

Ruoppausmassojen sijoitustapojen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin

ARTO ITKONEN, OUTI HYTTINEN JA IRIS KALLIO

Johdanto

Rannikkovesialueilla ruoppausmassojen meriläjäytyksellä on suuria vesistö- ja kalatalousvaikutuksia. Näiden syiden vuoksi ruoppausmassoja pyritään nykyään läjittämään enemmän maalle. Sisävesialueilla läjitys vesistöön on kiellettyä.

Meriläjitys aiheuttaa veden samentumista ja ruoppausmassan sedimentaatiota, jotka aikaansaavat valon vähenemistä vedessä, haitallisten aineiden määrän lisääntymistä, pH-muutoksia, vieraslajien ja pohjadynamiikan muutoksia sekä elinympäristöjen peittymistä. Näillä on arvioitu olevan negatiivisia vaikutuksia kalastolle ja pohjaeläöstölle. Ruoppausmassojen maalle sijoitukseen ohjaavat lisäksi mm. vesienhoitosuunnitelmien tavoitteet ja toimenpiteet vesimuodostumien tilan parantamiseksi sekä vallitsevat hallintokäytännöt ja ohjeistukset.

Pienruoppaustoiminta on Suomen rannikoilla intensiivistä, ja se on jo ehtinyt muuttaa rantavyöhykkeen tilaa merkittävästi. Suurimmat ruoppausmassamäärät syntyvät kuitenkin satamien ja väylien ylläpito- ja uudisruoppauksissa: varsinainen sedimentin pilaantuneisuudesta johtuva kunnostustoiminta on ollut toistaiseksi vähäistä. Väylien ja satamien laajentaminen ja syventäminen on välttämätöntä maankohoamisesta, jokien tuomasta lietteestä ja infrastruktuurin kehittämisestä johtuen.

Syntyvien ruoppausmassojen määrä on huomattava: Suomessa sijoitettiin vuosina 2013–2019 mereen noin 4 miljoonaa tonnia ruoppausmassoja (HELCOM 2023). Tämäkin tilasto on puutteellinen: esimerkiksi Turun seudun ruoppausmassojen sijoituspaikkaverailussa tehdyn tarvekartoituksen perusteella

pelkästään tällä alueella syntyy noin miljoona kuutiometriä ruoppausmassaa 10 vuodessa (Sitowise Oy 2018). Koko Euroopassa ruoppausmassoja syntyy noin 200 miljoonaa kuutiometriä vuodessa (Salomons & Brils 2004).

Massojen maalle sijoittamiseen pyrkiminen on johtanut yleiseen käsitykseen, että kaikkien ruoppausmassojen – myös pilaantumattomien vanhojen sedimenttien – maallisesijoitus on aina meriläjitystä kestävämpää. Käsityksemme mukaan näin ei aina ole muun muassa alueiden käytön näkökulmasta. Tässä artikkelissa ei vertailla maalle ja mereen läjittämisen kokonaiskestävyyttä, joka muodostuu ekologisesta, sosiaalisesta ja taloudellisesta kestävydestä. Teksti sitä vastoin käsittelee erästä heikosti huomioitua kestävyteen vaikuttavaa tekijää: kasvihuonekaasupäästöjä läjitystoiminnan aikana ja sen jälkeen (kuvat 1 ja 2).

Tausta-aineisto: sedimentin kasvihuonekaasupäästöt

Sedimentin orgaaninen aines hajoaa muuttaman vuoden sisällä runsashappisessa, erityisesti pulssimaisesti hapettavassa, ympäristössä huomattavasti niukkahappista ympäristöä nopeammin (esim. Aller 1994; Hulthe ym. 1998). Samalla syntyy kasvihuonekaasupäästöjä.

