

RIKI – rihmaleväbiomassan poistaminen ja kierrätys Saaristomerellä

Loppuraportti 8.12.2025

Harri Helminen (toim.)
Varsinais-Suomen ELY-keskus
16.10.2024-30.11.2025

Rahoittaja Ympäristöministeriö (65 %)



Kuva © Pekka Salminen

Tiivistelmä

Itämeren ja Saaristomeren rehevöityminen johtuu siitä, että mereen on vuosikymmenien ajan päässyt liikaa ravinteita, erityisesti fosforia ja typpeä. Liian suuren ravinnekuormituksen seurauksena meriekosysteemin perustuotanto on kasvanut, mikä ilmenee mm. planktonlevien ja makroskooppisten levien, erityisesti yksivuotisten rihmamaisten levien, sekä vesikasvien määrän lisääntymisenä. RIKI-hankkeen tavoitteena oli selvittää rihmalevien biomassan ja sen sisältämän fosforivaraston määrät Saaristomerellä. Arviot kiinnitettiin osaksi Saaristomeren päivitettyä fosforitasetta, jolloin saatiin suhteutettua ajalehtivien rihmalevien poiston merkitystä sisäisen kuormituksen vähentäjänä eri osissa Saaristomerta. Rihmalevien biomassa oli suurimmillaan huhtikuussa rantavyöhykkeessä (0-1 m) keskimäärin 118,2 g DW m⁻². Toukokuussa biomassat olivat tästä jo lähes puolittuneet: 63,7 DW m⁻². Kesä-heinäkuussa biomassat olivat suunnilleen samansuuruisia kuin toukokuussa. Koko Saaristomerellä rihmaleväbiomassaa arvioitiin olevan enimmillään huhtikuussa 119 819 DW t ja sen fosforivarasto oli 312 t. Touko-heinäkuussa biomassat olivat noin puolet pienempiä kuin huhtikuussa. Vähenemä johtui rihmalevien irtoamisesta alustoistaan, ja silloin muodostui pääosa ajalehtivista kuolleista rihmalevämatoista. Niiden määrän arvioitiin olevan noin 55 000 t DW ja fosforivaraston 146 t. Saaristomeren sisäisen fosforikuormituksen suuruudeksi ajanjaksolla 15.5.–15.10. arvioitiin 1094 tn. Siitä 25 % eli 269 t päätyisi pintakerrokseen (0–10 m) planktonlevien, rihmalevien ja muiden makrofytytien käyttöön. Rihmalevistä potentiaalisesti vapautuvan fosforin määrä kesäaikana olisi noin 13 % koko sisäisen fosforikuormituksen määrästä, mutta sen suhteellinen merkitys voi olla vielä selvästi suurempi, jos pääosa biomassasta jää matalille alueille. Rihmalevät kuluttavat hajotessaan happea ja mikäli pohja muuttuu kokonaan hapettomaksi, niin osaltaan ne edistävät myös pohjasedimentin muun fosforivaraston vapautumista. Irtoavien rihmalevien kerääminen merestä vähentäisi suoraan kesäaikaista käyttökelpoisen fosforin kuormitusta, joka on erityisen haitallista rehevöitymisen kannalta. Rihmaleväbiomassan talteenotto on yksi harvoista keinoista vaikuttaa suoraan sisäisen fosforikuormituksen määrään. Perinteisesti on ajateltu, että siihen voitaisiin vaikuttaa vain ulkoista kuormitusta vähentämällä. Sisäisen kuormituksen väheneminen tapahtuu kuitenkin tuntemattomalla viiveellä, ja vasteen saaminen esimerkiksi valuma-alueella tehtävillä toimenpiteillä on epävarmaa. Saaristomerellä ajalehtivien rihmalevämattojen laajamittaisesta keräämisestä ei ole kokemusta. Logistiikka ja sen kustannukset voivat olla ratkaisevia, kun arvioidaan toiminnan kannattavuutta.

Sisällys

1.	Hankkeen tausta	4
1.1.	Tarve ja relevanssi	4
1.2.	Tausta	4
1.3.	Tavoitteet	5
2.	Hankkeen toteutus	5
2.1.	Taustatyö	5
2.2.	Biomassan ja ravinteiden määrä	8
2.2.1.	Rihmaleväbiomassatuotanto Saaristomerellä - vaihtelut ajallisesti, paikallisesti sekä syvyyssvyöhykkeittä	8
2.2.2.	Vuoden 2025 tutkimukset	9
2.2.3.	Rihmalevien sisältämät ravinteet	11
2.2.4.	Muita lähtötietoja	12
2.3.	Biomassan kerääminen, hyötykäyttö ja kierrätys	12
2.4.	Kansalaisten aktivointi rihmalevämassojen keräämiseen	13
3.	Hankkeen tulokset	13
3.1.	Saaristomeren fosforitase ja sen muut osatekijät	13
3.2.	Saaristomeren fosforitase ja rihmalevät	20
3.2.1.	Rihmalevien yleinen ravinnedynamiikka	20
3.2.2.	Vuoden 2025 tutkimukset	21
3.2.3.	Uusien tulosten perusteella lasketut biomassa-arviot Saaristomerelle	26
3.2.4.	Ajelehtivät rihmalevät ja niiden fosforivarasto	28
3.3.	Rihmalevien kerääminen merestä ja sen kustannusarviot	30
3.4.	Fosforin poiston vaikuttavuus- ja kustannusvertailu	33
3.4.1.	Ruovikon poisto ja peltojen kipsikäsittely	33
3.4.2.	Toimenpiteiden vaikutusarviointi	35
3.4.3.	Toimenpidesuosituksia	39
3.5.	Kansalaisten aktivointi rihmalevämassojen keräämiseen	40
3.6.	Rihmalevämassojen mahdollinen hyötykäyttö ja kierrätys	41
3.6.1.	Biokaasu	41
3.6.2.	Muu hyötykäyttö	42
3.6.3.	Kierrätyksen toimintamalli	43
4.	Hankkeen ympäristövaikutukset	45
5.	Talousraportti	47
6.	Yhteenveto	47

1. Hankkeen tausta

1.1. Tarve ja relevanssi

Hanke perustuu Suomen merenhoitosuunnitelman toimenpideohjelmassa vuosille 2022–2027 esitettyyn uuteen toimenpiteeseen (TPO2022-REHEV12, *Kuolleen rihmalevä- ja vesikasvibiomassan poistaminen merestä*), jolla pyritään vähentämään Itämeren rehevöitymistä.

Hankkeen tyyppi on TKI ja se kohdentui haussa teemaan

2) Vesien ja meren biomassojen ravinteiden tai ravinteiden ja orgaanisen aineen kierrätys, talteenotto tai hyödyntäminen. Vesien ja meren biomassoilla tarkoitetaan vesistöistä, rannoilta tai ranta-alueilta poistettuja biomassoja. Etusijalla ovat Saaristomerellä ja sen valuma-alueella toteutettavat hankkeet.

1.2. Tausta

Itämeren ja Saaristomerren rehevöityminen johtuu siitä, että mereen on vuosikymmenien ajan päässyt liikaa ravinteita, erityisesti fosforia ja typpeä. Liian suuren ravinnekuormituksen seurauksena meriekosysteemin perustuotanto on kasvanut, mikä ilmenee mm. planktonlevien ja makroskooppisten levien, erityisesti yksivuotisten rihmamaisten levien, sekä vesikasvien määrän lisääntymisenä. Rehevöitymisen on arveltu lisänneen nopeasti kasvavien rihmalevien määrää. Rihmalevä vie elintilaa esimerkiksi rakkohaurulta, jonka muodostamat vyöhykkeet ovat tärkeitä elinympäristöjä monille eläimille ja kaloille, ja kuolleet rihmalevät haittaavat vesiekosysteemiä ja vesien virkistyskäyttöä monin tavoin.

Rihmalevillä on kuitenkin myös tärkeä osa rantavyöhykkeen ekosysteemissä. Rihmalevät sitovat osan vapaan veden ravinteista ja voivat rajoittaa kasviplanktonin liiallista kasvua. Vesikasvustot ovat tärkeitä kalojen lisääntymisalueita ja vesilintujen ruokailualueita. Ne tarjoavat myös suojapaikkoja lukuisille vesiselkärangattomille. Kun rihmalevät kuolevat, ne irtoavat kasvualustastaan, ja kerääntyvät aallokon ja virtausten vaikutuksesta usein yhteen suuremmiksi keräymiksi. Kuollutta rihmalevää esiintyy sekä pintavedessä että kertyy pohjalle ja pohjanläheiseen veteen.

Pohjaan painuvat kuolleet rihmalevät pahentavat Itämeren ja Saaristomerren happikatoa ja haittaavat pohjan elämää. Ne muodostavat merenpohjaan laajoja mattoja, joiden alle peittyvät alueet muuttuvat hapettomiksi. Tämä johtaa pahimmillaan kokonaisten pohjaeläinyhteisöjen tuhoutumiseen ja kalojen kutualueiden ja pohjakalojen elinolosuhteiden heikkenemiseen. Pintavedessä kelluvat kuolleet levämassat ajautuvat usein rantaveteen suojaisiin paikkoihin kuten pieniin merenlahtiin. Kuolleen levä- ja kasvibiomassan kerääntyminen rannoille on luontaista, mutta rehevöityminen on lisännyt sen määrää niin paljon, että sillä on negatiivisia vaikutuksia koko rantavyöhykkeen ekosysteemiin ja sen biodiversiteettiin. Ajan mittaan rantaan ja rantaveteen kertyvä kuollut eloperäinen aines voi muuttaa elinympäristön kokonaan toisenlaiseksi. Esimerkiksi monet

hiekkapohjaiset lahdet ja hiekkarannat ovat kasvaneet umpeen minkä seurauksena koko biotooppi on muuttunut. Myös monille kasvi- ja hyönteislajeille elintärkeät rantaniityt ovat monin paikoin rehevöityneet korkeakasvuiseksi ruovikoiksi. Rannoille ja rantaveteen kasautuneista levämassoista tulee kansalaisilta kesäisin säännöllisesti runsaasti yhteydenottoja, joissa pyydetään neuvoja, miten levämassan kanssa tulisi menetellä.

Nykyään kuollutta rihmaleväbiomassaa kerätään lähinnä mökkiläisten ja muiden yksityisten ihmisten toimesta omilta rannoilta. Vaikka erilaisia merileviä on hyödynnetty jo pitkään mm. maanparannusaineena ja eri teollisuuden aloilla, on niiden keruusta Itämerellä vain vähän kokemuksia. Keräysmenetelmien kehittämiseen ja myös viestintään rihmaleväongelmasta ja levän käyttömahdollisuuksista sekä ihmisten motivointiin levän keräämiseen tulisikin panostaa. Suomessa toisen vesialueella tapahtuvasta keräämisestä tulee ilmoittaa vesialueen omistajalle ja koneellisesta keräyksestä ELY-keskukselle. Laajamittaiseen levämassan poistoon saatetaan tarvita aluehallintoviraston lupa.

1.3. Tavoitteet

Hankkeen tavoitteena oli hankesuunnitelman mukaan selvittää rihmaleväbiomassoista syntyvien ongelmien laajuus Saaristomerellä, arvioida biomassan ja sen sisältämien ravinteiden (fosfori, typpi) ja hiilen uusiokäyttöpotentiaalia, kehittää leväbiomassan talteenottoa sekä selvittää ja kehittää leväbiomassan kierrätystä ja käyttökohteita. Rihmaleväbiomassan poistolla arvioidaan olevan Saaristomeren ekologista tilaa parantava vaikutus, mutta arviota sen vaikutuksista ei ole tiedonpuutteen takia voitu tehdä. Hankkeen loppuraportissa biomassan poiston vaikutukset suhteutetaan Saaristomeren muihin ravinnetaseisiin ja määritellään sen vaikutuskerroin.

Hankkeen edetessä sen tavoitteen asettelu jonkin verran tarkentui. Päähuomio kiinnitettiin rihmalevien biomassan ja sen sisältämän fosforivaraston määrän arviointiin. Arviot kiinnitettiin osaksi Saaristomeren päivitettyä fosforitasetta, jolloin saatiin suhteutettua ajalehtivien rihmalevien poiston merkitystä sisäisen kuormituksen vähentäjänä eri osissa Saaristomerta.

2. Hankkeen toteutus

2.1. Taustatyö

Hanketta aloitettaessa ei ollut käytössä Saaristomeren ekosysteemin, vesifaasin ja pohjasedimentin kattavia [ravinnetaselaskelmia](#). Näin ollen sellaisia piti ensin alkaa tekemään. Oli perusteltua keskittyä aluksi fosforitaseeseen [1,2]. Pitkällä aikavälillä kasviplanktonin tuotantoa rajoittavana pääasiallisena ravinteena Itämerellä ja Saaristomerellä voidaan pitää fosforia. Ilmakehän typpi tarjoaa ehtymättömän lähteen tyypeä sitoville kasviplanktonlajeille [2,3]. Typpifiksaatio lisää meriekosysteemissä typen määrää, mikä puolestaan johtaa fosforin rajoittavaan vaikutukseen myös rihmalevien tuotannossa. Matalassa Itämeressä ja

Saaristomerellä sedimentit näyttävät keskeistä roolia orgaanisen fosforin muuntamisessa epäorgaaniseen muotoon ja pitkällä aikavälillä fosforin poistamisessa vesipatsaan biokemiallisesta kiertokulusta [4]. Merellisessä fosforikierrossa tärkeimmät fosforivarannot ovat liukoinen epäorgaaninen fosfori (DIP), partikkelimainen epäorgaaninen fosfori (PIP), orgaaninen fosfori (POP) ja liukoinen orgaaninen fosfori (DOP) [5]. Kokonaisfosforia (TP) voidaan käyttää saatavilla olevien ravinteiden mittarina [6].

Aiempien tutkimusten perusteella tiedetään, että Saaristomerelle kulkeutuu ympäröiviltä merialueilta lähinnä Itämeren pääaltaalta tulevien virtausten mukana huomattavia määriä ravinteita [7, 8]. Fosforin nettovirtauksen määrät Itämereltä ja Pohjanlahdelta Saaristomereen arvioitiin v. 2024 kolmiulotteisen NEMO-hydrodynaamisen mallin avulla ajanjaksolle 2000–2021 [1]. Tämän hankkeen yhteydessä edellä mainitulla mallinnuksella päivitettiin fosforitaseen tiedot biologiselle tuotantokaudelle jaksolle 1993–2025.

Aiempiin Saaristomerta koskeviin tutkimuksiin perustuen on ollut tiedossa, että sedimentteihin varastoituneen fosforin määrä, joka voi ajan myötä vapautua, on suuri, ja sisäisillä fosforin kierrätysprosesseilla saattaa siten olla keskeinen rooli rannikkoalueen fosforivirroissa. Ravinteiden vapautuminen sedimentistä on selitys sille, että ulkoisen ravinnekuormituksen merkittävä vähentäminen ei aina johda vastaavaan ravinnepitoisuuksien ja kasviplanktonbiomassan vähenemiseen vastaanottavissa vesissä. Saaristomeren todellisen sisäisen fosforikuormituksen suuruutta ei ole aiemmin onnistuttu luotettavasti arvioimaan, tai arviot ovat olleet ilmeisesti liian korkeita. Tässä hankkeen yhteydessä tehtiin laskelmia mitattujen vedenlaatutietojen perusteella, jotta voitiin arvioida, kuinka paljon fosforia on kulkeutunut alusvedestä pintakerrokseen levätuotannon käyttöön biologisen tuotantokauden aikana [2]. Toisin sanoen määritettiin Saaristomeren tehollisen sisäisen fosforikuormituksen suuruus.

Seuraavassa vaiheessa kokosin ja päivitin Saaristomeren fosforitase aineistoja keskittyen erityisesti kalapopulaatioihin liittyvien fosforivarastojen arviointiin. Laskelmissa hyödynsin eri kalalajeista julkaistuja biomassatietoja ja lajikohtaisia fosforipitoisuuksia sekä sovelsin bioenergeettistä mallinnusmenetelmää silakkaan (*Clupea harengus membras*) ja ahvneen (*Perca fluviatilis*) lajikohtaisen ravinnonkulutuksen ja ravinneerityksen arvioimiseksi [9].

Taustatyöhön kuului vielä yksi osio, jossa selvitin millaisia vaikutuksia ja vasteita jätevesien ravinnekuormituksen merkittävä väheneminen on aiheuttanut Turun edustan merialueella [10].

Edellä mainitut toimenpiteet toteutettiin ajalla 16.10.2024–15.10.2025. Olen itse vastannut niiden toteutuksesta ja raportoinnista. Saaristomeren fosforitaseen päivittäminen taustakuormituksen osalta edellytti mallinnusta, joka hankittiin ostopalveluna (Arto Inkala). Tätä osioita ei ollut alkuperäisessä suunnitelmassa, mutta sen tekemisestä sovittiin hankevalvojan kanssa.

Tämän hankkeen yhteydessä tehdyissä mallinnuksissa keskityttiin Saaristomeren ekologisen tilan säätelyn kannalta olennaisimpaan jaksoon eli biologiseen tuotantokauteen, joka tässä kattoi aikavälin 15.5.–15.10. ja vuodet 1993–2025. Saaristomeren pintavirtausten (0–20 m) läpivirtaamat laskettiin keskiosan transektin kautta [1]. Lähtötiedot hankittiin Copernicus Baltic Sea Physics Reanalysis aineistosta vuosille 1993–2023 [11] ja Baltic Sea Physics Analysis Forecast aineistosta vuosille 2024–2025 [12]. Näistä läpivirtaamatiedoista saatiin edelleen arvioitua Saaristomeren eteläreunan veden vaihtuvuus ja laskettua eteläosan pintakerroksen kesäaikaiset vesitaseet. Kun niihin yhdistettiin mallinnusartikkelissa [1] esitetyt eri rajapintojen fosforin pitoisuustiedot, saatiin aikaan eteläosan fosforitaseet vuosille 1993–2025.

Mallinnuksen yhteydessä analysoitiin Saaristomeren tuulikenttien ja pintavirtausten välisiä yhteyksiä, jotta voitiin päätellä, mistä aiemmin havaitut muutokset johtuvat [1] Tuulitiedot olivat ERA5 tietokannasta, jota ylläpitää Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskus EMCWF [13]. Tietokannasta poimittiin Saaristomeren kattavalta alueelta (lat 59.75–60.75 lon 20–22.5) 0.25 asteen tarkkuudella tuulen u- ja v-komponentit vuosille 1940–2025 tunnin tarkkuudella. Tuulidatasta käytiin läpi kaikki 1–4 komponentin kombinaatiot ja sovitettiin lineaarinen regressiomalli läpivirtaamaan. Regressiomallin selitysaste ei merkittävästi parantunut kahden muuttujan jälkeen, joten käytettiin niistä parhaita u-komponentille pistettä 5975N2200E ja v-komponentille pistettä 6075N2200E.

Hankesuunnitelman mukaan *Hankkeen tuottamista tuloksista ja sovelluksista tiedotetaan laajasti eri foorumeilla. Keskeisimmät tulokset julkaistaan kansainvälisessä tieteellisessä vertaisarvioidussa julkaisusarjassa ja suomenkielisessä vesialan ammattilaisille tarkoitettussa erikoislehdessä*. Osion 2.1 keskeisimmät tulokset on julkaistu artikkeleissa [1, 2, 9, 10]. Tuloksia on esitelty eri yhteyksissä sidosryhmille mm. Saaristomeren valuma-alueen toimijoiden tapaamisessa, Forum Marinum Turku 22.1.2025 ja Seilin Tiede- ja Kulttuuripäivillä 22.8.2025. Esityksistä on käyty vilkasta keskustelua. Saaristomeren fosforitaseen eri tekijöiden merkityksen arviointi tuntuu olevan uusi lähestymistapa, joka haastaa aiemmat käsitykset esimerkiksi eliöihin ja kasveihin sitoutuneiden ravinteiden osuudesta rehevöitymiskehityksessä.

