolle automaattinen kaasuanalysaattori, joka tietyin väliajoin ottaa jokaisesta linjasta kaasunäytteen ja säätää automaattisesti venttiileitä. Tällaisen automaattisen järjestelmän asentaminen on halvempaa, jos sen voi tehdä pumppaamolle, jolle useat linjat tulevat, yhdistämällä linjat ja mittari yhdistettyyn linjaan.

Palaamme kaasun jalostustekniikoihin. Perinteisesti aktiivihiihellä suodatetaan sekä siloksaanit että rikkivedyt. Jos kaasumäärät ovat suuria ja rikkivetypitoisuudet korkeita, voi pesurit tulla järkevämmäksi ratkaisuksi, kun käyttökulut ovat niillä selkeästi pienemmät kuin aktiivihiiლისuodattimilla.

Metaanin soihtupoltto on vaikeaa, jos sen pitoisuus on alle 20–30 %. Rikastus biometaaniksi CHP- korkeudelle voisi onnistua myös vesipesurilla. Membraanit ja PSA ovat mahdollisia tekniikoita, muttei Saalastin käsityksen mukaan Suomessa kaatopaikoilla tällä hetkellä käytössä.

Doranovalle on menossa HSY:n kanssa testejä biokaasun ja synteettisen kaasun metanoinniksi, mutta he eivät ole testanneet metanointia kaatopaikkakaasuille. Metanoinnin haasteena on vedyn saatavuus ja kustannukset, erityisesti sähkön hinta, ja minkä kokoinen elektrolyysi tarvitaan. Lisäksi typpi jää, jolloin kaasuun sekoittuu ilmaa (?), eli kaasu on esipuhdistettava ennen metanointia, ja sen liikennekäyttö ei onnistu, jos metaanin sekaan jää typen kaasuja.

Käytettäessä PSA:ta tai membraania biometaanin rikastamiseen hiilidioksidi tulee puhtaana virtana, joka on helposti hyötykäytettävissä isolla kaatopaikalla.

Kohtuullisen hyvälaatuisella hiilidioksidilla on useita käyttökohteita:

- hiilen sidonta
- kaivosteollisuuden sivuvirtoja ja massoja, joihin CO₂ voidaan sitoa ja käyttää esimerkiksi rakennuspuolella päästökaupan välineenä
- vetytehtaaseen energiaksi ja polttoaineiksi

Hiilidioksidin talteenotto on kiinnostava asia biokaasupuolella. Kuinka hyödyntää, kuka ehtii ensimmäiseksi; CO₂-talteenotto tuo selkeästi lisäkannattavuutta biokaasulaitokseen, nimenomaan metaania rikastamalla ja CO₂ erottelemalla. Metanointikin voi olla kannattava vaihtoehto, referenssejä vain ei toistaiseksi juurikaan löydy, kun varsin uusi teknologia kyseessä. Kysymyksenä ovat kuljetusmatkat, mahdollisesti putkia pitkin? Jos suunnitelmissa on nesteyttää CO₂ rikastuksen jälkeen, kannattavat kuljetusmatkat kasvavat joihinkin satoihin kilometreihin.

Soihstupoltossa kaatopaikkakaasu, jonka metaanipitoisuus on vähintään 35 % palaa, mutta alle 30 % metaanipitoinen kaasu ei syty. Jos kyseessä on pieni penkka, seuraa pieni päästö, mutta ison penkan suhteen tukipolttoaineen käyttö on suotavaa selkeän kasvihuonekaasupäästön vuoksi. Silloin soihstupoltin voidaan pitää päällä hyödyntämällä nestekaasua tukipolttoaineena.

Kun mennään tarpeeksi pieniin metaanipitoisuuksiin, biosuotimet hake/turvedin läpi ovat "viimeinen" ratkaisu. Kaasu ohjataan penkan sisältä reikäputkea pitkin pintaosiin, jossa on hapettavat kerrokset.