Suomalainen meriruoppausmassa on tyyppillisesti liejusavea (hehikutushäviö 2–6 %) tai saviliejua (hehikutushäviö 6–20 %). Koxin ja muiden (2021) tutkimusprojektissa saviliejua vastaavaa alankomaalaista merisedimenttiä ”kypsytettiin” kaksi vuotta eli käsiteltiin mm. ojittamalla, huuhtelemalla makealla vedellä ja biologisella käsitteilyllä veden, suolojen ja orgaanisen aineksen määrän vähentämiseksi.



Kuva 1. Kuivumaan kasattua sedimenttiä tilapäisesti tyhjennetyn järven pohjalla. Kuva Kernusta, Virossa. Kuva: Arto Itkonen.

Figure 1. Sediment piled for dewatering on a temporarily drained lake basin. Photo from Kernu, Estonia. Photo: Arto Itkonen.



Kuva 2. Sedimentistä jään alle nousevia kaasukuplia. Kuva Hiedanrannasta, Tampereelta. Kuva: Arto Itkonen.

Figure 2. Gas bubbles from the sediment trapped below ice. Photo from Tampere, Finland. Photo: Arto Itkonen.

Tämän prosessin aikaansaama hiilidioksidin tuotto arvioitiin muuntamalla kypsytämättömän ja kypsytetyn merisedimentin hehkutus-häviöero orgaaniseksi hiileksi ja edelleen hiilidioksidiekvivalentiksi (CO_2 -ekv). Kahdella eri hajoamiskenaariolla CO_2 -ekv-emissioiksi saatiin 0,012 ja 0,050 tonnia hiilidioksidiekvi-

valenttia (t CO_2 -ekv) tuhatta sedimenttikiloa kohti.

Vastaavasti Gebert ja Knoblauch (2017) kuvasivat, kuinka saksalaisen liejuisen siltin orgaanisesta aineksesta 3–11 % hajosi kaatopaikkasijoituksessa 695 päivää kestäneen kokeen aikana. Tämä prosessi tuotti kaasua

noin 2–12 kuutiometriä tuhatta kuivapainokiloa kohti. Olettaen, että tämä kaikki oli hiilidioksidia, saadaan yksikköpäästökseen noin 0,0025–0,0150 t CO₂-ekv tuhatta sedimenttikiloa kohti. Arvot ovat kirjoittajien mukaan pieniä verrattuna yhdyskuntajätteen päästöihin. Ferrans ja muut (2022) käyttivät elinkaariarvioinnissaan maallelajitetyn ruotsalaisen liejuisen sedimentin muusta kuin kuljetuksesta johtuville kaasupäästöille jopa arvoa 0,14 t CO₂-ekv sedimenttitonnia kohti.

Meriläjitettyjen massojen päästöjä voidaan arvioida ilma–meri-rajapinnalta tehtyjen mittausten ja mallinnusten avulla. Fransner ja muut (2019) vertasivat mallinuksissaan Itämeren pohjoisosien merialueiden ilma–meri-hiilidioksidivaihtoa. Mallinnusten mukaan hiilidioksidipäästöt rannan läheisillä alueilla voivat kohota tasolle 60 g C m⁻² vuodessa, joka vastaisi 0,6 g CO₂ m⁻² päivässä. Humborg ja muut (2019) ovat kuvanneet huomattavasti suurempia CO₂-päästöjä merestä ilmaan (0,9–3,3 g C m⁻² eli 3,3–12 g CO₂-ekv m⁻² päivässä) poikkeustilanteessa, kesän lämpöjakson päätyttyä.

Arvio sijoitustavan vaikutuksesta kasvihuonekaasupäästöihin

Sitowise Oy teki edellä esitetyn ja SiteWise-ohjelmalla täydennetyin aineiston perusteella arvion eri tavoin sijoitettujen ruoppausmassojen kasvihuonekaasupäästöistä Suomen olosuhteissa. Kasvihuonekaasupäästölaskelmat tehtiin kolmelle skenaariolle, joihin valittiin mahdollisimman realistisia lähtöarvoja kerätystä aineistosta. Tarkastelujakso oli noin 2 vuotta eli sama kuin Koxin ja muiden (2021) sekä Gebertin ja Knoblauchin (2017) tekemissä sedimentin hajoamiskokeissa. Skenarioissa 1 000 000 m³tr (kiintoteoreettista m³) ruoppausmassoja sijoitetaan a) stabiloimattomana kuorma-autokuljetuksella 20 km:n päässä ruoppauskohteesta maalla sijaitsevalle läjitysalueelle, b) vastaavasti kuin kohdassa a

mutta sideaineella (tässä 5 paino-% sementtiä) stabiloituna tai c) meriläjitetyksi noin 20 km:n merikuljetusmatkan päähän.