Viitteet

- 1 Helminen, H.; Inkala, A. Modelled Water and Phosphorus Transports in the Archipelago Sea and through the Åland Sea and Northern Baltic Sea and Their Links to Water Quality. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 1252.
- 2 Helminen, H. The Role of Internal Phosphorus Loading in the Archipelago Sea Ecological Status. *Water* 2025, 17, 248.
- 3 Rolff, C.; Elfving, T. Increasing nitrogen limitation in the Bothnian Sea, potentially caused by inflow of phosphate-rich water from the Baltic Proper. *Ambio* 2015, 44, 601–611.
- 4 Eilola, K.; Meier, H.E.M.; Almroth, E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study. *J. Mar. Syst.* 2009, 75, 163–184.
- 5 Nausch, M.; Achterberg, E.P.; Bach, L.T.; Brussaard, C.P.D.; Crawford, K.J.; Fabian, J.; Riebesell, U.; Stühr, A.; Unger, J.; Wannicke, N. Concentrations and Uptake of Dissolved Organic Phosphorus Compounds in the Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.* 2018, 5, 386.
- 6 Andersson, A.; Högländer, H.; Karlsson, C.; Huseby, S. Key role of phosphorus and nitrogen in regulating cyanobacterial community composition in the northern Baltic Sea. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2015, 164, 161–171.
- 7 Helminen, H.; Juntura, E.; Koponen, J.; Laihonon, P.; Ylinen, H. Assessing of long-distance background nutrient loading to the Archipelago Sea, northern Baltic with a hydrodynamic model. *Environ. Model. Softw.* 1998, 13, 511–518.
- 8 Lignell, R.; Miettunen, E.; Kuosa, H.; Ropponen, J.; Tuomi, L.; Puttonen, I.; Lukkari, K.; Korppoo, M.; Huttunen, M.; Kaurila, K.; et al. Modeling how eutrophication in northern Baltic coastal zone is driven by new nutrient inputs, internal loading, and 3D hydrodynamics. *J. Mar. Syst.* 2025, 249, 104049.
- 9 Helminen, H. Phosphorus Pools Associated with Fish in the Archipelago Sea. *Fishes* 2025, 10, 328. <https://doi.org/10.3390/fishes10070328>
- 10 Helminen, H. The Effects of Reduced Wastewater Load in the Marine Area off Turku in the Archipelago Sea During the Period 1965–2025. *Water* 2025, 17, 1251.
- 11 <https://doi.org/10.48670/moi-00013>
- 12 <https://doi.org/10.48670/moi-00010>
- 13 Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

2.2. Biomassan ja ravinteiden määrä

2.2.1. Rihmaleväbiomassatuotanto Saaristomerellä - vaihtelut ajallisesti, paikallisesti sekä syvyysvyöhykkeittä

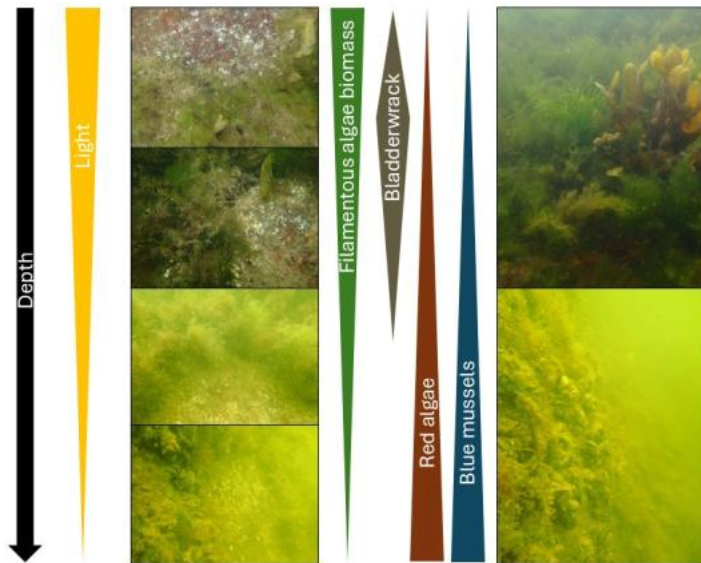
Rihmalevät koostuvat useista eri vihreistä, ruskeista ja punaisista makrolevälajeista. Osa lajeista suosii kylmää vettä, kun taas toiset viihtyvät paremmin kesäaikana ja lämpimämmässä vedessä, mikä johtaa vuodenaikaiseen lajistolliseen vaihteluun leväyhteisössä. Valon määrä ja ravinteiden saatavuus ovat tärkeitä rihmalevien massakasvustojen kehittymiselle, ja siksi intensiivisin kasvukausi sekä suurin biomassan tuotanto ajoittuvat usein kevääseen ja kesään [14].

Saaristomerellä rihmalevälajisto on monimuotoinen. Yleisimmät vihreät rihmalevät ovat viherahdinparta (*Cladophora glomerata*) ja meriahdinparta (*Cladophora rupestris*), jotka muodostavat laajoja mattomaisia kasvustoja kivikkoisilla ja ravinteikkailla rannoilla. Viherahdinparta on kesäaikaan rihmalevävyöhykkeen ehdoton valtalaji. Nämä lajit hyötyvät rehevöitymisen seurauksena lisääntyneistä typpi- ja fosforipitoisuuksista, ja voivat paikoin muodostaa laajoja ajalehtivia kasvustokerroksia kesäaikaan.

Ruskeista rihmalevistä tavataan runsaasti lettiruskohahtua (*Pilayella littoralis*) ja litupilvilevää (*Ectocarpus siliculosus*), jotka esiintyvät usein samoilla alueilla viherahdinparran kanssa ja kilpailevat samoista ravinteista ja kasvualustoista. Punaisista rihmalevistä yleisiä ovat punahelmilevä (*Ceramium tenuicorne*), mustaluulevä (*Polysiphonia fucoides*), jotka viihtyvät erityisesti ulkosaariston kivikkopohjilla ja *Fucus*-vesikasvustojen seassa.

Lisäksi alueella esiintyy pitkäikäisempiä makrolevälajeja, kuten rakkohauru (*Fucus vesiculosus*) ja Itämerenhauru (*Fucus radicans*), jotka muodostavat pysyviä levävyöhykkeitä ja tarjoavat elinympäristön monille selkärangattomille ja kalojen poikasille. Näiden lajien lisäksi haarukkalevää (*Furcellaria lumbricalis*) ja jousilevää (*Chorda filum*) tavataan paikoin ulommilla saaristoalueilla.

Ravinteiden saatavuus, veden lämpötila ja valon määrä ohjaavat näiden levien kasvukautta ja lajien välistä vuorottelua. Keväällä vihreät ja ruskeat rihmalevät valtaavat nopeasti pinnanlaiset kivikot ja muut kiinteät alustat, kun taas punalevien osuus kasvaa loppukesää kohti valon vähentyessä ja veden viiletessä. Tämä kausittainen vaihtelu kuvastaa Saaristomeren dynaamista ja rehevöitymisherkkää ekosysteemiä, jossa rihmalevien runsastuminen toimii tärkeänä indikaattorina ravinnekuormituksen muutoksille (kuva 1).

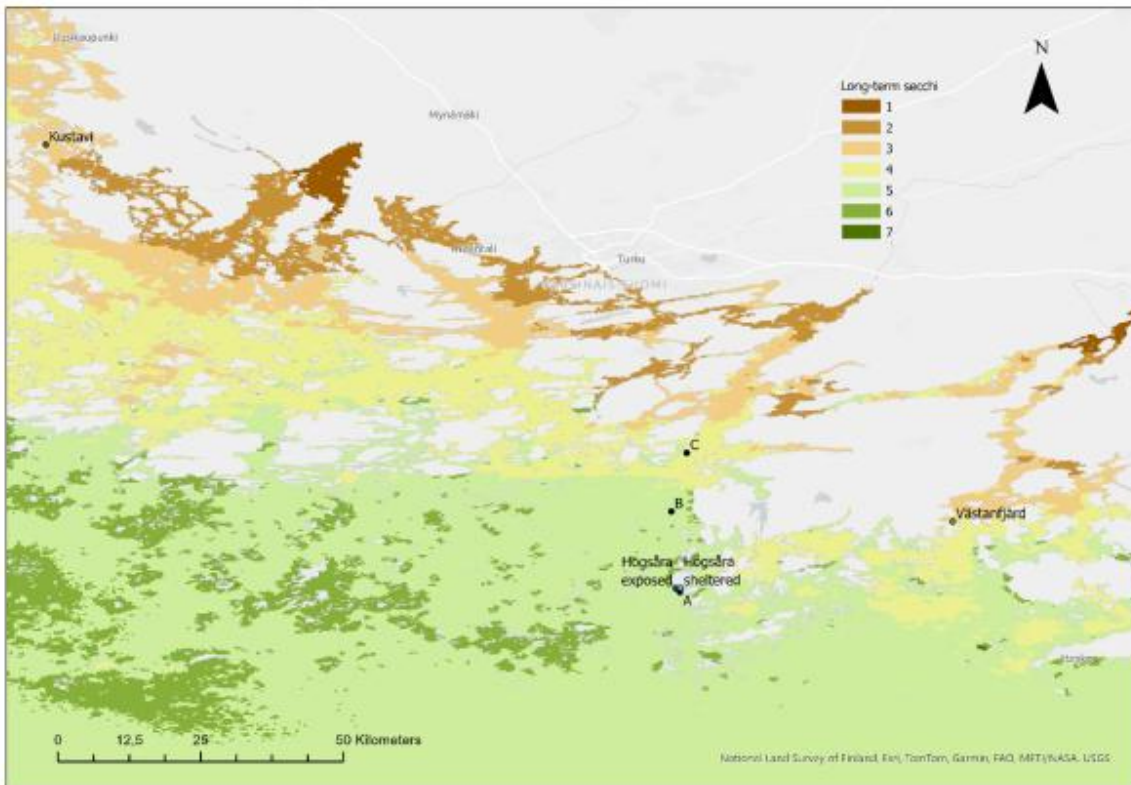


Kuva 1. Kuvat syvyysgradientin mukaisesti havainnollistavat ympäristötekijöiden, kuten valon määrän, muutosta sekä siihen liittyvää levä- ja eliöyhteisön vaihtelua Saaristomerellä.

2.2.2. Vuoden 2025 tutkimukset

Tämän osion toteutuksesta vastasi Åbo Akademi, yhteyshenkilönä dosentti Sonja Salovius-Laurén. Osiota laajennettiin hankkeen edettyä alkuperäisestä suunnitelmasta (ostopalvelu 30 000 €) siten, että sen suuruudeksi sovittiin hankevalvojan kanssa 50 000 €. Hankkeen edetessä oli alustavien tuloksien ja kirjallisuushakujen perusteella tullut selväksi, että Saaristomeren rihmalevien biomassan arviointiin tarvittavia lähtötietoja on ollut valmiina vain vähän. Rihmalevien esiintymisessä on lisäksi havaittu esiintyvän huomattavan paljon alueellista ja ajallista vaihtelua.

Tarkoituksena oli tutkia rihmalevätuotannon vaihtelua koko kasvukauden ajan, ja vaihtelut eri syvyyksissä Saaristomeren rehevöitymisgradientilla (kuva 2).



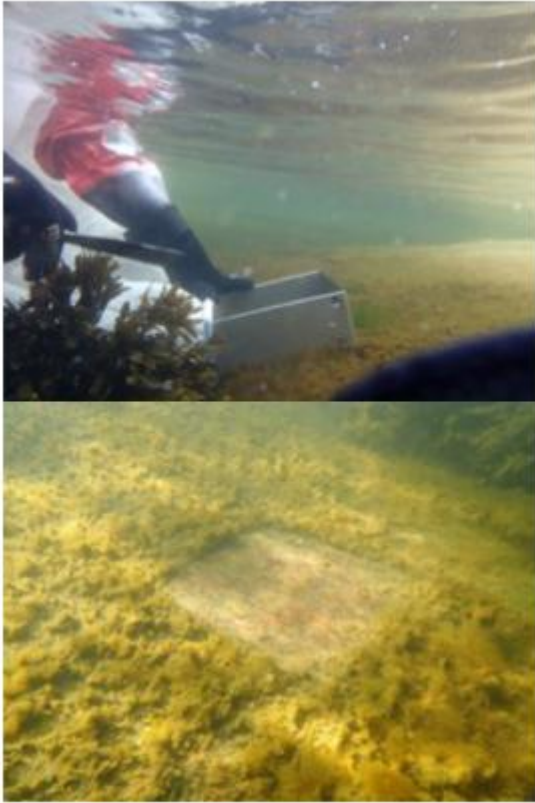
Kuva 2. Tutkimusalue Saaristomerellä. Kausinäytteenotto (Kustavi, Högåra avoin, Högåra suojaisa, Västana fjärd) sekä syvyysgradientit tutkimuspaikoista (A–C). Väritykset kuvaavat alueen pitkäaikaista keskimääräistä näkösyvyyttä. Liite ÅA.

Työssä tehtiin kolme tarkastelua:

- 1 Miten rihmalevien biomassatuotanto vaihtelee kasvukauden aikana ja mitkä rihmalevälajit dominoivat eri vuodenaikoina?
 - kuukausittainen näytteenotto kattaa koko kasvukauden (helmi-marraskuu), kesällä pääasiallisen kasvukauden aikana (kesä-syyskuu) joka toinen viikko.
 - näytteitä kerättiin neljästä paikasta: Västana fjärd, Högåra avoin, Högåra suojainen, ja Kustavi. Näytteet otettiin satunnaisesti 10–60 cm:n syvyydeltä siten, että kasvillisuus suunnilleen samalta syvyydeltä (ottaen huomioon vedenpinnan vaihtelun) tulee näytteeksi.
- 2 Miten rihmalevien biomassatuotanto vaihtelee Saaristomerren rehevöitymisgradientilla? Koealueena toimi ns. Paimionlahtigradientti Paimionlahdelta avomerelle (Söderön, Högåran eteläpuolella) ja tarkastelussa oli osittain samoja paikkoja kuin Maamerihankkeessa [15]. Näytteet kerättiin levien kasvukauden aikaan heinä-elokuussa.
- 3 Miten rihmalevien biomassatuotanto vaihtelee eri syvyyksillä? Rihmaleväbiomassojen syvyysjakaumaa tarkasteltiin keräämällä näytteitä jokaisesta syvyysmetristä, joilla rihmaleviä esiintyy. Näytteiden maksimisyvyys riippui paikasta ja kasvillisuudesta. Syvyysjakauma määriteltiin samalta

rehevöitymisgradientilta, kuin osatyössä 2, ja myös osatyö 3 toteutettiin kasvukauden aikana heinä-elokuussa.

Kaikki näytteet otettiin kvantitatiivisesti Kautsky-noutimella (kuva 3). Laboratoriossa näytteistä määritettiin levälajit, poistettiin eläinlajit (simpukat, liejutaskuravut) ja näytteen kokonaisbiomassa (kuivapainona) mitattiin.



Kuva 3. Yläosa: Kautskyn näytteenotin, johon on kiinnitetty näytepussi. Alaosa: Kallioranta rihmalevien määrällisen näytteenoton jälkeen. Kuva © Tiina Salo.

2.2.3. Rihmalevien sisältämät ravinteet

Ravinneanalyseja tehtiin Helsingin yliopiston Tvärminnen kenttäaseman laboratoriossa keväällä 2025 sinne Åbo Akademin (Christoffer Boström) toimittamista kuivatuista rihmalevänäytteistä. Näytteistä määritettiin hiili-, typpi- ja fosforipitoisuudet (mg/g DW).

Levämaterialin hiili- ja ravinnenäytteet kerättiin kahdeksalta asemalta (2 metrin syvyydeltä). Näytteet otettiin merestä “levämattinäytteinä” eli satunnaisena summanäyte levämassasta, johon todennäköisesti sisältyivät yleisimmät lajit kuten esim. *Cladophora*, *Ectocarpus* ja *Pylaiella*. Levien C-, N- ja P-pitoisuuksien mahdollisen ajallisen ja paikallisen vaihtelun havaitsemiseksi näytepaikat valittiin sekä pohjois–etelä- että itä–länsisuuntaisen gradientin mukaisesti. Viidellä asemalla (Almas, Fårö, Omenainen, Jänisholmen ja Hummelskär) näytteitä otettiin tiheämmin, eli 3–5 kertaa kesä–lokakuun aikana v. 2024.

Hiilen ja typen analysointia varten näyte punnittiin tinakapseliin, ja analyysit tehtiin Europa Scientific ANCA 202/20-stabiili-isotooppianalyysiaattorilla käyttäen Sercon GSL -näytevalmistusjärjestelmää. Kokonaisfosforin analyysi tehtiin muokkaamalla Solorzano & Sharpin menetelmää [16] hiukkasfosforille siten, että hydrolyysissä käytettiin 1 M HCl:ää 0,2 M HCl:n sijasta. pH:n säätämisen jälkeen fosfori määritettiin fosfaattina automaattisella fotometrisellä analyysiaattorilla (Thermo Scientific Aquakem 250).

Täydentävää tietoa rihmalevien sisältämistä ravinteista hankittiin kirjallisuushaulla.

Viitteet

14 Kemp, H.; Zieritz, A.; Dugdale, S.J.; Helmsing, N.R.; Wiezer, S.; de Senerpont Domis, L.N.; Maberly, S.C.; Kelly, M.; McGowan S. Light and temperature as triggers for surface filamentous green algal blooms in shallow freshwater systems. *Limnology and Oceanography*. 2025, 9999, 1–15.

15 Salo, T.; Salovius-Laurén, S. Green algae as bioindicators for long-term nutrient pollution along a coastal eutrophication gradient. *Ecol Indic* 2020, 140, 109034.

16 Solorzano, L.; Sharp, J.H. Determination of total dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural water. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(4),754-758.

2.2.4. Muita lähtötietoja

Rihmalevien kokonaisbiomassojen arvioimiseksi tarvittiin tietoja Saaristomeren syvyysvyöhykkeitten pinta-aloista ja rantaviivan pituuksista sen eri osissa. Nämä tiedot saatiin QGIS-paikkatieto-ohjelmilla käyttäen Traficommin julkaisemia aineistoja. Laskennan toteutti paikkatietoasiantuntija Annukka Koivukari, ELY-keskus.

2.3. Biomassan kerääminen, hyötykäyttö ja kierrätys

Hankesuunnitelman mukaan tarkoitus oli selvittää olemassa olevien vesikasvien keruulaitteistojen soveltuvuus kuolleen rihmalevään keruuseen ja tehdä teknistaloudellinen analyysi biomassan keräämisen kustannuksista ja hiilijalanjäljestä. Osio on toteutettu jonkin verran alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen kokoamalla erilaisista raporteista, kirjallisuudesta ja muusta hakutiedoista kattava katsaus. Rihmaleväbiomassan hyötykäyttöön ja kierrätykseen on suunniteltu toimintamalleja tiiviissä yhteistyössä Nexamass Oy:n kanssa.

2.4. Kansalaisten aktivointi rihmalevämassojen keräämiseen

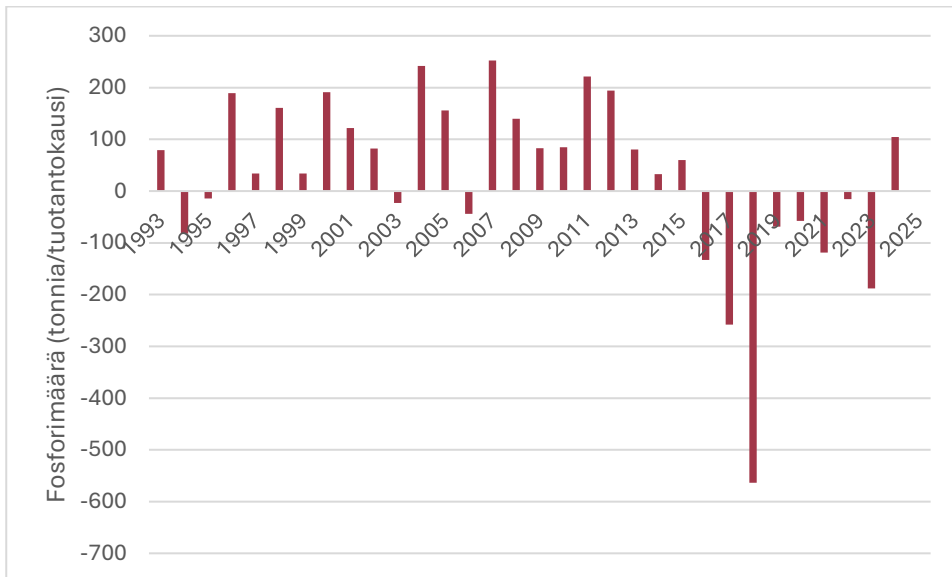
Tässä osahankkeessa oli tarkoitus kehittää ja ottaa käyttöön karttapohjainen mobiilisovellus, jolla kuka tahansa voi ilmoittaa havaitsemistaan levämassoista ja ilmoittaa paljonko levää on kerännyt. Sen käyttöön ohjausta varten laaditaan nettiopas rihmalevien tunnistamisesta, talteenotosta ja käyttömahdollisuuksista. Osio toteutettiin yhteistyössä Nexamass Oy:n kanssa. Nexamass on tehnyt omana hankkeenaan karttapohjaista mobiilisovellusta järviruokolle ja saimme neuvoteltua siihen sovellukseen mukaan rihmalevät. Demoversiot on luvattu valmistuvan tämän hankkeen loppuraportointia varten, eikä tästä osiosta koidu RIKI hankkeelle kustannuksia. Ohjeistuksen tekstit tuotti ELY-keskus (FT Janne Suomela).

3. Hankkeen tulokset

3.1. Saaristomeren fosforitase ja sen muut osatekijät

Taustakuormitus sekä joki- ja pistekuormitus. Saaristomeren fosforitaseen arviointi varten oli aiemmin laskettu veden vaihtoa ja fosforin nettovirtauksia Itämeren pääaltaalta Saaristomerelle ja Ahvenanmeren kautta Selkämerelle 3-D hydrodynaamisella mallilla, joka kattoi vuodet 2000–2021 [1]. Mallinnus tuotti uudet arviot Saaristomeren taustakuormitukselle eri ajanjaksoille 2000-luvulla. Sen kiinnostavin tulos oli havainto vuosina 2015–2021 havaittu nettovirtauksen suunnan muutos. Pintakerroksesta vettä alkoi virrata Saaristomereltä pääaltaan suuntaan etelään, kun aiemmin suunta oli ollut päinvastainen. Suunnan muutoksen seurauksena Saaristomerelle tulevan taustakuormituksen määrä väheni olennaisesti. Tämä voi olla syynä veden laadun paranemiseen Kihdin ulkosaaristoalueen keski- ja eteläosissa. Siellä a-klorofyllipitoisuuden perusteella arvioituna hyvä ekologinen tila olisi jo saavutettu.

Mallinnuksen mukaan vuosina 2000–2014 fosforin netto- eli taustakuormitus oli keskimäärin noin 465 tonnia vuodessa, josta 120 tonnia ajoittui kesäaikaan. Samoina vuosina Saaristomereen tuleva muu kokonaisfosforikuormitus (jokikuormitus ja pistekuormitus, pois lukien ilmaperäinen ja sisäinen kuormitus) oli keskimäärin 537 tonnia vuodessa [1]. Vastaavasti vuosina 2015–2021 fosforin vuotuisen ulosvirtauksen laskettiin olevan 182 tonnia, josta 162 tonnia tapahtui kesäaikana. Saaristomereen tuleva muu kokonaisfosforikuormitus näytti vuosina 2015–2021 vähentyneen noin 18 % ja oli keskimäärin 442 tonnia vuodessa. Nämä fosforikuormituksen vähenemiset eivät näy Saaristomeren sisä- tai saaristoalueilla, joissa mitatut klorofyllipitoisuudet ovat kasvaneet tasaisesti [1]. Vesipuidedirektiivin (WFD) mukaisessa vuonna 2019 toteutetussa luokituksessa Saaristomeren ekologinen tila arvioitiin kuitenkin kokonaisuudessaan tyydyttäväksi. Rannikon läheisyydessä sisäsaaristossa ja paikoin välisaaristossa on myös vesialueita, joiden tila on välttävä tai jopa huono. Sisäsaaristo on pääosin suojaisia ja voimakkaasti paikallisten jokivesien vaikutuksen alainen [17]. Tämä viittaa siihen, että sisäsaariston tila määräytyy pääasiassa paikallisten kuormituslähteiden mukaan.