Membraani ei ole käytössä kustannustehokkuuden vuoksi, ja koska ongelmana ovat happi ja typpi, jotka jäävät metaanin kanssa samaan jakeeseen.

Kryogeeninen tislaukset voisivat toimia isolla laitoksella. Niitä toimittaa ranskalainen yritys. On suuri investointi, mutta toisaalta hyvän erottelun vuoksi myös haitta-aineet saadaan erikseen, ja syntyy hyvä lopputuote. Kokoluokkaa tarvitsisi olla Suomen suurimpia (HSY).

Saalasti ei ollut kuullut molekyyliportista myöskään.

Heikkolaatuisen kaatopaikkakaasun hyödyntämiseen priimaus on yksinkertaisinta, samoin soihstupoltin ja nestekaasun avulla ylläpidettävä jatkuva tuli

Saalasti pohti, miten Suomessa raportoidaan päästömittauksia, miksi mittauksia tehdään eri lailla, ja miksi käytännöt ovat erilaisia.

Keskustelimme seuraavaksi kastelun vaikutuksesta kaasuntuottoon. Saalasti ei usko, että penkan kastelu voidaan tehdä varsinkaan isossa penkassa niin, että vettä johtuisi joka paikkaan, joten sillä lienee pieni vaikutus. He ovat tehneet Tartossa kokeita, joissa penkan päällä oli kaivo ja siitä haaroja ympäri penkkaan, mutta vaikutus oli tosiaan pieni.

Doranova toimittaa kaatopaikkakaasun keruujärjestelmiä myös ulkomaille, ja Tunisiassa tilanne on aivan erilainen kuuman ja kuivan ilmaston vuoksi; siellä kastelusta oli tosiaankin hyötyä kaatopaikkakaasun muodostumiselle, kun veden pumppaus tapahtui takaisin penkasta pystykaivoihin.

Iso penkka olisi hyvä sen testaamiseen, minkä laatuista hiilidioksidia saadaan eri menetelmillä talteen.

Kysyin kaatopaikkakaasun keruun saannosta, ja Saalastin mukaan Suomessa saadaan kaasua talteen mitatuilla kaatopaikka-alueilla noin 60–70 %, mutta vaihtelu on melko suurta, ja jos ajatellaan koko Suomea ja useita kaatopaikkoja, joilta kaasua ei lainkaan kerätä tai polteta soihdussa, vuotoa on koko Suomea ajatellen kyllä.

Saalastia kiinnostaisi myös tutkimus, jossa samalla alueella mitattaisiin kaatopaikkakaasujen pitoisuuksia eri mittausmenetelmillä, jolloin saataisiin vertailutietoa eri mittareiden tuloksista. Totesin, että tämä voisi olla kaatopaikkakaasuverkostossa yhteisesti kiinnostava ja mahdollisesti toteutettava asia.