Kuljetusten hiilidioksidipäästöjä arvioitiin kestävyysarviointiohjelman SiteWise™ versiolla 3.2 (Moore & Sirabian 2018) 1 000 000 m³:n ruoppausmassamäärää kohden. SiteWise on avoin Excel-pohjainen kvantitatiivinen kestävyysarviointiohjelma, joka on kansainvälisesti verifioitu (Sustainable Remediation Forum 2023). Se soveltuu hyvin ruoppaus-hankkeiden päästölaskentaan. Massojen tilavuuspainon oletettiin olevan 1,2 t m⁻³.

Laskelmissa huomioitiin kuljetus (ei paluumatkoja), sideaineen valmistus ja sedimentin hajoamisesta syntyvät päästöt. Muiden kuin kuljetustyökoneiden käytön aiheuttamien päästöjen arvioitiin olevan samaa luokkaa kuin maa- ja meriläjitetyksessä, eikä niitä huomioitu laskelmissa. Todennäköistä kuitenkin on, että skenaariossa b) käytettävä stabilointilaitteisto lisää päästöjä jonkin verran.

Sedimentin käsittelyn osalta vain siirrosta koituneet hiilidioksidipäästöt huomioitiin laskelmissa, vaikka sedimentin maakuljetus saattaa edellyttää sen käsiteltävyyden parantamista kuivattamalla tai stabiloimalla. Stabiloitinkäsittely saattaa merkittävästi lisätä kasvihuonekaasupäästöjä sideaineiden valmistuksen takia, mutta myös hillitää sedimentin hajoamista. Esimerkiksi tyyppillinen sementti aiheuttaa Mooren ja Sirabianin (2018) mukaan kasvihuonekaasupäästöjä noin 0,83 kg CO₂-ekv kg⁻¹ (laskelmassa 5 paino-% sideainetta). Stabiloinnin kaasun lämmityspotentiaalisen suhteen intensiivinen sementti voidaan usein vaihtaa teollisuuden sivutuotteisiin; lentotuhkaan, masuunikuonaan tms. Tehdyssä laskelmassa käytettiin arviota, jonka mukaan stabiloitu massa tuottaa 50 % stabiloimattoman massan hajoamisen kasvihuonekaasupäästöistä. Arvioinnissa ei huomioitu mahdollista kaasunkeräystä, sillä sen ei arvioida yleensä olevan kustannustehokasta.

Maalle tai mereen läjitetyistä sedimentoista aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä löydettiin vain vähän vertailukelpoisia tutkimuksia. Hajoamisnopeuksina hapetuspelkistysrajan ylä- ja alapuolella käytettiin edellä viitatus kirjallisuuden arvoja. Sedimentin suspendoitumista meriläjitysvaiheessa ei huomioitu. Se voi kuitenkin kiihdyttää massojen hajoamisnopeutta, ja siten vaikuttaa tuloksiin. Tätä kompensoitiin valitsemalla meriläjitettyjen massojen CO₂-ekv-päästölle varsin suuri arvo (2 kg m⁻² vuodessa 7 m:n läjitys-

kerrospaksuudella). Käytännössä meriläjititys tapahtuu yleensä suhteellisen syvään veteen (vähintään 15–20 m) ja enimmäkseen koheesion sitomina ruoppausmassakuormina, mikä vähentää sekoittumista ja suosii olosuhteiden pysymistä vähähappisina.