Kuva 4. Virtausmallinnukseen perustuva arvio fosforin taustakuormituksesta (tonni) biologisella tuotantokaudella (15.5.–15.10.) vuosina 1993–2025.

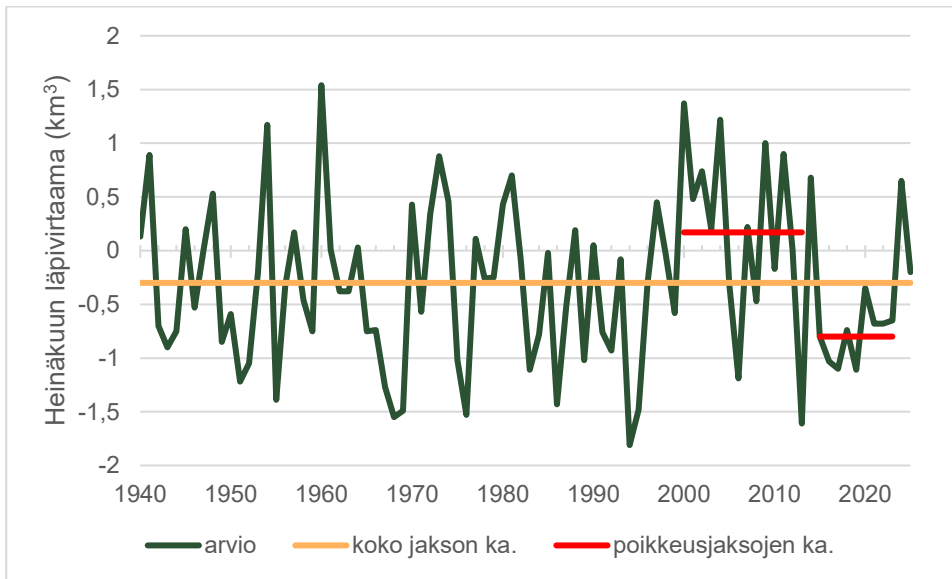
Hankkeessa tehtyjen mallinnusten mukaan Saaristomerelle Itämeren pääaltaalta ja Suomenlahdelta tulleen fosforin nettokuormituksen määrä biologisella tuotantokaudella (15.5.–15.10.) vuosina 1996–2015 oli keskimäärin 115 tonnia (kuva 4). Vuoden 2015 jälkeen Saaristomeren pintavirtausten suunnat muuttuivat. Muutosten seurauksena vuosina 2016–2023 tapahtui fosforin ulosvirtausta, jonka määräksi laskettiin keskimäärin 175 tonnia. Vuosina 2024 ja 2025 tilanne jälleen kääntyi ja fosforin sisään virtaus oli keskimäärin 52 tonnia kaudessa. Koko jakson 1993–2025 fosforin taustakuormituksen keskiarvo on ollut 29 tonnia (15.5.–15.10.).

Saaristomeren tuulikomponenttien ja läpivirtaamien välille saatiin seuraava regressiomalli

Läpivirtaama = $0.1370 - 1.0822 u_{\text{tuuli}} + 0.3501 v_{\text{tuuli}}$, jossa
 $R = 0.93$, $R^2 = 0.87$ ja $p = 0.000$ kaikille parametreille

Tuuli- ja virtaus datan todettiin tilastollisten testien perusteella noudattavan hyvin normaalijakaumia. Koska tuulitietoja oli saatavilla vuodesta 1940 asti, voitiin regressiomallilla nyt laskea läpivirtaamatiedot takautuvasti alkamaan sieltä lähtien (kuva 5). Vuosien 1940–2025 aikasarjasta saatiin sitten laskettua poikkeusjaksojen esiintymistodennäköisyyksiä.

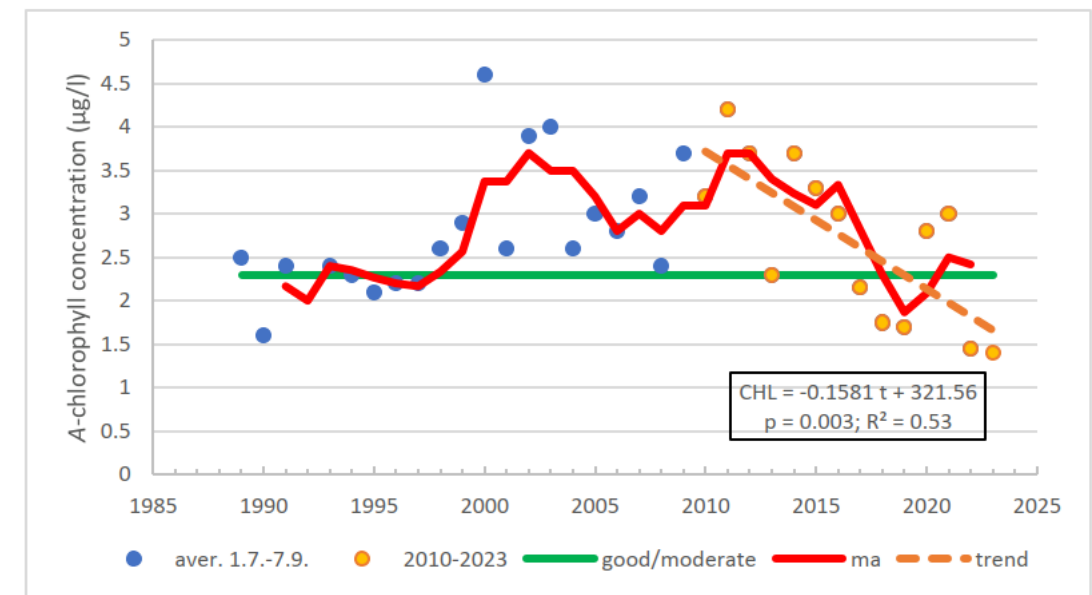
2000-luvulla Saaristomeren virtausolot ovat poikenneet huomattavasti normaalista. Esimerkiksi todennäköisyys heinäkuun aikaisen läpivirtaama-aikasarjan v. 2015–2023 esiintymiselle (keskiarvo - 0,8 km³, poikkeama - 0,5; kuva 2) oli 2,6 %. Vastaavasti vuosina 2000–2013 virtaamasuunta oli etelästä pohjoiseen keskimäärin + 0,2 km³ (poikkeama + 0,5) ja jakson esiintymistodennäköisyys vain 0,2 %.



Kuva 5. Heinäkuun mallinnettu läpivirtaama (km^3) vuosina 1940–2025. Koko jakson keskiarvo ($-0,3 \text{ km}^3$) keltaisella ja poikkeamavuosien keskiarvot punaisella: 2000–2013 $+0,2 \text{ km}^3$ ja 2015–2023 $0,8 \text{ km}^3$. Etumerkki + tarkoittaa virtaussuuntaa etelästä pohjoiseen (Saaristomerelle) ja – pohjoisesta etelään (Saaristomereltä pääaltaalle päin).

Jos oletetaan, että fosforin nettokuorma (kuva 4) olisi normaalijakautunut ja sen keskiarvo ja hajonta vuosien 1993–2025 estimaateista laskettu, jakson 2016–2023 esiintymiselle tulisi todennäköisyys noin 0,3 % riippuen tilastollisesta testistä (t-testi 0,004, Welchin t-testi 0,003, Mann-Whitneyn u-testi 0,002).

Saaristomeren keskiosan ulkosaariston havaintoasemilla fosforin taustakuormituksen muutokset 2000-luvulla näyttivät johtavan vastaaviin vaihteluihin pintakerroksen levätuotantoa kuvaavissa a-klorofyllipitoisuuksissa. Esimerkiksi lähellä Kihdin keskiosaa sijaitsevalla havaintoasemalla Iniö 33 (kuva 6) ja Kihdin eteläosan havaintoasemalla Kuml 155 Kihti X/2 klorofyllipitoisuus on viime vuosina pysynyt keskimäärin alle hyvän rajan $2,3 \mu\text{g/l}$, jolla se oli viimeksi 1990-luvulla. Nykyisen hyvän tilan säilyminen näyttää kuitenkin mallinnusten perusteella epätodennäköiseltä.



Kuva 6. Klorofylli a:n pitoisuus (µg/l) pintavedessä (0–10 m) havaintoasemalla Iniö 33 Äppelö ekologisen luokittelun ajanjaksolla (1. heinäkuuta–7. syyskuuta) vuosina 1989–2023. Hyvän tilan raja (hyvä/tydyttävä) on 2,3 µg/l. Punainen viiva esittää klorofyllipitoisuuden kolmen vuoden liukuvaa keskiarvoa. Oranssi katkoviiva kuvaa klorofyllipitoisuuden vähenemistä vuosina 2010–2023 ($p = 0,003$; $R^2 = 0,53$). Lähteenä [1].

Sisäinen kuormitus. Rehevöityneissä vesiekosysteemeissä, kuten Saaristomerellä, sedimentti toimii merkittävänä ravinteiden nieluna ja lähteenä. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että myös Saaristomeren sedimenteissä on huomattavia määriä fosforia, joka voi vapautua takaisin veteen ajan myötä. Tämän vuoksi sisäiset fosforin kierrätysprosessit ovat keskeinen tekijä rannikkoalueiden fosforivirtausten ja rehevöitymisen dynamiikassa. Sedimentistä vapautuvien ravinteiden on esitetty selittävän sen, että ulkoisen ravinnekuormituksen merkittävä vähentäminen ei aina johda vastaavaan ravinnepitoisuuksien ja kasviplanktonbiomassan vähenemiseen vastaanottavissa vesissä. Saaristomeren sisäisen fosforikuormituksen suuruutta ei kuitenkaan ole onnistuttu luotettavasti arvioimaan, tai aiemmat arviot ovat todennäköisesti olleet liian suuria. Tutkimuksessani [2] tein laskelmia mitattujen vedenlaatutietojen perusteella fosforin siirtymisen arvioimiseksi pohjanläheisestä vesikerroksesta pintakerrokseen (0–10 m) biologisen tuotantokauden aikana levätuotannon käyttöön. Toisin sanoen määritin Saaristomeren ns. tehollisen sisäisen fosforivuon määrän. Laskelmien perusteella fosforia kulkeutui pintakerrokseen 269 tonnia (netto) ajanjaksolla 15.5.–15.10. Sisäisen kuormituksen kokonaismäärän arvioitiin samalla ajanjaksolla olevan 1094 tonnia.

Tutkimuksessa [2] arvioin myös, paljonko fosforia poistuu Saaristomeren pintakerroksesta (0–10 m) kevätukinnan aikana planktisten levien hajoamisen ja vajoamisen seurauksena. Kokonaispoistumaksi saatiin 1518 tonnia fosforia. Eniten (68 %) fosforia poistuu kevätukinnan aikana ulkosaaristossa. Talviaikainen Saaristomeren ulkoinen kokonaisfosforikuormitus, joka on pääosin (noin 60 %) peräisin valuma-alueelta, oli 575 tonnia vuodessa. Tästä fosforikuormituksesta 27,6 % oli liuenneessa epäorgaanisessa muodossa (DIP).

Vesipatsaan fosforivarasto. Tutkimuksessa [9] tarkensin edelleen Saaristomeren fosforitaseen osatekijöitä. Saaristomeren veden fosforivarasto vaihtelee vuodenaikojen mukaan niin kuin jo aiemmin oli osoitettu. 2000-luvulla eniten fosforia vedessä oli talvella (1.1. – 31.3), yhteensä 6764 tonnia, ja vähiten alkukesällä (15.5.–15.6.) kevätkukinnan jälkeen, jolloin määrä oli 4789 tonnia. Ekologisen luokittelun ajanjaksolla (1.7.–7.9.) veden keskimääräinen fosforimäärä oli 5494 tonnia. Koko vesipatsaan keskimääräiset kokonaisfosforipitoisuudet olivat talvella 30,7 µg/l, alkukesällä 21,8 µg/l ja ekologisen luokittelun ajanjaksolla 25,0 µg/l. Talven maksimista alkukesän minimiin tapahtuva kausittainen vähenemä, yhteensä 1975 tonnia, johtuu pääasiassa kevään kasviplanktonkukinnasta. Kevätkukinnan aikana primaarituottajat sitovat suuria määriä fosforia, joka myöhemmin siirtyy sedimentteihin orgaanisen aineksen laskeutumisen myötä. Osa pintavedestä poistuvasta fosforista päätyy myös rihmalevien käyttöön. Niiden määrä näyttää ÅA tutkimusten (liite) mukaan olevan runsaimmillaan varhain keväällä.

Kaloihin sitoutunut fosfori. Vesienhoidon toimenpiteiden suunnittelussa päädytään useimmiten siihen, että vesimuodostumien ekologisen tilan parantaminen edellyttää merkittäviä ravinnekuormituksen vähennyksiä [18]. Koska tällaisia vähennyksiä on usein vaikea toteuttaa, toimenpideohjelmassa on ehdotettu vesieliöiden biomassaan sitoutuneiden ravinteiden poistamista täydentävänä toimenpiteenä. Ajatuksena on, että tämä voisi osittain kompensoida tarvittavia kuormitusvähennyksiä. Lähestymistapa on sisälletty myös Saaristomeren ekologisen tilan parantamiseen tähtääviin toimiin [19], joihin on ehdotettu mm. kalastuksen tehostamista. Toisaalta on esitetty, että monissa tapauksissa kalakantojen säilyttäminen ekosysteemissä saattaa olla merellisten ravinnekiertojen kannalta edullisempaa. Ekosysteemin kannalta on suotavampaa, että ravinteet sitoutuvat kalaston biomassaan sen sijaan, että ne olisivat kasviplanktonin käytössä, koska näin ravinteet varastoituvat pidempään ja rehevöitymistä ylläpitävä nopea kierto vähenee.

Tutkimuksessani [9] keskityin arvioimaan kalakantoihin sitoutuneiden fosforivarastojen suuruutta biomassatietojen ja lajikohtaisten fosforipitoisuuksien perusteella. Tulokset toivat uutta tietoa kalojen merkityksestä Saaristomeren fosforitaseessa ja korostavat niiden roolia pitkäaikaisessa ravinteiden varastoinnissa (kuva 7).

Vuosina 1998–2023 Saaristomeren keskimääräinen vuosittainen kalasaalis oli 15 516,5 tonnia (16,3 kg/ha), josta 73,1 % koostui kaupallisesti pyydetystä silakasta. Muita runsaasti saaliissa esiintyviä lajeja olivat ahven (*Perca fluviatilis*), kuha (*Sander lucioperca*), hauki (*Esox lucius*) ja kuore (*Osmerus eperlanus*). Keskimäärin vuosisaalis sisälsi 83,4 tonnia fosforia. Kalastus saattoi vuosittain poistaa fosforimäärän, joka vastasi noin 0,6 % vesipatsaassa ja pintasedimentissä olevasta kokonaisfosforivarastosta tai 1,4 % Saaristomereen arvioidusta kokonaisravinnekuormituksesta. Kalojen osuus fosforin kierrossa on kaikkiaan vähäinen, ravinteiden kierron dynamiikkaa hallitsee pääasiassa plankton. Planktonia syövät kalat ja niiden saalisajit sekä kasviplankton kierrättävät pääasiassa jo vesipatsaassa olevia ravinteita, eivätkä ne siten ole pääasiallisia rehevöitymisen ajureita.

Kesäaikainen kalabiomassan kasvu Saaristomerellä sitoo huomattavia määriä fosforia, moninkertaisesti enemmän kuin mitä vuosittain poistuu kalastuksen kautta. Vuonna 1988 Saaristomeren silakkakannan arvioitiin sisältäneen noin 786 tonnia fosforia, mutta vuoteen 2023 mennessä määrä oli vähentynyt vain 127 tonniin. Vuosien 1988 ja 2023 välillä Saaristomeren silakan kutukannan arvioitu fosforivarasto väheni noin 85 %, ja vastaavasti silakkapopulaation kokonaisbiomassan fosforimäärä pieneni noin 84 %. Tämä huomattava lasku

kuvastaa merkittävää silakkabiomassan vähenemistä Saaristomerellä. Muutos on saattanut vaikuttaa fosforin kiertoon, ravintoverkon toimintaan sekä ravinteiden pidättymiseen ja kiertoihin meriekosysteemissä.

Kaloihin sitoutunut fosforivarasto voidaan nähdä dynaamisena ja osittain lyhytkestoisena osana alueen kokonaisfosforibudjettia. Planktonia syövä silakka, joka on biomassana runsain laji Saaristomerellä, kuljettaa itseensä sitoutunutta fosforia Itämerellä syönnösvaellustensa aikana. Tämä todennäköisesti vähentää silakan paikallista vaikutusta veden laatuun, mikäli tällaisilla vaikutuksilla on ylipäätään suurta merkitystä.

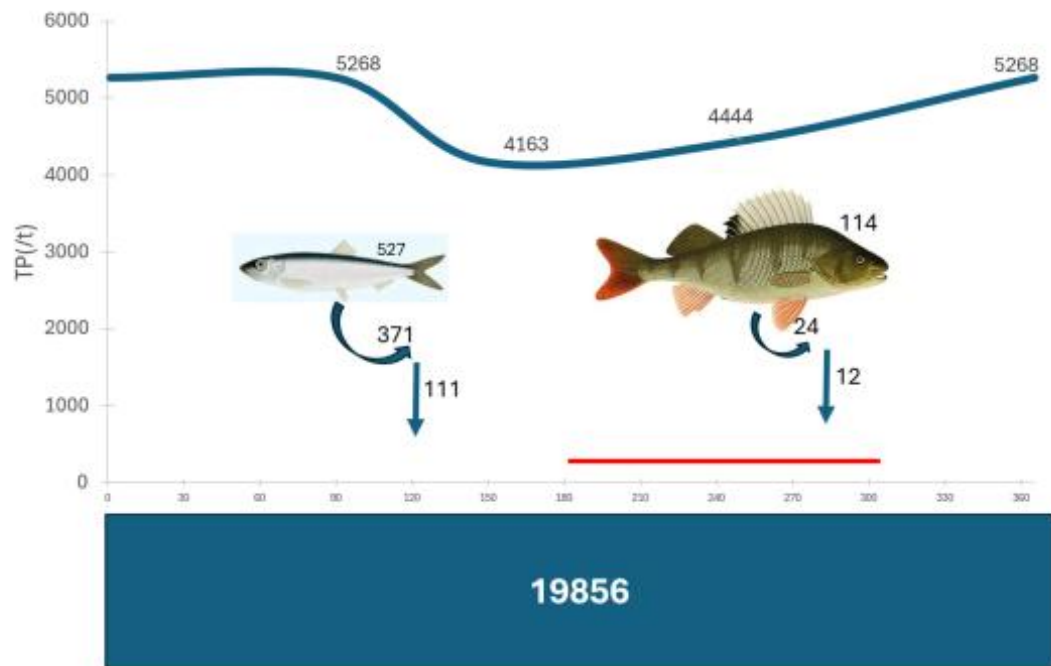
Bioenergeettisiin malleihin perustuvien ravinnonkäyttöarvioiden mukaan silakat saivat vuonna 1988 noin 66 % vuotuisesta ravinnostaan Saaristomeren ulkopuolisilta alueilta, ja vuonna 2023 vastaava osuus oli noin 57 %. Suurin osa Saaristomeren silakkakannan sisältämästä fosforista on siten peräisin alueen ulkopuolelta. Silakka toimii näin fosforin kuljettajana, siirtäen osan fosforivarannosta Saaristomeren ekosysteemiin, jossa sitä poistuu osittain kalastuksen kautta ja osittain vapautuu lisääntymiskauden aikana mereen.

Arvioni mukaan [9] silakkakannan biomassaan sitoutunut fosfori olisi enimmillään 1980-luvun lopulla vastannut noin 10 prosenttia vedessä talviaikaan esiintyvistä fosforimäärästä. 2020-luvulla vastaava osuus on ollut enää noin 2 %.

Kalasaaliin kautta tapahtuva fosforin poistuman merkitys tulee arvioida sen määrän suhteessa sekä sedimentin pintakerroksen että vesifaasin fosforivarantoihin. Kalajäänteiden uppoaminen pohjaan johtaa siihen, että osa niihin sitoutuneesta fosforista jää sedimentin pintakerrokseen. Sedimentissä orgaaninen fosfori muuttuu leville käyttökelpoiseksi epäorgaaniseksi fosforiksi (DIP), josta osa voi palautua vesifaasiin.

Vuosina 1998–2023 Saaristomeren kokonaiskalasaaliin mukana poistui keskimäärin 83 t fosforia. Mikäli tämä fosfori ei olisi poistunut kalastuksen kautta vaan olisi jäänyt mereen, se olisi lisännyt sedimentin ja vesifaasin yhdistettyä fosforivarantoa (sedimentti 19856 t ja kesäaikainen vesifaasin varasto 2000-luvulla 5494 t) noin 0,3 %/v.

Saaristomerellä niiden lajien saaliit, joita yleensä pyydetään niin sanotussa hoitokalastuksessa (kuore, särki ja lahna), pysyivät vaatimattomina 2010-luvun alkuun saakka (v. 2000–2009 ka. 140 t/v). 2010-luvulla kuoresaaliit kuitenkin kasvoivat nopeasti ja saavuttivat ennätysellisen 2311 tonnin määrän vuonna 2020. Tuolloin kuoresaaliin mukana poistui merestä 10,4 tonnia fosforia. Tämä määrä ei käytännössä vaikuttanut mitenkään Saaristomeren kokonaisfosforitasessa.



