

Rannikon (Suomenlahti, Saaristomeri, Selkämeri) kokonaiskuormitusmalli: ravinnepäästöjen vaikutus veden tilaan

- Kehityshankkeen loppuraportti (XI 2015- VI 2018)

Tutkimusryhmä: Risto Lignell¹, Elina Miettunen¹, Laura Tuomi², Janne Ropponen¹, Harri Kuosa¹, Jenni Attila¹, Irma Puttonen³, Kaarina Lukkari¹, Heikki Peltonen¹, Jouni Lehtoranta¹, Markus Huttunen¹, Marie Korppoo¹, Kimmo Tikka², Janne Mäyrä¹, Anna-Stiina Heiskanen¹, Bo Gustafsson⁴, Erik Gustafsson⁴, Jari Hänninen⁵, Frede Thingstad⁶, Karel Kaurila⁷, Jarno Vanhatalo⁷, Antti Westerlund², Simo-Matti Siiriä²

Organisaatiot: ¹SYKE, ²Ilmatieteen laitos, ³Åbo Akademi, ⁴Baltic Nest Institute (Ruotsi), ⁵Turun yliopisto, ⁶Bergenin yliopisto (Norja), ⁷Helsingin yliopisto



Sisällysluettelo

1.	TIIVISTELMÄ	- 3 -
2.	HANKKEEN TAUSTA	- 4 -
3.	HANKKEEN AIEMMAT VAIHEET	- 7 -
4.	HANKKEEN TAVOITTEET	- 8 -
5.	HANKKEEN OSAPUOLET JA MENETELMÄT	- 9 -
6.	RANNIKON MALLINNUS: HANKKEEN TULOKSET	- 10 -
6.1	Mallin käyttöliittymä	- 10 -
6.2	Vesipatsaan havaintoaineisto ja pistekuormitus	- 14 -
6.3	Sedimenttien fosforivarannot ja sisäinen kuormitus	- 21 -
6.4	Kolmiulotteisen hydrodynamiikan mallinnus	- 28 -
6.5	FICOS-mallijärjestelmä ja vesipatsaan ravinnekiertojen mallinnus	- 34 -
6.6	Valuma-alueen kuormitus	- 43 -
6.7	Kuormitusvähennysten vaikutus Saaristomeren rehevöitymiseen	- 48 -
6.8	Ulkoisen ja sisäisen kuormituksen merkitys Saaristomerellä	- 52 -
7.	TULOSTEN KESTÄVYYS JA HYÖDYNTÄMINEN	- 56 -
8.	JATKOKEHITYSTARPEET	- 58 -
	KIRJALLISUUSVIITTEET	- 61 -
	LIITTEET	- 63 -
	Liite 1. Opas vedenlaatumallijärjestelmän käyttöön	- 63 -
	Liite 2. Menetelmä sedimentin prosesseissa veteen vapautuvan fosforin määrän arvioimiseksi	- 71 -
	Liite 3. Mallilyhenteet ja niiden selitykset	- 74 -
	Liite 4. FICOS -mallijärjestelmän toiminta	- 75 -
	Liite 5. Mallin parametrisointi ja bayeslainen epävarmuusanalyysi	- 77 -
	Liite 6. VEMALA ja ICECREAM –mallien kuvaukset	- 79 -
	Liite 7. VEMALAn ilmastoskenaariot	- 83 -
	Liite 8. Nash-Sutcliffe -kerroin	- 84 -

1. TIIVISTELMÄ

Hankkeessa kehitettiin rannikon (Suomenlahti-Saaristomeri-Selkämeri) kokonaiskuormituksen mallijärjestelmä vesienhoidollisten toimenpiteiden suunnittelun, vaikutusten arvioinnin ja seurannan työkaluksi. Virtaukset ovat avainasemassa avoimia mereisiä systeemejä mallinnettaessa, ja Suomen rannikon mutkikas pohjan topografia, saarisuus ja rantaviivan rikkonaisuus tekevät sen hydrodynamiikan mallinnuksesta erittäin haastavan. Pääosin hyödynnettiin ja jalostettiin olemassa olevia malleja ja havaintoaineistoja. Tärkeimpinä työkaluina käytettiin VEMALA -mallia valuma-alueelta tulevan kuormituksen arviointiin (ml. epäorgaaniset ravinteet) sekä sisäisen kuormituksen, pistekuormituksen ja ilmalaskeuman empiiristen arvioiden, 3-ulotteisten (3D) COHERENS ja NEMO -virtausmallien ja FICOS -vedenlaatumoduulin kytkentää rannikkoalueen hydrodynamiikan, taustakuormituksen ja vesipatsaan ravinnevoiden estimointiin. Nykyisistä Itämeren ekosysteemimalleista puuttuu rannikkokomponentti, ja hankkeemme on uraa uurtava Itämeren piirissä kytkiessään realistisen hydrodynaamis-biogeokemiallisen rannikomallin operatiiviseen valuma-alueeseen.

FICOSilla pystyttiin kuvaamaan realistisesti leväbiomassan (N_2 -sitovat sinilevät ja muut levät), α -klorofyllin sekä typen ja fosforin epäorgaanisten (DIN ja DIP) ja kokonaisravinteiden pitoisuuksien vuotuiset kehitykset sekä ravinnekuormituksen ja sen muutosten aiheuttamat vasteet näissä muuttujissa. Korkean erotuskyvyn virtausmallin avulla simuloitiin ravinnesyötteiden kulkeutumista ja laimenemista saaristossa ja osoitettiin, että sekä jokikuormituksen että sisäisen kuormituksen vaikutus rajoittuu lähinnä sisä-välisaariston alueelle.

Saaristomerelle demonstroitiin malliarviointi kuormituksen eri lähteiden (valuma-alue, pohjasedimentit, pistekuormitus, ilmalaskeuma ja ulapan taustakuormitus) merkityksestä tuottavan pintakerroksen ravinnesyötteinä kasviplanktonin kasvukaudella. Taustakuormitus dominoi syötteitä koko Saaristomerien skaalassa. Tärkeimmät syötteet rannikon läheisyydessä olivat jokikuormitus (DIN) ja sisäinen, sedimenteistä vapautuva kuormitus (DIP), ja suunnilleen puolet sisäisestä kuormituksesta kulkeutui mallin mukaan syvävedestä pintakerrokseen.

Lisäksi laadittiin Saaristomerelle pitkän aikavälin (30-100 v) veden tilan (α -klorofylli -pitoisuus) ennusteet skenaarioissa, joissa joko jatketaan nykyisillä vesien ja merenhoidon toimenpiteillä tai vaihtoehtoisesti toteutetaan maksimaalinen peltokuormituksen vähentäminen (VEMALA -malli) ja kaikki Itämeren maat toteuttavat HELCOMin Baltic Sea Action Plan'in (BSAP) mukaiset kuormitusvähennysten tavoitteet (ulapan taustakuormitus; Baltic Nest Institute, BALTSEM -mallin skenaarioajat). Malliennusteiden mukaan ilmaston lämpenemisen aiheuttama lisääntyvä sadanta ja ravinteiden huuhtoutuminen mereen johtaa rehevöitymisen kasvuun, jollei BSAP:n ja peltokuormituksen vähentämistavoitteita pystytä toteuttamaan.

Hanke on toteutettu Ympäristöministeriön (YM) tilauksesta, ja sen rahoittaja on YM:n ravinteiden kierrätysohjelma (Hanke 12, RaKi-viite 6.2). Hankkeen vastuuorganisaatio on SYKE (vastaava tutkija Risto Lignell) ja se toteutettiin SYKEN johtamassa konsortiossa, johon lisäksi kuuluivat Ilmatieteen laitos (IL) ja Åbo Akademi (ÅA). Hanke on toteutettu tiiviissä yhteistyössä konsortion, YM:n ja keskeisten loppukäyttäjien, Varsinais-Suomen ELY-keskuksen (VARELY), Uudenmaan ELY-keskuksen (UUELY), Kaakkois-Suomen ELY-keskuksen (KASELY) sekä Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskusten kanssa (EPOELY ja POPELY); lisäksi olemme tehneet hedelmällistä tieteellistä yhteistyötä Tukholman yliopiston Baltic Nest Institute'n (BNI), Kungliga Tekniska Högskolanin (KTH, Tukholma) sekä Bergenin (Norja), Helsingin ja Turun yliopistojen kanssa. YM, VARELY, UUELY ja KASELY muodostivat myös hankkeen ohjausryhmän, jolle tutkimuskonsortio säännöllisesti raportoi tehtävien edistymisestä.

Hankkeen kokonaisbudjetti oli 580k€, josta YM:n rahoitusosuus oli 300k€.