Tutkimuksen laskennalliset tulokset on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Taulukossa 1 on esitetty SiteWise-ohjelmalla lasketut CO₂-ekv-päästöt eri kuljetusmuodoille eri kuljetusetäisyyksillä. Taulukossa 2 on laskettu vertailupäästöt eri sijoitusskenaarioille.

Taulukko 1. Ruoppausmassojen kasvihuonekaasupäästöjen riippuvuus kuljetusmatkasta ja kuljetustavasta. Päästöt on laskettu 1000 m³ ruoppausmassamäärää kohti.

Table 1. Dependence of greenhouse gas emissions generated from dredged materials of transportation distance and the method (*kuorma-auto* = truck, *rautatie* = railway, and *vesikuljetus, ei sähköinen* = water transport, non-electric). The emissions are calculated for 1000 m³ dredged material.

Kuljetustapa	5 km	10 km	20 km	50 km	100 km	200 km
Kuorma-auto, 24 m³, diesel; t CO₂-ekv	0,33	0,65	1,30	3,25	6,50	12,99
Rautatie, diesel; t CO₂-ekv			0,66	1,65	3,31	6,61
Vesikuljetus, ei-sähköinen; t CO₂-ekv	0,20	0,40	0,80	2,01		

Taulukko 2. Kasvihuonekaasujen päästölaskelmat tarkastelluille kolmelle sijoitusskenaariolle. Päästöt on laskettu 1 000 000 m³ ruoppausmassamäärää kohti. Taulukossa yksikkö t Mm⁻³ a⁻¹ tarkoittaa tonnia miljoonaa kuutiometriä kohti vuodessa.

Table 2. Greenhouse gas emission calculations for the three placement scenarios (a) on-land placement, no stabilization b) on-land placement, stabilization, and c) marine placement) were considered. The CO₂ emissions (CO₂-päästöt) are calculated for 1 000 000 m³ dredged material. In the table: *huomioitu kasvihuonekaasulähde* = greenhouse gas source considered, *maakuljetus* = land-based transportation, *sedimentin hajoaminen* = sediment decomposition, *sementin vaikutus* = cement impact, and *käytetty ominaispäästö* = specific emission used.

Skenaario	Huomioitu kasvihuonekaasulähde	Käytetty ominaispäästö	CO ₂ päästöt (t Mm ⁻³ a ⁻¹)
a) maalleläjitys, ei stabilointia	Maakuljetus	1,3 kg CO ₂ -ekv m ⁻³ (20 km)	650
	Sedimentin hajoaminen	6 kg CO ₂ -ekv m ⁻³	6 000
	Yhteensä		6 650
b) maalleläjitys, stabilointi	Maakuljetus	1,3 kg CO ₂ -ekv m ⁻³ (20 km)	650
	Sedimentin hajoaminen	3 kg CO ₂ -ekv m ⁻³	3 000
	Sementin vaikutus	50 kg CO ₂ -ekv m ⁻³	24 900
	Yhteensä		28 550
c) meriläjitys	Vesikuljetus	0,8 kg CO ₂ -ekv m ⁻³ (20 km)	400
	Sedimentin hajoaminen	2 kg m ⁻² a ⁻¹	290
	Yhteensä		690

Johtopäätökset

Tarkasteltujen skenaarioiden arvioidaan karkeasti vastaavan Suomessa vuodessa ruopattavaa massamäärää. Taulukon 2 perusteella skenaario a) (maalläljitys, ei stabilointia) tuottaa miljoonaa kuutiometriä kohden noin 6000 tonnia suuremmat CO₂-ekv:n kasvihuonekaasujen vuosipäästöt ja skenaario b) (maalläljitys, stabilointi) lähes 28 000 tonnia suuremmat CO₂-ekv:n vuosipäästöt kuin skenaario c) (meriläjitys).