Viitteet

1. Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., & Korhonen, J. (2016). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology No. 258. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf>
2. Alitalo, A. (2026). Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikirjeenvaihto 10.3.2026 QPowerin tuotekehitysjohtajan Anni Alitalon kanssa.
3. Amaraibi, R. J., Reynolds, B., Joseph, B., & Kuhn, J. N. (2025). Experimental, economic, and life cycle carbon footprint assessment of low-cost adsorbents for siloxane removal from landfill gas. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 44(1). <https://doi.org/10.1002/ep.14534>
4. Aranowski (2025). Valorisation of Landfill Gas Using a Spinning Fluids Reactor. 11th Abstract in the International Conference on Renewable Energy Gas Technology Weimar, Germany 2025. https://locagas.eu/resources/Abstract_Robert_Aranowski.pdf
5. Bockreis, A., & Steinberg, I. (2005). Influence of mechanical-biological waste pre-treatment methods on the gas formation in landfills. *Waste Management*, 25(4), 337–343. <https://doi:10.1016/j.wasman.2005.02.004>
6. Borhani, T. N. G., Azarpour, A., Akbari, V., Alwi, S. R. W., & Manan, Z. A. (2015). CO2 capture with potassium carbonate solutions: A state-of-the-art review. *International journal of greenhouse gas control*, 41, 142–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.026>
7. Brandani, F., Pullumbi, P., & Monereau, C. (2021). Nitrogen rejection from landfill gas using pressure swing adsorption. *Adsorption*, 27(4), 603–617. <https://doi.org/10.1007/s10450-021-00304-0>
8. Bykov, E., Tixier, S., Paulauskas, R., Jančauskas, A., & Striūgas, N. (2026). Plasma-assisted combustion of low calorific gases under different oxygen-enrichment level. *Fuel*, 407, 137392. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137392>
9. Cesar, R., Marques, P. J., Tavares, J. R., Antunes, F. C., Goncalves, J. M., Vicentini, R., ... & Zanin, H. G. (2024). Biogas refining: A review on advances in metal-oxide-modified activated carbon for H2S and CO2 removal. *Energy & Fuels*, 39(1), 39–71. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03493>
10. CEWEP (2026). Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2024. Siviu päivitetty 1.4.2026 ja viitattu 2.6.2026. <https://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2024/>
11. Chen, K., Kahangamage, U., Tan, K., & Leung, C. W. (2025). Heat transfer analysis of premixed low calorific value landfill gas impinging flame under oxygen and hydrogen enrichment. *Results in Engineering*, 25, 104118.
12. Cho, E., You, Y. H., Back, C. G., & Hong, J. W. (2024). Enhancing landfill gas bio-desulfurization: operational insights and microbial dynamics from the Daegu Bangcheon-ri Sanitary Landfill. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1421510. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1421510>
13. Choudhury, A., & Lansing, S. (2021). Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104837. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104837>
14. Duan, Z., Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2021). Trace gas composition in landfill gas at Danish landfills receiving low-organic waste. *Waste management (Elmsford)*, 122, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.001>
15. Duan, Z., Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2022a). Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations. *Waste Management*, 139, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>

16. Duan, Z., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2022b). Mitigation of methane emissions from three Danish landfills using different biocover systems. *Waste Management*, 149, 156–167.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.022>
17. Einola, J., Sormunen, K., Lensu, A., Leiskallio, A., Ettala, M., & Rintala, J. (2009). Methane oxidation at a surface-sealed boreal landfill. *Waste Management*, 29(7), 2105–2120.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.01.007>
18. Elmobarak, W. F., Almomani, F., Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Martis, R., & Rasool, K. (2023). Current status of CO₂ capture with ionic liquids: Development and progress. *Fuel*, 344, 128102.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128102>
19. EFTA Surveillance Authority ESA (2026). ESA urges Iceland to meet waste collection and recycling targets: ESA Newsroom: <https://www.eftasurv.int/newsroom/updates/esa-urges-iceland-meet-waste-collection-and-recycling-targets>, Letter of formal notice to Iceland – Waste Targets. 18.3.202: <https://www.eftasurv.int/cms/sites/default/files/documents/gopro/Case%2093896%20College%20Decision%20062%2026%20COL%20-%20Letter%20of%20formal%20notice%20-%20Iceland%20-%20Waste%20targets.pdf>
20. EPA (1995). U.S. Environmental Protection Agency. Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, AP-42, Fifth Addition, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. January 1995.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=200149JJ.TXT>
21. EU (1999). Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, OJ L 182, 16.07.1999, p. 1–19.
22. EU (2018). Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste, OJ L 150, 14.6.2018, p. 100–108., 32018L0850
23. EU (2024). EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU) 2024/1785, annettu 24 päivänä huhtikuuta 2024, teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen) annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 010/75/EU ja kaatopaikoista annetun neuvoston direktiivin 1999/31/EY muuttamisesta. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401785
24. EU (2026). Kick-off meeting for the drawing up of the best available techniques (BAT) reference document for landfills (LAN BREF). Meeting report. <https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2026-01/LAN%20BREF%20KoM%20Report-bref.pdf>
25. European Environment Agency (2025). Diversion of waste from landfill in Europe. Published 18 Nov 2025. EEA:n verkkosivut. Viitattu 2.6.2026.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/diversion-of-waste-from-landfill>
26. Eurostat (2026). Municipal waste statistics. Statistics explained. Data extracted in January 2026. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics
27. Fatima, N., Waheed, H., Raza, A., Mukhtar, A., & Ahmad, F. (2024). A critical review on membrane technology and its application in CO₂ capturing. *Chem. Methodol*, 8(9), 662–698.
<https://doi.org/10.48309/CHEMM.2024.473209.1818>
28. Gazpack (2026). SULAFER®. <https://gazpack.nl/en/sulago>
29. Ghafoori, M. S., Loubar, K., Marin-Gallego, M., & Tazerout, M. (2022). Techno-economic and sensitivity analysis of biomethane production via landfill biogas upgrading and power-to-gas technology. *Energy*, 239, 122086. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122086>
30. Giordano, C. R., Van Brunt, M. E., Halevi, S. J., Castaldi, M. J., Orlovits, Z., & Illes, Z. (2024). Landfill gas collection efficiency: Categorization of data from existing in-situ measurements. *Waste Management*, 175, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.042>

