

# Saaristomeren valuma-alueen kokonaiskuormitusmallin kehittäminen

(Ympäristöministeriö: RaKi-hanke 12)



## Hankkeen tutkijat ja yhteistyökumppanit

*Suomen ympäristökeskus (SYKE, vastuorganisaatio)* - Risto Lignell (vastaava tutkija), Elina Miettunen, Janne Ropponen, Markus Huttunen, Marie Korppoo, Harri Kuosa, Jouni Lehtoranta, Kaarina Lukkari, Heikki Peltonen, Jonna Piiparinen, Jenni Attila

*Ilmatieteen laitos* - Kimmo Tikka, Laura Tuomi

*Åbo Akademi* - Irma Puttonen

**Yhteistyö:** *Kungliga Tekniska Högskolan (KTH)* - Vladimir Cvetkovic

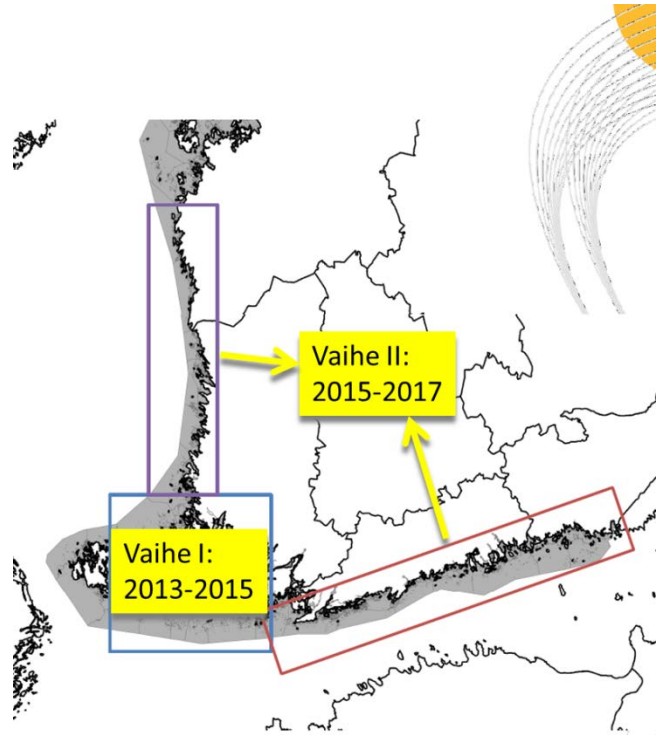
**Loppukäyttäjä-yhteistyö:** *Ympäristöministeriö (YM), Varsinais-Suomen ELY –keskus (VARELY), Uudenmaan ELY –keskus (UUDELY)*

## Sisällysluettelo

<b>1. HANKKEEN TAVOITE</b>	<b>- 3 -</b>
<b>2. HANKKEEN KESTO</b>	<b>- 3 -</b>
<b>3. MIKSI TARVITAAN ERIKSEEN SAARISTOMERELLE RÄÄTÄLÖITYÄ MALLIA?</b>	<b>- 3 -</b>
<b>4. SAARISTOMEREN MALLIJÄRJESTELMÄN KUVAUS</b>	<b>- 3 -</b>
<b>5. KÄYTTÖLIITTYMÄ</b>	<b>- 4 -</b>
<b>6. MALLIN HAVAINTOAINEISTOT</b>	<b>- 4 -</b>
<b>7. SAARISTOMEREN PISTEKUORMITUS JA SISÄINEN KUORMITUS</b>	<b>- 5 -</b>
<b>8. HYDRODYNAMIIKAN MALLINNUS</b>	<b>- 7 -</b>
<b>9. VESIPATSAAN BIOGEOKEMIAN (RAVINNEKIERTOJEN) MALLINNUS</b>	<b>- 8 -</b>
<b>10. SAARISTOMEREN VALUMA-ALUEEN KUORMITUS</b>	<b>- 10 -</b>
<b>11. VALUMA-ALUEKUORMITUKSEN VÄHENTÄMISEN VAIKUTUKSET SAARISTOMERELLÄ</b>	<b>- 11 -</b>
<b>12. MALLIKEHITYS</b>	<b>- 13 -</b>
<b>13. JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>- 14 -</b>

## 1. Hankkeen tavoite

Hankkeessa kehitettiin Saaristomerен alueen kokonaiskuormituksen mallijärjestelmä sujuvalla käyttöliittymällä viranomaisten vesienhoidollisten toimenpiteiden suunnittelun, vaikutusten arvioinnin ja seurannan työkaluksi. Lopullisena tavoitteena on mallintaa koko Suomen rannikkovyöhyke: **jatkovaiheessa (1.11.2015 – 31.12.2017) mallijärjestelmää kehitetään ja sovelletaan Suomenlahdelle ja Selkämerelle** (Kuva 1).



Kuva 1. Rannikon mallijärjestelmän kehittämisen vaiheet Suomenlahti-Selkämeri jatkumolla.

## 2. Hankkeen kesto

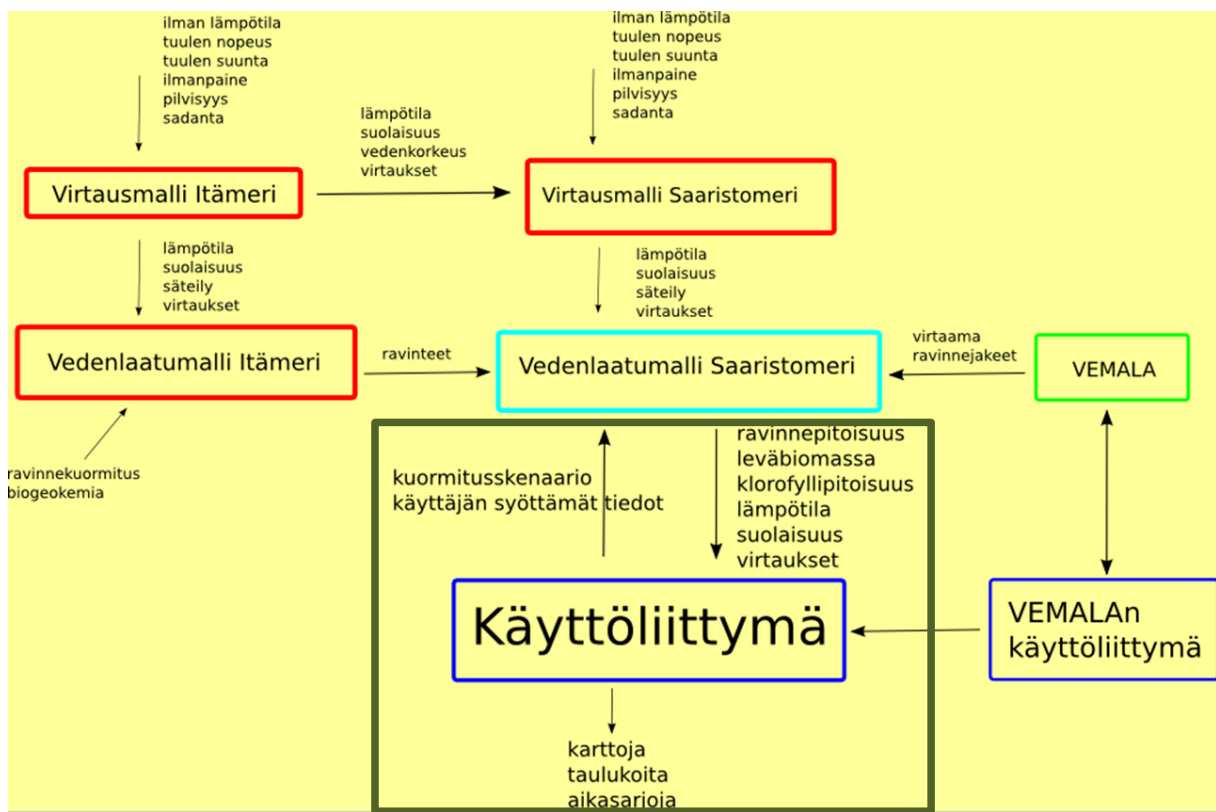
24.6.2013 – 30.10.2015

## 3. Miksi tarvitaan erikseen Saaristomerelle räätälöityä mallia?

Käytössä olevissa Itämeren ekosysteemimalleissa, mm. Itämeren ravinnekuormituksen vähennystavoitteiden arviointiin käytetyn BNI:n (Baltic Nest Institute, Tukholma) BALTSEM -mallissa, ei ole erillistä rannikkokomponenttia, joten niiden kyky kuvata topografialtaan ja virtausoloiltaan mutkikkaiden rannikkoalueiden dynamiikkaa on puutteellinen.