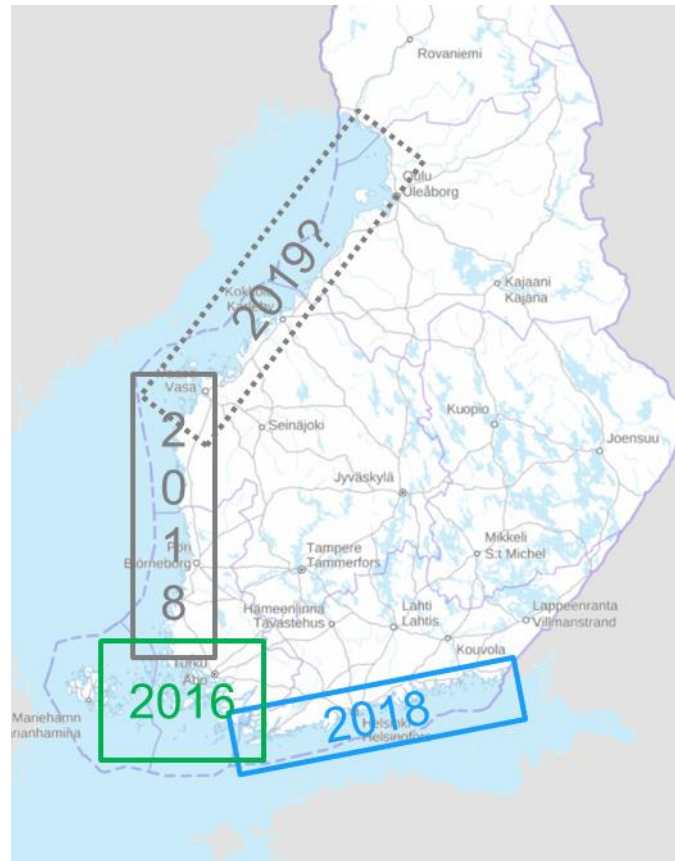
2. HANKKEEN TAUSTA

Terrestristen ja akvaattisten ekosysteemien ravinnekierrot ovat mutkikkaiden vuorovaikutussuhteiden tulosta, sisältäen ravinnevoiden takaisinkytkennät. Lisäksi mereiset systeemit ovat fyysikaalisesti avoimia eli vapaassa vuorovaikutuksessa ja materian vaihdossa ympäristön vesialueiden kanssa. Näin ollen valuma-alue-rannikko systeemin dynamiikka ei ole intuitiivisesti hallittavissa, vaan tarvitaan matemaattisia malleja sen toiminnan kuvaamiseen ja vasteiden estimointiin sekä systeemin ominaisuuksien kvantitatiiviseen ymmärtämiseen kokonaisuutena. Tavoitteena on laatia riittävän realistisia (mekanistisia) ja samalla riittävän yksinkertaisia (läpinäkyviä) mallikuvauksia, jotka toisaalta auttavat ymmärtämään ao. systeemin toimintaa eri skenaarioissa, ja toisaalta ovat riittävän yleisiä soveltuakseen eri rannikkoalueille.

Rannikon fyysikaalis-kemiallisilla vaihtumisvyöhykkeillä on suuri merkitys Itämeren avoimissa estuaarisysteemeissä. Esimerkiksi SYKEN tutkimuksissa on osoitettu, että nämä vyöhykkeet pidättävät ja modifioivat merkittäväällä tavalla valuma-alueilta tulevaa ravinnekuormitusta. Saaristomerelle 1990-luvulla laaditun virtaus- ja vedenlaatumallin tulokset osoittivat puolestaan, että maa-alueelta tulevan kuormituksen ja pohjasta vapautuvien ravinteiden lisäksi Itämeren pääaltaasta tulevilla ravinnevirroilla saattaa olla suuri merkitys alueen rehevöitymiskehityksessä (Helminen ym. 1998). Näiden ravinnelähteiden keskinäistä suhteuttamista sekä paikallisten kuormituslähteiden vaikutusten arviointia varten on viranomaisilla suuri tarve kvantitatiivisille mallityökaluille, joilla systeemin rehevöitymisvasteita kontrolloivat mutkikkaat vuorovaikutussuhteet ja takaisinkytkennät voidaan hallita. Hankkeessa laadittiin tällainen rannikon (Suomenlahti-Saaristomeri-Selkämeri) kokonaiskuormitusmalli YM:n, VARELYn, UDELYn, KASELYn ja EPOELYn vesienhoidollisten toimenpiteiden suunnittelun, vaikutusten arvioinnin ja seurannan työkaluksi (mallinnusalueet on esitetty Kuvassa 2.1). Työssä hyödynnettiin aikaisemmissa hankkeissa kerättyjä havaintoaineistoja ja mallien tulostietoja.

Suomen rannikko on poikkeuksellisen mosaiikkimainen ja matala meri-alue, minkä vuoksi pohjasedimentin ravinnekierrot voivat säädellä merkittävästi veden laatua yhdessä virtausdynamiikan kanssa. Pohjan ja vesipatsaan välinen ravinnekierto voikin merkittävästi hidastaa ulkoisen ravinnekuormituksen vähennyksistä tulevaa veden laadun parantumista niin ajallisesti kuin paikallisestikin. Sisäisen kuormituksen empiiristä asiantuntija-arviota varten kerättiin kattava Saaristomerien kenttähavaintoaineisto (ÅA ja SEABED projekti ym. lähteet), ja näitä tuloksia ekstrapoloitiin pohjan laadun mukaan muille rannikkoalueille. Valuma-alueelta tulevan kuormituksen ja sen muutosten mallinnus on myös keskeisellä sijalla rannikon rehevöitymisvasteiden arvioinnissa ja siihen käytettiin SYKEssä sovellettua ja hankkeessamme edelleen kehitettyä VEMALA-kuormitusmallia (mallien lyhenteet ja lyhyt kuvaus on Liitteessä 3). Synteesinä tuotimme Saaristomerelle mallitarkastelun, jossa arvioidaan keskeisten mallialueen ravinnelähteiden (valuma-alue, ulapan taustakuormitus, sedimenttien sisäinen kuormitus ja pistekuormittajat) merkitys tuottavan pintakerroksen rehevöittäjinä. Malliarviomme on tärkeä edistysaskel rannikon rehevöitymisprosessin ymmärtämiseksi etenkin sisäisen kuormituksen osalta, sillä sedimenteistä syväveteen vuodessa vapautuva DIP-vuo dominoi rannikon läheisiä DIP-syötteitä.

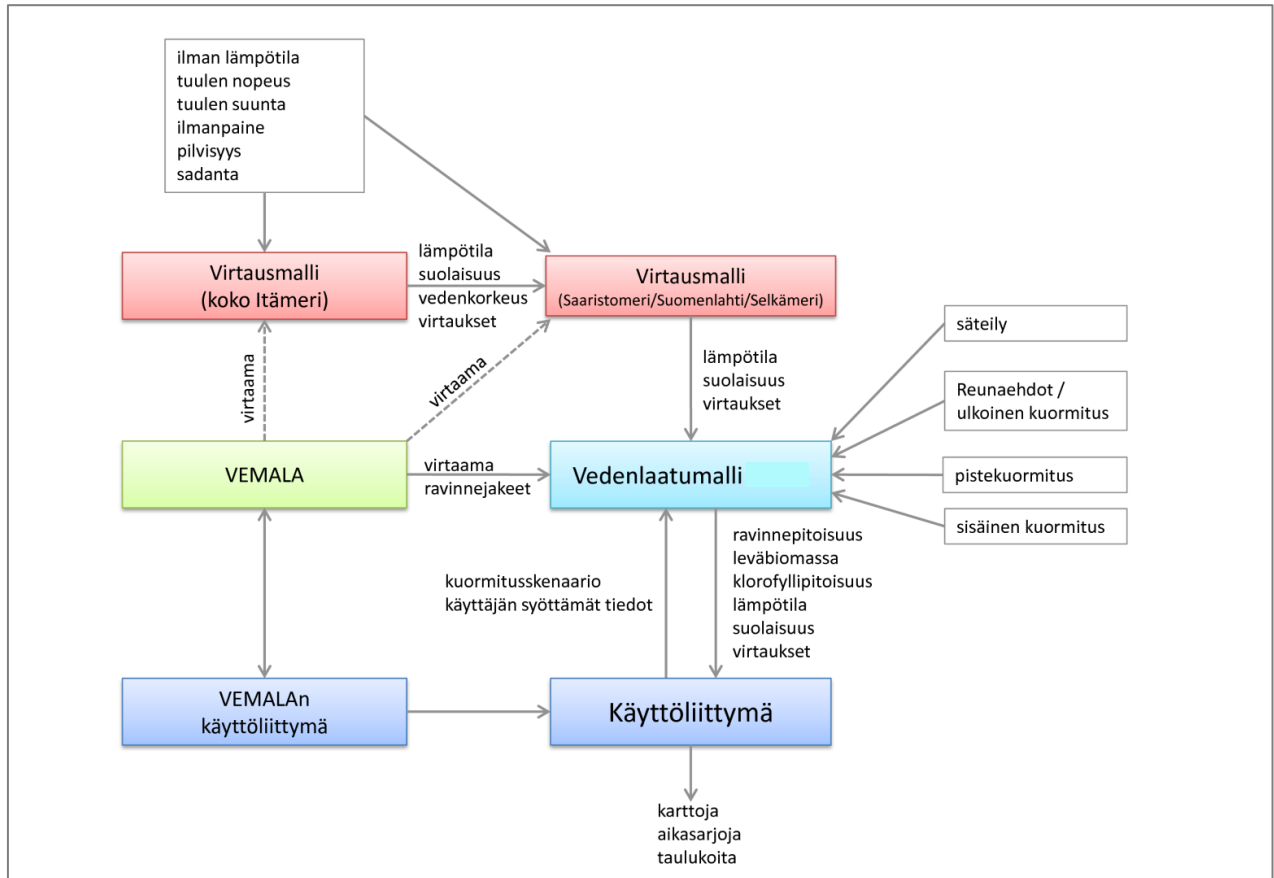
Rannikon vesipatsaan ravinnekiertoja kuvaavaksi malliksi valittiin SEABED -hankkeen Saaristomerellä käyttämä biogeokemiallinen malli (Kiirikki ym. 2001), jota on kehitetty edelleen. Vedenlaatumalli on mukautettu käyttämään koko Itämeren ja rannikkomme kytkevän 3D hydrodynaamisen mallimme tuottamaa dataa (veden virtaukset, lämpötilakerrostuneisuus ym.) ja kommunikoidaan hankkeen toteuttaman uuden käyttöliittymän kanssa (Kuva 2.2; yksityiskohtaisempi kuvaus mallijärjestelmän toiminnasta Liitteessä 4). Sisäisen, valuma-alueelta ja ulapalta peräisin olevan ravinnekuormituksen lisäksi vedenlaatumallin syötteisiin on sisällytetty ilmalaskeuma ja kaikki rannikkoalueen pistekuormittajat.