31. Hirvonen, J. (2010). Kaatopaikkakaasun puhdistaminen ja analysointimenetelmät. Pro gradu - tutkielma, Uusiutuvan energian maisteriohjelma, Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto.
<https://urn.fi/URN:NBN:fi:ju-201007012210>
32. Huang, D., Yang, L., Xu, W., Chen, Q., Ko, J. H., & Xu, Q. (2020). Enhancement of the methane removal efficiency via aeration for biochar-amended landfill soil cover. *Environmental Pollution*, 263, 114413. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114413>
33. Hydryx (2026). Yrityksen verkkosivut. Viitattu 2.6.2026. <https://www.hydryx.eu/solution>
34. Kahangamage, U., Chen, K., Zhen, H., & Leung, C. W. (2024). Numerical investigation of combustion characteristics of hydrogen-enriched low calorific value landfill gas for energy applications. *Energy Reports*, 12, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.008>
35. KIVO (2023). Kysely jäsenlaitoksille kaatopaikkakaasuista: tulokooste [ei julkinen raportti].
36. Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2016). Establishing bio-mitigation systems at landfills for reducing greenhouse gas emission – State-of-the-art. Abstract from Global Waste Management Symposium 2016, Indian Wells, California, United States.
37. Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2018). Landfill gas management by methane oxidation. *Solid waste landfilling*, 477–497.
38. Kriipsalu, M., Somani, M., Pehme, K., Tamm, O., Truu, J., Truu, M., & Orupold, K. (2023). Performance of biocover in controlling methane emissions from landfill: A decade of full-scale investigation. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 486–495.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.048>
39. Lair, A., Mansuy, M., Romand, C., Oberti, O., Pradels, C., Barina, G., ... & Trommsdorff, C. (2024). Enhancing landfill efficiency to drive greenhouse gas reduction: A comprehensive study on best practices and policy recommendations. *Waste Management & Research*, 42(10), 889–900.
<https://doi.org/10.1177/0734242X241270951>
40. Lampinen, A. & Rautio, E. (2015). Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen. Teoksessa: Kymäläinen, M., & Pakarinen, O. (toim) *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Luku 7. Suomen Biokaasuyhdistys ry. HAMKin julkaisuja 36/2015.
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1>
41. Latvala, M. (2009). Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristö ; 24/2009. <http://hdl.handle.net/10138/37998>
42. Lee, S., Xu, Q., Booth, M., Townsend, T. G., Chadik, P., & Bitton, G. (2006). Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills. *Waste management*, 26(5), 526–533. DOI: [10.1016/j.wasman.2005.10.010](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.010)
43. Leppänen (toim.), (2002). Kaatopaikan tiivistysrakenteet. Suomen ympäristö, Ympäristöopas 36.
<http://hdl.handle.net/10138/41085>
44. Liesegang, E. (2018). Varsinais-Suomen ja Satakunnan käytöstä poistettujen yhdyskuntajätteen kaatopaikkojen nykytila: Ympäristövaikutukset ja kunnostustarve. Varsinais-Suomen ELY-keskuksen raportteja 56/2018. URN:ISBN:978-952-314-735-5
45. Maghsoudi, H., Tabar, M. A., Snoeck, C., Goderis, S., Van den Brande, N., Mangialetto, J., & Denayer, J. F. (2025). Iron (Fe) and chromium (Cr) substituted ETS-4 adsorbents for efficient nitrogen removal from low grade natural gas/biogas. *Separation and Purification Technology*, 370, 133291. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133291>
46. Mann, J. H., Wilder, L., Zarus, G., & Nickel, R. (2001). Landfill Gas Basics. *Landfill Gas Primer*, 3–14.
https://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/pdfs/landfill_2001_ch2mod.pdf
47. Nikkari, E. (2013). Kaatopaikkakaasun muodostumisen mallinnus-yhdyskuntajätteen koostumuksen ja käytetyn hajoamisvakion vaihtelujen vaikutukset. LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO, Teknillinen tiedekunta, Ympäristötekniikan koulutusohjelma, BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari.