## 4. Saaristomerен mallijärjestelmän kuvaus

Rannikon veden laadun ja kuormitusten muutosten arviointi vaatii useiden eri mallien yhteensovittamista yhtenäiseksi mallijärjestelmäksi (Kuva 2). Valuma-alueelta tuleva ravinnekuormitus arvioidaan Suomen valuma-alueille tehdyllä mallilla (WSFS-VEMALA). Veden hydrodynamiikka mallinnetaan 3-ulotteisella virtausmallilla (COHERENS), joka on kytketty Saaristomerен alueen ravinnevoita ja levämäärien kehitystä kuvaavaan vedenlaatumalliin (SEABED). Malleja käytetään myös avomereltä Saaristomerelle tulevan taustakuormituksen arviointiin. Saaristomerен oman sisäisen kuormituksen arviointiin käytettiin tilastollisia menetelmiä. Hankkeemme on urauurtava Itämeren piirissä kytkiessään riittävän realistisen hydrodynaamis-biogeokemiallisen rannikkomallin operatiiviseen valuma-aluemalliin.



Kuva 2. Yleiskuvaus Saaristomerren mallijärjestelmän rakenteesta.

## 5. Käyttöliittymä

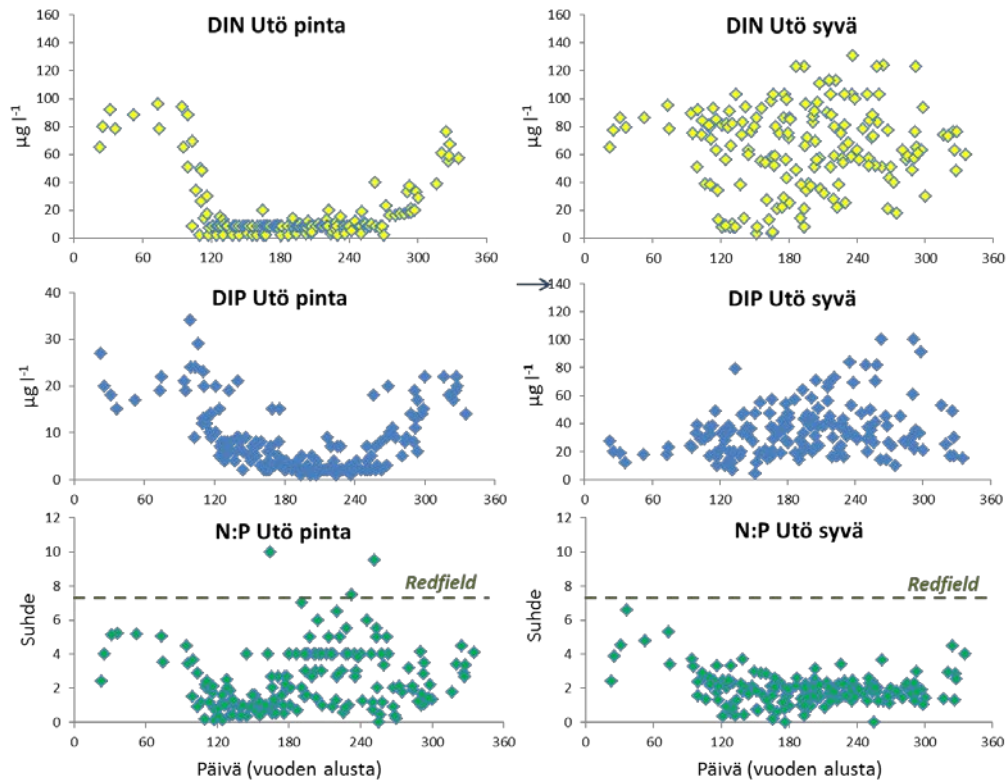
Hankkeen kestäessä tehtiin tiivistä yhteistyötä YM:n, VARELY:n ja UDELY:n kanssa mallin käyttötarpeiden määrittelemiseksi. Tämän pohjalta identifioitiin mallilta tarvittavat ominaisuudet sekä laadittiin suunnitelma käyttöliittymästä. Malliajojen määrittelemiseksi ja laskettujen tulosten esittämiseksi luotiin kevyt, helppokäyttöinen ja mahdollisimman selkeä web-pohjainen käyttöliittymä (Kuva 2). Käyttöliittymä saa pääosan lähtötiedoistaan ja määrittelyistään rajapintapalvelusta ja siten se mukautuu aineistossa tapahtuviin muutoksiin. Käyttöliittymä käyttää SYKE:n ArcGIS -karttapalvelua, josta saadaan vesimuodostumien ja käytettyjen hilojen rajat (tarkempi alueellinen erottuvuus).

Käyttäjä ottaa järjestelmään yhteyden selaimella. Tulokset saadaan ja voidaan tallentaa karttoina, taulukoina ja aikasarjoina.

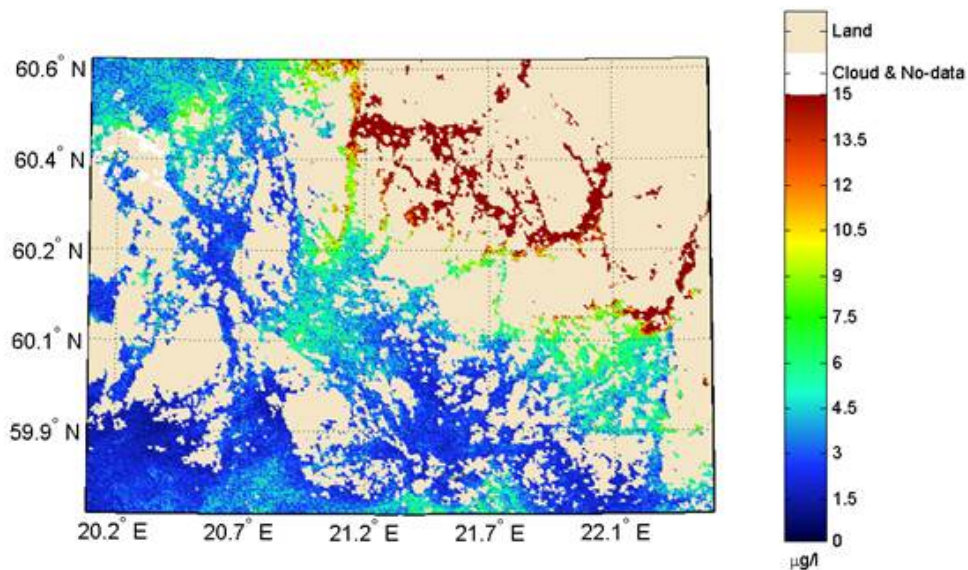
## 6. Mallin havaintoaineistot

Saaristomerren vesipatsaan havaintoaineistoa käytettiin mallin verifiointiin eli sen antamien tulosten vertailuun mittausten kanssa. Aineistoja saatiin Ahvenanmaan kalankasvattajien velvoitetarkkailujen tuloksista, ympäristöhallinnon Hertta-havaintoaineistoista sekä tutkimusalue Arandan seurantamatkoilta. Esimerkkinä on mallin reunaehtoina käytetyt Utön intensiiviaseman mittaukset ajanjaksolta 2006 – 2011 (Kuva 3). Tämän aineiston perusteella arvioitiin Itämeren 3-ulotteisen hydrodynaamisen mallin virtausten Saaristomerelle mukanaan kuljettama taustakuormitus.

Havaintoasemamittausten lisäksi mallin vertailuaineistona on käytettävissä satelliittihavainnoista tulkitut klorofylli-*a*- ja sameus- (vuodet 2003 - 2011) sekä pintalämpötila-aineistot (2005 - 2011). Satelliittihavaintojen etuna on se, että niiden havaitseman alueellisen vaihtelun avulla voidaan verrata mallin laskentatulosta eri puolilla mallinnusalueetta. Kuvassa 4 on esimerkki satelliittiaineistosta klorofylli-*a*:n osalta. Alueellisen vaihtelun tarkoista havainnoista on erityisesti hyötyä intensiivisinä kevät- ja sinileväkukintajaksoina.



Kuva 3. Utön intensiiviaseman epäorgaanisten ravinteiden havaintoaineisto 1994 – 2011 (typpi = DIN, fosfori = DIP). Pinta = näyte 0 - 5 m; syvä = näyte 1 m pohjan yläpuolelta.