Kuva 7. Saaristomeren yleistetty fosforitase ilman rihmaleviä Helmisen [9] mukaan. Potentiaalinen mobiilin fosforin varasto pintasedimentissä: 19 856 tonnia, esitetty sinisenä alimpana palkkina. Vesimassan sisältämä fosforivarasto (t) eri vuodenaikoina 1980-luvun lopulla: sininen aaltoviiva. Vuoden 1988 silakan (117 091 t) kutukannan sisältämä fosforimäärä (527 t): esitetty kalasymbolin yläpuolella. Kalasymbolin alapuolella oleva kaareva nuoli: fosfori (t), jonka kutukanta kierrättää, kun se on Saaristomerellä. Suora alaspäin osoittava nuoli: arvioitu ulosteisiin sitoutunut kokonaisfosfori (t). Punainen viiva osoittaa ajanjakson, jolloin silakkakanta on syönnöksellä Saaristomeren ulkopuolella. Vuoden 1998 ahvenkannan (10 600 t) osalta siihen sitoutunut, kierrätetty ja sedimentoitunut fosfori (t) on esitetty vastaavalla tavalla kuin silakan kohdalla.

Viitteet

17 Miettunen, E.; Tuomi, L.; Myrberg, K. Water exchange between the inner and outer archipelago areas of the Finnish Archipelago Sea in the Baltic Sea. *Ocean Dynam.* 2020, 70, 1421–1437. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01407-y>

18 Berninger, K.; Fleming, V.; Huttunen, M.; Iho, A.; Niskanen, L.; Kuosa, H.; Piiparinen, J.; Räike, A.; Salo, M.; Sarkkola, S.; et al. Rannikkovesille Tuntuvia Kuormitusvähennyksiä; Policy Brief No. 26; Valtioneuvoston Selvitys- ja Tutkimustoiminta: Helsinki, Finland, 2023.

19 Available online: <https://www.ely-keskus.fi/saaristomeri/saaristomeri-ohjelma> (accessed on 1 June 2025).

3.2. Saaristomeren fosforitase ja rihmalevät

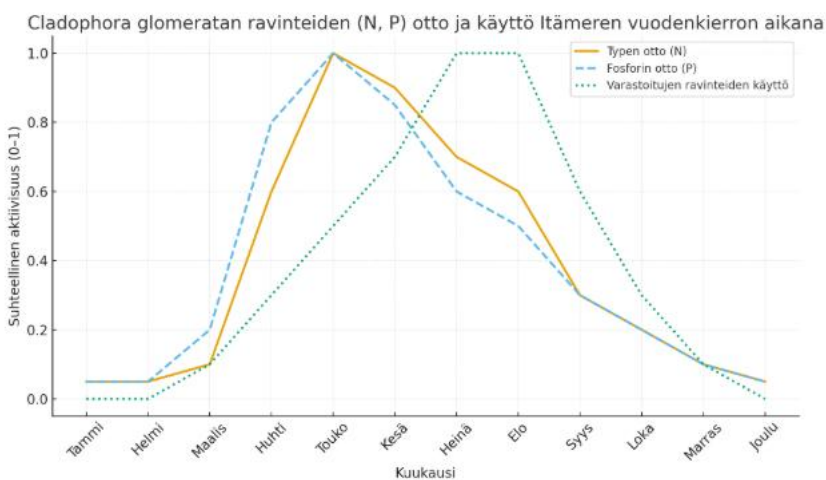
3.2.1. Rihmalevien yleinen ravinnedynamiikka

Rihmalevien ravinteidenotto alkaa keväällä (helmi-maaliskuussa) (kuva 8). Levien talvehtineet mikroskooppiset muodot aktivoituvat, ja heti kun lämpötila nousee ja valo lisääntyy, levä alkaa ottaa ravinteita suoraan vedestä. Itämeressä tämä ajoittuu usein 4–8 °C vedenlämpötiloihin. Tällöin veteen on vielä liuenneena runsaasti nitraattia (NO_3^-) ja fosfaattia (PO_4^{3-}), joita levät hyödyntävät tehokkaasti.

Keväällä varsinkin lettiruskohahtu (*Pylaiella littoralis*) muodostaa yleisesti matalan veden rihmalevävyöhykkeen. Lettiruskolevä aloittaa kasvunsa jo helmikuussa, muodostaa keväällä paksuja mattoja ja kuolee keskikesällä. Kuolleesta, pohjasta irronneesta lettiruskolevästä koostuvat lautat ovat tuttu näky Saaristomerellä. Lettiruskolevä sietää paremmin kylmää vettä kuin toinen yleinen ruskolevä, pilviruskolevä (*Ectocarpus*), joka ei kasva alle kahdeksanasteisessa vedessä. Pilviruskolevä aloittaa kasvunsa kesäkuun alussa, talvehtineet yksilöt jo toukokuussa. Alkukesää (touko–kesäkuu) pidetään vaiheena, jolloin *C. glomerata* kasvaa nopeasti ja muodostaa valtaosan vuosittaisesta typpi- ja fosforivarastostaan. Rihmalevät ottavat ravinteet suoraan ympäröivästä vedestä koko solupinnallaan, niillä ei ole juuria tai erityisiä imuelimiä. Ravinteet varastoituvat solun vakuoleihin ja polyfosfaattirakeisiin.

Keskikesällä (heinä–elokuu) rihmalevät käyttävät ravinnevarastojaan kasvuun. Kun meriveden liuenneiden ja käyttökelpoisten ravinteiden pitoisuudet vähenevät, *C. glomerata* alkaa kuluttaa aiemmin varastoimiaan ravinteita. Tämä selittää sen, miksi se voi edelleen kasvaa keskikesällä, vaikka käyttökelpoista fosforia ja typpeä on vesifaasissa vähän. Varastointikykyä kutsutaan kirjallisuudessa termillä ”luxury uptake”.

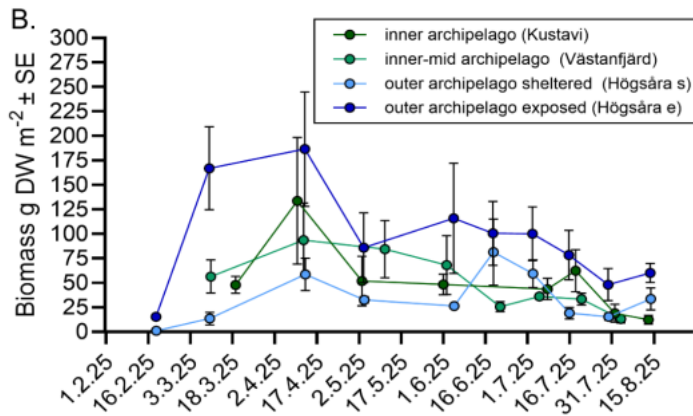
Syksyllä (syys–lokakuu) rihmalevien kasvu hidastuu valon vähetessä. Makroskooppinen rihmasto alkaa hajota, mutta osa ravinteista vapautuu takaisin veteen hajotuksen kautta, mikä voi tukea muiden lajien kasvua tai mikrobitoimintaa.



Kuva 8. Viherahdinparran (*Cladophora glomerata*) ravinteiden otto ja käyttö vuodenvieron aikana.

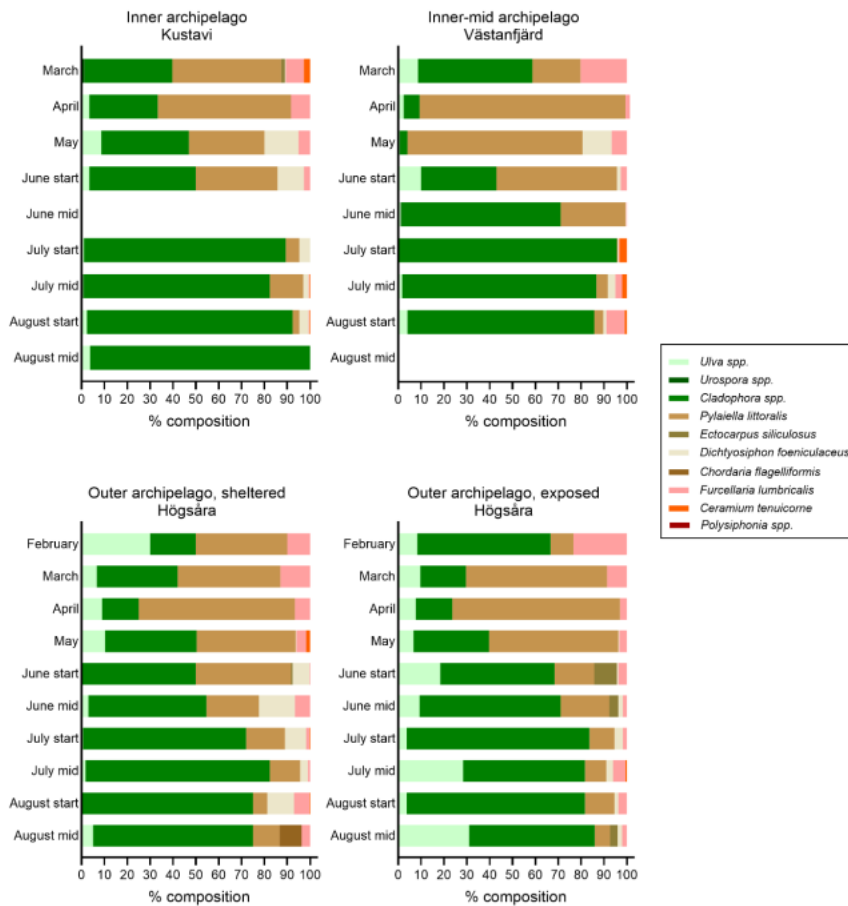
3.2.2. Vuoden 2025 tutkimukset

Åbo Akademin tutkimusten (liite) mukaan mitatut rihmalevän biomassat olivat selvästi suurimpia ulkosaariston avoimella tutkimuspaikalla, kun taas sisäsaariston, sisä–keskisaariston ja suojaisan ulkosaariston kohteilla tuotanto oli pienempää ja keskenään melko samanlaista (kuva 9).



Kuva 9. Rihmalevien biomassa ($\text{g kuiva-ainetta m}^{-2}$) eri näytepaikoilla: sisäsaaristossa (tummanvihreät symbolit), sisä–keskisaaristossa (vaaleanvihreät symbolit), ulkosaariston suojaisalla kohteella (vaaleansiniset symbolit) ja ulkosaariston avoimella kohteella (tummansiniset symbolit). Tiedot esitetään keskiarvoina \pm keskivirhe (SE). Näytteenotto oli tiheämpää kesä–syyskuussa (kahdesti kuukaudessa). $N = 3$ per kohde ja näytteenottokerta.

Kaikilla tutkimuspaikoilla rihmaleviä oli merkittäviä määriä jo maaliskuussa: pintakerroksessa (0-1 m) keskimäärin $71,2 \text{ g DW m}^{-2}$ (vaihteluväli $14 - 167 \text{ g DW m}^{-2}$). Rihmalevien biomassa oli suurimmillaan huhtikuussa keskimäärin $118,2 \text{ g DW m}^{-2}$ ($59 - 187 \text{ g DW m}^{-2}$). Toukokuussa biomassat olivat tästä jo lähes puolittuneet: $63,7 \text{ g DW m}^{-2}$ ($33 - 86 \text{ g DW m}^{-2}$). Kesä–heinäkuussa biomassat olivat suunnilleen samansuuruisia kuin toukokuussa: keskimäärin $62,3 \text{ g DW m}^{-2}$ ($43 - 108 \text{ g DW m}^{-2}$), mutta elokuussa enää $23,9 \text{ g DW m}^{-2}$ ($13 - 48 \text{ g DW m}^{-2}$).



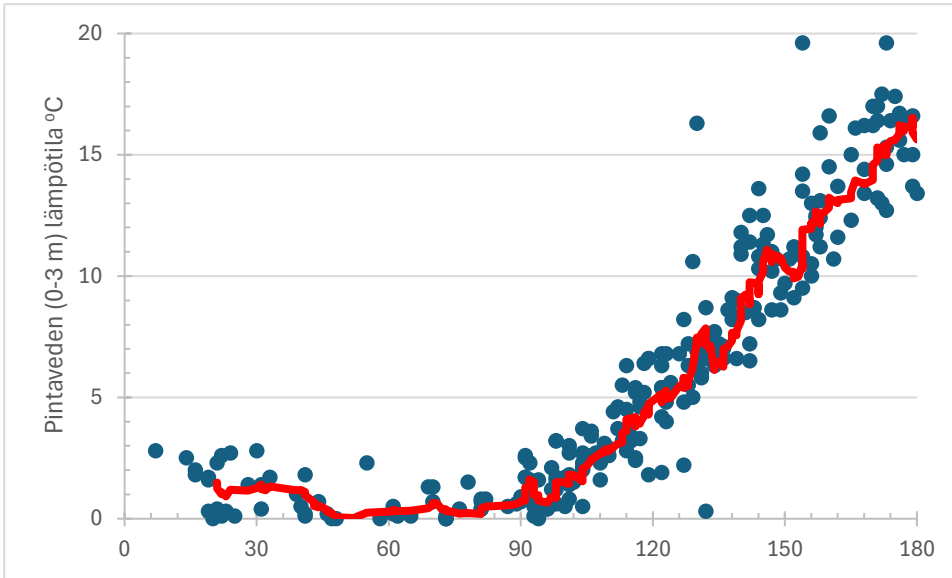
Kuva 10. Rihmalevyhteisön koostumus eri näytepaikoilla (A–D) ja eri ajankohtina (helmikuu/maaliskuu – elokuun puoliväli). Kunkin näytteenottoajankohdan prosentuaalinen koostumus on esitetty kolmen rinnakkaisnäytteen keskiarvona kunkin paikan osalta.

Tutkimuksessa tunnistettiin kaikkiaan 10 lajia tai taksonia. (kuva 10). Lajikohtaiset vasteet veden lämpötilan nousuun johtivat selvästi muutoksiin lajikoostumuksessa Saaristomerellä. Keväällä maaliskuussa hallitsevina lajeina olivat ruskolevät (*Pylaiella littoralis* / *Ectocarpus siliculosus*) ja kesällä viherlevät (*Cladophora*-suvun lajit). Huhtikuussa, kun rihmalevien biomassat olivat suurimmillaan, valtalajina oli *Pylaiella littoralis*: sen osuus oli 70–90 % (kuva).

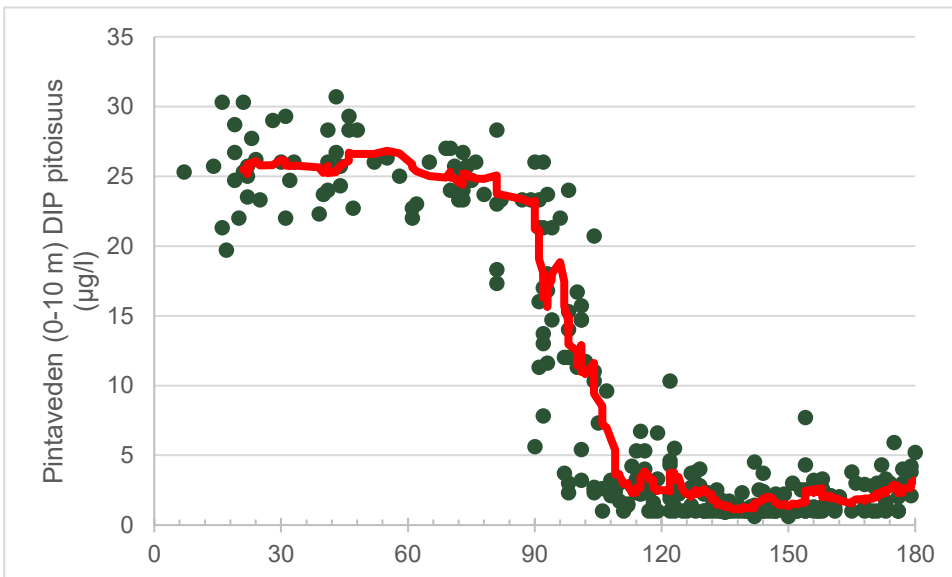
Kirjallisuudesta löytyy vastaavia esimerkkejä *Pylaiella littoralis* esiintymisistä. Kiirikin ja Lehvon [20] tutkimuksessa ilmeni, että Hangon Tvärminnessä Suomenlahdella *Pylaiella littoralis* alkoi kasvaa jo helmikuussa. Maksimipeittävyys saavutettiin toukokuun alussa, ja filamenttien rappeutuminen ja irtoaminen tapahtui myöhään toukokuussa ja kesäkuussa. Lotze ym. [21] mukaan *Pylaiella littoralis* omaa keväällä huomattavan kilpailuedun muihin rihmaleviin nähden, sillä sen kasvu voi alkaa jo 5 °C lämpötilassa. Tukholman saaristossa *Pylaiella littoralis* oli valtalajina jo maaliskuussa ja sen runsaushuippu alkoi huhtikuun puolivälissä [22].

Saaristomeren pintavesi on maaliskuussa vielä keskimäärin alle 1 °C asteista ja alkaa lämmitä vasta huhtikuussa. Pintavesi on 5 °C asteista huhtikuun lopussa (kuva 11). ÅÅ:n tutkimusten mukaan Saaristomerellä rihmalevien suurimmat biomassat ajoittuvat huhtikuuhun kasviplanktonin kevätukinnan aikaan, jolloin

pintaveden lämpötila on alle 5 °C. Tällöin merivedessä on runsaasti leville käyttökelpoisessa muodossa olevaa fosforia (DIP) (kuva 12).



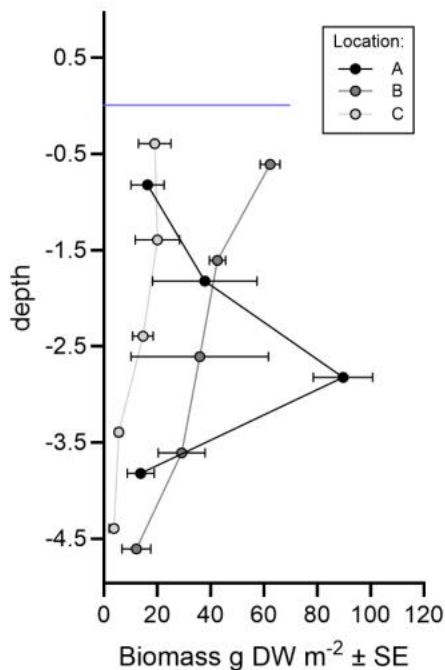
Kuva 11. Seilin havaintoasemalla vuosina 2000–2025 mitatut pintaveden (0–3 m) lämpötilat ajanjaksolla 1.1.–30.6.



Kuva 12. Seilin havaintoasemalla vuosina 2000–2025 mitatut pintaveden (0–10 m) fosfaattifosforipitoisuudet (DIP) ajanjaksolla 1.1.–30.6.

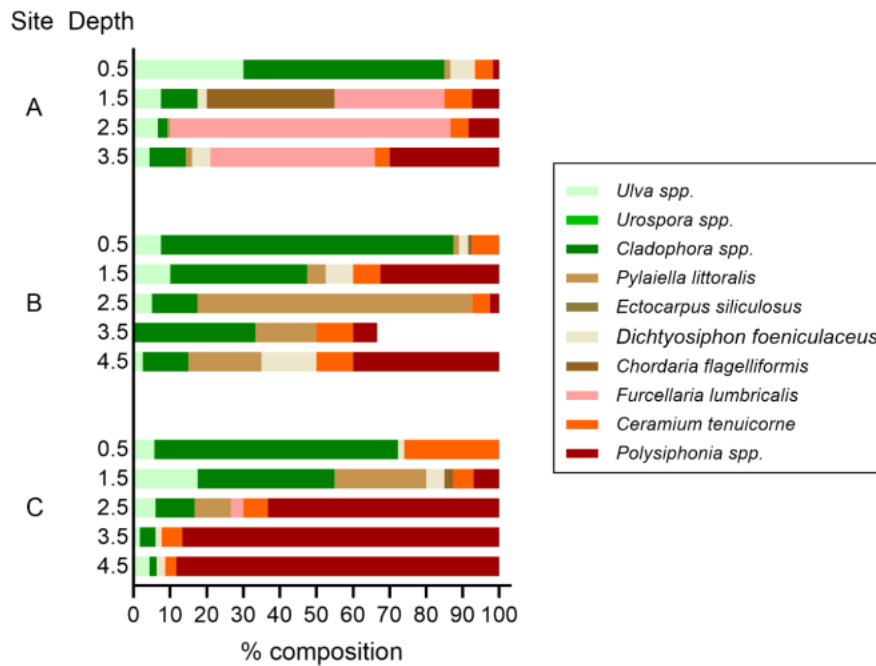
ÅA:n vuoden 2025 tutkimusten mukaan rihmalevien biomassa Saaristomeren rannoilla elokuussa väheni syvyyden kasvaessa (kuva 13). Poikkeuksen muodosti Högsåran havaintoasema A, jossa biomassa oli

suurimmillaan 2,5 metrin syvyydessä. Tämä näyttää johtuvan runsaasta *Furcellaria lumbricalis* (punalevä) määrästä. Tämä levälaji on rakenteeltaan jäykkä ja painavampi kuin useimmat rihmalevät. Lisäksi kohteessa A tuotanto oli alhainen myös lähellä pintaa ($< 20 \text{ g ka m}^{-2}$), mikä on pienempi kuin läheiseltä, aallokolle avoimelta ulkosaariston kohteelta saatu arvio (70 g ka m^{-2} , 400 metriä pohjoiseen, 5 päivää myöhemmin). Paikallinen vaihtelu vaikuttaa olevan suurta. Biomassan määrä saattaa vaihdella myrskyjen seurauksena, jotka voivat repiä rihmoja irti, tai johtua suunnista, esimerkiksi jyrkillä, pohjoiseen suuntautuvilla rannoilla, joilla on vähemmän valoa ja siten heikompi kasvu.