Kuva 2.1. Rannikon mallinnusalueet. Saaristomerén kokonaiskuormitusmallin ensimmäinen versio valmistui 2016. Sitä on kehitetty edelleen tämän hankkeen uusien alueiden, Suomenlahden ja Selkämeren mallinnuksen yhteydessä. Myös jatkosuunnitelma Merenkurkun-Perämeren rannikon mallintamiseksi on laadittu.

Valuma-aluemallien skenaariot sisältävät 7 eri ilmastoskenaariota (Liite 7) ja kaksi maatalouden toimenpidevaihtoehtoa. Toimenpidevaihtoehdot ovat nykyiset maataloustoimenpiteet tai maksimitoimenpiteet maatalouden kuormituksen vähentämiseksi. Merimallissa pystytään edelleen valitsemaan haluttu skenaario näistä meren ravinnesyötteenä. 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 määritellä.

Hankkeessa laskettiin 57 skenaariota Saaristomerén ravinnekuormituksen mahdollisesta kehityksestä nykytilasta vuosiin 2030, 2050 ja 2100 (á 10 v tarkastelujaksot). Nämä skenaariot sisältävät keskimääräisen ilmastonskenaariota (lämpötila nousee n. 2 °C vuoteen 2100 mennessä) ja kaksi maatalouden toimenpidevaihtoehtoa: 1. nykyiset maataloustoimenpiteet jatkuvat ("business as usual", BAU) tai 2. toteutetaan maksimitoimenpiteet maatalouden kuormituksen vähentämiseksi (Δ Pelto(max)). Lisäksi ulapan taustakuormituksen arvioinnissa on käytetty vastaavasti kahta BNI:n BALTSEM -mallinnusteiden skenaariota: 1. nykyiset kuormituksen vähennystoimenpiteet jatkuvat (BAU) tai 2. kaikki Itämeren rannikkovaltiot toteuttavat HELCOMin Baltic Sea Action Plan'in (BSAP) tavoitteet. Selkämeren tilan pitkäaikaisennusteissa on käytetty vasteiden vaihteluvälin haarukoimiseksi kahta ao. skenaarioiden kombinaatiota, eli 1. perusvaihtoehdot (BAU ja BAU) ja 2. äärevimmät toteutettavissa olevat vaihtoehdot (Δ Pelto(max) ja BSAP).



Kuva 2.2. Kaaviokuva rannikon kokonaiskuormituksen FICOS-mallinnusjärjestelmästä. Punaisella merkityt 3D virtausmallit ovat valmiiksi ajettuja ja turkoosilla merkittyä vedenlaatumallia kutsutaan käyttöliittymän kautta. Mallilyhenteet on selitetty Liitteessä 3 ja yksityiskohtainen kuvaus mallijärjestelmän toiminnasta on Liitteessä 4.

Kokonaiskuormitusmallista hyötyvät välittömästi alueen vesiensuojelua palvelevan alueellisen ympäristöhallinnon työntekijät (ELY -keskukset) sekä YM:n Itämeren suojelua kehittävät virkamiehet. Merenhoidon ja vesienhoidon suunnittelukierros on 6 vuotta.

Merenhoitosuunnitelman hyvän tilan määrittelyä ja sen indikaattoreita on tarkennettu toista suunnittelukautta varten vuonna 2018. Sekä vesienhoidossa että merenhoidossa tarvitaan työkaluja, joilla pystytään arvioimaan tehtyjen toimenpiteiden ympäristövaikutuksia, ja hankkeemme on kehittänyt näiden tarpeiden mitat täyttävän mallin.

3. HANKKEEN AIEMMAT VAIHEET

Hankkeen kahdessa aikaisemmassa vaiheessa (VI 2013 – IV 2015) kehitettiin ravinnekuormituksen ja veden laadun mallinnusjärjestelmä (FICOS, Finnish Coastal Nutrient Load Model) Saaristomeren veden tilan ja kuormitusvasteiden arviointiin (raportit Lignell ym. 2014, 2016).

Saaristomeren mallinnuksessa on aiemmin toteutettu seuraavat keskeiset tehtävät:

- I. Käyttötarpeet määriteltiin yhdessä YM:n, VARELY:n ja UDELY:n kanssa. Tämän pohjalta identifioitiin mallilta tarvittavat ominaisuudet sekä suunniteltiin ja laadittiin käyttöliittymä: sen ulkonäkö, toiminnallisuus, tietojen syöttötapa, tulostettavat suureet ja tunnusluvut sekä niiden esitystapa. Käyttöliittymän koodauksen toteutti Siili Oy.
- II. Olemassa olevien tietovarantojen, tietoaineiston laadun sekä sen prosessointi- ja hyödyntämistarpeen kartoitettiin ja koottiin mallinnuksen havaintoaineistona käytettäväksi.
- III. Sedimenttien sisäisen fosforikuormituksen asiantuntija-arvio tuotettiin SEABED-hankkeessa (ÅA) kattavasti kerättyjen Saaristomeren sedimenttinäytteiden laadukkaiden kemiallisten analyysien perusteella.
- IV. Valuma-alueen virtaama- ja kuormitustiedot tuotettiin WSFS-VEMALA –mallilla, mukaan lukien hankkeessa kehitetty epäorgaanisten ravinteiden syötteiden mallinnus.
- V. Kolmiulotteinen hydrodynaaminen Itämerimalli muokattiin ja skaalattiin Saaristomerimallin tarkemman erottelukyvyn tarpeita vastaavaksi (COHERENS) ja koko Itämeren malli kytkettiin laadittuun Saaristomerimalliin. Keskeinen haaste oli pohjan topografian ja alkuarvojen määrittäminen mutkikkaan saaristoalueen virtausmallinnusta varten.
- VI. Aiemmin SEABED-hankkeessa (ÅA, KTH) laadittu veden laadun mallinnusjärjestelmää kehitettiin ja sovellettiin Saaristomerelle kytkemällä siihen tuotettu ulapan taustakuormitus, sedimenttien sisäinen kuormitus ja valuma-alueen kuormitus. Kehitetty mallijärjestelmä (FICOS) hyödyntää lisäksi meri- ja rannikkomallien virtauskenttädataa, ja sen sisältämää ravinnekiertomallia käytetään veden tilan, mm. a -klorofyllin pitoisuuksien ja kuormitusvasteiden arviointiin.
- VII. Julkinen päätösseminaari pidettiin 30.10. 2015, jossa esiteltiin havaintoaineistoa, mallia, malliajoja ja käyttöliittymää. Tilaisuuteen kutsuttiin ulkopuolisia asiantuntijoita ja sidosryhmiä, kuten ELY-keskuksia. Saadun palautteen pohjalta jatkohanketta muokattiin ja kehitettiin yhteistyössä ohjausryhmän kanssa.

4. HANKKEEN TAVOITTEET

Tämä raportti kattaa jakson XI 2015 – VI 2018, jolloin Suomenlahdelle ja Selkämerelle on tuotettu FICOSin tarvitsemat ulkoiset ja sisäiset ravinnesyötteet ja fysikaaliset puitteet (ml. 3D hydrodynamiikka ja hydrografia), ja ao. mallijärjestelmä on sovellettu näille alueille; samalla on Saaristomerén vastaavaa vedenlaatumoduulia kehitetty edelleen koko rannikon mallinnuksen tarpeisiin soveltuvaksi (Kuva 2.1).