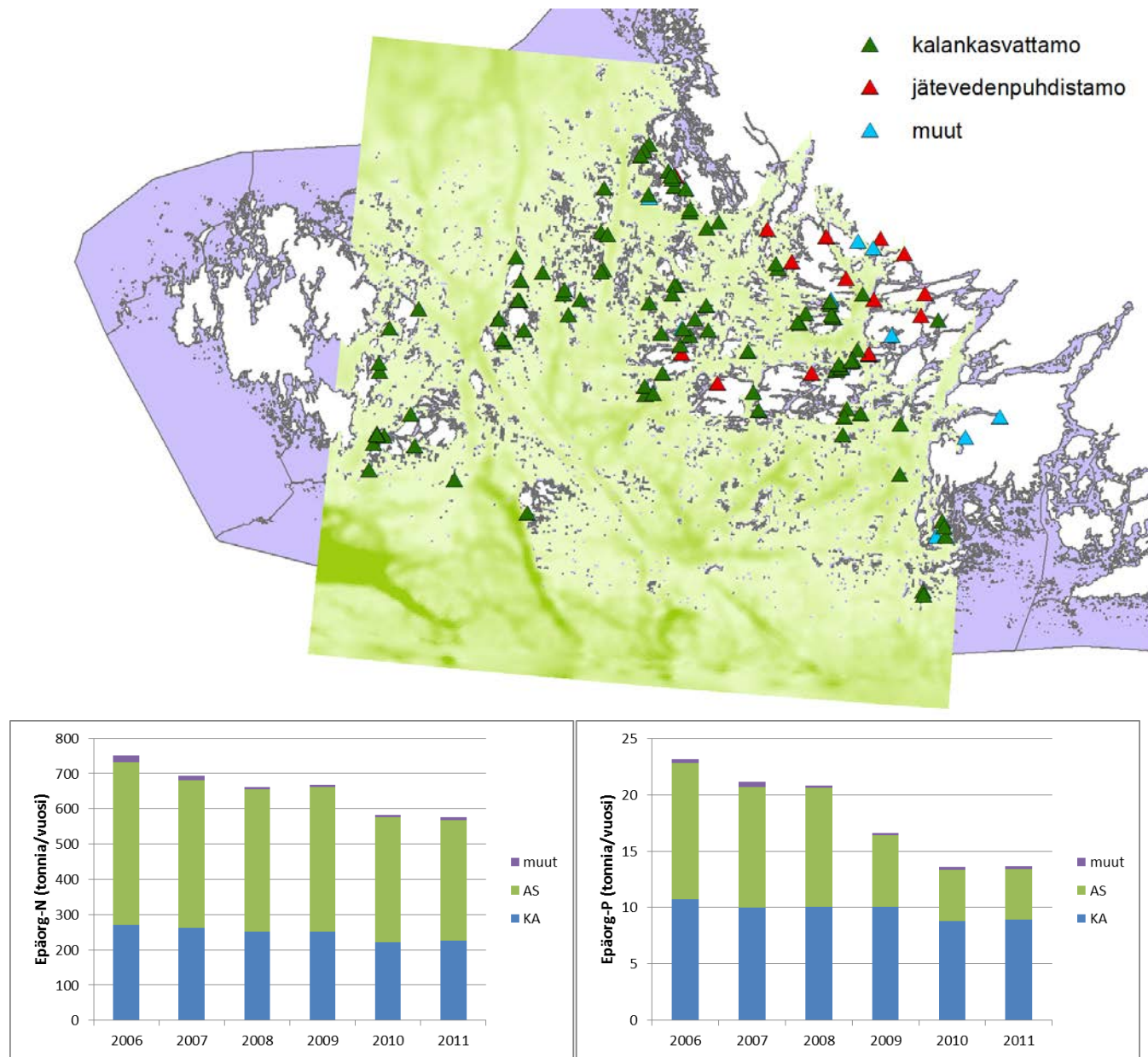
Kuva 4. Esimerkki satelliittihavainnosta tulkitusta klorofylli-*a*:n vaihtelusta (skaala oikealla) mallin laskenta-alueella 19.4.2005. Havaintohetki osuu intensiiviseen kevätukukinta-aikaan.

## 7. Saaristomeren pistekuormitus ja sisäinen kuormitus

Saaristomerta kuormittavat suoraan lähinnä kalankasvattamot ja jätevedenpuhdistamot (Kuva 5). Teollisuuden omista jätevedenpuhdistamoista tuleva kuormitus on Saaristomeren alueella hyvin vähäistä. Suurin osa epäorgaanisesta fosforikuormituksesta on peräisin kalankasvatuksesta jätevedenpuhdistamoiden ollessa vastaavasti suurin typen lähde.

Arvio sedimentin prosesseissa ajan myötä veteen vapautuvan epäorgaanisen fosforin sisäisestä kuormituksesta perustuu sedimentin fosforijaeaineiston (SEABED -hanke) pohjalta laskettuun ns.

potentiaalisesti liikkuvan eli mobiilin fosforin määrään sedimentin pinnassa. Asemakohtaiset pitoisuudet interpoloitiin koko mallialueelle eri pohjatyypin mukaan. Vuotuisen sedimentaation määräksi mallialueen kertymäpohjilla, jonne sedimentoitunut aines kulkeutuu pohjan virtausten myötä, arvioitiin keskimäärin 1 cm. Rautaan sitoutunut fosfori voi vapautua verraten nopeasti hapettomissa olosuhteissa, joten arviota tarkennettiin lisäksi pohjien happitilanteen mukaan; tämä tehtiin tausta-aineistosta saatujen happitietojen pohjalta.

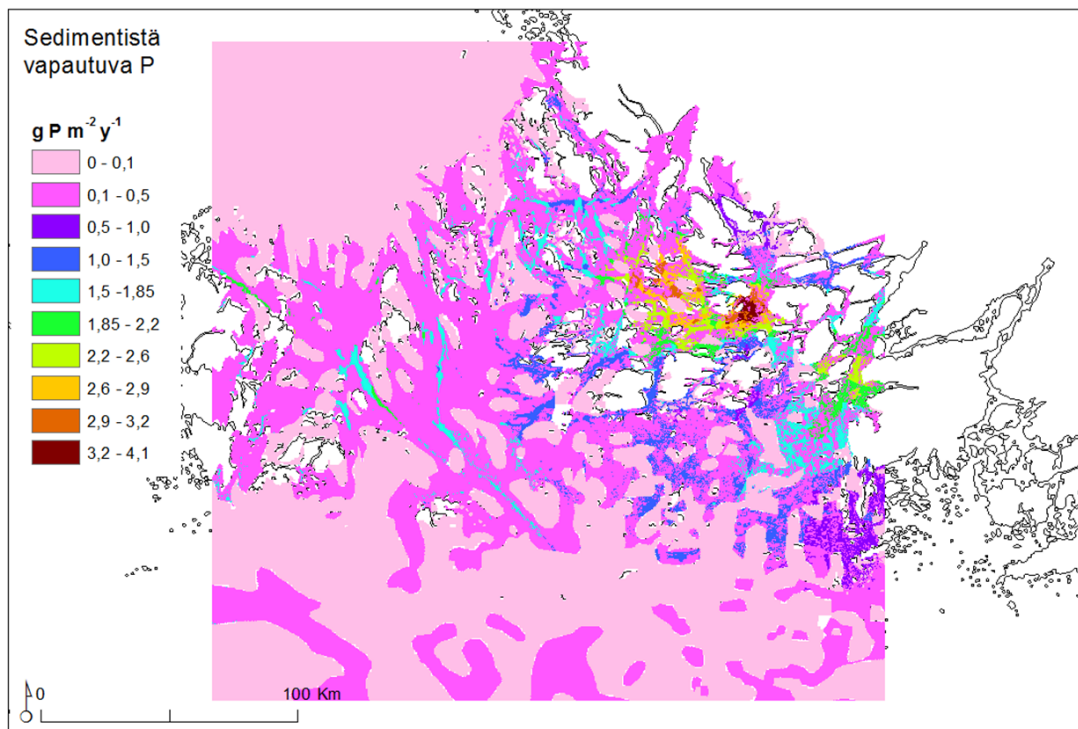


Kuva 5. Saaristomerren mallialueella sijaitsevat pistekuormittajat (yllä) ja niiden aiheuttama epäorgaanisten ravinteiden kuormitus vuosina 2006 – 2011.

Saaristomerren alueelle tehtiin kaksi sisäisen fosforikuormituksen arviota. Arviossa 1 oletettiin vallitsevan tavanomaiset, keskimääräiset happiolosuhteet. Arvio 2 perustui kahteen havaintoaineistojen perusteella tehtyyn pohjan happitilanteen ääriolosuhteeseen: Arvio 2a edustaa sedimentistä yhden vuoden aikana vapautuvan fosforin minimimäärää keskimääräistä paremmissa happioloissa ja arvio 2b vastaavasti maksimimäärää huonoissa happioloissa. Arvion 1 mukaan vuotuisen sisäisen fosforikuormituksen määrä olisi keskimääräisissä olosuhteissa koko Saaristomerren mallialueelta 3200 t ja arvioiden 2a ja 2b perusteella vaihtelu on 1800 ja 3680 tonnin välillä.