Kuva 13. Rihmalevien biomassa (g KA m^{-2}) syvyysgradientin mukaan. Tiedot on esitetty keskiarvoina \pm keskivirhe (SE). Tummit symbolit kuvaavat avoiminta tutkimuspaikkaa ja vaaleimmat rehevöityneintä kohdetta (keskisaaristossa). Sininen pystyviiva osoittaa vedenpinnan.

Fotosynteesin ominaispiirteet näyttävät säätelevän makrolevien vyöhykkeisyyttä kalliorannoilla: lajikoostumus muuttui vihreistä levistä ruskeisiin ja punaisiin levin syvyyden kasvaessa (kuva 14).



Kuva 14. Rihmalevien lajikoostumus (yhteisön prosentuaalinen osuus) syvyysgradientin mukaan. Tiedot esitetään paikan ja syvyyden sisällä otettujen rinnakkaisnäytteiden (n = 2–3) keskiarvoina. Vihreät, ruskeat ja punaiset sävyt kuvaavat vastaavasti viher-, rusko-, ja punaleviä. Tyypillisesti viherleviä esiintyy runsaimmin lähellä pintaa, kun taas punalevät ovat yleisempiä syvemmällä vedessä.

Rihmalevämassasta tehtyjen laboratorioanalyysien mukaan sen fosforipitoisuus oli keskimäärin (kaikkien näytteiden keskiarvo) $0,26 \pm 0,03$ %, typpipitoisuus $1,94 \pm 0,19$ % ja hiilipitoisuus $24,7 \pm 2,1$ % DW (taulukko 1).

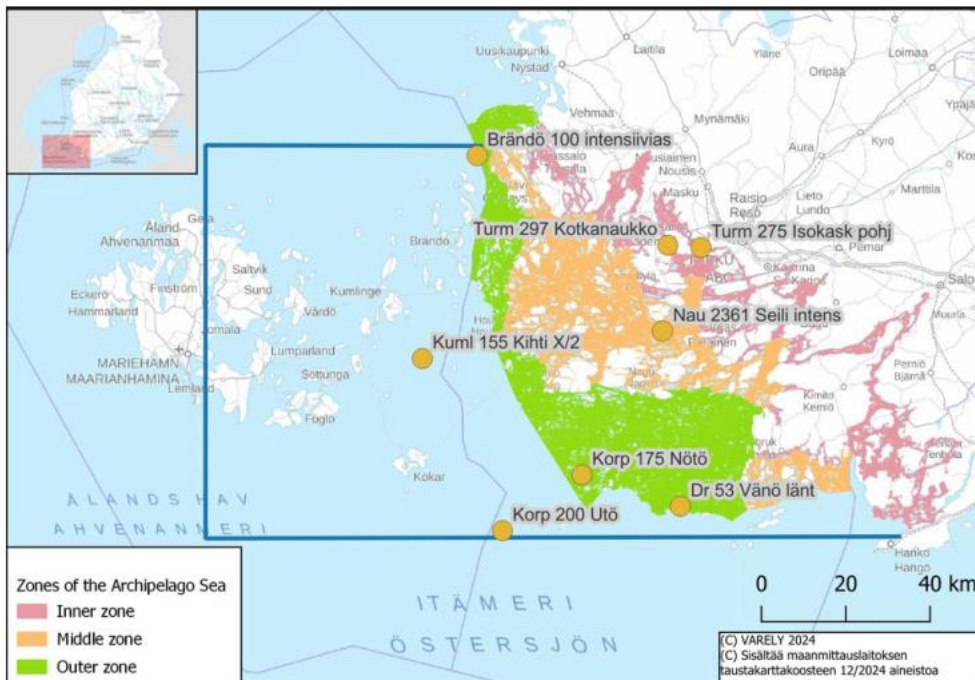
Itämeren alueelta löytyy jonkin verran mitattua tietoa rihmalevien ravinnepitoisuuksista ja niiden vaihteluista. Kulikowskin ym [23] yhteenvedon mukaan *Cladophoran* typpipitoisuudet olisivat $\approx 1.2\text{--}4.0$ % DW ($12\text{--}40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) ja fosforipitoisuudet $\approx 0.05\text{--}0.25$ % DW ($0.5\text{--}2.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Näihin verraten tässä yhteydessä mitatut typpipitoisuudet olisivat vaihteluvälin puolivälistä, mutta fosforipitoisuudet korkeita. Möllerin [24] mukaan Puolan rannikolla vedestä mitatun ajelehtivan rihmaleväbiomassan fosforipitoisuus olisi ollut $0,19$ % DW, typpi $1,85$ % ja hiili $26,1$ %. Haro ym. [25] tutkimuksessa mitattiin *Pylaiella littoralis* ravinnepitoisuuksia rehevöityneellä lauhkean suistoalueella Luoteis-Irlannissa. Tulosten mukaan typen pitoisuus oli keskimäärin $4,82 \pm 0,22$ % DW, ja fosforin pitoisuudet vaihtelivat välillä $0,17\text{--}0,26$ % DW. Kirjallisuuden mukaan *Cladophora glomeratan* kuiva-ainepitoisuus olisi noin 12 % [26].

Taulukko 1. Rihmalevämassasta tehtyjen laboratorioanalyysien (fosfori, typpi, hiili) tuloksien tunnusluvut.

	P (%)	N (%)	C (%)
Keskiarvo	0,264	1,94	24,7
Keskivirhe	0,014	0,091	1,03
Mediaani	0,260	1,85	25,0
Keskihajonta	0,09	0,601	6,76
Otosvarianssi	0,008	0,362	45,7
Kurtosis	-0,464	-0,646	0,485
Vinous	0,24	0,018	-0,567
Minimi	0,09	0,716	6,37
Maksimi	0,460	3,04	39,0
Lukumäärä	43	43	43
Luotettavuustaso ($\pm 95,0$ %)	0,028	0,185	2,08

3.2.3. Uusien tulosten perusteella lasketut biomassa-arviot Saaristomerelle

Saaristomeren Varsinais-Suomen puolella (6191 km², sisä- väli- ja ulkosaaristo, kuva 15) on rantaviivaa yhteensä 17 900 km ja syvyysvyöhykkeen 0–3 m pinta-ala 88 610 ha sekä vyöhykkeen 0–6 m pinta-ala 133 811 ha. Vastaavasti koko Saaristomeren (9500 km²) rantaviivan pituus on 26 316 km, syvyysvyöhyke 0–3 m: 130 272 ha ja 0–6 m: 196 725 ha. Edellisten lukujen perusteella koko Saaristomeren syvyysvyöhykkeen 0–4,5 m pinta-alaksi arvioitiin 163 500 ha. Saaristomeren rantaviivan pituuden ja syvyysvyöhykkeen (0–4,5 m) pinta-alan perusteella laskettuna todennäköinen rihmalevien esiintymisvyöhykkeen leveys olisi keskimäärin 62 m.



Kuva 15. Kartta Saaristomerestä ja vedenlaadun seurantapisteen sijainneista. Sininen viiva osoittaa Saaristomeren rajan. Eri vesialueiden tyypit (sisä-, väli- ja ulkosaaristo) on esitetty kartalla eri väreillä (vaaleanpunainen, oranssi, vihreä). Ulkosaariston uloimmat vesimuodostumat etelässä ja lännessä, jotka kuuluvat ulkosaaristotyyppiin, on vaaleansinisellä rajan sisäpuolella. Vedenlaadun havaintoasemat on merkitty karttaan keltaisilla ympyröillä ja nimetty. Lähteenä [2].

Rihmalevätutkimuksen raportissa (liite 1, kuva 5 ja taulukko 1) esitetyt rihmalevien biomassa estimaatit eri ajankohtina edustavat pintakerrosta (0–1 m). Muutkin pintakerroksen keskiarvot koko tutkitun syvyysvyöhykkeen (0–4,5 m) keskiarvoksi raportin kuvan 7 paikoilla B ja C havaitun syvyyden mukaisen vaihtelun perusteella. Pintakerroksen biomassat olivat keskimäärin 1,611 kertaa suurempia kuin koko syvyysvyöhykkeen keskiarvo. Tästä sain muuntokertoimen 0,62 (1/1,611), jolla pinnan biomassat voidaan muuttaa koko vyöhykkeen (0–4,5 m) keskiarvoiksi. Näin lasketut keskiarvot kerroin sitten aiemmin arvioidulla syvyysvyöhykkeen 0–4,5 m pinta-alalla 1635 km².

Taulukkoon 2 on laskettu, paljonko eri kuukausina koko Saaristomeren alueella on ollut rihmalevien biomassa (DW t) ja paljonko siihen on sitoutunut fosforia (t). Eniten rihmaleväbiomassaa oli huhtikuussa 119 819 DW t ja sen fosforivarasto oli 312 t. Silloin valtalajina oli *Pylaiella littoralis*, jonka osuus oli 70–90 %.

Touko-heinäkuussa biomassat olivat noin puolet pienempiä kuin huhtikuussa. Jos tulkitaan, että vähemmän johtui rihmalevien irtoamisesta alustoistaan, niin silloin muodostuivat ne ajalehtivat rihmalevämatot, joista kesän aikana vapautuu ravinteita. Vähennemästä laskien ajalehtivien rihmalevien määrä olisi ollut kaikki noin 55 000 t DW ja sen sisälsi fosforivarasto 146 t.

Taulukko 2. Rihmalevien biomassan määrääarviot (DW, kuivapaino) Saaristomeren litoraalivyöhykkeessä (0–1 m), syvyysovyöhykkeen (0–4,5 m) keskiarvo, laskennallinen kokonaisbiomassa (t) ja fosforivarasto (t) vuodenvaihtuksen aikana.

	(0-1 m) g m ⁻² DW ka.	(0-4,5 m) g m ⁻² DW	kokonaisbiomassa (t) DW	fosforivarasto P (t)
maaliskuu	71,2	44,1	72175	188
huhtikuu	118,2	73,3	119819	312
toukokuu	63,7	39,5	64573	168
kesä- ja heinäkuu	62,3	38,6	63154	164
elokuu	23,9	14,8	24227	63

3.2.4. Ajelehtivat rihmalevät ja niiden fosforivarasto

Saloviuksen ja Bonsdorffin [27] mukaan kiinnittyneet rihmamaiset levät irtoavat vähitellen elinkiertoensa loppuvaiheessa. Irtonaiset rihmat huuhtoutuvat joko rantaan tai vajoavat pohjaan, usein valokerroksen alapuolelle, missä levämässän hajoaminen jatkuu. Saaristomerellä on havaittu laajoja, jopa noin 30 hehtaarin kokoisia hajoavien levien esiintymiä, joiden paksuus ja koostumus vaihtelevat [28]. Hajoamisprosessi on voimakkaasti lämpötilasta riippuvainen. Levämässän hajoaminen johtaa usein hapettomiin tai vähähappisiin olosuhteisiin levämässän sisällä, veden ja sedimentin rajapinnalla sekä sedimentissä. Bakteeritoiminta on tällöin voimakasta, erityisesti rikkibakteerien (suku *Beggiatoa*) osalta, jotka voivat näkyä valkoisena peitteenä sedimentin pinnalla [29] sekä levämässän pinnalla [28, 30]. Anaerobisissa olosuhteissa orgaanisen aineksen hajoaminen sedimentissä tapahtuu pääasiassa sulfaattireduktion kautta sekä meri- että murtovesissä [31].

Meriekosysteemeissä kasvien hajoaminen etenee yleensä kolmessa vaiheessa: ensin tapahtuu nopea liukoisten aineiden ja ravinteiden huuhtoutuminen, jota seuraa mikrobivälitteinen hajoamisvaihe. Lopun levä- ja kasvimateriaalin mekaaninen pirstoutuminen johtuu selkärangattomien toiminnasta. Vapautuneet ravinteet päätyvät muiden opportunististen mikro- ja makrolevälajien käyttöön.

Hajoamisprosessi on nopea alkuvaiheessa, kun helposti hajoavat yhdisteet liukenevat veteen, mutta hidastuu ajan myötä, kun jäljelle jää vain kestävämpi orgaaninen aines. Nopeuteen vaikuttavat lämpötila, orgaanisen aineksen koostumus, partikkelikoko ja ravinteiden saatavuus. Prosessi on lajikohtainen ja voi kestää kuukausista useisiin vuosiin [27]. Irtonaiset levämässät toimivat siten merkittävänä ravinteiden varastona Itämeren rannikkoekosysteemeissä.

Aiemmin esitin arvion, että 2000-luvulla Saaristomerellä kevätkukinnan aikana ja jälkeen pintakerroksesta (0–10 m) poistuisi fosforia 1518 tonnia [2]. Koska rihmalevien fosforinotto on nopeaa tuohon aikaan, voidaan olettaa, että ne ottavat tarvitsemansa fosforin (312 t) tuosta poolista. Sen osuus olisi siitä noin 20 %. Fosforia vapautuu rihmalevistä kesän mittaan vesifaasiin, kun ne irtoavat kasvualustoiltaan ja alkavat hajota. Alkukesän ajelehtivien levämässöjen fosforivarastoksi arvioitiin 146 t ja sen voidaan katsoa olevan osa sisäisen kuormituksen poolia. Arvioin mainitussa tutkimuksessa [2], että sisäisen fosforikuormituksen suuruus ajanjaksolla 15.5.–15.10. olisi 1094 tn. Siitä 25 % eli 269 t päätyisi pintakerrokseen planktonlevien käyttöön. Rihmalevistä potentiaalisesti vapautuvan fosforin määrä kesäaikana olisi noin 13 % koko sisäisen fosforikuormituksen määrästä, mutta sen

suhteellinen merkitys voi olla vielä selvästi suurempi, jos pääosa biomassasta jää matalille alueille. Rihmalevät kuluttavat hajotessaan happea ja mikäli pohja muuttuu kokonaan hapettomaksi, niin osaltaan ne edistävät myös pohjasedimentin muun fosforivaraston vapautumista. Tutkimussukeltajat ovat tehneet havaintoja, joiden mukaan rihmalevämatot voisivat ajelehtia virtausten mukana syvempiin vesikerroksiin, mutta mitattua tietoa asiasta ei ole [28].

Joka tapauksessa irtoavien rihmalevien kerääminen merestä vähentäisi suoraan kesäaikaista käyttökelpoisen fosforin määrää meressä, joka on erityisen haitallista rehevöitymisen kannalta. Rihmaleväbiomassan talteenotto on yksi harvoista keinoista vaikuttaa suoraan veden ja sedimentin fosforimäärään. Perinteisesti on ajateltu, että siihen voitaisiin vaikuttaa vain ulkoista kuormitusta vähentämällä. Sisäisen ravinnevaraston väheneminen tapahtuu kuitenkin tuntemattomalla viiveellä, ja vasteen saaminen esimerkiksi valuma-alueella tehtävillä toimenpiteillä on epävarmaa.

Viitteet

- 20 Kiirikki, M.; Lehvo, A. Life strategies of filamentous algae in the northern Baltic Proper. *Sarsnia*, 1997, 82, 259-267.
- 21 Lotze, H.K.; Schramm, W.; Schories, D.; Worm, B. Control of macroalgal blooms at early developmental stages: *Pilayella littoralis* versus *Enteromorpha* spp. *Oecologia*, 1999, 119, 46-54.
- 22 Wiklund, A-K.; Malm, T.; Honkakangas, J.; Eklund, B. Spring development of hydrolittoral rockshore communities on wave-exposed and sheltered sites in the northern Baltic proper. *OCEANOLOGIA*, 2012, 54 (1), 75 – 107
- 23 Kulikowski, T. (editor); Jakubowska, M.; Krupska, J.; Psuty, I.; Szulecka, O. Guide to macroalgae cultivation and use in the Baltic Sea Region. National Marine Fisheries Research Institute Gdynia, 2021. 100 p.
- 24 Möller et al. (2021) Ecological aspects of sustainable beach wrack management: Report of the InterregProject CONTRA. Rostock, 2021. 57 p.
- 25 Haro, S.; Bermejo, R.; Healy, M.G.; Knöeller, K.; Fenton, O.; Heesch, S.; Morrison, L. Seasonal Variability of Golden Tides (*Pylaiella littoralis*, *Phaeophyceae*) and Nutrient Dynamics in a Potentially Eutrophic Intertidal Estuary. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 2336. <https://doi.org/10.3390/jmse12122336>
- 26 Kulikova, Y.; Sukhikh, S.; Kalashnikova, O.; Chupakhin, E.; Ivanova, S.; Chubarenko, B.; Gorbunova, J.; Babich, O. Assessment of the Resource Potential of Baltic Sea Macroalgae. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3599
- 27 Salovius, S.; Bonsdorff, E. Effects of depth, sediment and grazers on the degradation of drifting filamentous algae (*Cladophora glomerata* and *Pilayella littoralis*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2004, 298, 93 – 109.
- 28 Vahteri, P., Mäkinen, A., Salovius, S., Vuorinen, I. Are drifting algal mats conquering the bottom of the Archipelago Sea, SW Finland? *Ambio*, 2000, 29, 338 – 343.
- 29 Rosenberg, R., Díaz, R.J. Sulfur bacteria (*Beggiatoa* spp.) mats indicate hypoxic conditions in the inner Stockholm archipelago. *Ambio*, 1993, 22, 32 – 36.
- 30 Holmström, A. Occurrence, species composition, biomass and decomposition of drifting algae in the northwestern Åland archipelago, Northern Baltic Sea. MSc Thesis. Åbo Akademi Univ., Dept. of Biology, 1998, p. 69. In Swedish with English abstr.
- 31 Fenchel, T.; King, T.M.; Blackburn, T.H. *Bacterial Biochemistry: The Ecophysiology of Mineral Cycling*. Academic Press, San Diego, 1998, p. 307.

3.3. Rihmalevien kerääminen merestä ja sen kustannusarviot

Edellä päädyttiin siihen johtopäätelmään, että ajelehtivien rihmalevien pois kerääminen merestä on Saaristomerellä suositeltava toimenpide sisäisen kuormituksen hillitsemiseksi. Sen teknistaloudellinen toteutus voi kuitenkin olla haastavaa. Ajelehtivia rihmaleviä arvioitiin olevan kaikkiaan Saaristomerellä 55 000 t DW eli märkämpainona mitaten noin 450 000–500 000 tonnia ja sen sisältämä fosforivarasto on 146 tonnia. Saaristomerellä ajelehtivien rihmalevämattojen laajamittaisesta keräämisestä ei ole kokemusta. Rantoja todennäköisesti puhdistetaan jonkin verran eri puolilla Saaristomerta manuaalisesti ja kerätty biomassa pääosin kompostoidaan tms. omilla tonteilla, mutta tämän toiminnan laajuudesta ei ole tietoa. Kirjallisuudesta löytyy esimerkkejä muiden vesikasvien kuten vesiruton (*Elodea canadensis*) poiston tehokkuudesta järvillä ja keräämisen kustannuksista. Näitä tietoja voidaan hyödyntää arvioitaessa rihmalevien keräämisen kustannustehokkuuksia Saaristomerellä. Pitää kuitenkin muistaa, että täällä keräämisen haasteena on erityisen suuri rantaviivan pituus suhteessa pinta-alaan. Aluetta luonnehtii valtava topografinen monimuotoisuus, siihen kuuluu noin 30 000 saarta [2]. Ongelmana keräyksessä voi olla myös se, että huomattava osa kuolleesta rihmalevästä ilmeisesti painuu pohjaan, usein syvempään veteen, mistä sen löytäminen ja kerääminen voi olla hankalaa. Ennen painumistaan se ajelehtii pinnassa ja on helposti havaittavissa ja helpommin kerättävissä vain lyhyen aikaa kesässä. Pohjaan tai syvemmälle veteen painuneiden levämassojen etsimiseen on kuitenkin menetelmiä (esim. kaikuluotaus, tulevaisuudessa ehkä vedenalaiset droonit). Kerääminen syvemmältä on myös mahdollista mutta edellyttää menetelmien kehitystyötä. Laajamittaisen keräämisen suunnittelun yksityiskohtiin ei mennä tämän hankkeen puitteissa, mutta logistiikka ja sen kustannukset voivat olla ratkaisevia, kun arvioidaan toiminnan kannattavuutta (kuva 16).



Kuva 16. Erilaista vesikasvien poistoon ja kuljetuksiin tarvittavaa kalustoa.

<https://www.amphibousexcavator.com/>

Turun lähellä Littoistenjärvellä (155 ha, rantaviivan pituus noin 7 km) saatiin parhaimmillaan kerättyä vesiruttoa (*Elodea canadensis*) n. 700 tonnia (märkäpainona, 63 t kuivapainona) kesän 1998 aikana keräävällä niittokoneella [Aquatic Weed Harvester RS2000] [32]. Satoa saatiin talteen 4,5 t/ha (märkäpaino) tai 100 t/rantaviiva km. Vesiruton biomassan arvioitiin tuolloin olleen koko järven alueella noin 400 g m⁻² DW. Elodea-hankkeen loppuraportin mukaan [33] vesiruton kuiva-ainepitoisuus on noin 9 %. Littoistenjärvessä oli vesiruttoa kuivapainona mitaten 620 t tai märkäpainona noin 7000 t. Vesiruton fosforipitoisuus kesä–syyskuussa 1996–2001 oli 0,61 ± 0,06 % kuiva-aineesta [28]. Sarvalan ym. [32] mukaan vesiruoton biomassaan sitoutunut fosforimäärä Littoistenjärvessä huippuvuosina olisi ollut keskimäärin noin 2200 kg P, eli 22-kertainen verrattuna veteen varastoituneeseen fosforiin (97 kg) ja 27-kertainen sen ajan ulkoiseen kuormitukseen (82 kg vuodessa); vain sedimentin fosforivarasto oli suurempi. Näiden lukujen valossa on selvää, että vesirutto on ottanut juurillaan tarvitsemansa ravinteet sedimentistä.