Hankkeella (1.11.2015 – 30.6.2018) oli kaikkiaan seuraavat keskeiset tavoitteet:

- I. Käyttötarpeiden määrittely yhdessä YM:n, VARELY:n, KASELY:n ja UUDELY:n kanssa: mallilta tarvittavien ominaisuuksien ja sen käyttöliittymän kehittäminen (ulkonäkö, toiminnallisuus, tietojen syöttötapa, tulostettavat suuret ja tunnusluvut sekä niiden esitystapa).
- II. Mallinnuksen havaintoaineiston koostaminen olemassa olevista tietovarannoista Suomenlahdelle ja Selkämerelle (mukaan lukien laadun varmistus).
- III. Valuma-alueen virtaama- ja kuormitustietojen sekä niiden ennusteiden tuottaminen WSFS-VEMALA –mallilla, erityiskohteena epäorgaanisten ravinteiden (typpi = DIN ja fosfori = DIP) voiden mallinnus.
- IV. Kolmiulotteisen (3D) hydrodynaamisen merimallin soveltaminen Saaristomerelle, Suomenlahdelle ja Selkämerelle (COHERENS ja NEMO -mallit). Pohjan topografian ja alkuarvojen määrittäminen alueelle virtausmallia varten.
- V. FICOS –vedenlaatumoduulin kehittäminen ja laajentaminen ja sen sisältämän ravinnekiertomallin parametrisoinnin ja prosessien formuloinnin kehittäminen sekä soveltaminen Saaristomerelle, Suomenlahdelle ja Selkämerelle. FICOS -mallijärjestelmän toteutus on sisältänyt mm. reunaehtojen määrittelyn havaintoaineistojen pohjalta (taustakuormitus) sekä kytkennän 3D hydrodynaamiseen mallin virtauskenttiin sekä sisäisen kuormituksen, ilmalaskeuman, pistekuormituksen ja valuma-alueen ravinnesyötteisiin.
- VI. Julkinen päätösseminaari (20.6.2018), johon mennessä hankkeen keskeiset tavoitteet (I-V) on toteutettu ja raportoitu. Tilaisuuteen kutsutaan ulkopuolisia asiantuntijoita ja sidosryhmiä, kuten ELY -keskuksia. Saadun palautteen pohjalta myös jatkohanketta (Merenkurkku-Perämeri) muokataan ja kehitetään yhteistyössä ohjausryhmän kanssa.

5. HANKKEEN OSAPUOLET JA MENETELMÄT

Hanke on toteutettu SYKE:n, Ilmatieteen laitoksen (IL), VARELYn, UUDELYn, KASELYn, Ympäristöministeriön (YM), Åbo Akademin (ÅA), Baltic Nest Institute'n (BNI, Tukholma), Bergenin yliopiston (Norja) ja Kungliga Tekniska Högskolanin (KTH, Tukholma) tiiviillä yhteistyöllä.

SYKE johti hanketta ja toimi sen vastuuorganisaationa (hankevastaava Risto Lignell; tutkijat SYKEstä, jollei erikseen mainittu). Mallinnuksen tarvitsema havaintoaineisto kerättiin sekä vesipatsaan että sedimentin avainmuuttujien osalta (Harri Kuosa, Kaarina Lukkari ja Irma Puttonen, ÅA), ja sitä täydennettiin kaukokartoituksen tuomalla parannuksella vesipatsaan aineiston alueelliseen kattavuuteen (Jenni Attila). Hankkeeseen palkattiin kokopäiväinen merimallintaja, FM Elina Miettunen, joka kartoitti batymetria- (pohjan topografia) tiedot sekä toteutti 3D hydrodynamiikan COHERENS (Saaristomeri) ja NEMO –mallinnukset (Suomenlahti ja Selkämeri). Laura Tuomi (IL) ohjasi Elinan merimallinnusta, toimitti tarpeellista IL:n hydrodynaamista ja meteorologista pakote- ja taustadataa sekä analysoi merimallin tuloksia Elinan kanssa. Risto Lignell ja Heikki Peltonen osallistuivat rannikkosysteemin ravinnevirtojen mallinnukseen yhdessä Janne Ropponen kanssa. Irma Puttonen ja Kaarina Lukkari koostivat ja analysoivat sisäisen fosforikuormituksen syötteiden asiantuntija-arvioita varten kattavan kenttähavaintoaineiston (ÅA ja SEABED-projekti; Turun yliopisto/Jari Hänninen ja Seilin aseman data, ym. lähteet) ja sovelsivat näitä tuloksia kaikille rannikkoalueille.

Risto Lignell modifioi SEABED –mallijärjestelmän sisältämän biogeokemiallisen ravannekiertomallin (Kiirikki ym. 2001) parametrisoinnin ja prosessien formuloinnit realistisemmiksi, ja Janne Ropponen kytki modifioidun ravannekiertomallin 3D hydrodynaamiseen merimalliimme yhdessä Elinan ja Lauran kanssa ja vastasi yleisemmin FICOS –vedenlaatumoduulin laatimisesta (Finnish Coastal Nutrient Load model). Janne vastasi myös malliajajien ja käyttöliittymän rajapinnan koodaamisesta sekä laskentaympäristön ylläpidosta yhdessä Kimmo Tikan (IL) kanssa; Kimmo johti lisäksi mallin käyttöliittymän laadintaa yhteistyössä Janne Mäyrän kanssa toteuttaen YM:n, VARELYn, KASELYn ja UUDELYn tarpeita ja toiveita mahdollisuuksien mukaan. J. Ropponen oli tiiviissä yhteydessä Ruotsiin SEABEDin vedenlaatumoduulin hyödyntämisen tiimoilta (SEABED-mallintajat Vladimir Cvetkovic ja Anders Jönsson). Ravannekiertomallin kehitystä toteutettiin yhteistyössä Prof. Frede Thingstadin kanssa (Bergenin yliopisto), ja malli kalibrointi ja epävarmuustarkastelut toteutettiin Prof. Jarno Vanhatalon ja DI Karel Kaurilan (Helsingin yliopisto) johdolla. Ulpaa taustakuormituksen pitkäaikaisten (30-100 v) skenaarioiden ennusteet saatiin HELCOMin BSAP kuormitusvähennysten vaikutusarvioiden mallintajilta, Dr Bo Gustafssonilta ja Dr Erik Gustafssonilta (BNI). Markus Huttunen tutki eri maankäyttömuotojen vaikutusta ravinnepäästöihin ja ohjasi valuma-alueen kuormituksen VEMALA –mallinnusta, jonka soveltamisen rannikkoalueille, mukaan lukien mekanistisen ekosysteemimallinnuksen kannalta keskeiset epäorgaanisten ravinteiden syötteet (N ja P) ja niiden syötteiden pitkäaikaisennusteet (30-100 v), toteutti puolestaan projektimme tutkija, PhD Marie Korppoo.

6. RANNIKON MALLINNUS: HANKKEEN TULOKSET

6.1 Mallin käyttöliittymä

Käyttöliittymä luotiin mallijärjestelmän malliajojen määrittelemiseksi ja laskettujen tulosten esittämiseksi – tavoitteena oli kevyt, helppokäyttöinen ja mahdollisimman selkeä selainpohjainen liittymä. Käyttöliittymällä valitaan haluttu muuttuja, alue ja sen resoluutio, ajoaika ja skenaario (esim. pistekuormittajan tai valuma-alueen ravinnepäästöjen vaikutus). Liittymän avulla saadaan aikasarja-, taulukko- ja karttapohjaiset tulostukset malliajoista, mukaan lukien mahdollisuus kahden malliajon vertailuun.

Mallin peruskäytön opas on Liitteenä 1.

6.1.1. Käyttöliittymän rakenne ja osoitteet

Rannikon vedenlaatumallin käyttöliittymä on 'single page'-web-sovellus, jolla voidaan määritellä vedenlaatumallin ajoja ja tarkastella ja vertailla malliajojen tuloksia.

Käyttöympäristö koostuu neljästä osasta:

- itse vedenlaatumalli
- mallijärjestelmän tausta- ja lähtötiedot
- rajapintapalvelu ja
- web-käyttöliittymä

Näiden neljän palvelun lisäksi käyttöliittymä käyttää SYKEN karttapalvelinta.

Käyttöliittymä saa lähtötietonsa rajapintapalvelusta, joka myös hoitaa liittymän ja mallijärjestelmän välistä kommunikaatiota. Käyttöliittymä on toteutettu siten, että se on kullekin mallihila-alueelle lähtötietoja lukuun ottamatta teknisesti identtinen. Käyttöliittymä on toteutettu pääosin java -scriptillä, lähtötiedot ja konfiguroinnit ovat json-tiedostoina ja rajapinta on koodattu python-kielellä käyttäen cherrypy -kirjastoa.