- https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/90935/Kandi_Eero_Nikkari_KORJATTU_VIIMEINEN.pdf?sequence=2
48. Ogunlode, P., Abunumah, O., Orakwe, I., Shehu, H., Muhammad-Sukki, F., & Gobina, E. (2022). An initial study of biogas upgrading to bio-methane with carbon dioxide capture using ceramic membranes. *Catalysis Today*, 388, 87–91. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.11.006>
 49. Paques (2026). THIOPAQ®: The go-to biogas desulphurization system. <https://www.paquesglobal.com/products/thiopaq>
 50. Pera, L., Gandiglio, M., Marocco, P., Pumiglia, D., & Santarelli, M. (2024). Trace contaminants in biogas: biomass sources, variability and implications for technology applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 114478. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114478>
 51. Pfister, K. (2013). EHDOTUS VALTIONEUVOSTON ASETUKSEKSI KAATOPAIKOISTA. PÄÄASIALLINEN SISÄLTÖ. Ympäristöministeriön muistio 23.4.2013. Viitattu 28.7.2025. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Muistio-ehdotuksesta-valtioneuvoston-asetukseksi-kaatopaikoista-33E9F7B1_C452_4B39_A596_4D5077E8B13E-39736.pdf/a4bd4998-4b3e-f744-6be3-ec811032d610/Muistio-ehdotuksesta-valtioneuvoston-asetukseksi-kaatopaikoista-33E9F7B1_C452_4B39_A596_4D5077E8B13E-39736.pdf?t=1603260933015
 52. QPower (2023). Jätteestä polttoaineeksi: Q Powerin innovatiivinen teknologia muuttaa kaatopaikkakaasun uusiutuvaksi polttoaineeksi. QPower-verkkosivut, artikkeli 20.4.2023. Viitattu 10.3.2026. <https://qpower.fi/fi/jatteesta-polttoaineeksi/>
 53. Reddy, K. R., Yargicoglu, E. N., & Chetri, J. K. (2024). Field-scale performance of biochar-amended soil covers for landfill methane oxidation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 5819–5834. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01487-w>
 54. SBB 2025. Suomen Biokierto ja biokaasu ry:n ja HAMKin ylläpitämä kartasto. Biokaasulaitokset kartalla 2024 - <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1ZHpWSB6Av2QQIZSGySCriDCW7piuXnBM&usp=sharing>
 55. Scheutz, C., Duan, Z., Møller, J., & Kjeldsen, P. (2023). Environmental assessment of landfill gas mitigation using biocover and gas collection with energy utilisation at aging landfills. *Waste Management*, 165, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.014>
 56. Singh, D., Sirini, P., & Lombardi, L. (2025). Green hydrogen production from biogas or landfill gas by steam reforming or dry reforming: specific production and energy requirements. *Energies*, 18(10), 2631. <https://doi.org/10.3390/en18102631>
 57. Suomen virallinen tilasto (2000). Ympäristötilasto 2000, Environment Statistics 2000. Ympäristö ja luonnonvarat 2000:1. <https://urn.fi/URN:ISBN:951-727-740-7>
 58. Suomen virallinen tilasto (2025): Kasvihuonekaasut [verkkójulkaisu]. ISSN=1797–6049. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 16.7.2025]. Saantitapa: <https://stat.fi/tilasto/khki>
 59. Suomen ympäristökeskus (2001). Kaatopaikkojen lopettamisopas. Ympäristöopas 89. <http://hdl.handle.net/10138/41633>
 60. Suomen ympäristökeskus (2008). Kaatopaikkojen käytöstä poistaminen ja jälkihoito. Ympäristöhallinnon ohjeita 1/ 2008. <http://hdl.handle.net/10138/41544>
 61. SYKE (2025a). Kaatopaikkadirektiivi (1999/31/EY), raportointijaksot vuosilta 2010–2022. Viitattu 28.7.2025. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset?organization=syke-reporting>
 62. SYKE (2025b). Suomen kuntien kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. ALas-mallin laskentaperiaatteet. Suomen ympäristökeskus SYKE 20.5.2025 Alas 1.6. Viitattu 9.3.2026. https://hiilineutraalisuomi.syke.fi/wp-content/uploads/sites/8/2025/05/Alas_1.6_laskentaperusteet.pdf