Henkilöautojen vuosipäästöt olivat Suomessa autoa kohti noin 2,1 tonnia CO₂-ekv vuonna 2019 (Tilastokeskus 2020; Traficom 2023). Vuonna 2018 yhtä suomalaista kohden lasketut päästöt olivat Hinku-laskennan mukaan noin 6,9 tonnia CO₂-ekv (Lounasheimo ym. 2020). Näin ollen miljoonan sedimenttikuutiometrin maalläljityksestä aiheutuisi noin 2 800 henkilöauton ja noin 860 suomalaisen (Pelkosenniemen kokoisen kunnan väestön) päästöjä vastaavat ylimääräiset CO₂-ekv vuosipäästöt verrattuna meriläjitykseen. Usein maalläljitys ei käytännössä onnistu ilman stabilointia. Stabiloituna 5 paino-%:n sementtisideainelisyksellä ruoppausmassan aiheuttamat ylimääräiset CO₂-ekv vuosipäästöt vastaisivat noin 13 300 henkilöauton ja noin 4 000 suomalaisen (Polvijärven kokoisen kunnan väestön) päästöjä.

Järvisedimenttien maalläljityksessä tilanne ei parane, sillä suurempi osa hiilipäästöistä on metaania, jonka lämmityspotentiaalikerroin on noin 25-kertainen hiilidioksidiin verrattuna. On tunnettu asia, että meriveden rikki suosii sulfaattia pelkistäviä bakteereita. Niiden runsas esiintyminen taas vähentää metaania tuottavien mikrobien metanogeneesiä (esim. Oremland & Taylor 1975). Lisäksi järvisedimentit sisältävät yleensä enemmän orgaanista ainesta. Tämän seurauksena järvisedimenttien hajoamisessa vapautuvien kasvihuonekaasujen määrä on suurempi kuin merisedimenteillä, ja suurempi osuus niistä on metaania.

Tarkastelujakso rajautui vain noin kahteen ruoppauksen jälkeiseen vuoteen. Sedimentin hajoaminen jatkuu tämän jälkeenkin. Kestänee vuosikymmeniä ennen kuin anaerobisen hajoamisen tuottamien päästöjen voidaan odottaa ylittävän maalle sijoitettujen massojen aerobisen hajoamisen päästöjen määrän. Tämä kasvattaa entisestään maalle ja mereen läjitettävien massojen kasvihuonekaasupäästöjen eroa.

Edellä esitetyt laskelmat sisältävät monia yleistyksiä ja epävarmuuksia. Ne kuitenkin osoittavat, että orgaanispitoisen maalle läjitettävän ruoppausmassan hajoamisesta johtuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat todennäköisesti merkittävä ongelma kestävän kehityksen näkökulmasta. Kirjoittajien käsityksen mukaan nämä sedimentin hajoamisnopeuden erot jätetään nykyisin sijoitustapojen kestävyysarvioinneissa joko huomioimatta, niille annetaan vain vähän painoarvoa tai ne arvioidaan virheellisesti esim. yhdyskuntajätteiden läjityksen lämmityspotentiaalin kautta. Ruoppausmassan aerobinen hajoaminen maalle läjitettäessä tuottaa todennäköisesti niin merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjä, että asia täytyy huomioida nykyistä paremmin sijoitustapojen kokonaiskestävyyttä arvioitaessa.

FT ARTO ITKONEN

(arto.itkonen@sitowise.com)

FT OUTI HYTTINEN

(outi.hyttinen@sitowise.com)

TKK IRIS KALLIO

(iris.kallio@sitowise.com)

Sitowise Oy,
Vuolteenkatu 2, 33100 Tampere

Kirjoittajat työskentelevät Sitowise Oy:ssä. Arto Itkonen ja Outi Hyttinen ovat laatineet yhdessä Suomen ympäristökeskuksen asiantuntijoiden kanssa ohjeistusta vesistö- ja sedimenttihankkeiden kestävään hallintaan. Iris Kallio on tekemässä aiheesta diplomityötä.

Summary

Effects of placement methods to greenhouse gas emissions from dredged sediments

In Finland, approximately 1 million m³ of dredged sediment is placed annually either to sea, or nowadays increasingly to land. As demonstrated in many earlier studies, the decomposition rate and thus greenhouse gas generation potential of sediment normally increases when the material is transferred from the anoxic sea bottom to oxic environment.