Käyttöliittymän osoitteet alueittain ovat:

1. SYKEN verkon ulkopuolelta yhteyttä otettaessa:

- <https://ahp2.ymparisto.fi/saaristomeri/sm> - Saaristomerren 1. hila
- <https://ahp2.ymparisto.fi/saaristomeri/sml> - laajennettu Saaristomeri
- <https://ahp2.ymparisto.fi/saaristomeri/sl> - Suomenlahti
- <https://ahp2.ymparisto.fi/saaristomeri/pl> - Selkämeri

2. CITRIX-yhteyden kautta ja SYKEN sisäverkosta osoitteet ovat vastaavasti:

- <http://kkst1.env.fi/saaristomeri/sm-2>
- <http://kkst1.env.fi/saaristomeri/sml-2>
- <http://kkst1.env.fi/saaristomeri/sl-2>
- <http://kkst1.env.fi/saaristomeri/pl-2>

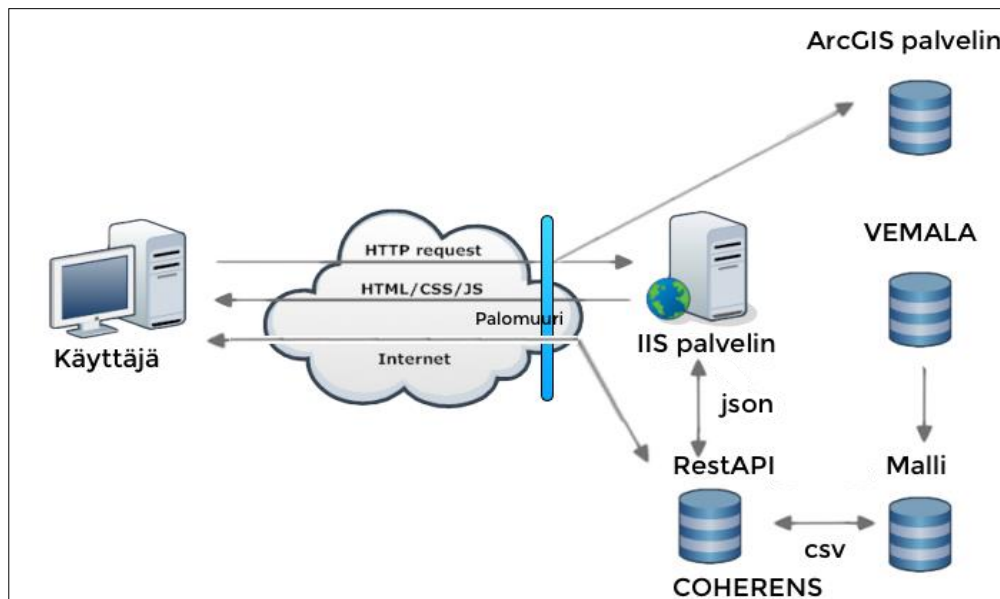
6.1.2. Käyttöliittymän suunnittelu ja tekninen toteutus

Käyttöliittymän toiminnallisuus suunniteltiin kahdessa työpajassa, joista ensimmäisessä kartoitettiin käyttäjien tarpeet ja toisessa näitä käyttötapauksia tarkennettiin ja priorisoitiin. Työpajojen pohjalta tarpeet ryhmiteltiin toisaalta peruskäyttäjän tarvitsemiin ja toisaalta asioiden valmistelua tekevän virkamiehen tarpeisiin.

Ryhmittelyn ja priorisoinnin perusteella päätettiin mitä toiminnallisuuksia ja missä järjestyksessä projektissa toteutetaan. Alkuperäisen suunnitelman mukaiset toiminnallisuudet saatiinkin toteutettua ja jatkotyössä suuri osa uusista piirteistä. Teknisesti järjestelmää on kehitetty koko ajan uusien, esiin tulleiden, käyttäjien tarpeiden myötä.

Alusta alkaen tavoitteena on ollut toteuttaa käyttöliittymä siten, että sen koodi on mahdollisuuksien mukaan riippumaton alueista ja lähtötiedoista, ja että mahdollisimman paljon laskentaa ja lähtötietojen käsittelyä voidaan tehdä taustalla rajapintapalvelimella.

Käyttöliittymän toteutukseen päätettiin käyttää kokeneiden koodajien hyvin hallittomia ja avoimia kehitysvälineitä. Näin käyttöliittymä saatiin toteutettua nopeasti ja samalla turvattiin jatkokehitys myös muiden kuin alkuperäisen kehittäjän tekemänä. Käyttöliittymää onkin eri vaiheissa koodannut viisi eri henkilöä, kolme Siili Oy:ltä sekä Kimmo Tikka (IL) ja Janne Mäyrä (SYKE). Rajapintapalvelua toteutettiin ja laajennettiin sitä mukaa kuin tarvetta ilmeni. Toteutuksesta ovat vastanneet Kimmo Tikka (IL) ja Janne Mäyrä (SYKE).



Kuva 6.1.1. Käyttöliittymän toimintaympäristö

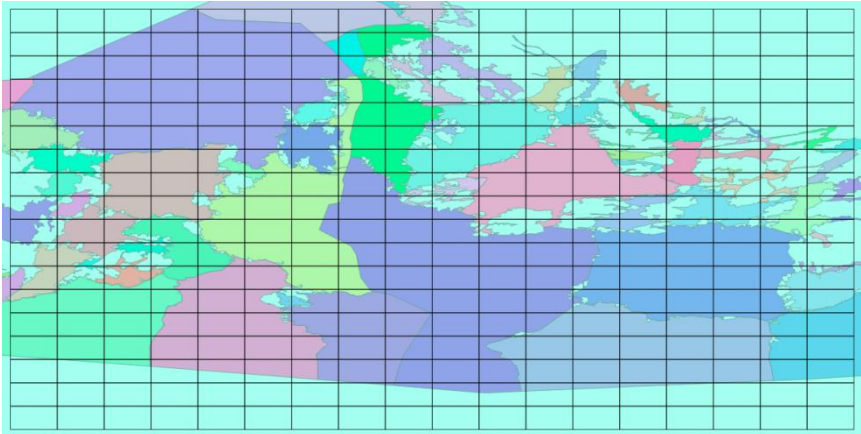
Käyttöliittymän toiminnallisuutta hoitaa useampi palvelin (Kuva 6.1.1). Itse käyttöliittymän websivut ladataan SYKEN web-palvelimilta. Käyttöliittymä lukee lähtötietonsa rajapintapalvelimelta ja tarvittavat karttatasot SYKEN karttapalvelusta. Rajapintapalvelu toimii COHERENS-palvelimella, jota myös varsinainen laskentamalli käyttää.

Käyttöliittymän ja rajapinnan koodia on hallinnoitu github -versionhallinnan avulla. Käyttöliittymän määrittely- ja lähtötiedot ovat puolestaan pääosin tekstipohjaisia JSON -tiedostoja. Näin järjestelmän hallitsija voi helposti, yksinkertaisin työkaluin halutessaan tehdä muutoksia järjestelmään.

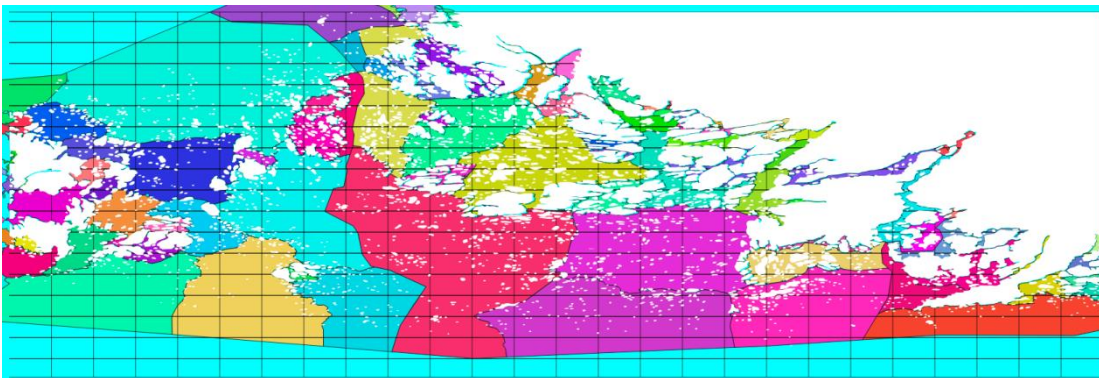
6.1.3. Mallijärjestelmän lähtötiedot

Mallihila ja vesimuodostumat. Mallihila annetaan järjestelmälle ascii-tiedostona, jossa on lueteltu hilapisteeet, niiden syvyys ja koodit vesimuodostumille ja hilaruuduille, joihin piste kuuluu. Mallihilasta lasketaan myös karttakäyttöliittymän vaatimat karttatasot.