63. Tabar, M. A., Maghsoudi, H., & Denayer, J. F. (2025). Hybrid membrane-vacuum pressure swing adsorption: Low-cost technology for simultaneous biomethane and carbon dioxide production from biogas. *Bioresource technology*, 422, 132241. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132241>
64. Tan, K., Kahangamage, U., Chen, K., & Leung, C. W. (2026). Enhancing combustion stability and emission performance of low-calorific landfill gas through hydrogen enrichment in a double-layer porous media burner. *Fuel*, 405, 136522. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136522>
65. Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). Handbook of solid waste management. Chapter 14: Landfilling. McGraw-Hill eBooks. Figure 14.6. DOI: 10.1036/0071356231
66. Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (Toim.). (1993). *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, Inc. (pp. 381–417).
67. Verma, G., Reddy, K. R., & Green, S. J. (2025). Investigation of biogeochemical landfill covers incorporating different biochars and alkaline industrial byproducts for landfill gas mitigation: A column experiment study. *Science of The Total Environment*, 974, 179192.
68. VNa 331/2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista. <https://www.finlex.fi/eli?uri=http://data.finlex.fi/eli/sd/2013/331/ajantasa/2021-11-25/fin>
69. VNp 861/1997. Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista. Kumottu asetuksella VNa 331/2013. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/1997/861>
70. Väyrynen, A. (2023). Kasvihuonekaasupäästöjen vertailtavuus Suomen jätelaitoksissa (Master's thesis, Itä-Suomen yliopisto).
71. Zemite, L., Eglitis, N., Daleckis, V., Kronkalns, D., & Slutins, O. (2025a). Innovative Landfill Gas Treatment System in Latvia: Evaluation of a Full-Scale Purification Prototype. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 62(6), 86–102.
72. Zemite, L., Kronkalns, D., Backurs, A., Jansons, L., Eglitis, N., Cnubben, P., & Lapuke, S. (2025b). Development of an Innovative Landfill Gas Purification System in Latvia. *Sustainability*, 17(13), 5691.

[\[www.circhubs.fi/kajastus\]](http://www.circhubs.fi/kajastus)

[\[www.hamk.fi/projektit/kajastus\]](http://www.hamk.fi/projektit/kajastus)



Elinvoimakeskus



LOUNAIS-SUOMEN
JÄTEHUOLTO



Kiertokaari



**Euroopan unionin
osarahoittama**



HAMK
Hämeen ammatti-
korkeakoulu



Jätekukko