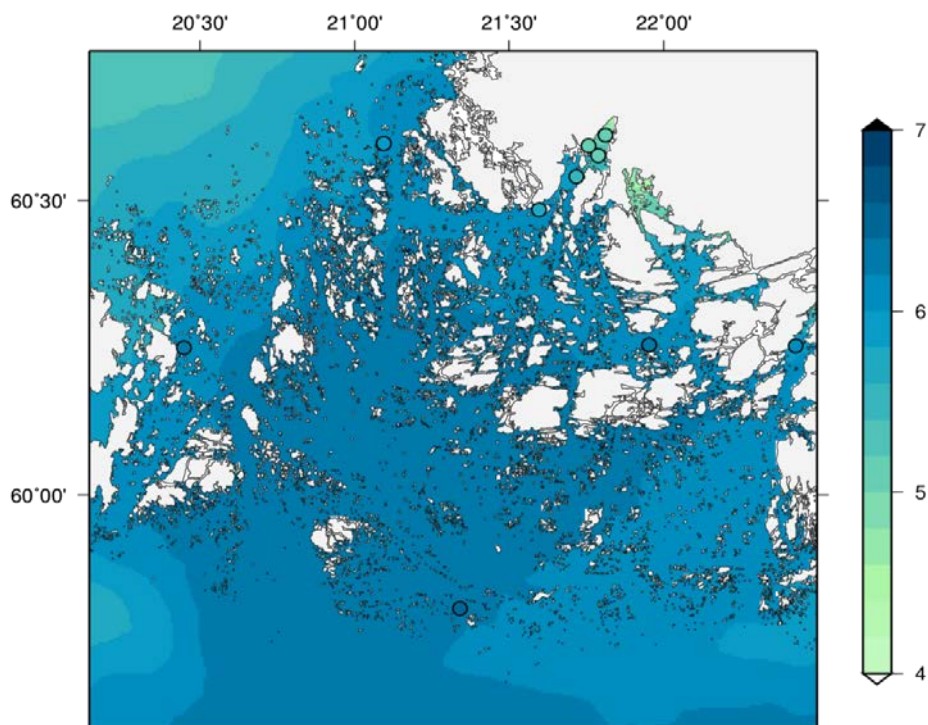
Kuvan 6 kartassa on esitetty Arvion 1 mukainen alueellinen vaihtelu vuosittaisessa sisäisen fosforin kuormituksessa. Suurimmat sisäisen fosforikuormituksen pitoisuudet sijoittuvat sisä- ja ulkosaariston keskivaiheille. Loppukesällä lämpötilan nousu ja happivaihtelun suhteen herkillä alueilla hapettomuus

kiihdyttävät fosforin vapautumista sedimentistä. Arvion 1 mukaisia sisäisen fosforikuormituksen pitoisuuksia käytettiin syöteinä vedenlaatumallin testiajoissa. Mallijärjestelmämme syvään veteen tuottamat fosforipitoisuudet vastaavat hyvin havaintojen pitoisuuksia. Sisäinen kuormitus on yli kertaluokkaa suurempi kuin valuma-alueen kuormitus (Luku 10), mutta suurimmalla osalla Saaristomerta kasvukauden aikainen vesipatsaan lämpötilakerrostuminen (termokliini) estää tehokkaasti sedimentistä vapautuneiden ravinteiden pääsyn syvävedestä tuottavaan pintakerrokseen.



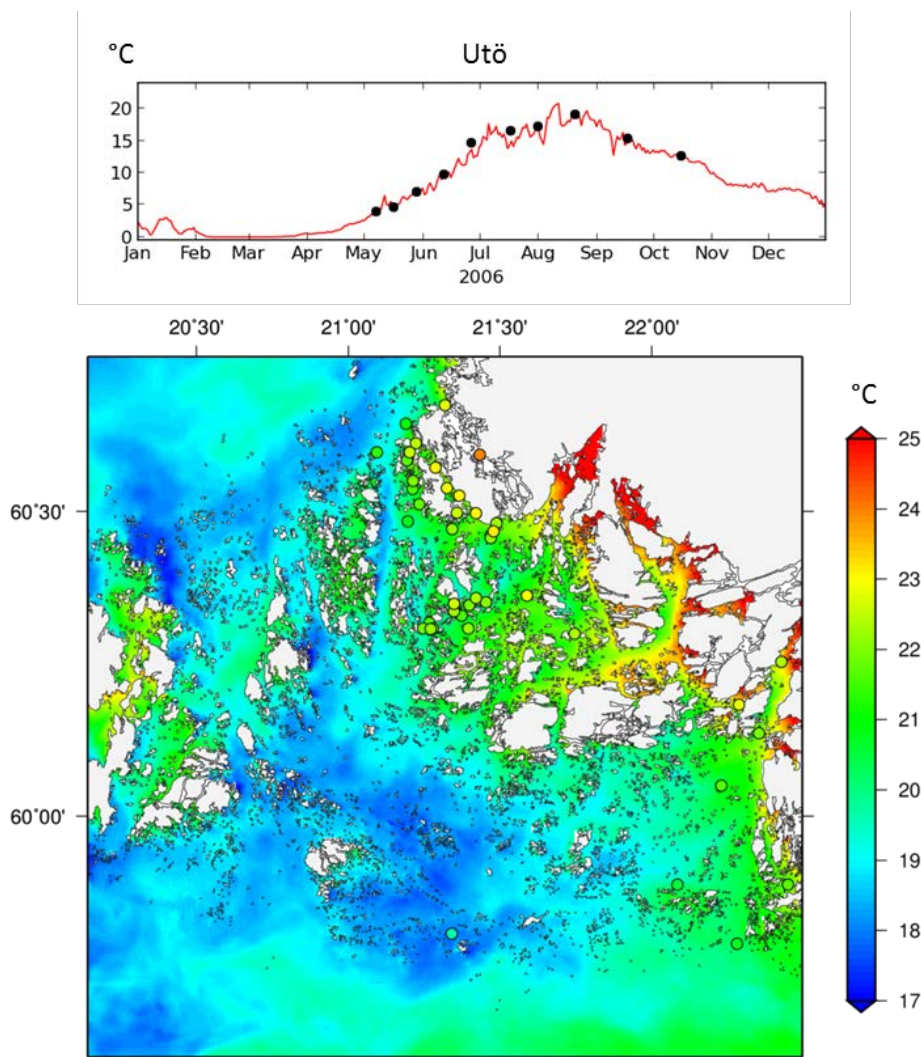
Kuva 6. Saaristomeren sisäisen fosforikuormituksen vuotuinen arvio normaalioloissa (Arvio 1).

## 8. Hydrodynamiikan mallinnus



Kuva 7. Hydrodynaamisen mallin laskeman pintakerroksen suolaisuuden alueellinen kuukausikeskiarvo heinäkuussa 2011 verrattuna seuranta-asemien havaintoihin samalta kuukaudesta (merkitty palloina).

Saaristomeren 3-ulotteisen hydrodynamiikan mallinnukseen sovellettiin karkean erottelukyvyn Itämerimallin ja tarkan erottelukyvyn rannikkomallin yksisuuntaista kytkentää ("nesting"; COHERENS -malli). Saaristomerisovelluksen horisontaalinen erottelukyky on 0,25 merimailia eli noin 460 metriä ja siinä on 40 syvyyskerrosta. Saaristomerimalli saa reunaehdot eli tiedon lämpötilasta, suolaisuudesta, virtauksista ja vedenkorkeudesta mallialueen avoimilla reunoilla Itämerimallilta. Hydrodynaaminen mallimme kuvaa varsin tarkasti pintakerroksen saliniteetin (suolaisuuden) ja lämpötilan alueellista vaihtelua sekä lämpötilan vuodenaikaisvaihtelua (Kuvat 7 ja 8) ja kerrostuneisuutta.



Kuva 8. Hydrodynaamisen mallin laskema pintalämpötilan vuodenaikainen vaihtelu Utön seuranta-asetalla (punainen viiva) havaintoihin (pisteet) verrattuna vuonna 2006 (yllä), sekä mallin laskeman pintakerroksen lämpötilan vuorokausikeskiarvo 11.7.2011 verrattuna seuranta-asettien havaintoihin 11. – 12.7.2011 (ympyrät, alla) Saaristomeren mallialueella.