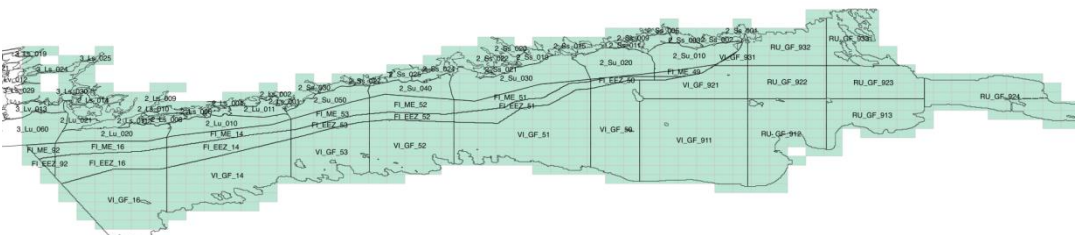
Alkuperäiset vesimuodostumien rajat on haettu SYKEN karttapalvelusta. Käyttöliittymän tarpeisiin rajoja on yksinkertaistettu niin, että vesimuodostumien sisällä olevat saaret on poistettu. Tämä oli välttämätöntä, jotta käyttöliittymän käyttö olisi sujuvaa. Tulosten parempaa havainnollistamista varten laadittiin karttapalvelimelle maamaski, jossa saaret näkyvät. Varsinaisten vesimuodostumien lisäksi laskennassa käytetään avomerialueella osajakoja, joita käsitellään vesimuodostumien tapaan. Avomerialueen vesimuodostumia käytetään malliajoissa reunaehto- ja laskenta-alueina eikä käyttäjä voi niitä tarkastella.



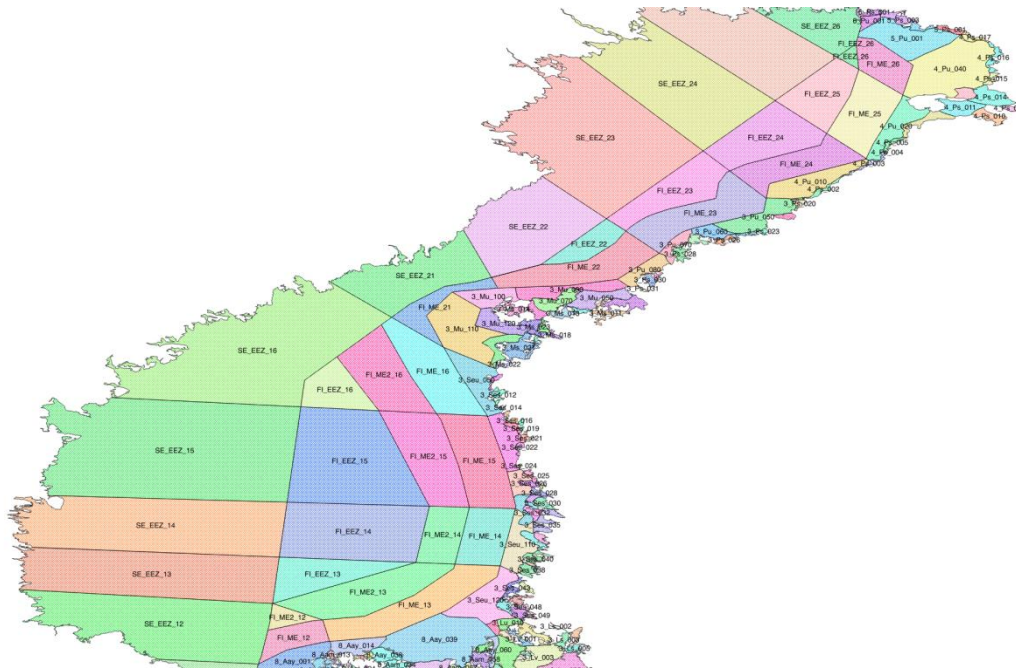
Kuva 6.1.2. Saaristomerен ensimmäinen, suppea hila (sm; Hangosta länteen).



Kuva 6.1.3. Saaristomerен toinen, laajennettu hila (sml).



Kuva 6.1.4. Suomenlahden hila-alueen vesimuodostumat (sl).



Kuva 6.1.5. Pohjanlahden hila-alueen vesimuodostumat (pl).

Vesimuodostumien tihennys. Vedenlaatumallin alkuperäinen laskentatarkkuus oli vesimuodostumatasolla (SEABED). Nykyversiossa mallijärjestelmän käyttäjä voi malliajoja määriteltessään kuitenkin määrätä haluamansa vesimuodostumat laskettavaksi tarkemmalla resoluutiolla (hilatihennyksellä). Tarkin hilataso, jolla laskentaa voidaan suorittaa, on hydrodynaamisen mallin tarkkuus. Kolmiulotteista hydrodynamiikkaa lasketaan joko 0.25 nm (Suomenlahti ja Saaristomeri) tai 1nm (Selkämeri) hilakoolla. Tarkimmasta hilasta laskentaa varten muodostetaan monikerrat, joiden hilaruudun koko on joko 1nm, 2nm tai 4nm.

Kuormitukset. Laskennassa käytetään useita erilaisia kuormitustekijöitä, joista käyttäjä voi käyttöliittymässä tarkastella ja muokata pistekohtaisia kuormituksia. Valuma-aluemallin (VEMALA) mukaiset kuormitukset lasketaan omassa järjestelmässään. Muut taustakuormat määritetään erikseen ja otetaan mallilaskelmassa huomioon. Kuormituspisteille määritetään paikka, tyyppi, vuosikuormitus ([kg/v]) ja kuormituksen jakautuminen eri kuukausille. Järjestelmässä käytetään oletusjakaumia, ellei muuta ole määritetty.

6.2 Vesipatsaan havaintoaineisto ja pistekuormitus

Osiassa on koostettu, prosessoitu ja laaturkistettu pistekuormituksen syötteet sekä alueen mittaushavainnot ja kaukokartoitusaineistot mallijärjestelmän havaintoaineistoksi ja reunaehdoiksi. Pistekuormittajien päästötiedot on koottu ympäristöhallinnon VAHTI-järjestelmästä ja tarkistettu ELY-keskuksissa. Rannikon ravinne-, a-klorofylli- ja levälajistoaineistot on pääosin koottu SYKEN Hertta-tietokannasta. Kaukokartoitus- ja Alg@line aineistot täydensivät mittaushavaintoja pinnan lämpötilan, sameuden ja a-klorofyllin osalta sekä ajallisesti että alueellisesti.

Mallinnusalueen fosforikuormituksesta suurin osa on peräisin kalankasvatuksesta taajamien jätevedenpuhdistamoiden ollessa suurin typen lähde. Teollisuuden osuus ravinnekuormituksesta on vähäistä. Saaristomerellä ja Suomenlahdella leväbiomassan vuosidynamiikka noudattaa nykyisin Itämeren tyypillistä sukkessiota, jossa voimakasta kevätukukintaa seuraa alhaisen biomassan alkukesä ja keski- ja loppukesän sinileväkukintajakso; Selkämerellä sekä kevätukukinta että sinileväkukinta ovat pienempiä. Kevätukukinta päättyy vesipatsaan epäorgaanisen typen loppumiseen, ja epäorgaanisten N:P -ravinesuhteiden perusteella myös kesä on ensisijaisesti typpirajoitteinen lukuun ottamatta tyypeä sitovia sinileviä. Selkämeren tuotantodynamiikassa on tapahtunut muutos 1990-luvun puolivälissä, jolloin tyypeä sitovat sinilevät yleistyivät. Sinileväkukintojen voimakkuus kuitenkin vaihtelee vuosien välillä ilmeisesti fosforin sisäisen kuormituksen vaikutuksen mukaan. Selkämerellä sisäisen kuormituksen vaikutus on välillinen riippuen vedenvaihdosta Itämeren päältäan ja Pohjanlahden välillä. Syvän veden fosforitaso nousee kesän kuluessa sisäisen kuormituksen takia, sillä pohjan läheinen alentunut happitilanne tai täysi hapettomuus on paikoittain havaittavissa.