A greenhouse gas emission budget comparison of different placement methods was made for sediment volume roughly corresponding to the annual dredging in Finland (Tables 1 & 2). The results indicate that greenhouse gas emissions in on-land placement are significantly higher than in marine placement, and at such a level that the accelerated decomposition should be given more attention in the sustainability assessments of the placement alternatives.

Lähdeluettelo

- Aller, R. C., 1994. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter: effects of redox oscillation. *Chemical Geology* 114, 331–345. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90062-0)
- Ferrans, L., Nilsson, A., Schmieder, F., Pal, D., Rahmati-Abkenar, M., ym., 2022. Life Cycle Assessment of Management Scenarios for Dredged Sediments: Environmental Impacts Caused during Landfilling and Soil Conditioning. *Sustainability* 14, 13139. <https://doi.org/10.3390/su142013139>
- Fransner, F., Fransson, A., Humborg, C., Gustafsson, E., Tedesco, L., ym., 2019. Remineralization rate of terrestrial DOC as inferred from CO₂ supersaturated coastal waters. *Biogeosciences* 16, 863–879. <https://doi.org/10.5194/bg-16-863-2019>
- Gebert, J. & Knoblauch, C., 2017. Long-term gas generation from landfilled dredged sediment. In *Proceedings Sardinia 2017. International Waste Management and Landfill Symposium*, 2.–6.10.2017, Cagliari, Italia. Abstrakti, 7 s.
- HELCOM, 2023. Depositing of dredged material in the Baltic Sea. Raportti. 33 s.
- Hulthe, G., Hulth, S. & Hall, P. O. J., 1998. Effect of oxygen on degradation rate of refractory and labile organic matter in continental margin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 1318–1328. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00044-1)
- Humborg, C., Geibel, M. C., Sun, X., McCrackin, M., Mörth, C.-M., ym., 2019. High emissions of carbon dioxide and methane from the coastal Baltic Sea at the end of a summer heat wave. *Frontiers in Marine Science* 6, 493. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00493>
- Kox, M., Klimkowska, A., Kauffman, J. B., Tonnejck, F. & Jansen, S., 2021. Ripening of dredged sediment: Study of greenhouse gas emissions. *Terra et Aqua* 164, 20–29.
- Lounasheimo, J., Karhinen, S., Grönroos, J., Savolainen, H., Forsberg, T., ym., 2020. Suomen kuntien kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. ALAsmallin menetelmäkuvaus ja laskentojen tuloksia 2005–2018. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 25/2020, 107 s.
- Moore, S. & Sirabian, R., 2018. SiteWise™ Version 3.2 User Guide. NAVFAC Engineering and Expeditionary Warfare Center, 95 s.
- Oremland, R. S. & Taylor, B. F., 1975. Inhibition of methanogenesis in marine sediments by acetylene and ethylene: validity of the acetylene reduction assay for anaerobic microcosms. *Applied Microbiology* 30, 707–709. <https://doi.org/10.1128/am.30.4.707-709.1975>
- Salomons, W. & Brils, J. (toim.), 2004. Contaminated Sediments in European River Basins. European Sediment Research Network, 79 s.
- Sitowise Oy, 2018. Turun seudun sedimenttien maaläjitysalue selvityksen loppuraportti. Sitowise Oy, versio A1 31.5.2018, 42 s.
- Sustainable Remediation Forum, 2023. Guidance, tools and other resources. <https://www.sustainableremediation.org/guidance-tools-and-other-resources> [31.7.2023]
- Tilastokeskus, 2020. Tietilasto 2019. https://stat.fi/til/tiet/2019/tiet_2019_2020-04-15_tie_001_fi.html [8.7.2023]
- Traficom, 2023. Henkilöautojen hiilidioksidipäästöt. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/henkilöautojen-hiilidioksidipaastot> [28.7.2023].