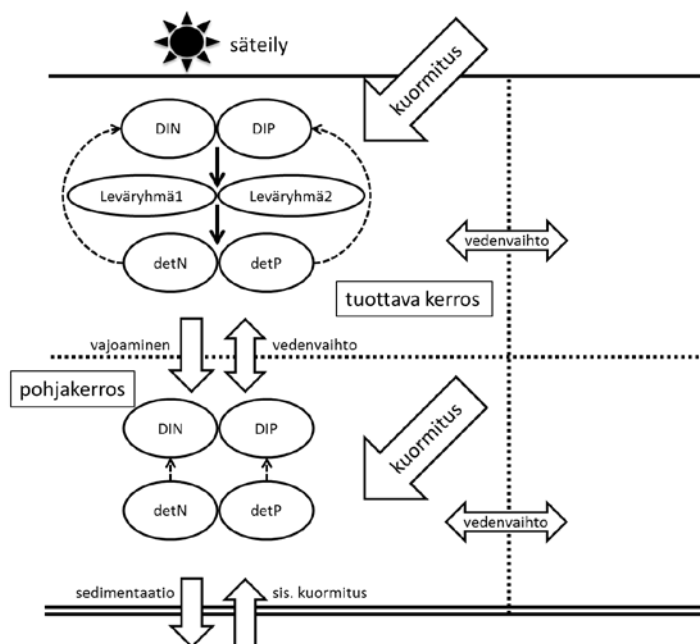
## 9. Vesipatsaan biogeokemian (ravinnekiertojen) mallinnus

Saaristomerihankkeessa sovellettiin SEABED –hankkeen (Åbo Akademi, KTH) aiemmin tuottamaa vedenlaatumallia (Python Water Quality Model; Kiirikki ym. 2001, *BER 6*). Vedenlaatumalli on kytketty 3-ulotteisen hydrodynaamisen malliimme. Ravinnesyötet malli saa sisäisestä kuormituksesta (Luku 7), valuma-alueen kuormitusskenaarioista (Luku 10) sekä Saaristomeren ulkopuolelta tulevasta taustakuormituksesta. Jälkimmäistä syötettä varten on tuotettu biogeokemialliset reunaehdot (ravinteet ja leväbiomassa) Saaristomeren ulkoreunojen intensiiviasemien mittaustulosten perusteella. Mallia on myös täydennetty kokonaisravinteiden kulkeutumisen laskennalla.

Saaristomerihankkeen tarkoitukseen muokattu vedenlaatumalli sisältää epäorgaanisen typen ja fosforin varantojen (DIN ja DIP) lisäksi kaksi niitä hyödyntävää leväryhmää (tyypeä sitovat sinilevät ja eukaryootit eli muut autotrofiset levät), jotka kuollessaan muodostavat vajoavaa ja samalla mineralisoituvaa detritusta

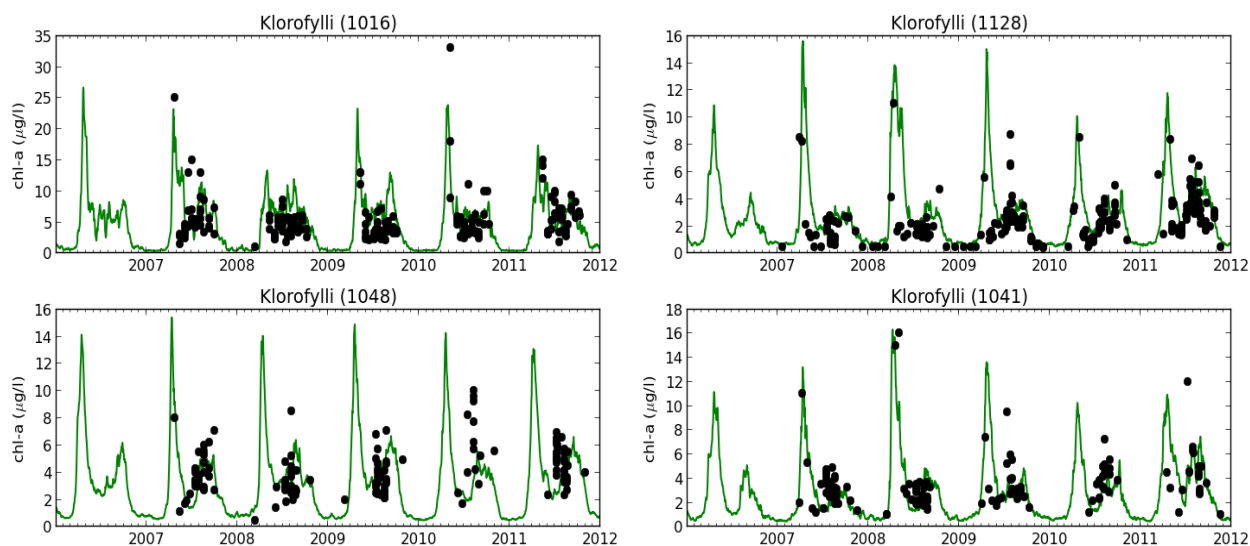


(typpi ja fosfori = detN ja detP; Kuva 9). Vesipatsas on jaettu termokliin in eristämään tuottavaan pintakerrokseen ja syvän veden kerrokseen (levät kasvavat vain valaistussa, n. 0-10 m tuottavassa kerroksessa). Hydrodynaamisesta merimallista saadaan arvio kerrosten välisen vedenvaihdon suuruudelle, jonka avulla lasketaan ravinteiden kulkeutuminen pinnan ja syväveden välillä. Merimallin virtauskenttiä hyödynnetään myös laskettaessa ravinnesyötteiden horisontaalista kulkeutumista ja laimenemista. Leväryhmien kasvuvaste lasketaan kokonaisbiomassana (märkäpaino) ja klorofylli-*a*:na.



Kuva 9. Vedenlaatumallin ravinnekiertojen vuokaavio. Malliin kytkettyyn hydrodynamiikkaan sisältyy veden ja ravinteiden vaihto sekä syvyysuunnassa että vierekkäisten vesialueiden välillä, mukaan lukien taustakuormitus mallialueen ulkopuolelta. Leväryhmä1 = eukaryootit, Leväryhmä2 = tyypä sitovat sinilevät; muut selitykset tekstissä.

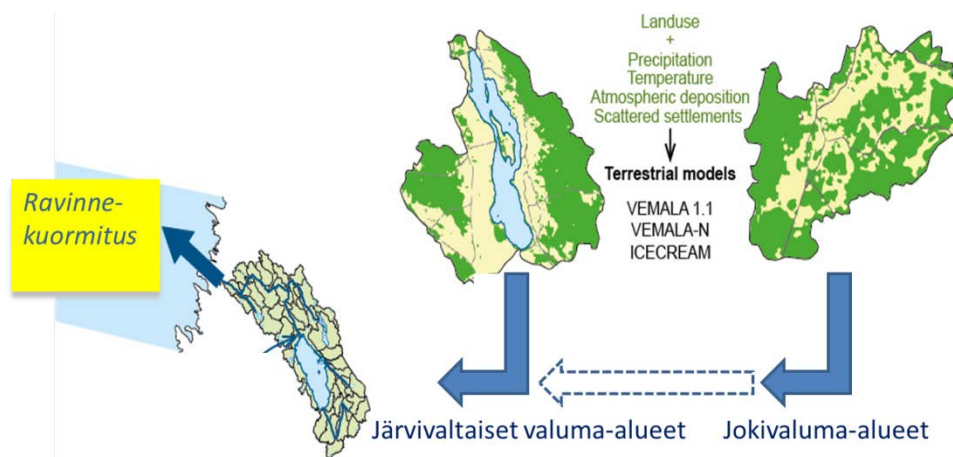
Vedenlaatumallia on testattu vertaamalla Saaristomeren 2003 - 2013 havaintojakson aineistoa mallin simulointeihin. Vedenlaatumalli pystyy varsin hyvin simuloimaan leväbiomassan kasvukauden aikaisen kehittymisen vesimuodostumissa (Kuva 10).



Kuva 10. Klorofylli-*a*:n ajallinen vaihtelu 2006 - 2013 neljällä tyypillisellä Saaristomeren vesimuodostumalla kattaen etelä-pohjoinen ja sisä-ulkosaaristo -vaihtumisvyöhykkeet. Mallisimulointi = yhtenäinen viiva; havainnot = pisteet. Huomaa, että pisteet edustavat havaintoja eri puolilla vesimuodostumia, mikä lisää havaintojen luontaista hajontaa!

## 10. Saaristomeren valuma-alueen kuormitus

Saaristomeren valuma-alueen VEMALA -mallinnuksen päämääränä on arvioida mereen päätyvän ravinnekuormituksen määrä. Nykytilan lisäksi on selvitetty miten ilmaston muuttuminen, ihmistoimintojen muutokset maataloudessa sekä kuormitusvähennystoimenpiteet voivat vaikuttaa ravinnepäästöihin. Maa-alueiden ravinnekuormitusarvio sisältää biologisesti käyttökelpoiset, epäorgaaniset ravinteet, mikä mahdollistaa realistiset Saaristomeren planktonlevien rehevöitymisvasteiden malliarviot (kts. Luku 9). Ravinnekuormituksen laskemiseksi sovelletaan WSFS-VEMALA -mallia ja siihen liitettyä ICECREAM -peltomallia (Kuva 11). VEMALA -malliin lisättiin eri ravinnelajien joki- ja järvi-prosessit. Merimallintamisen lähtötiedoksi annetaan päivittäinen virtaama ja ravinnekuormitus Saaristomereen eri vesistöalueiden purkupisteisiin.