6.2.1 Pistekuormitusaineisto.

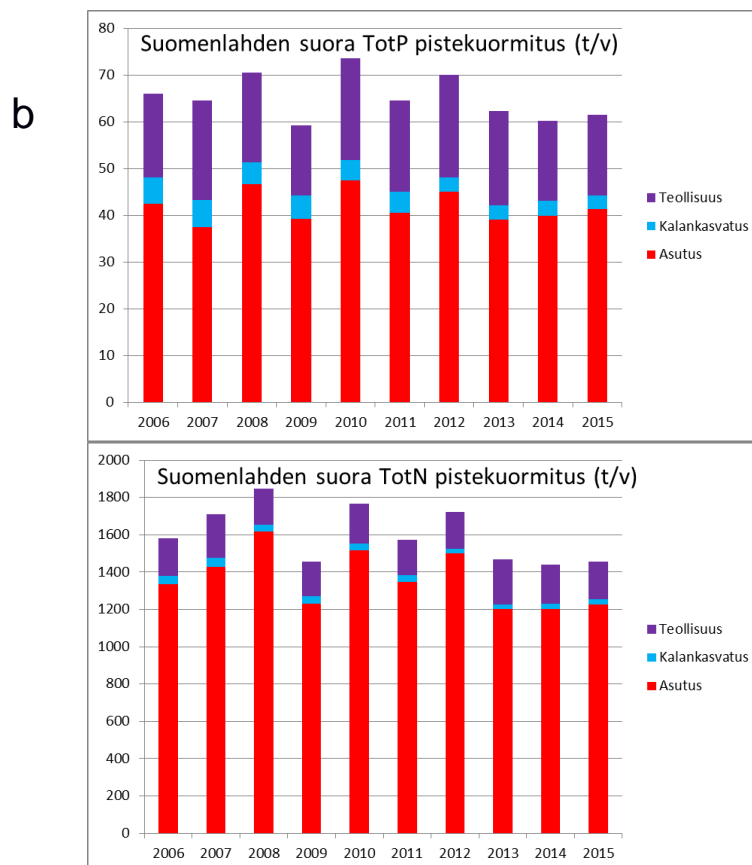
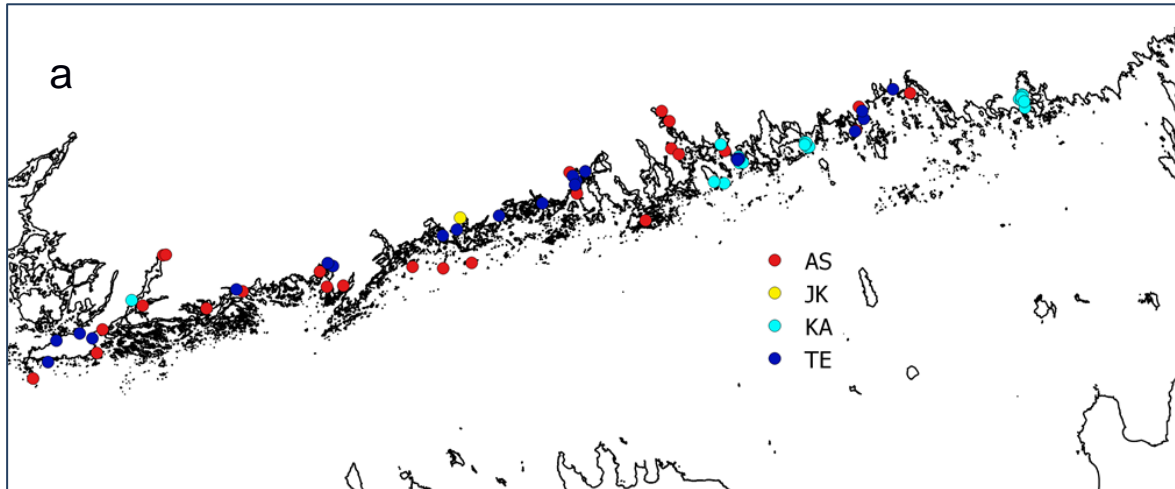
Rannikolle suoraan kuormittavien pistekuormittajien kuormitustiedot on koottu ympäristöhallinnon VAHTI-järjestelmään. Kuormitusaineisto on esitetty kuormitusluokittain (asutus, kalankasvatus, teollisuus ja jätteenkäsittely) kuormittajakohtaisesti. Kuormitustiedot esitetään kokonaisravinteiden vuosikuormina.

Kuormitustiedot on koottu hankkeen puolesta taulukoihin vuosille 2006 - 2015. Aineisto on ensin tarkistettu selvien virheiden ja/tai puutteiden osalta. Samalla kuormittajien koordinaatit on tarkastettu. Vuosien 2006 – 2015 aineisto yksilöityne tarkastuspyyntöineen lähetettiin edelleen ELY-keskuksiin tarkastettavaksi. Rannikkoaluemallin käytössä oleva pistekuormitusaineiston laatu on siten varmistettu. Saadun kokemuksen mukaan suurin osa VAHTI-aineistosta on laadultaan hyvää, mutta tarkastus on puutteiden täydentämiseksi syytä tehdä. Kokonaisravinteet on jyvitetty perustuotannolle käyttökelpoisiksi epäorgaanisiksi ravinteiksi kertoimilla (DIN/TotN = 0,78 ja DIP/TotP = 0,25).

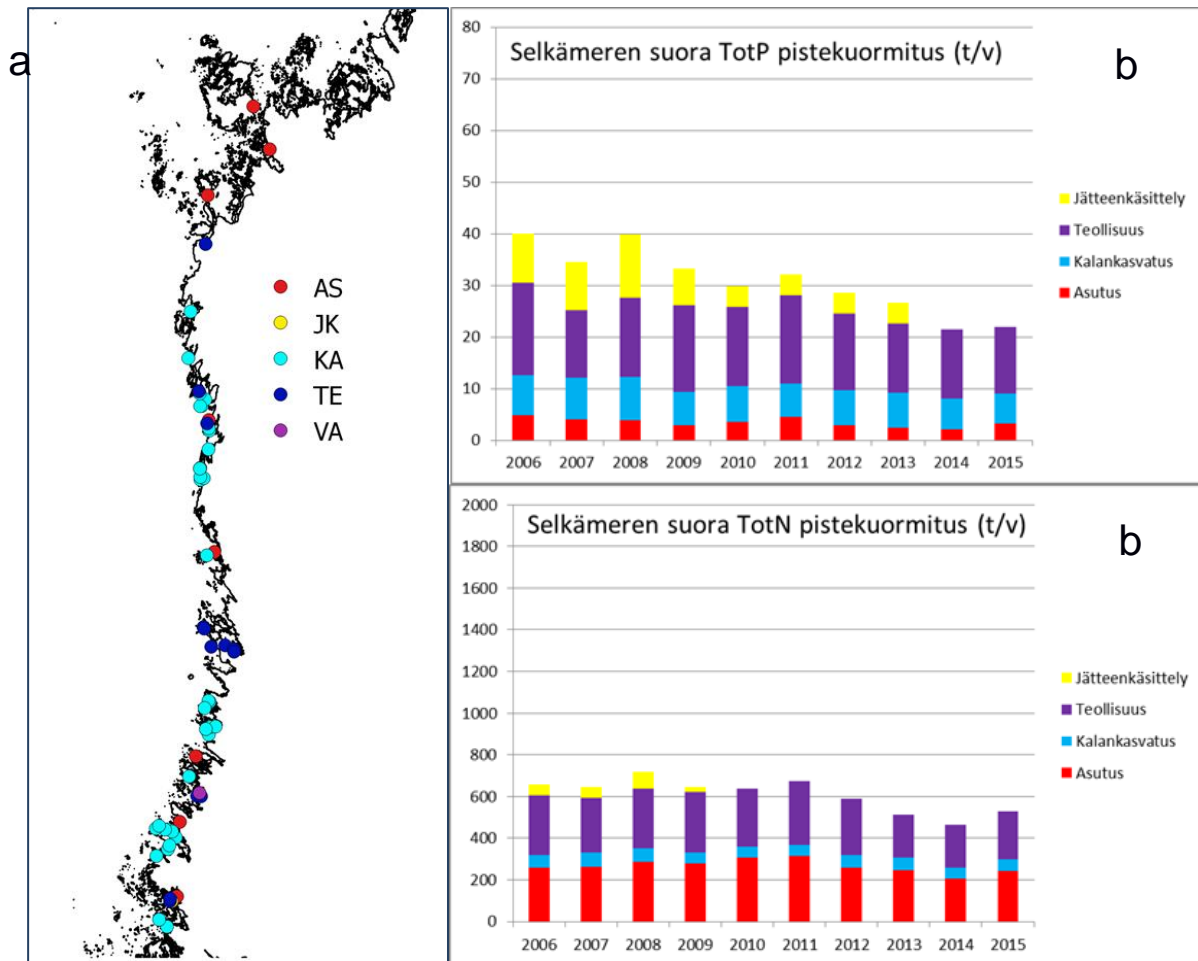
Suomenlahtea suoraan kuormittavien pistekuormittajien sijainti on koottu Kuvaan 6.2.1a ja kokonaisravinteiden kuormituksen kehitys on esitetty Kuvaan 6.2.1b. Selkämeren vastaavat tiedot on esitetty Kuvissa 6.2.2a ja 6.2.2b.

Suomenlahden osalta ainoa jätteenkäsittelyyn (JK) luokiteltu pistekuormittaja oli hyvin pieni ja lopettanut toimintansa 2011. Selkämeren ainoa varastointiin (VA) luokitellun pistekuormittajan kuormitus lakkasi vuonna 2009. Selkämeren huomattava jätteenkäsittelyn (JK) pistekuormitus koostui kahdesta laitoksesta, joiden kuormitus loppui vuosina 2009 ja 2013. Suomenlahden suurimman yksittäisen pistekuormittaja on Viikin keskuspuhdistamo, jonka osuus kokonaisfosforin suorasta kokonaispistekuormituksesta on n. 50% ja typen osalta n. 30%. Sille voitiin laskea muunnoskertoimet erikseen puhdistamolta saatujen mittaustietojen mukaisesti. Ne ovat 0,38 fosforille (DIP/TotP) ja 0,60 typelle (DIN/TotN). Mereen suoraan laskevan

pistekuormituksen osalta on muistettava, että monet rannikon lähellä sijaitsevat puhdistamot (mm. Porin kaupunki) laskevat puhdistetut jätevetensä jokeen lähellä sen suuta. Nämä pistekuormittajat ovat mukana VEMALA-mallissa jokikuormituksen osana eikä niitä ole laskettu rannikon suoraan pistekuormitukseen.