Littoistenjärvellä saatiin vesiruton mukana poistettua fosforia järvestä kesän aikana yhteensä 427 kg (2,8 kg/ha tai 61 kg/rantaviiva km). Sarvalan ym. [32] mukaan vesiruton keruukustannukset olisivat v. 1998 olleet yhteensä 31 500 € eli 203 €/ha tai 45 €/t (märkäpaino). Fosforinpoiston yksikköhinnaksi tuli 74 €/kg. Vuonna 1992 vesiruttoa kerättiin Littoistenjärven rannoilta haravoimalla (kuva 17). Biomassa kuljetettiin keräyskeskukseen kompostoitavaksi. Näin saatiin kerättyä noin 500 tonnia biomassaa (märkäpainona) eli noin 3 t/ha. Sarvala ym. [32] mukaan kustannukset tuolloin olivat 13 500 €. Järvestä pois kerätyn fosforin hinta oli 49 €/kg.



Kuva 17. Vesiruton keräämistä Littoistenjärvellä. Kuva: Antti Puhakka, Kaarina-Lehti.

Littoistenjärvellä arvioitiin vesiruttoa olleen enimmillään noin 7000 t eli 400 g m^{-2} DW ja Saaristomerellä ajelehtivia rihmaleviä 55 000 t eli 34 g m^{-2} DW. Jos sadonkorjuun teho olisi suoraan verrannollinen biomassojen määrään, niin Saaristomerren rannoilta saataisiin talteen rihmalevää noin 0,4 t/ha (märkäpaino) ja kuivapainona 48 kg/ha. Sen sisältämä fosforimäärä olisi 125 g/ha. Littoistenjärvellä keruukustannus oli 203 €/ha. Sen mukaan Saaristomerellä rihmalevää keräämällä poistetun fosforin hinnaksi tulisi 1624 €/kg.

Mutta edellä olevassa laskelmassa oletetaan, että ajelehtivat rihmalevämatot olisivat jakautuneet tasaisesti pitkin rantaviivaa. Näin ei asia ole vaan paikoin rihmalevät ovat pakkautuneet hyvinkin tiiviiksi kasaumiksi (kuva 18). Dosentti Christoffer Boströmin tiedonannon (ÅA, 4.9.2025) mukaan heidän tutkimuksissaan Saaristomerellä (tutkittu alue 1042 km^2) on arvioitu ajelehtivia rihmalevämattoja olleen keskimäärin 25 g m^{-2} DW, mutta määrässä oli erittäin suurta ajallista ja alueellista vaihtelua välillä $0\text{--}500 \text{ g m}^{-2}$ DW. Irtonaista rihmaleväbiomassaa voisi siis paikoitellen olla jopa enemmän kuin Littoistenjärvellä oli parhaimmillaan vesiruttoa. Tällaisilla paikoilla sato voisi olla 5,6 t/ha (märkäpaino) eli kuivapainona 675 kg/ha ja kerätty massa sisältäisi fosforia 1,76 kg. Poistetun fosforin yksikköhinnaksi tulisi 116 €/kg.



Kuva 18. Kuollutta levämassaa Saaristomerellä kesäkuussa 2024.

Viitteet

32 Sarvala, J., Helminen, H. & Heikkilä, J. Invasive submerged macrophytes complicate management of a shallow boreal lake: a 42-year history of monitoring and restoration attempts in Littoistenjärvi, SW Finland. *Hydrobiologia* **847**, 4575–4599 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s10750-020-04318-7>

33 Karjalainen, S.M.; Välimaa A-L.; Hellsten, S.; ja Virtanen, E. (toim.). Vesiruton hyötykäyttö biotaloudessa – järvien riesasta raaka-aineeksi Elodea-hankkeen loppuraportti. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 17/2017.

3.4. Fosforin poiston vaikuttavuus- ja kustannusvertailu

3.4.1. Ruovikon poisto ja peltojen kipsikäsittely

Järviruokon niittämistä merialueilla perustellaan usein siten, että siinä saadaan samalla poistettua merestä rehevöittävää fosforia ja typpeä. Toisaalta valuma-alueen peltoja käsitellään kipsillä, jotta saataisiin niiden aiheuttama fosforikuormitus jokiin ja edelleen mereen väheneväksi. Hanke-esittelyn mukaan kipsikäsittelyn avulla Itämereen päätyvää fosforikuormitusta saadaan leikattua välittömästi ja alhaisin kustannuksin.

Ajosenpään [34] mukaan ruovikon poistossa leikkuun kustannukset vedessä kasvavan ruovikon ja pehmeöpohjaisen maaruovikon tai rantaniityn leikkaamiseen olivat hankkeen toteuttamisessa leikkuissa 600-1000 €/ha + alv. Hehtaarikohtaisiin hintoihin vaikuttivat muun muassa leikattavien kohteiden laajuus, välivarastopaikkojen määrä ja etäisyydet niihin. Vedessä kasvavan ruovikon niiton kustannukset ovat keskimäärin 700-1100 €/ha + alv. rannan varastopaikalle kuljetettuna ja nostettuna. Ajosenpään raportissa on esitetty koealakohtaisia mittaustuloksia järviruokon ravinne- ja metallipitoisuuksista vuodelta 2012. Niiden mukaan ruokon keskimääräinen fosforipitoisuus kesällä oli 0,14 % ka. ja talvella 0,03 % ka. Typpipitoisuus vastaavasti oli 1,63 % ka. ja 0,48 % ka.

Järviruokon biomassa-arvioissa (kg/ha) on paljon vaihtelua. Ajosenpää [34] käyttää laskelmissaan oletuksensa Saaristomerelle Komulaisen ym. [35] esittämää arviota 5 t kg ha⁻¹ ka. Väisäsen tutkielman [36] mukaan keskimääräinen järviruok'on märkäbiomassa koko tutkimusalueella oli 6,6 t kg ha⁻¹. Kuivapaino oli mittausten mukaan noin 50 % märkäpainosta, joten biomassa olisi ollut 3,3 t kg ha⁻¹ ka. Tutkimus tehtiin Paraisten kaupungin alueella. Tornikosken ym. [37] selvityksessä järviruok'on kuivabiomassan tuoton keskiarvo oli 6,6 t/ha, Vuosina 2005–2008 Ruovikkostrategia Suomessa ja Virossa -projektissa arvioitiin kuivabiomassoja pilottialueilla [38]. Hirvensalossa vaihtelu oli kuivabiomassoille keskimääräisesti 6–7 t/ha ja Salossa keskimääräisesti 5–6 t/ha. Virossa mitattiin vuosina 2006–2011 keskimääräinen 9,14 t/ha kesäaikainen ja 7,36 t/ha talviaikainen kuiva-ainetuotto [39]. Käytän laskelmissani biomassan estimaattia 5 t kg ha⁻¹ ka ja siitä johdettavaa järviruokon mukana poistuvan fosforin määrää 7 kg ha⁻¹.

Ruovikoiden määrästä Saaristomerellä ei ole olemassa tarkkaa tietoa. Sweco Oy:n ja Turun AMK:n raportin [40] mukaan ”ruovikoiden kokonaisvuosituotannoksi (pinta-ala noin 169 km²) on laskettu noin 164 000 tonnia, joka sisältää typpeä noin 2 500 tonnia ja fosforia noin 250 tonnia”. Lukujen alkuperää ei raportissa ole kerrottu. Ruovikoiden pinta-ala Saaristomerellä olisi tämän tiedon mukaan 16 900 ha ja tuotanto 9,7 t ha⁻¹. Ilmeisesti tuotannolla tarkoitetaan tässä yhteydessä kuiva-ainetta, koska silloin saadaan fosforipitoisuudella 0,15 % arvio ”sisältää fosforia noin 250 t”. Aiemman tiedon perusteella tämä järviruokon tuotantoarvio on noin puolet liian suuri, mutta arvioitu pinta-ala voi olla oikeansuuntainen. Ensimmäinen koeluontoinen yhteenveto Suomen rannikkoalueiden ruovikkopinta-aloista on tehty CORINE-satelliittiaineistojen perusteella vuosien 2006–2009 aineistoista. Ruovikoiden kokonaispinta-alaksi rannikolla arvioitiin noin 40 000 ha, kun otettiin huomioon merialueilla ja rannikolta enintään kilometrin sisämaahan sijaitsevat ruovikot. Varsinais-Suomessa ja Satakunnassa arvioitiin olevan tämän selvityksen mukaan ruovikoita yhteensä 13 169 ha [41]. Iksen ja Hagelbergin [38] mukaan Varsinais-Suomessa olisi arviolta 6 250 hehtaaria hyödynnettävää ruovikkoa.

Jos oletetaan, että Saaristomerellä olisi järviruokoa keskimäärin pinta-alalla 16 900 ha ja sen biomassa olisi 5 t kg ha⁻¹, olisi ruovikkoa kaikkiaan 84 500 t ka. ja noin 169 000 t mp. Sen sisältämä fosforivarasto olisi kesällä 118 t ja

typpisisältö 1377 t. Järviruokon keruukustannuksiksi rannan varastopaikalle asti arvioitiin 700–1100 €/ha eli 140–220 €/t. Fosforinpoiston yksikköhinnaksi tulee 100–157 €/kg.

Vuonna 2018 tehdyn tietopaketin mukaan [42] peltojen kipsikäsittelyn kustannus suhteutettuna sen kykyyn vähentää maatalouden fosforikuormitusta oli noin 60–70 euroa vähennettyä fosforikiloa kohti. Siinä arvioitiin, että fosforikuormituksen vähentämisessä nykyisten keinojen, kuten suojakaistojen ja kosteikkojen lisääminen tulisi selvästi kalliimmaksi. Professori Markku Ollikaisen tiedonannon mukaan (sähköposti 11.11.2025) AIN3-hankkeessa on päivitetty kipsikäsittelyn kustannusvaikuttavuusluvut. Kipsin kustannuksena on käytetty 10 €/t (KIPSI-hankkeesta) ja kipsikäsittelyn kokonaiskustannukset ovat 244 €/ha. Ne koostuvat seuraavasti: hankinta 40 €/ha, kuljetus 129 €/ha, levitys 30 €/ha ja muokkaus 46 €/ha. Kustannus vähennettyä fosforikiloa kohti riippuu vaikutuksen kestosta, joka voi olla 3–5 vuotta ja käsittelyn tehokkuudesta, joka voi olla 30–50 % [39].

Saaristomeren valuma-alueen peltojen huuhtoumaksi on esimerkiksi Vemala kuormitusmallissa arvioitu 1,3 kg P/ha/v. Jos kipsikäsittelyn vaikutusaika olisi 5 vuotta ja teho 50 %, kustannus vähennettyä fosforikiloa kohti olisi 75 €. Vastaavasti jos vaikutus olisi 3 vuotta ja teho 50 % tai vaikutus 5 vuotta ja teho 30 % kuten Savijoella [43], niin kustannus olisi 125 €/kg. Kallein hinta 209 €/kg tulisi, jos vaikutus olisi vain 3 vuotta ja teho 30 %.

Viitteet

- 34 Ajosenpää, T. Suunnittelulla ja ruo´on hyötykäytöllä tehokkuutta rantojen hoitoon - Tuloksia ja kokemuksia VELHO-hankkeesta. Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2014. Raportteja 55.
- 35 Komulainen, M.; Simi, P.; Hagelberg, E.; Ikonen, I. & Lyytinen, S. 2008. Reed energy – Possibilities of using the Common Reed for energy generation in Southern Finland. Reports from Turku University of Applied Sciences 67.
- 36 Väisänen, R. 2023. Järviruovikon (*Phragmites australis*) biomassan arviointi Sentinel 2 -satelliittikuvista. Pro Gradu -tutkielma. Turun yliopisto, Maantieteen laitos. 64 s + 2 liitettä.
- 37 Tornikoski J.; Piiparinen, N.; Norokytö, N. 2025. Järviruokobiomassojen kartoitukset. Turku AMK. Raportti 38 s.
- 38 Ikonen, I.; Hagelberg, E. 2007. Etelä-Suomen ruovikkostrategia. Esimerkkeinä Halikonlahti ja Turun kaupungin rannikkoalueet. Suomen ympäristö 9/2008. Lounais-Suomen ympäristökeskus.
- 39 Kask, Ü.; Kask, Livia. 2013. Reed as a renewable energy source. Equipment and technologies for using reed in energy industry. Teoksessa: Kask, Ü. (toim.). Guidebook of Reed Business. COFREEN – Reed for bioenergy and construction
- 40 Sweco Oy; Turku AMK. Ravinteiden käytön yleissuunnitelma Saaristomeren valuma-alueelle. Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 39 | 2014
- 41 Klemola, H.; Härjämäki, K.; Pihlaja, K. Opas ranta-alueiden monikäyttösuunnitteluun. Maaseutuverkoston esite. 76 s.
- 42 <https://blogs.helsinki.fi/save-kipsihanke/files/2018/11/SAVE-hankkeen-tietopaketti-kipsik%C3%A4sittelyst%C3%A4.pdf>
- 43 Ekholm, P.; Ollikainen, M.; Punttila, E.; Ala-Harja, V.; Riihimäki, J.; Kiirikki, M.; Taskinen, A.; Begum, K. Gypsum amendment of agricultural fields to decrease phosphorus losses – Evidence on a catchment scale. Journal of Environmental Management, 2024, 357,120706. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120706>

3.4.2. Toimenpiteiden vaikutusarviointi

Rihmalevien poisto merestä vs. valuma-alueella tehtävä fosforipoisto

Ajelehtivien rihmalevien poisto merestä vähentää suoraan sisäistä fosforikuormitusta, jonka osaksi rihmalevistä vapautuva fosfori muuten muuttuisi. Sisäisen kuormituksen vaikutus Saaristomerен ekologiseen tilaan on arvioitu merkittäväksi [2]. Sisäisessä kuormituksessa fosfori vapautuu sedimentistä liukoisessa muodossa (DIP) ja on siten suoraan leville käyttökelpoisessa muodossa. Kipsikäsittely vähentää valuma-alueen pelloilta jokiin ja mereen päätyvän fosforin määrää. Valuma-alueelta tulevan kuormituksen vaikutusalueen laajuus vaihtelee jokien koon, suurten jokisuiden sijainnin ja rannikon monimuotoisuuden mukaisesti [44]. Valuma-alueen kuormitus, erityisesti leville käyttökelpoisen fosforin (DIP) kuormitus, kohdistuu pääosin vain rajoitetulle vyöhykkeelle, Saaristomerellä sisäsaaristoon. Helmisen [2] mukaan jokikuormituksen fosforista 27,6 % on liukoisessa muodossa (DIP). Suomen Ympäristökeskus on arvioinut FICOS-rannikkomallilla huhti-elokuun ravinnevirroista eri kuormituslähteiden suhteellisia merkityksiä Suomen rannikkoalueilla, myös Saaristomerellä [F]. Liuenneiden pääravinteiden, typen ja fosforin, kuormituslähteiden suhteelliset osuudet laskettiin vertaamalla valuma-alueen kuormituksen, pohjasedimentistä tulevan sisäisen kuormituksen sekä avomereltä tulevan kuormituksen ja pistekuormittajien ravinnekuormituksia vesimuodostuman kokonaiskuormitukseen.

Taulukko 3. Jokikuormituksen (jokiK) ja sisäisen kuormituksen (sisäK) osuudet mallinnetuista kokonaiskuormituksista (TP = kokonaisfosfori; DIP = liukoinen fosfori) Saaristomerен eri vyöhykkeiden vesimuodostumissa. Sisäsaariston vesimuodostumien osuuksien keskiarvo = ss, välisaariston = vs ja ulkosaariston = us (kuva 15). Ratio = sisäisen kuormituksen ja Vemala-mallilla lasketun jokikuormituksen välinen suhde. Jos esimerkiksi Ratio = 2,7, niin sisäisen kuormituksen osuus tai merkitys on 2,7 kertaa suurempi kuin jokikuormituksen. Lähteenä L1 taulukko 2 [44].

TP

	jokiK	sisäK	Ratio
ss	0,34	0,34	1
vs	0,09	0,24	2,7
us	0,02	0,11	5,5

DIP

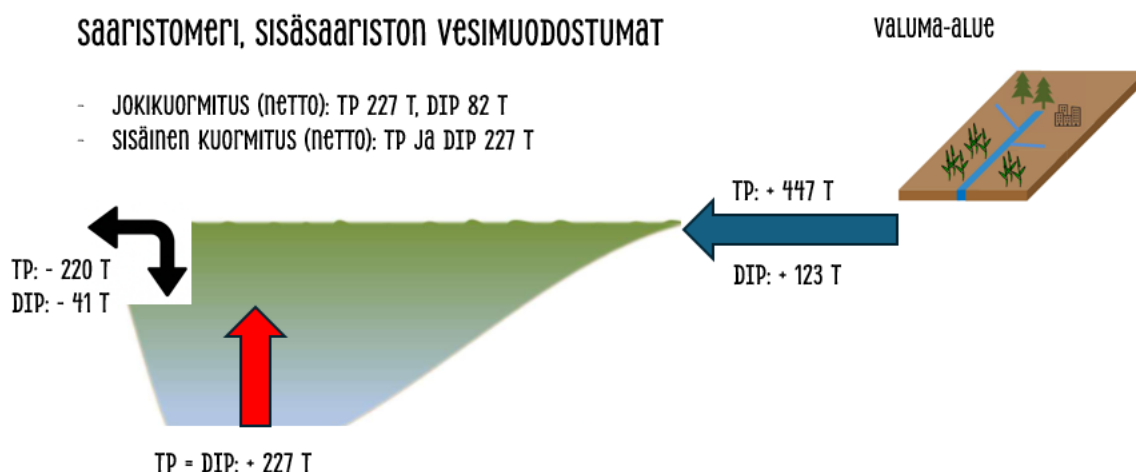
	jokiK	sisäK	Ratio
ss	0,18	0,50	2,8
vs	0,04	0,35	8,8
us	0,01	0,18	18

Taulukko 4. Saaristomerен mantereen puoleisten vesialueiden pinta-alat. Lähde: [2]

Vyöhyke	Pinta-ala (km ²)
Sisäsaaristo	679
Välisaaristo	1280
Ulkosaaristo	4232

Kuten mallinnustulosten yhteenvedosta (taulukko 3) ilmenee sisäisen kuormituksen osuus suhteessa jokikuormitukseen kasvaa mitä ulommas Saaristomerelle mennään. Saaristomerен sisäsaaristossa sisäisen kuormituksen ja jokikuormituksen osuudet kokonaisfosforikuormituksesta on arvioitu yhtä suuriksi. Helmisen [2] mukaan Saaristomerен jokien tuoma kokonaisfosforikuormitus on vuosina 2000–2023 ollut keskimäärin 447 t/v. Jokikuormituksen fosforista pääosa on sitoutunut kiintoaineeseen, josta osa laskeutuu pohjalle merivedessä. Näin ollen kaikki jokiveden mukana tuleva fosfori ei siirry purkuvesistön vesivarastoon, ja osa kulkeutuu virtausten mukana ulompiin vesimuodostumiin (kuva X). Jokikuormituksen fosforista 27,6 % on liukoisessa eli leville käyttökelpoisessa muodossa (DIP) [2].

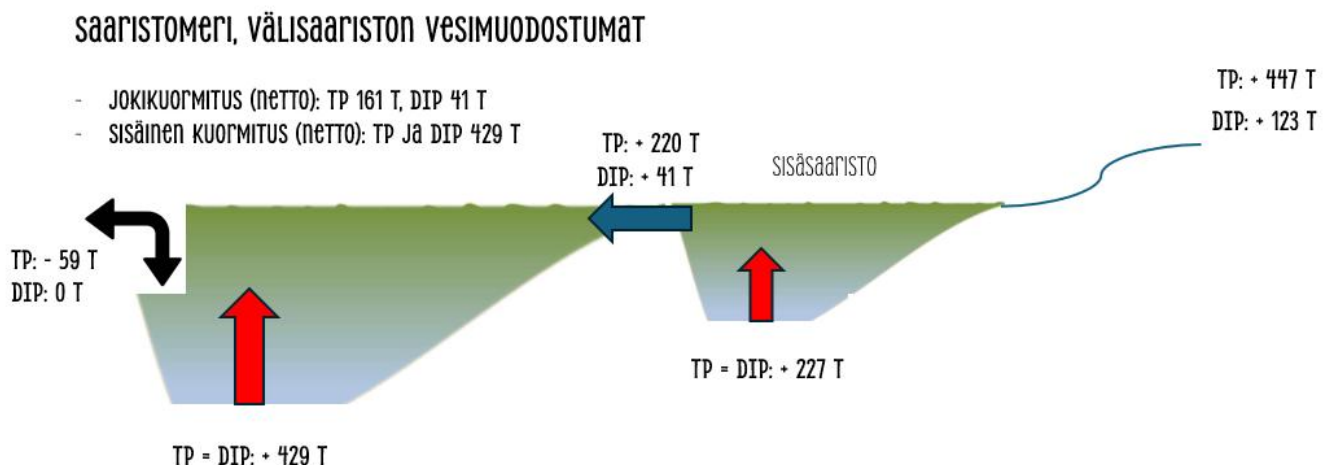
Tässä yhteydessä sisäisen kuormituksen arvioina eri vyöhykkeissä pitää käyttää FICOS-mallin [45] lähtötietoja, koska taulukon 3 osuudet on sillä mallilla laskettu. FICOS-mallissa sisäisen kuormituksen suuruuden arvioitiin olevan kasvukaudella (huhti-syyskuu) 2402 t, josta 1220 t päätyi pintakerrokseen (0–10 m). Mallinnetun alueen suuruus Saaristomerellä oli 7177 km². Alueellista sisäisen kuormituksen jakaumaa ei raporteissa ole esitetty. Oletetaan, että sisäinen kuormitus jakautuu tasaisesti. Silloin sen suuruus olisi 0,335 t km⁻² (g m⁻²) yhteensä ja pintakerrokseen päätyvä määrä 0,17 t km⁻². Sisäsaaristovyöhykkeen pinta-ala Saaristomerен mantereen puolella on 679 km², joten siellä sisäisen kuormituksen suuruus olisi 227 t. FICOS-mallin arvioitu sisäisen fosforikuormituksen määrä eroaa huomattavasti Helmisen [2] laskennallisesta nettoarviosta.