Kuva 11. Yleiskuvaus VEMALA-mallinnuksesta.

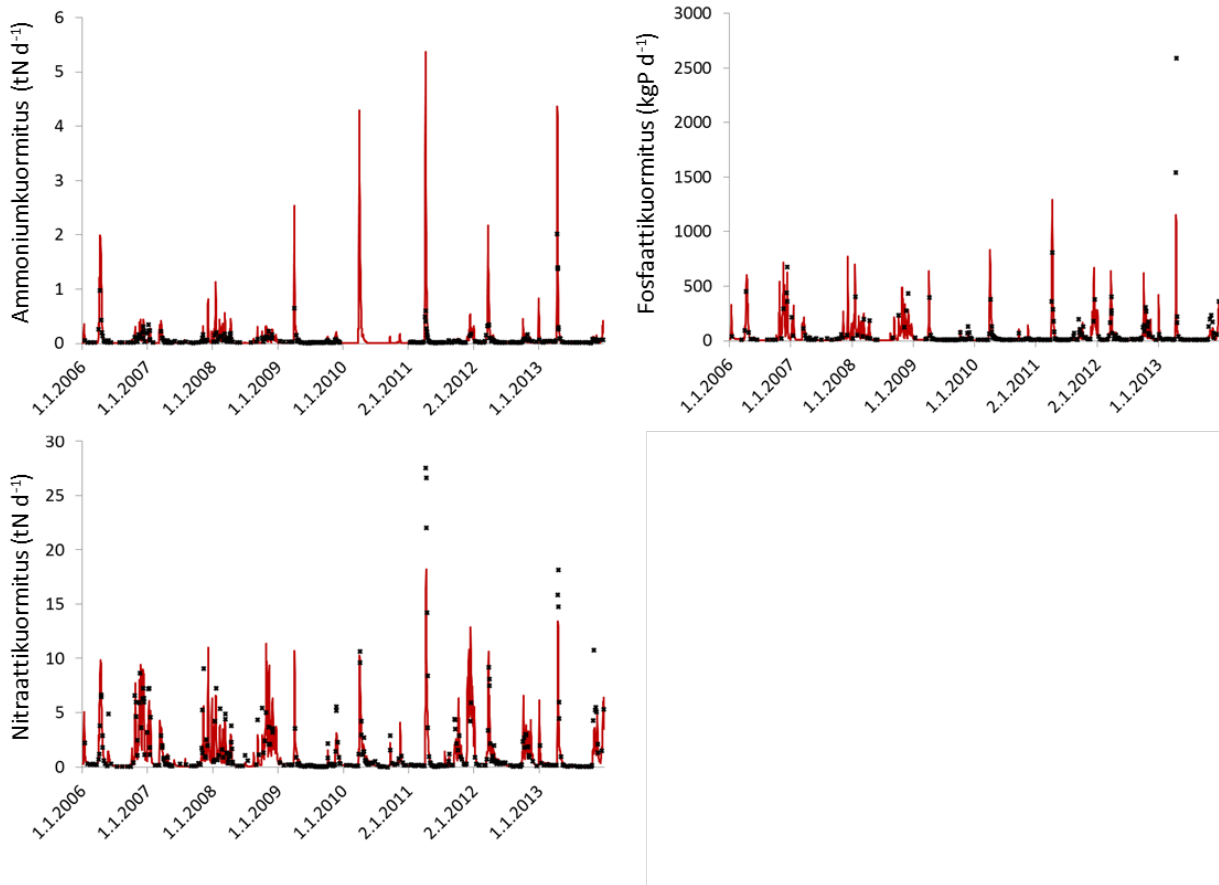
VEMALA simuloi pääasiassa hyvin Saaristomereen tulevat päivittäiset epäorgaanisten ravinteiden kuormitukset valuma-alueilta, kuten Aurajoen esimerkki osoittaa (Kuva 12). Jaksolla 2005-2014 kokonais- ja epäorgaanisen fosforin vuotuiset kuormitukset olivat koko Saaristomeren osalta keskimäärin 540 ja 160 tP v<sup>-1</sup> ja vastaavat typen arvot olivat 9500 ja 6000 (nitraatti + ammonium) tN v<sup>-1</sup>. Ammoniumtypen osalta mallin antamat arvot ovat vielä toistaiseksi epätarkkoja havaintoihin verrattuna, mutta sen merkitys verrattuna nitraattikuormitukseen on pieni.

VEMALA ja ICECREAM malleilla laskettiin 14 eri skenaariota Saaristomeren ravinnekuormituksen mahdollisesta kehittämisestä ajanjaksolla 2020 - 2029. Nämä skenaariot sisältävät 7 eri ilmastoskenaariota kattaen ilmaston muutoksen todennäköisen vaihteluvälin sekä kaksi maatalouden toimenpidevaihtoehtoa: nykyiset maataloustoimenpiteet tai kaikki vesienhoitosuunnitelmissa ehdotetut toimenpiteet samaan aikaan käytössä kuormituksen vähentämiseksi (tarkennettu lannoitus, talviaikainen kasvipeitteisyys, suojavyöhykkeet, lietteen sijoitus nurmilla sekä kerääjäkasvien käyttö kevätiljoilla). Merimallissa pystytään valitsemaan haluttu skenaario mereen tulevaisuuden ravinnepäästöiksi. Erillisellä käyttöliittymällä on mahdollista muodostaa uusia skenaarioita niin, että maatalouden toimenpiteitä voi olla maksimia pienempi määrä ja samalla muiden kuormituslähteiden (pistekuormittajat, haja-asutus ja metsätalous) muutokset voidaan myös määrittellä erikseen.

Nykyisillä maatalouden toimenpiteillä nitraattityppikuormitus olisi kasvamassa 7 - 8 % ja fosfaattifosforin pysymässä lähellä nykyistä tasoa ilmastonmuutoksen edetessä. Maatalouden toimenpiteiden maksimaalinen käyttöön otto vähentäisi mereen päätyvä nitraattityypen ainevirtaamaa jaksolla 2020 - 2029 n. 18 - 21 % ja fosfaatin ainevirtaama n. 3 - 11 % jaksoon 2005 - 2014 verrattuna. Ammoniumtypen ainevirtaamaa sen sijaan näyttäisi kasvavan myös maatalouden maksimitoimenpiteillä.

Tarkennettu osoittautui lannoitus yksittäisistä toimenpiteistä tehokkaimmaksi. Osa lasketusta vähenemästä johtuu ajanjakson 2020 - 2029 pienemmästä ennustetusta virtaamasta. Vuodesta 2030 eteenpäin virtaama on ennusteiden mukaan kasvussa, mikä lisää myös taas ravinnekuormitusta. Ilmastonmuutos on vaikuttamassa

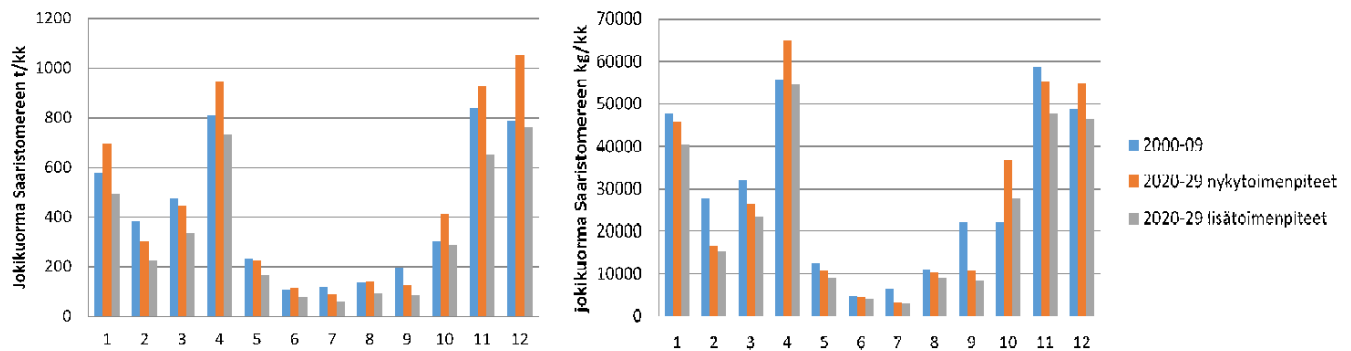
selvästi myös virtaaman ja samalla mereen päätyvän kuormituksen painottumiseen vuoden sisällä siten, että nykyistä suurempi osuus tulee talvella.



Kuva 12. VEMALA v.3:n antamat epäorgaanisten ravinteiden päivittäiset jokikuormat Aurajoen valuma-alueelta (punainen viiva) verrattuna havaintoihin (pisteet).

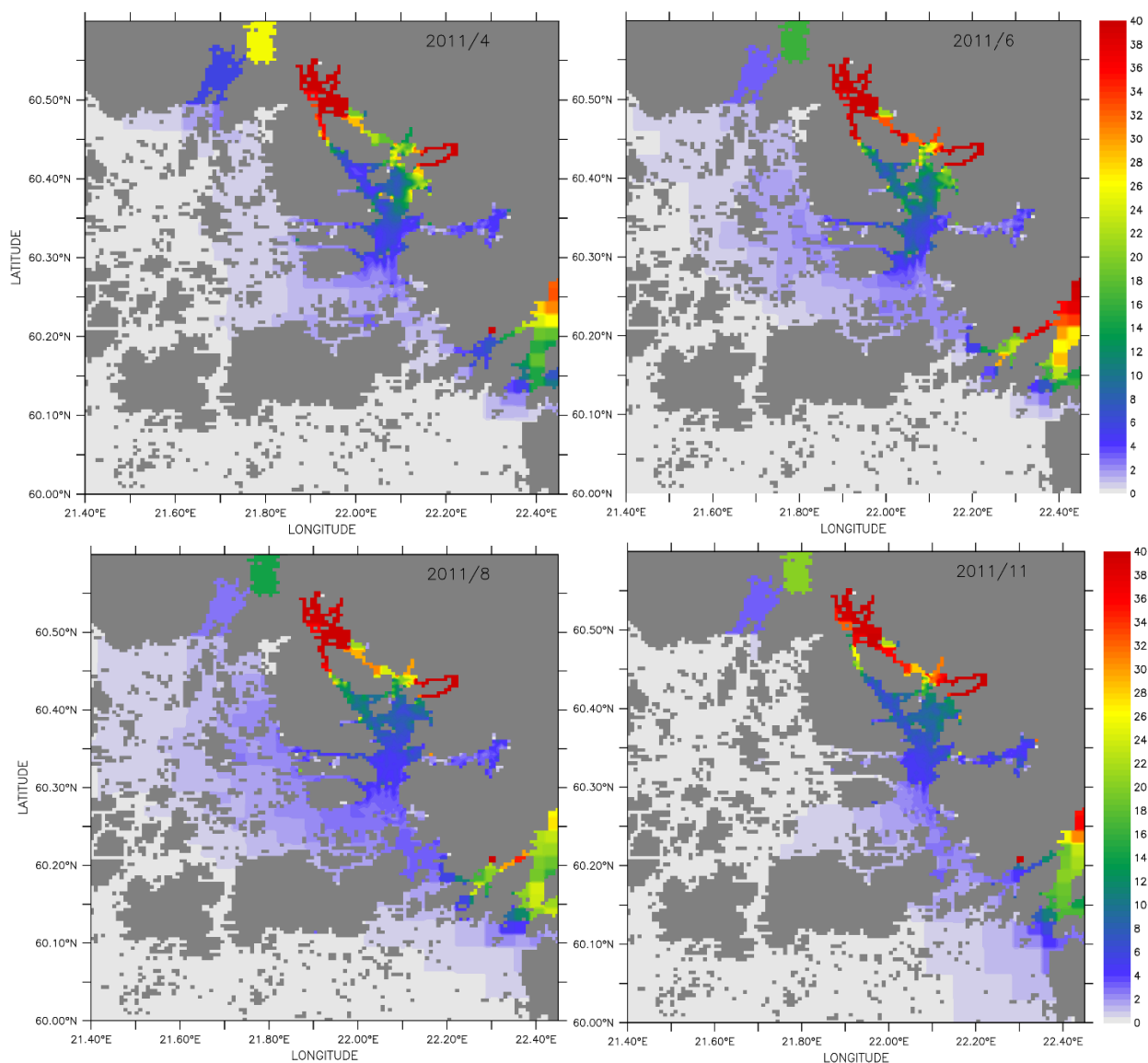
## 11. Valuma-aluekuormituksen vähentämisen vaikutukset Saaristomerellä

VEMALA –mallilla toteutettiin valuma-alueiden epäorgaanisten ravinnepäästöjen vähennysskenaariot, ja maatalouden maksimitoimenpiteillä kuorman vähenemä on 2020-2029 keskimäärin 19% (typpi) ja 15% (fosfori), kun muihin kuormituslähteisiin, kuten metsätalouteen, ei oleteta tehtävän muutoksia (Kuva 13). Kevään kuormituspiikki osuu planktonlevien kevätkukintaan syksyn huipun tullessa kasvukauden jälkeen; kesällä jokikuormitus on suhteellisen alhainen.



Kuva 13. Epäorgaanisen typen ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ;  $\text{t N kk}^{-1}$ , vasen paneeli) ja fosforin ( $\text{kg PO}_4\text{-P kk}^{-1}$ , oikea) kuukausittainen kuormitus Saaristomereen (VEMALA –malli): Nykytilanne (keskiarvo 2000-2009, sininen palkki), sekä ennuste (2020-2029) nykytoimenpiteiden jatkuessa (punainen) ja lisätoimenpiteillä (maksimaalinen toteutettavissa oleva peltopäästöjen vähennys, vihreä).

Rannikomallimme kulkeutumissimulaatioista puolestaan nähdään, että valuma-aluekuormituksen vaikutusalue rajoittuu lähinnä rannikkoon ja sisäsaaristoon (Kuva 14; konservatiivisen, suspendoituneen merkkiaineen kulkeutumissimulaatio), mikä osoittaa, että ao. kuormitus laimenee tehokkaasti edetessään. Tätä näkemystä tukevat alueellisten saliniteettipitoisuuksien jakautumisen havainnot ja vastaavat hydrodynaamisen mallin simulaatiot: Saaristomerенn vesi on suolaisuuden suhteen lähes homogeenista aivan rannikon läheisimpiä sisälahtia lukuun ottamatta (Kuva 7), mikä kertoo tehokkaasta ulappa- ja rannikkovesien sekoittumisesta.