Kuva 19. Saaristomerен sisäsaariston vesimuodostumien fosforikuormituksen (TP kokonaisfosfori, DIP liukoinen fosfori) osiot tuotantokaudella huhti-elokuussa. Jokien mereen tuomasta kokonaisfosforikuormituksesta (447 t/t), jää sisäsaariston vesifaasiin 227 t, koska osa on kulkeutunut ulommas tai sedimentoitunut. Tästä

muodostuu sisäsaaristoon samansuuruinen nettokuormitus kuin sisäisestä kuormituksesta. Jokikuormituksessa kokonaisfosforista on 27,6 % liukoisessa muodossa. DIP nettokuormitus (82 t) on laskettu taulukon 3 tiedoista.

SAVE-hankkeessa arvioitiin, että jos Saaristomeren valuma-alueella 115 000 ha peltoja käsitellään kipsillä, saataisiin vähennettyä kokonaisfosforikuormitusta 100 t/v [46]. Tämä olisi 22 % kokonaisfosforin vähennys jokien mereen tuomaan kuormitukseen (447 t). Taulukon 3 mukaan jokikuormituksen osuus sisäsaariston fosforin (TP) kokonaiskuormituksesta on 34 %, sama kuin sisäisen kuormituksen osuus. Sisäsaariston kokonaiskuormitukseen saadaan siis samansuuruinen vaikutus, jos jokikuormitusta vähennetään 22 % (100 t) kuin jos sisäistä kuormitusta vähennetään 22 % eli 50 t (0,22 x 227 t). Tämä johtuu siis siitä, että jokikuormituksesta noin puolet kulkeutuu ulommas saaristoon, mutta sisäisten ravinnevarastojen vähentäminen kohdistuu sisäsaaristoon kokonaan. Sisäisen kuormituksen vähentäminen olisi sisäsaaristossa kaksi kertaa vaikuttavampaa kuin valuma-alueen toimenpiteet.



Kuva 20. Saaristomeren välisaariston vesimuodostumien fosforikuormituksen (TP kokonaisfosfori, DIP liukoinen fosfori) osiot tuotantokaudella huhti-elokuussa. Jokien mereen tuomasta kokonaisfosforikuormituksesta (447 t/t), jää välisaariston vesifaasiin 161 t, koska osa on jo jäänyt sisäsaariston, osa sedimentoituu ja osa kulkeutuu ulommas. Jokikuormituksessa kokonaisfosforista on 27,6 % liukoisessa muodossa. Sisäsaariston läpi välisaaristoon kulkeutuu arviolta alun perin jokikuormituksesta peräisin olevaan liukoista fosforia noin 40 t.

Välisaaristossa sisäisen kuormituksen osuus (429 t, 24 %) kokonaiskuormituksesta on mallinnuksen mukaan noin 2,7 kertaa suurempi kuin jokikuormituksen osuus (netto 161 t, 9 %). Valuma-alueella tehty 22 % vähennys fosforikuormitukseen (100 t) pienentäisi kokonaiskuormitusta välisaariston vesimuodostumissa enää vain 2 %. Samansuuruinen vaikutus saataisiin aikaan vähentämällä sisäistä kuormitusta 8,25 %. FICOS-mallin lähtötietojen ja välisaariston pinta-alan (taulukko 4) mukaan laskettuna sisäisen kuormituksen määrä olisi kaikkiaan 429 t ja siitä pintakerrokseen päätyisi 218 t. 8,25 % vähennys olisi koko sisäisestä kuormituksesta 35,4 t. Samaan vaikutukseen (2 % vähennys kokonaisfosforikuormituksessa) tarvittavien vähennysten suhde, jokikuormitus valuma-alueella 100 t vs. sisäinen kuormitus välisaaristossa 35,4 t, on 2,8.

Ulkosaaristossa sekä jokikuormituksen, että sisäisen kuormituksen merkitys on jo niin pieni, että paikallisten kuormitusten vähentämistoimenpiteiden vaikutukset jäävät siellä vähäpätöisiksi. Mallinnusten mukaan ulkosaaristossa muilta merialueilta tulevan fosforikuormituksen osuus kokonaiskuormituksesta on noin 86 % [44]. Sisäsaaristossa muun merialueen vaikutus on 30 % ja välisaaristossa 67 %.

Suhteelliset erot kasvavat huomattavasti eri vyöhykkeissä, kun tarkastellaan liukoisen fosforin (DIP) eli leville käyttökelpoisen fosforifraktion kuormituksen osuuksia (taulukko 3). Sisäsaaristossa sisäisen kuormituksen (DIP) osuus kokonaiskuormituksesta on 2,8 kertaa suurempi kuin jokikuormituksen (18 %). Välisaaristossa sisäisen kuormituksen (DIP) osuus kokonaiskuormituksesta (35 %) on 8,75 kertaa suurempi kuin jokikuormituksen osuus (4 %). Valuma-alueella tehty 100 t fosforikuormituksen vähennys (22 %) pienentäisi liukoisen fosforinkokonaiskuormitusta välisaariston vesimuodostumisissa 0,9 %. Sama vaikutus saataisiin aikaan vähentämällä sisäistä kuormitusta 2,6 % eli 11 t. Samaan vaikutukseen tarvittavien vähennysten suhde (jokikuormitus 100: sisäinen kuormitus 11) on 9,1.

Viitteet

44 Fleming, V.; Kuosa, H.; Hoikkala, L.; Räike, A.; Huttunen, M.; Miettunen, E.; Virtanen, E.; Tuomi, L.; Nygård, H.; Kauppila, P. Rannikkovesiemme vedenlaadun ja rehevöitymistilan tulevaisuus ja sen arvioiminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021, 14. Available online: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162906>

45 Lignell, R.; Miettunen, E.; Tuomi, L.; Ropponen, J.; Kuosa, H.; Attila, J.; Puttonen, I.; Lukkari, K.; Peltonen, H.; Lehtoranta, J.; et al. Rannikon Kokonaiskuormitusmalli: Ravinnepäästöjen Vaikutus Veden Tilaan—Kehityshankkeen Loppuraportti (XI 2015–VI 2018); Finnish Environment Institute: Helsinki, Finland, 2019.

46 Ekholm, P. https://blogs.helsinki.fi/save-kipsihanke/files/2022/10/SAVE2-kipsihanke-jatkoseurannan-tulosten-julkistus-19.10.2022_Esitykset.pdf

Järviruo'on ja kalabiomassan poisto

Järviruokon sisältämäksi fosforimääräksi arvioitiin edellä 7 kg ha^{-1} ja koko Saaristomeren alueella ruovikon sisältämä fosforivarasto olisi kesällä 118 t. Koska järviruoko ottaa pääosan sen tarvitsemasta fosforista ja tyypestä juurillaan pohjasta [47], ruovikon fosforivarasto suhteutetaan Saaristomeren sedimentin fosforivarastoon. Saaristomeren pintasedimentissä on fosforia arvioitu olevan yhteensä 19 856 tonnia [9]. Järviruokon arvioitu fosforivarasto on siitä 0,6 %. Järviruokoa poistamalla ei saada aikaan suoria vedenlaatuvaikutuksia. Pitkän ajan kuluessa toistuvat niitot voivat toki kuluttaa rantavyöhykkeen sedimentin ravinnevarastoja, jonka suuruutta ei ole tarkemmin arvioitu. Ajosenpään raportissa [34] oli mitattu ruovikoiden sedimenteistä fosforipitoisuuksia, jotka olivat keskimäärin $790 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (vaihteluväli $500\text{--}1300 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$). Mitatut fosforipitoisuudet olivat selvästi suuremmat kuin Puttosen [48] tutkimuksissa Saaristomeren pintasedimenteissä keskimäärin, $481 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ ja lähes kahdeksankertaiset syvemmällä olevaan (yli 10 cm) taustapitoisuuteen, $111 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$, verraten. Ruovikkoalueiden tiedetään toimivan hyvin maalta tulevien ravinteiden pidättäjänä. Ruovikon harvennuksen pääasialliset hyödyt tulevat esimerkiksi virkistyskäytön parantumisena tai rantojen monimuotoisuuden lisääntymisenä [35,39].

Kalojen osuus fosforin kierrosta meriekosysteemeissä on pieni. Planktoneliöstön merkitys on ratkaiseva, koska niiden elinkierto on lyhyempi ja ravinteiden kierrätys paljon tehokkaampaa kuin kalojen. Sekä planktonia syövät kalat, että niiden saaliseläimet ja kasviplankton kierrättävät ravinteita, jotka ovat jo valmiiksi vesipatsaassa.

Kalojen biomassaan sitoutuneiden ravinteiden poistamisella ei ole suoraa vaikutusta Saaristomeren rehevöitymiseen [9]. Rehevöitymistä säätelee ensisijaisesti ulkoisten ja sisäisten ekosysteemitekijöiden yhdistelmä, erityisesti keskeisten ravinteiden saatavuus. Jos Saaristomeren kaloja ei pyydettäisi, ne lopulta kuolisivat ja vajoisivat merenpohjaan, missä niiden sisältämät ravinteet joko kartuttaisivat sedimentin fosforivarantoa tai tulisivat pohjaeläinten käyttöön. Helmisen [9] laskelmien mukaan vuosina 1980–2023 silakan kalastuksen arvioidaan poistaneen noin 139 tonnia fosforia vuodessa. Jos tämä fosfori olisi jäänyt Saaristomereen, se olisi lisännyt sedimentin ja vesipatsaan yhteenlaskettua fosforivarastoa noin 0,6 %/v.

Viitteet

47 Romero, J. A.; Brix, H.; & Comín, F. A. Seasonal variations in *Phragmites australis* growth and nutrient uptake in a Mediterranean wetland. *Aquatic Botany*, 1999, 64(2), 105–116.

48 Puttonen, I.; Lukkari, K.; Miettunen, E.; Ropponen, J.; Tuomi, L. Estimating internal phosphorus loading for a water quality model using chemical characterisation of sediment phosphorus and contrasting oxygen conditions. *Sci. Total Environ.* 2024, 942, 173717.

3.4.3. Toimenpidesuosituksia

Rannikkovesien hyvän tilan saavuttamisen ja ylläpitämisen mahdollistava maksimikuormitus, ns. kuormituskatto, on määritetty vesienhoidollisten toimenpiteiden suunnitteluun ja vaikutusten arviointiin kehitetyn rannikon kokonaiskuormitusmallin [49] avulla Saaristomerelle. Myös merenhoitosuunnitelmassa on asetettu väliaikaisia vähennystavoitteita. Mallinnuksen perusteella on arvioitu, että Saaristomerellä tarvitaan 68 % kuormitusvähennys kokonaistypessä ja -fosforissa, jos tavoitteena on hyvä/erinomainen tila väli- ja ulkosaaristossa sekä tyydyttävä/hyvä tila sisäsaaristossa [49]. Kattoja laskettaessa ilma- ja ympäristö- ja merialueilta tulevan kuormituksen oletettiin vähenevän 50 %, mikä raportin [49] mukaan vastaa HELCOM kuormituskatoilla saavutettavaa tasoa. Sisäisen kuormituksen oletettiin mallissa vähenevän samassa suhteessa valuma-alue- ja pistekuormituksen kanssa.

Esitettyyn kuormituskattoon Saaristomerellä on käytännössä mahdoton päästä nykyisillä kansallisilla toimenpiteillä, jotka kohdistuvat lähinnä vain valuma-alueelta tulevan fosforin vähennyksiin. Taulukon 3 mukaan nähdään, että vaikka jokien tuoma fosforikuormitus loppuisi kokonaan, välisaariston vesimuodostumien kokonaisfosforin kokonaiskuormitus nykytilanteessa alenisi vain 9 % (liukoisen fosforin kuormitus 4 %). Sisäisen kokonaisfosforikuormituksen osuuden välisaaristossa on FICOS-mallilla laskettu olevan 24 % (liukoisen fosforin 35 %). Välisaariston ekologisen tilan paraneminen edellyttää myös sisäisten ravinnevarastojen vähentämistä. Ajelehtivien rihmalevien ja niihin sitoutuneen fosforin kerääminen pois merestä on tämän selvityksen perusteella yksi varteenotettava vaihtoehto, ja täydentäisi valuma-alueella tehtävää peltojen kipsikäsittelyä ja muita vesiensuojelutoimenpiteitä.

Kun pelloilta tulevaa fosforikuormitusta vähennetään, alenee kokonaiskuormitus eniten sisäsaaristossa, mutta vaikutukset näkyvät myös välisaaristossa vaikkakin laimeampana (taulukko). Ajelehtivien rihmalevämattojen alueellisesta jakaumasta ei ole tarkkoja tietoja käytettävissä, mutta yleisesti ottaen rihmaleväbiomassat jäävät alhaisiksi sisäsaaristossa, jossa veden sameus rajoittaa niiden kasvua ja niiden vaatimaa kiinteää kasvualustaa on suhteellisesti vähemmän kuin ulompana. Kipsikäsittelyssä fosforin poiston hinnan on arvioitu halvimmillaan olevan 75 €. Rihmalevälauttojen keräämisen kokonaiskustannukset todennäköisesti ovat selvästi tätä

suurempia, vaikka optimioloissa voitaisiin merestä nosto toteuttaa suunnilleen samalla hinnalla kuin kipsillä. Sisäsaariston vesimuodostumien tilaa kannattaa yrittää parantaa peltojen kipsikäsitteilyllä.

Jos peltojen kipsikäsitteilyllä Saaristomeren valuma-alueella saataisiin aikaan kokonaisfosforin vähennys 100 t/v eli noin 22 %, sen hinnaksi tulisi 7,5 milj. €. Toteutuessaan sisäsaariston vesimuodostumissa kokonaisfosforikuormitus alenisi tällöin 7,5 % ja DIP 4 % sekä välisaaristossa TP 2 % ja DIP 0,9 % (taulukko 3). Jos sama summa sijoitettaisiin välisaaristossa rihmalevien poistoon olettaen, että niiden fosforinpoisto maksaisi saman verran kuin kipsikäsitteilyssä, kokonaisfosforikuormitus alenisi 5,6 % ja DIP 8,2 %.

Toimenpiteiden kohdentaminen riippuu olennaisesti siitä, mitä osaa Saaristomereä halutaan parantaa. Vaikka sisä- ja välisaariston hyvän ekologisen tilan saavuttaminen ei paikallisilla toimenpiteillä onnistuisi tai on hidasta, voidaan rihmalevien poistolla meren tilan paranemista nopeuttaa. Vuosina 2020–2024 Saaristomeren valuma-alueella on peltoja kipsikäsitelty yhteensä 27 000 ha. Käsitteilyn vaikutuksena fosforikuormitus on vähentynyt keskimäärin 12,7 t/v [50].

Viitteet

49 Fleming, V.; Berninger, K.; Aikola, T.; Huttunen, M.; Iho, A.; Kuosa, H.; Niskanen, L.; Piiparinen, J.; Räike, A.; Salo, M.; et al. Rannikkovesien Ravinteiden Kuormituskatot ja Kuormituksen Vähentämisen Keinoja: Loppuraportti; Valtioneuvoston Selvitys- ja Tutkimustoiminnan Julkaisusarja: Helsinki, Finland, 2023

50 https://www.ely-keskus.fi/kipsinlevitys/ajankohtaista-ja-tapahtumia/-/asset_publisher/kqPhEm2ygdeC/content/kipsi-hankkeen-levitystavoite-l%C3%A4henee-kovaa-vauhtia-kuormitusta-v%C3%A4hennetty-jo-110%E2%80%AFtonnia-vuosien-2020-2024-v%C3%A4lisen%C3%A4-aikana

3.5. Kansalaisten aktivointi rihmalevämassojen keräämiseen

Osana hanketta suunniteltiin rihmalevä mobiilisovelluksen rakenne ja sisältö ja laadittiin tekstit ja koottiin sopivat valokuvat (liite 3). Mobiilisovelluksen tavoitteena on innostaa ja opastaa ranta-alueiden käyttäjiä keräämään kuollutta rihmalevää ja hyödyntämään sitä ja kierrättämään sen sisältämiä ravinteita esimerkiksi kompostoimalla. Sovellus tarjoaa tiiviissä muodossa tietoa rihmalevistä ja niiden merkityksestä rannikkovesien ekosysteemissä, kertoo mistä rihmalevät tunnistaa, miten ne eroavat muista levistä ja vesikasveista ja miltä kuollut rihmalevä näyttää. Sovelluksessa on runsaasti valokuvia, jotka auttavat levien ja kuolleen rihmalevän tunnistamisessa ja elävöittävät sovellusta. Keskeinen osa sovellusta ovat ohjeet levän keräämiseen ja kompostointiin ja hyötykäyttöön. Varsinaista toimivaa sovellusta ei tässä hankkeessa tehty, vaan se on tarkoitus liittää osaksi Nexamassin valmistelemaa biomassan keräyssovellusta ja -alustaa, tai toteuttaa osana ACWA LIFE Actions for Waters From Source to Sea -hanketta [51].

Sovelluksen keskeiset toiminnot ja sisältö:

- **Tietoa rihmalevistä:** mitä rihmalevät ovat, mistä ne tunnistaa, miltä kuollut rihmalevä näyttää, mikä on rihmalevien rooli ekosysteemissä ja miksi ne ovat runsastuneet.
- **Keräysohjeet:** ohjeet levän keräämiseen rannalta ja vedestä, tarvittavat välineet, turvallisuusohjeet sekä luonnon huomioiminen.

- **Hyötykäyttö:** kompostointiohjeet ja vinkit levän jatkokäsittelyyn. Sovellus korostaa ravinteiden kierrättämistä ja mm. varoittaa raskasmetallien mahdollisesta kertymisestä.
- **Karttatoiminto:** tavoitteena innostaa levän keräämiseen ja pyytää apu levän keräämiseen. Käyttäjät voivat merkitä kartalle paikat, joissa levää on ja paljonko levää on kerännyt, ilmoittaa talkoista ja seurata levänkeräyksen edistymistä.
- **Yhteisöllisyys:** mahdollisuus jakaa kuvia ja kokemuksia sekä saada lisätietoa aiheesta linkkien kautta.

Sovellus tukee hankkeen päätavoitteita: vähentää rihmalevän aiheuttamia haittoja, parantaa rantavesien virkistyskäyttöä ja edistää ravinteiden poistamista merestä. Samalla se tarjoaa konkreettisen työkalun, jolla tavalliset ihmiset voivat parantaa rantansa viihtyisyyttä ja virkistyskäyttöarvoja ja samalla osallistua merialueen tilan parantamiseen.

Viitteet

51 <https://ym.fi/en/-/significant-eu-funding-to-acwa-life-project-to-improve-status-of-waters-in-finland>

3.6. Rihmalevämassojen mahdollinen hyötykäyttö ja kierrätys

Rihmalevillä on runsaasti potentiaalisia käyttökohteita. Esimerkiksi *Cladophora* -suvun rihmaleviä voidaan käyttää kasvien kasvun tehosteina, hiilihydraattien, vitamiinien, rasvahappojen, proteiinien, hivenaineiden ja biologisesti aktiivisten yhdisteiden lähteenä, kosmetiikka-, kemian- ja lääketeollisuudessa, sekä lannoitteiden ja rehujen lähteenä ja raaka-aineena [52, 53]. Hyötykäyttö- ja kierrätysmahdollisuudet vaihtelevat riippuen levälajista ja sen ominaisuuksista. Rihmalevillä on huomattava potentiaali myös bioenergian lähteenä (bioetanol, biokaasu, biovety, biodiesel, bioöljyt) [54, 55] ja kompostoidulla rihmalevällä maanparannusaineena [56]. Rihmalevien kasvatusta on tutkittu myös potentiaalisena jätevedenpuhdistusmenetelmänä (ravinteiden ja raskasmetallien poisto) [57] ja ravinteiden sitomiseen ja poistamiseen merestä [58].

Kuolleen levämassan koostumus vaihtelee yleensä enemmän kuin elävän levän riippuen mm. missä vaiheessa hajoamista kuollut levä on. Kuollut levämassa voi koostua useista levä- ja vesikasvilajeista ja sisältää epäpuhtauksia ja roskia, mikä myös vaikeuttaa sen hyötykäyttöä. Tämä voi rajoittaa kuolleen rihmalevän käyttömahdollisuuksia korkean jalostusteen tuotteisiin. Kuolleen rihmalevämassa sopii kuitenkin hyvin mm. bioenergian tuotantoon, maanparannusaineeksi ja lannoitteeksi sekä biohiilen raaka-aineeksi.

Seuraavassa tarkastellaan kuolleen rihmalevämassan hyötykäyttö- ja kierrätysmahdollisuuksia.