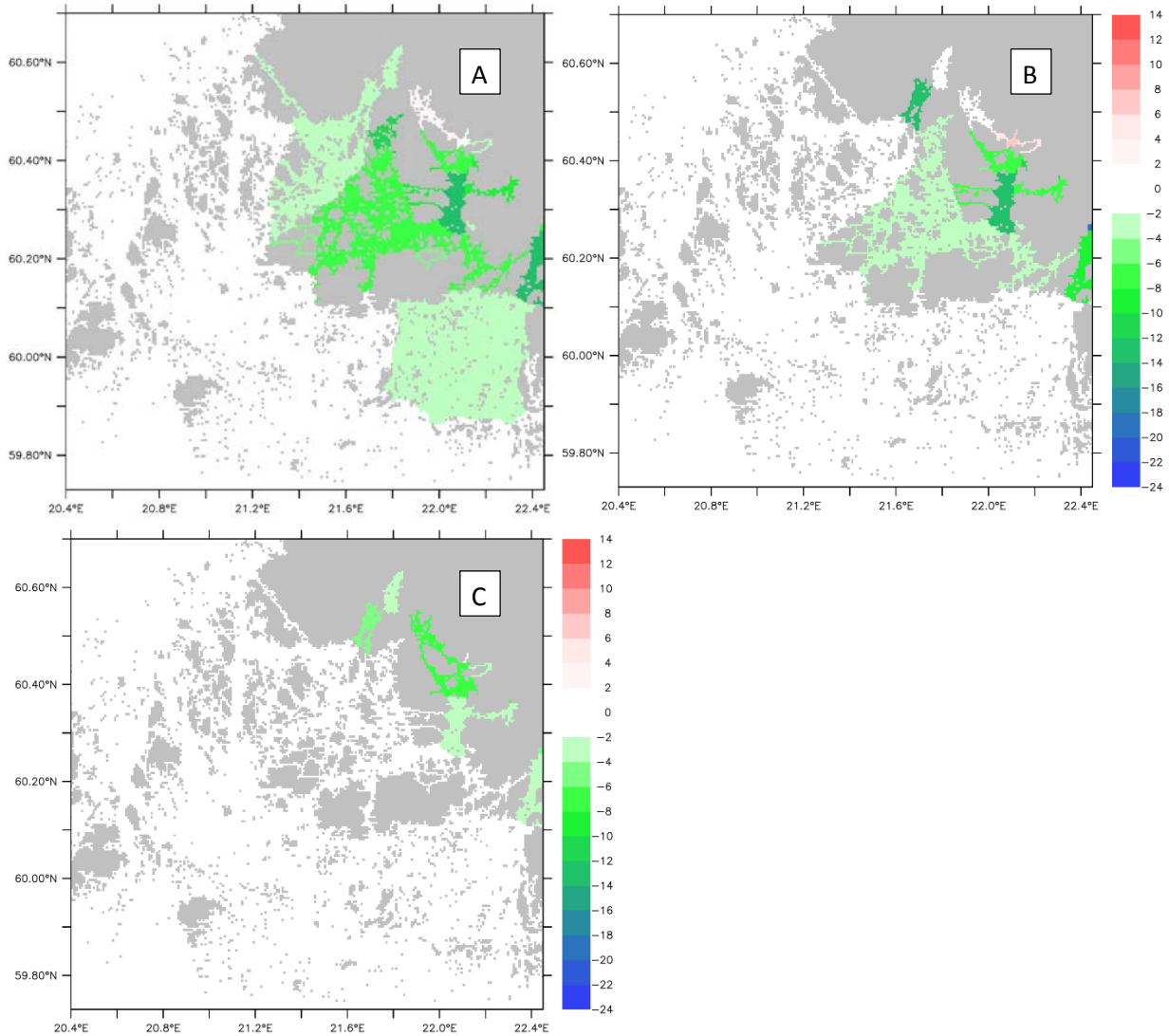


**Kuva 14. Valuma-alueen jokikuormituksen kulkeutuminen ja laimenneminen Saaristomerellä: Mallisimulaatio konservatiivisen merkkiaineen (tässä kokonaisfosfori,  $\mu\text{g/l}$ ) keskimääräisestä kuukausittaisesta alueellisesta jakautumisesta huhti-, kesä-, elo- ja marraskuussa 2011. Muita ravinnesyötteitä ei mukana.**

VEMALA –kuormitusskenaario, jossa toteutettiin maatalouden ravinnepestöjen maksimaaliset vähennykset, johti 5-10% *a*-klorofylli -pitoisuuden laskuun rannikon ja sisäsaariston alueella (Kuva 15). Tämä alustava arviomme vaikuttaa ylisummaan realistiselta ottaen huomioon kuormituksen tehokkaan laimennuksen rannikolla, mutta toisaalta aivan rannikon tuntumassa malli todennäköisesti aliarvioi rehevöitymävasteen, koska nämä matalat, rajoitetun vedenvaihdon alueet jäävät 3-ulotteisen hydrodynaamisen mallimme katveeseen. Valuma-aluekuormituksen rehevöittävä vaikutusta (prosentuaalista muutosta) peittää osaltaan myös vastealueen (Kuva 14) suhteellisen voimakas sisäinen kuormitus (Kuva 6) ja monien pistekuormittajien päästöt (Kuva 5).

Esitettyssä skenaariossa vain Saaristomerенn valuma-alueella vähennetään kuormitusta – reaali maailmassa näitä toimenpiteitä tulee toteuttaa koko Itämerенn valuma-alueella veden tilan kohentamiseksi. Esimerkiksi

7.5% lasku ulkopuolelta tulevien ravinteiden taustakuormituksessa johti noin 5-10% laskuun koko Saaristomeren klorofylli-*a* -pitoisuuksissa.



Kuva 15. Valuma-alueen ravinnekuormituksen maksimaalisen vähentämisen vaikutus Saaristomerellä: klorofylli *a* -pitoisuuden prosentuaalinen muutos (nykykuormitustilanteeseen verrattuna) keväällä (A, huhtitoukokuu), kesällä (B, kesä-elokuu) ja syksyllä (C, syys-lokakuu). Maatalouden maksimitoimenpiteillä epäorgaanisen ravinnekuormuksen vähenemä VEMALA -skenaariossa on keskimäärin 19% (typpi) ja 15% (fosfori).

## 12. Mallikehitys

Jatkon vastaavassa yhteistyöhankkeessa laaditaan Suomenlahden ja Selkämeren rannikkoalueet kattava kokonaiskuormitusmalli. Tämä malli ja siitä edelleen kehitettävät versiot vahvistavat rannikkoalueiden vesiensuojelullisen suunnittelun ja päätöksenteon kvantitatiivista, tieteellistä pohjaa. Sekä hydrodynaamisen mallin että vedenlaatumallin tulokset vastasivat hyvin havaintoja. Mallin soveltamiselle uusille alueille ei ole muutenkaan estettä mallin hydrodynamiikan (fysiikan) eikä ravinnekiertojen yleisten kuvausten puolesta, ja fysiikan osalta työ helpottuu jatkossa. Valuma-alueen kuormitusmallissa (VEMALA) lähtötietojen (peltojen viljavuusanalyysiaineistot) ja järvi-prosessien tarkennukset ovat selkeimpiä kehitystarpeita. Sisäisen kuormituksen arviot perustuvat poikkeuksellisen edustavaan aineistoon (SEABED -hanke), mutta pohjien suuri heterogeenisyys ja vakioitu, keskimääräinen arvio sedimentaationopeuksille tuovat epävarmuutta aineiston soveltamiseen mallinnusalueiden laskelmissa. Tulevaisuudessa sedimentaatio tulee sisällyttää dynaamisena muuttujana malliin.

## 13. Johtopäätökset

VEMALA –kuormitusskenaario, jossa toteutettiin maatalouden ravinnepäästöjen vähennysten maksimitoimenpiteet, johti 5-10% klorofylli-*a* -pitoisuuden laskuun rannikon ja sisäsaariston alueella. Tämä alustava arviomme vaikuttaa ylisummaan realistiselta ottaen huomioon kuormituksen tehokkaan laimenemisen rannikolla. Valuma-aluekuormituksen vähentämisen vaikutusta (prosentuaalista muutosta) peittää osaltaan myös vastealueen suhteellisen voimakas sisäinen kuormitus ja monien pistekuormittajien päästöt. Aivan rannikon tuntumassa, ulospäin rajoitetun vedenvaihdon alueilla malli voi aliarvioida rehevöitymismvasteen (hydrodynaamisen mallin katvealuetta), ja tällaisiin alueisiin tuleekin soveltaa niitä varten kehitettyä SYKEN tilastollista CLR –mallia (Olli Malve). Tulevaisuudessa näiden kahden mallijärjestelmän tulokset kannattaa yhdistää koko rannikon kattamiseksi vesien- ja merenhoidossa.

Leväbiomassan ja *a*-klorofyllin pitoisuudet ovat herkkiä ja informatiivisia rehevöitymisen biologisia indikaattoreita. Nykyoloissa pintakerroksen rehevöitymistä vakavampi ekologinen ongelma Saaristomerellä on kuitenkin pohjien hapettomuus (anoksia), joka laajenee loppukesällä ja tuhoaa elämän näistä habitaateista ja lisää lähinnä kemiallisten prosessien välityksellä sedimenttien sisäistä kuormitusta. Todennäköisesti myös valtaosa pintakerrokseen päätyvästä uusien ravinteiden kuormituksesta sitoutuu leviin ja vajoaa sedimentaation välityksellä Saaristomeren pohjalle (vrt. Dugdale ja Goering 1967, *Limnol. Oceanogr.* 12), missä se kuluttaa hajotessaan happea ja vapauttaa ravinteita takaisin kiertoon. Valuma-alueen kuormituksen pienentämisellä on siis huomattava potentiaalinen merkitys Saaristomeren pohjien tilan kohenemiselle sedimentaation vähetessä.

Lisäksi valuma-alueen ravinnekuormitus aiheuttaa vakavia ympäristöhaittoja rantojen rihmamaisten levien ja päällyksilevien ylenmääräisen kasvun seurauksena, joka tukahduttaa ranta-alueiden luontaisen kasvuston ja esimerkiksi näiden habitaattien avainroolin kalojen kutualueena ja poikasten kasvuympäristönä. Kaikkiaan vesien virkistyskäyttöarvo siis kohenee valuma-aluekuormituksen pienemisen myötä.

Realistisia matemaattisia malleja tarvitaan arvioitaessa ihmisperäisen kuormituksen ja sen kontrolloinnin ympäristövaikutuksia rannikkoalueilla, jotka ovat fyysisesti avoimia, mutkikkaan vuorovaikutusverkoston säätelemiä ekosysteemejä. Nykyiset Itämeren ekosysteemimallit eivät kata rannikon erityispiirteiden mallinnusta, joten hankkeessa kehitettiin Saaristomeren alueen kokonaiskuormitusmalli vesienhoidollisten toimenpiteiden suunnittelun, vaikutusten arvioinnin ja seurannan työkaluksi. Hankkeen tavoitteet määritettiin ja hanke toteutettiin yhteistyössä loppukäyttäjien, YM:n, VARELY:n ja UUDELY:n, kanssa. Saaristomeren erityisen vaikea mallinnettava sen pohjan muotojen ja rantaviivan rikkonaisuuden vuoksi. Hankkeen tavoitteeksi asetettu mallien ja havaintoaineistojen yhdistäminen kuitenkin saavutettiin. Tuloksena on Itämeren piirissä uraauurtava malliympäristö, joka kytkee riittävän realistisen hydrodynaamis-biogeokemiallisen rannikkomallin operatiiviseen valuma-aluemalliin.