3.6.1. Biokaasu

Rihmalevän käyttöä biokaasun tuotannossa on varsin vähän selvitetty Itämeren alueella [26]. Zagorskis ym. tutkimuksessa oli hankittu aineistoa Asovanmereltä (Mustameren lahti), jonka rannoille ajautuu paljon makroleviä (mm. *Enteromorpha intestinalis* ja *Phaeophyceae sp.*) ja Šventoji joelta (Liettua), jossa esiintyy

viherahdinpartaa (*Cladophora glomerata*) [54]. Tutkimuksen mukaan makrolevät ja vesikasvit voivat olla erinomaista raaka-ainetta biokaasun tuotantoon. Sekoittamalla niitä rinnakkaissubstraatteihin, kuten naudon lantaan, voitiin saavuttaa korkeampia biokaasu- ja metaanituottoja. Tästä selvityksestä ei kuitenkaan käynyt ilmi, kuinka kallista rihmaleivistä tuotettu biokaasu olisi. *Cladophoran glomeratan* metaanintuotoksi oli tutkimuksessa mitattu 256,9 mL CH₄/g VS. Jos oletetaan, että rihmalevän kuiva-ainepitoisuus (TS) olisi 10 % ja biokaasun hinta 2,2 €/kg CH₄, ja että VS ≈ TS (eli koko kuiva-aine on orgaanista), saadaan biokaasun myyntiarvoksi 0,405 €/kg VS. *Cladophora*-rihmalevää tehtävästä biokaasusta saatava hinta olisi siis 40,5 €/t märkäpaino. Biokaasun arvo kasvaa lineaarisesti kuivapainon osuuden noustessa. Littoistenjärvellä 1990-luvulla vesiruton koneelliset keräämiskustannukset olivat 45 €/t mp. Rihmalevien keräämisessä merialueella voidaan optimioloissa päästä lähelle samaa, mutta vain teoriassa. Pelkät rihmalevien keruukustannukset todennäköisesti jo ylittävät siitä biokaasutuksessa saatavan tuoton.

SYKE on tutkinut Suomessa vesiruton (*Elodea canadensis*) hyötykäyttöä biotaloudessa [33]. Vesiruton käyttöä biokaasutuksessa rajoittaa sen suurehko vesipitoisuus (noin 90 %). Tämä vaikuttaa niin biomassan varastointiin kuin kuljetuksiinkin. Biokaasutuksen edistämiseksi tulisi erilaisia massan kuivausratkaisuja kehittää siten, että massan kuiva-ainepitoisuus olisi kuivauksen jälkeen 20–30 %. Syötemateriaalin kuiva-ainetavoite liittyy lähinnä varastointiin ja kestäväntiin, ei itse mädätysprosessiin. Biokaasutus ns. märkäprosessina edellyttää, että syötteen kuiva-ainepitoisuus on maksimissaan 10 %, kuitenkin mieluummin alle tämän.

SYKE:n selvityksen [33] mukaan keskeinen kysymys vesiruton biokaasutuksessa on materiaalin varastointi, kuten yleensäkin energiakasvisyötteillä. Kasvin korjuuaika on lyhyehkö ja haluttaessa sen laajempaa hyödyntämistä biokaasutuksessa, on se voitava varastoida pidemmäksi ajaksi. Pidempiaikaisessa varastoinnissa tapahtuu orgaanisen aineen hävikkiä, mikä pitäisi minimoida. Syötteen korjuu, kuivaus ja varastointi pitäisi suunnitella kokonaisuutena, joka palvelee biokaasuprosessin tarpeita.

Tulokset ovat kuitenkin vesiruton osalta olleet rohkaisevia, vesirutto on biokaasuprosessiin sopiva syötemateriaali. Kaasun saanto vesirutosta on ollut hyvä, sillä arvot ovat korkeampia kuin useille muille orgaanisille jakeille, joita hyödynnetään laajasti biokaasuprosesseissa [33].

3.6.2. Muu hyötykäyttö

Rihmaleviä voidaan kompostoida tai käyttää biokaasun valmistuksessa syntyvää mädätysjäännöstä lannoitteena. Näissä investointitarve on alhainen, jos toiminta yhdistetään nykyisiin kompostointiketjuihin. Kompostoinnin taloudellinen potentiaali on rajallinen ja hyöty lähinnä paikallinen. Ympäristöhyötynä on rihmalevien sisältämien fosforin ja typen kierrätys sekä maaperän parantaminen. Riskinä ja käyttöä rajoittavana tekijänä ovat kuitenkin levän mahdollisesti sisältämät raskasmetallit ja muut haitalliset aineet [57].

Myös eläinrehun lisäaineeksi voidaan käyttää rihmalevien biomassaa [46, 47]. Se edellyttää esikäsitteilyä, johon sisältyy kuivaus ja jauhaminen. Investointitarve ja taloudellinen potentiaali on arvioitu kohtalaiseksi. Haasteena on rehun ravintoarvon ja turvallisuuden varmistaminen (mahdolliset haitalliset aineet) [57]. Ympäristöhyötynä olisi tuontirehun osittainen korvaaminen.

Biohiilen valmistus pyrolyysillä on yksi käyttötapa, jolle on kasvava markkina hiilensidonnassa. Sen haasteena on suuri energian tarve ja logistiikka. Ympäristöhyötynä saadaan lisättyä hiilen sidontaa ja parannetaan maaperän kuntoa.

Perusoletuksilla arvioituna kaikki edellä mainitut kuolleen rihmalevän hyötykäytön vaihtoehdot ovat enemmän tai vähemmän taloudellisesti ja kaupallisesti tappiollisia, koska kaikkia ympäristöhyötyjä on vaikea mitata rahassa. Ongelmana on rihmalevien hyvin matala energiasisältö/kuiva-ainepitoisuus ja korkea vesipitoisuus. Siitä koituu haasteita erityisesti tarvittavalle logistiikkaketjulle ja esikäsittelylle.

Viitteet

- 52 Prazukin, A.V.; Anufrieva, E.V.; Shadrin, N.V. Biomass of Cladophora (Chlorophyta, Cladophorales) is a promising resource for agriculture with high benefits for economics and the environment. *Aquaculture International*, **2024**, 32, 3637–3673. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01342-x>
- 53 Craigie, J.S. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *J Appl Phycol*, **2011**, 23, 371–393. DOI 10.1007/s10811-010-9560-4
- 54 Zagorskis, A.; Gotovskiene, A.; Monin, V. Quality Assessment of Biogas-Producing Macroalgae from Azov Sea and Šventoji River. *Sustainability* 2023, 15, 14542. <https://doi.org/10.3390/su15191454>
- 55 Sharma, P.; Sharma, N. Industrial and Biotechnological Applications of Algae: A Review. *Journal of Advances in Plant Biology*. 2017, 1(1), 01-25. <https://doi.org/10.14302/issn.2638-4469.japb-17-1534>
- 56 Vijaya S. 2025. Algae in agriculture and environmental innovation. *European Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*. Vol 12 Issue 4: 1-192.
- 57 Liu, J.; Pemberton, B.; Lewis, J.; Scales, P.J.; Martin, G.J.O. Wastewater treatment using filamentous algae - A review. *Bioresour Technol*, 2020, 298, 122556. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122556.
- 58 Suutari, M.; Leskinen, E.; Spilling, K.; Kostamo, K.; Seppälä, J. Nutrient removal by biomass accumulation on artificial substrata in the northern Baltic Sea. *J Appl Phycol*, 2017, 29, 1707–1720. DOI 10.1007/s10811-016-1023-0

3.6.3. Kierrätyksen toimintamalli

Järviruokon hyödyntämisen ja kierrätyksen edistämiseksi on valmisteilla toimintamalli, jota sen kehittäjä Nexamass Oy kutsuu *biomassifikaatioksi* [59, liite 3]. Sillä tarkoitetaan taloudellisesti kannattavaa ja laajennettavissa olevaa menetelmää biomassan korjuuseen ja jalostamiseen. Nexamassin mukaan luomalla keruun, tuotannon ja teollisten ostajien muodostama klusteri voidaan rakentaa toimivan markkinapaikka biopohjaisille raaka-aineille. Nexamassin toimintamalli vaikuttaa sopivalta myös rihmalevien kierrätykseen ja sen hyödyntäminen myös rihmalevien kierrätykseen olisi taloudellisesti edullinen ratkaisu suurempien rihmaleväemäärien kierrättämiseen ja hyökykäyttöön. Hankkeen yhteydessä olemmekin useaan otteeseen keskustelleet Nexamassin edustajien (Pär Mickos, Altti Kelttinen) kanssa ja ideoineet kuinka saataisiin myös rihmalevät mukaan osaksi kyseistä tuotantoketjua. Toimintamallin on tarkoitus valmistua lähiaikoina.

Vesiruton käytön selvityksessä yhtenä haasteena nähtiin sen korkea vesipitoisuus, joka on samansuuruisia kuin muillakin vesikasveilla ja levillä. Biomassification-mallin mukaan rihmalevää koottaisiin keruupisteisiin altaisiin, joissa on esimerkiksi sellainen verkkopohja, jonka läpi vesi pääsee valumaan maahan. Maan vetovoima kuivattaa siis levämässän ja vaikutusta voitaisiin lisätä asettamalla varastoaltaisiin liukuva kansi lisäpainoilla, joka painaisi levämässän yhteen puristaen veden vielä tehokkaammin pois. Massan tulevan käyttötarpeen

mukaan saadaan lisätietoa optimaalisesta kosteusprosentista.

Taulukko 5. Nexamass Oy, BIOMASSIFICATION-alustan kuvaus.

-
- A) Maanomistaja rekisteröi itsensä, yhteystietoineen
 - B) Maanomistaja ilmoittaa hallinnassaan olevat rihmalevä alueet ”resursseina”.
(Kiinteistönumero, osoite, niitettävän alueen rajausta kartalle, ohjelma laskee pinta-alan)
 - C) Alusta luo ”resurssin” jokaisesta hyväksytyistä alueista (”Supply”)
 - D) Sopimus loppuasiakkaan kanssa mahdollistaa tarpeen luonnin (”Demand”)
 - E) Alusta yhdistää tarpeeseen sopivat resurssit ja muodostaa ”Työn”.
 - F) Työn suorittamiseen haetaan (manuaalisesti tai tarjousten perusteella) sopivat kerääjät (*Harvesters*) ja kuljetuksen hoitajat (”Transporters”) sekä tarpeen mukaan välikäsittelijä tai keräysalue (Processors). Syntyy eriä (”Batch”) eli työkokonaisuuksia, joilla on resursseja, kysyntää, nimettyjä tekijöitä, työvaiheita ja aikataulu.
 - G) Kunkin vaiheen jälkeen kuitataan se alustaan, jotta nähdään erien valmistumista ja loppuasiakkaan tilauksen täyttymistä.
 - H) Loppuasiakkaan pyynnön mukaan järjestetään kuljetus keräysalueista loppuasiakkaalle joko vaiheittain tai kertatoimituksena.
 - I) Loppuasiakkaan maksettua toimituksesta tilitetään osallistuvien osapuolten kustannuserät ja alustan palkkio, loput jäävät maanomistajalle.
-

Viite

59 <https://www.nexamass.com/>

4. Hankkeen ympäristövaikutukset

Valtiontalouden tarkastusviraston tarkastuskertomuksen 10/2024 *Vesien- ja merenhoidon ohjaus, rahoitus ja tuloksellisuus – Maatalouden ravinnekuormituksen vähentäminen* mukaan [60] valtionhallinnon tulisi määrittellä kuormituksen vähentämistavoitteet selkeästi ja perustellusti, kohdentaa rahoitus kustannusvaikuttavimpiin toimenpiteisiin ja kohteisiin sekä tuottaa järjestelmällistä tietoa rahoituksen vaikutuksista.

Tarkastuskertomuksen mukaan tähän asti tehdyt toimenpiteet ovat olleet riittämättömiä.

RIKI hankkeen tärkeimmät ympäristövaikutukset ovat loppuraportissa esitettyihin perusteltuihin vaikutusarviointeihin nojautuvat johtopäätelmät. Ajelehtivien rihmalevien pois kerääminen merestä on Saaristomerellä suositeltava vesien- ja merenhoidon toimenpide, koska sillä voidaan suoraan vähentää rehevöitymisen kannalta erityisen haitallista sisäistä kuormitusta etenkin välisaaristossa. Toimenpiteellä voidaan täydentää valuma-alueella tehtävää fosforin poistoa ja parantaa Saaristomeren ekologista tilaa

SWOT-analyysillä on arvioitu esitetyn toimenpiteen strategisia vahvuuksia (S), heikkouksia (W), mahdollisuuksia (O) ja uhkia (T) (taulukko 6).

Toimenpiteen käyttöönoton hidasteena voivat olla sen tunnistetut heikkoudet, jotka liittyvät erilaisten laskelmien luotettavuuteen. Rihmalevien biomassan vaihteluista ei Saaristomerellä ole kerätty systemaattista tietoa, vaikka eri yhteyksissä toistetaan käsitystä, että rihmalevien määrät olisivat runsastuneet rehevöitymiskehityksen myötä. RIKI hankkeessa tehtiin ensimmäistä kertaa arvio koko Saaristomeren alueen elävien ja kuolleiden rihmalevien määrästä ja vuodenaikaisesta vaihtelusta, mutta se perustui vain yhden vuoden aikana hankittuun aineistoon muutamalta havaintoasemalta. Saaristomeren ravinnekuormitusmallinnukseen (FICOS) liittyy merkittävää parametri- ja ennuste-epävarmuutta etenkin sisäisen fosforikuormituksen ja vedenvaihdon osalta. Hankkeessa tehty Saaristomeren fosforitaseen päivitys on hyödyllinen, kun FICOS-mallia näiltä osin parannetaan.

Taulukko 6. SWOT matriisi vesien- ja merenhoidon toimenpiteen *Rihmalevien poisto Saaristomeren sisäisen kuormituksen vähentäjänä* arvioinnin tueksi.

Sisäiset tekijät

Vahvuudet +	Heikkoudet –
<ul style="list-style-type: none"> - laaja monitorointiaineisto - mallinnus ja taselaskelmat mukana vertaisarvioituissa julkaisuissa - mallinnus ja veden laatutietoja yhdistelty monimuotoisesti 	<ul style="list-style-type: none"> - epävarmuudet laskelmien lähtötiedoissa - rihmalevien biomassan arvioinnin suuri ajallinen ja alueellinen vaihtelu - sisäisen fosforikuormituksen määrällinen arviointi - mallinnuksen oletuksien ja laskennan epävarmuus

Ulkoiset tekijät

Mahdollisuudet +	Uhat –
<ul style="list-style-type: none"> - Saaristomeren sisäisen ravinnekuormituksen vähentäminen - Saaristomeren ekologisen tilan parantaminen 	<ul style="list-style-type: none"> - suositeltujen toimenpiteiden taloudelliset ja tekniset esteet ja hidasteet

Viite

60 <https://vtv.fi/raportti/vesien-ja-merenhoidon-ohjaus-rahoitus-ja-tuloksellisuus-maatalouden-ravinnekuormituksen-vahentaminen/>

5. Talousraportti

RIKI hankkeen sisäinen talousraportti 5.12.2025 toimitetaan liitteenä (liite 4). Erikseen on lähetetty hankkeen kustannuserittely (RIKI_Kustannuserittely_5JOU25_VARELY).

Yhteenveto 30.11.2025 tilanteen perusteella.

palkat	
(sivukuluineen)	57150,72
ostopalvelut	58163,76
muut	24
	41,23
	10,01
yhteensä	115389,72

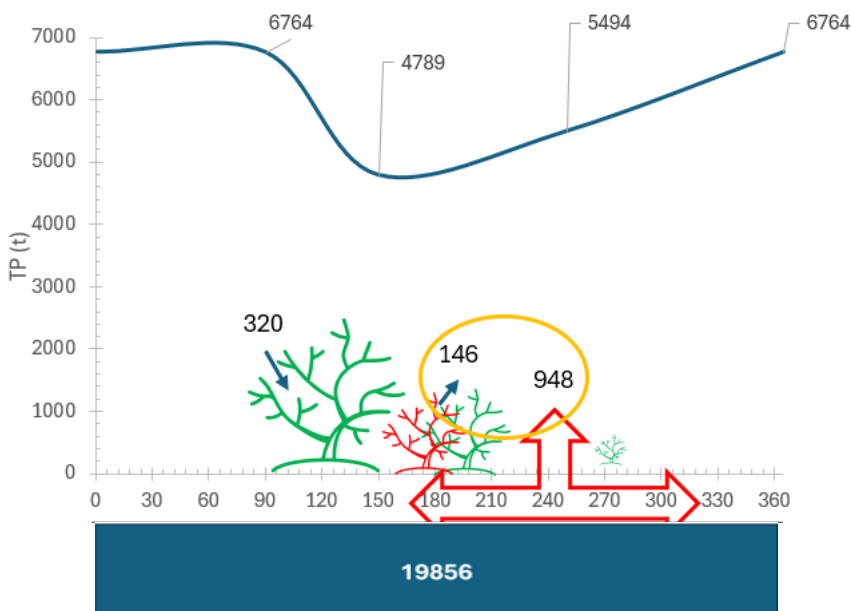
Ostopalvelut koostuvat Åbo Akademin työstä (yhteistyösopimus 50 000 €), Saaristomeren fosforitaseen päivitys (Arto Inkala, 6000 €) ja Åbo Akademin tilaamasta ravinneanalytiikasta (2163,76 €, HY Tvärminne).

6. Yhteenveto

RIKI-hankkeen tavoitteena oli selvittää rihmalevien biomassan ja sen sisältämän fosforivaraston määrät Saaristomerellä. Arviot kiinnitettiin osaksi Saaristomeren päivitettyä fosforitasetta, jolloin saatiin suhteutettua ajalehtivien rihmalevien poiston merkitystä sisäisen kuormituksen vähentäjänä eri osissa Saaristomerta. Rihmalevistä potentiaalisesti vapautuvan fosforin määrä kesäaikana (146 t) olisi noin 13 % koko Saaristomeren sisäisen fosforikuormituksen määrästä (1094 t). Mutta sen suhteellinen merkitys voi olla paikallisesti selvästi suurempi, jos pääosa ajalehtivasta biomassasta jää matalille alueille. Rihmalevät kuluttavat hajotessaan happea ja mikäli pohja muuttuu kokonaan hapettomaksi, niin osaltaan ne edistävät myös pohjasedimentin muun fosforivaraston vapautumista. Irtoavien rihmalevien kerääminen merestä vähentäisi suoraan kesäaikaista käyttökelpoisen fosforin kuormitusta, joka on erityisen haitallista rehevöitymisen kannalta. Rihmaleväbiomassan talteenotto on yksi harvoista keinoista vaikuttaa suoraan sisäisen fosforikuormituksen määrään. Perinteisesti on ajateltu, että siihen voitaisiin vaikuttaa vain ulkoista kuormitusta vähentämällä. Sisäisen kuormituksen väheneminen tapahtuu kuitenkin tuntemattomalla viiveellä, ja vasteen saaminen esimerkiksi valuma-alueella tehtävillä toimenpiteillä on epävarmaa. Saaristomerellä ajalehtivien rihmalevämattojen laajamittaisesta keräämisestä ei ole kokemusta. Perusoletuksilla arvioituna kuolleen rihmalevän hyötykäytön vaihtoehdot ovat enemmän tai vähemmän taloudellisesti ja kaupallisesti tappiollisia, koska kaikkia rihmalevän merestä keräämisen ympäristöhyötyjä on vaikea mitata rahassa.

Rihmalevien osuus Saaristomeren fosforitaseessa on esitetty kuvassa 21. Maalis-huhtikuussa rihmaleviin sitoutuu niiden kasvaessa fosforia 320 t. Kevään aikana kuoleviin rihmaleviin on sitoutunut 146 t fosforia, joka

muuttuu osaksi sisäisen kuormituksen poolia. Yhteensä yläpuoliseen vesifaasiin vapautuva sisäinen kuormitus on 1094 t (pohjasta 948 t ja kuolevista levistä 146 t) ajalla 15.5.–15.10. Vain osa (269 t) tästä päätyy pintakerrokseen ja perustuotannon käyttöön. Vesimassan sisältämä fosforimäärä (t) vaihtelee vuoden mittaan, ja on esitetty kuvassa sinisellä viivalla (2000-luvun keskiarvo). Keväällä huhti-toukokuussa tapahtuva fosforimäärän väheneminen (6764 t → 4789 t) johtuu siitä, että keväällä kasvaneet planktonlevät (kevätkukinta) kuolevat liukoisten ravinteiden loputtua ja vievät ravinteet mukanaan pohjaan. Sisäisen kuormituksen ja ulkoisen kuormituksen vaikutuksesta vesimassan fosforimäärä kasvaa kesän ja syksyn mittaan.



Kuva 21. Saaristomeren yleistetty fosforitase, jossa mukana rihmalevien osuus. Huhtikuussa rihmaleviin sitoutuu fosforia 320 t. Touko-kesäkuussa meressä rihmaleviä on noin 53 % alkuperäisestä määrästä, joten kuolleeseen rihmaleväbiomassaan on jäänyt 146 t fosforia. Rihmalevien hajotessa vapautuva fosfori muuttuu osaksi sisäisen kuormituksen poolia, josta muodostuu yhteensä 1094 t suuruinen fosforikuormitus yläpuoliseen vesifaasiin ajalla 15.5.–15.10. [2]. Vesimassan sisältämä keskimääräinen fosforivarasto (t) 2000-luvulla eri vuodenaikoina (4789 t – 6764 t) on kuvassa sinisellä aaltoviivalla. Potentiaalinen mobiilin fosforin varasto pintasedimentissä, 19 856, on esitetty sinisenä alimpana palkkina.

Hankkeen aikana on selvinnyt, kuinka vähän Saaristomeren rihmalevien ajallisesta ja alueellisista vaihteluista on olemassa tutkittua tietoa. Tutkimusten lisäksi tarvitaan sekä elävien rihmalevien lajiston ja biomassan että kuolleiden ja ajalehtivien rihmalevämattojen säännöllistä monitorointia, joka kuuluisi ympäristöhallinnon järjestettäväksi.

LIITTEET

Liite 1. Salovius-Laurén, S.; Salo, T. Filamentous macroalgal production in the Archipelago Sea - variation in time, space and along a depth gradient. *Environmental and Marine Biology*, Åbo Akademi University, 3.11.2025. 12 s.

Liite 2. Suomela, J. Kuolleen rihmalevän keräyksen mobiiliapplikaation toimintakuvaus. Varsinais-Suomen ELY-keskus 28.11.2025. 16 s.

Liite 3. Nexamass Oy. Biomassification alustan toimintakuvaus. 23 s.

Liite 4. RIKI-talousraportti 5.12.2025.