Kuva 6.2.1. (a) Suomenlahden suorat pistekuormittajat kuormitustyypeittäin ja (b) niiden osuudet kokonaisravinteiden kuormituksesta vuosittain (AS = asutus, JK = jätteenkäsittely, KA = kalankasvatus ja TE = teollisuus).

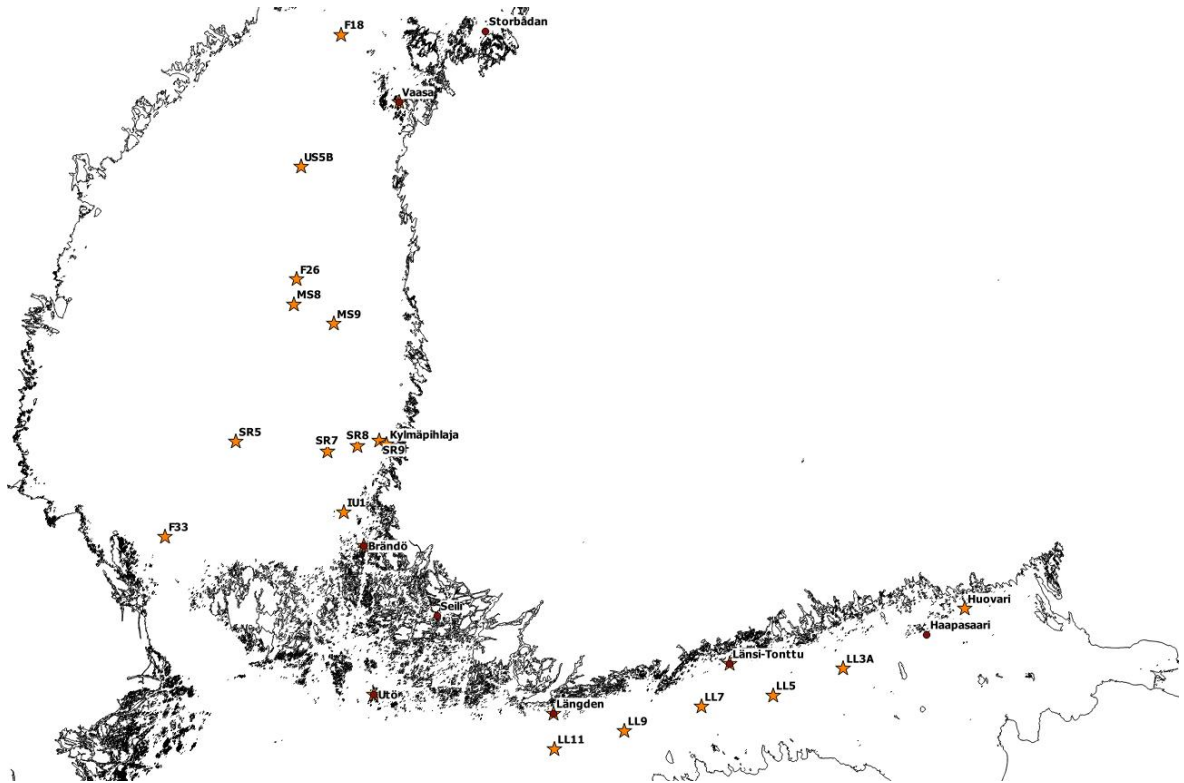


Kuva 6.2.2. (a) Selkämeren suorat pistekuormittajat kuormitustyypeittäin ja (b) niiden osuudet kokonaisravinteiden kuormituksesta vuosittain (b) (AS = asutus, JK = jätteenkäsittely, KA = kalankasvatus, TE = teollisuus, VA = varastointi).

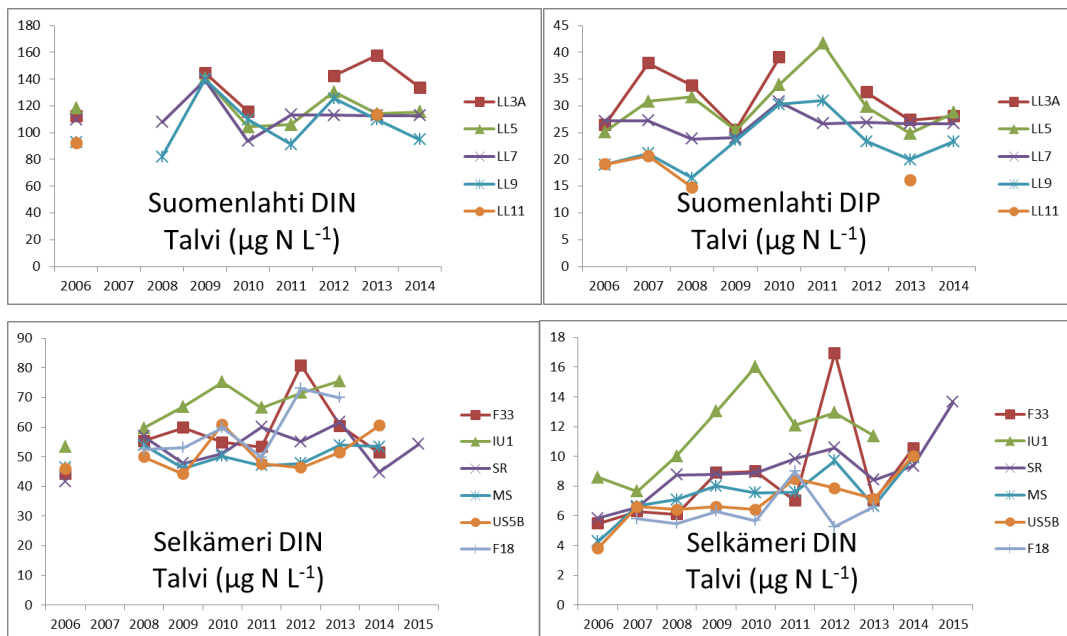
6.2.2. Havaintoaineistot.

Havaintoaineistojen kokoamisen, tarkistuksen, korjaamisen ja muokkaamisen tarkoituksena on tuottaa mallijärjestelmän tarvitsemat reunaehdot ja aineistoa validointiin ja kalibrointiin. MTA Arandan matkoilla kerättyjen avomeren havaintojen asemaverkosto on sekä Suomenlahden että Selkämeren osalta hyvin laaja. Hankkeen reunaehto- ja määrittämiseksi havaintoasemien pitää kuitenkin kuvata mallialueen avomeren puoleista reuna sijainniltaan lähinnä fyysikaalisen ympäristön puolesta. Siksi ensimmäinen valintakriteeri on asemien sijainti. Suomenlahden virtauskentistä johtuen edustavat havaintoasemat sijaitsevat Suomenlahden keskilinjalla tai sen pohjoispuolella. Selkämeren pohjan syvyysmuotojen vuoksi edustavat avomerasemat sijaitsevat lähinnä keskilinjalla itäpuolella Selkämeren syvällä alueella. Lisäksi Selkämeren eteläosassa on asemia, jotka sijaitsevat Ahvenanmeren pohjoispuolella.

Avomeren havaintoasemista karsittiin pois asemat, joista ei ollut mitattu ravinteita riittävällä kattavuudella joko ajallisesti tai määritettyjen ravinteiden suhteen. Karsinnan jälkeen avomeren havaintoasemiin jäi pelkästään HELCOMin avomeriseurannan asemia, joilla näytteenotto tapahtuu lähinnä talvella (COMBINE1) ja keskikesällä (COMBINE3). Valitut avomeren havaintoasemat on esitetty Kuvassa 6.2.3.



Kuva 6.2.3. Reunaehtoja varten poimitut havaintoasemat (oranssi tähti = avomeren havaintoasema, purppura tähti = rannikon intensiiviasema, Storbådanin aineistoa on käytetty vain mallin validointiin).



Kuva 6.2.4. Suomenlahden ja Selkämeren havaintoaineistojen talven liukoisten ravinteiden konsentraatiot valituilla havaintoasemilla.

Havaintoaineistoista poimittiin liuenneiden ravinteiden ja kokonaisravinteiden mittaustulokset. Liuenneen tyyppien (DIN) osalta laskettiin nitraatti(+ntriitti)- ja ammoniumkonsentraatiot yhteen. Talvella pintavesi on sekoittunut syväälle, joten mittaustulokset pinnasta 60 metriin edustavat talviarvoja. Kesän mittaustulokset ryhmiteltiin edustamaan pintakerrosta (havainnot 0 - 10 m) ja syvää kerrosta (havainnot 20 - 40 m). Suomenlahden kohdalla käytettiin viiden havaintoaseman

tietoja erikseen, mutta Selkämeren havaintoasemien tietoja yhdistettiin myös alueittain. Selkämerellä F33, IU1, US5B ja F18 käsiteltiin erikseen, mutta SR-sarja (SR5, SR7, SR8 ja SR9) sekä MS-ryhmä (F26, MS8 ja MS9) yhdistettynä.

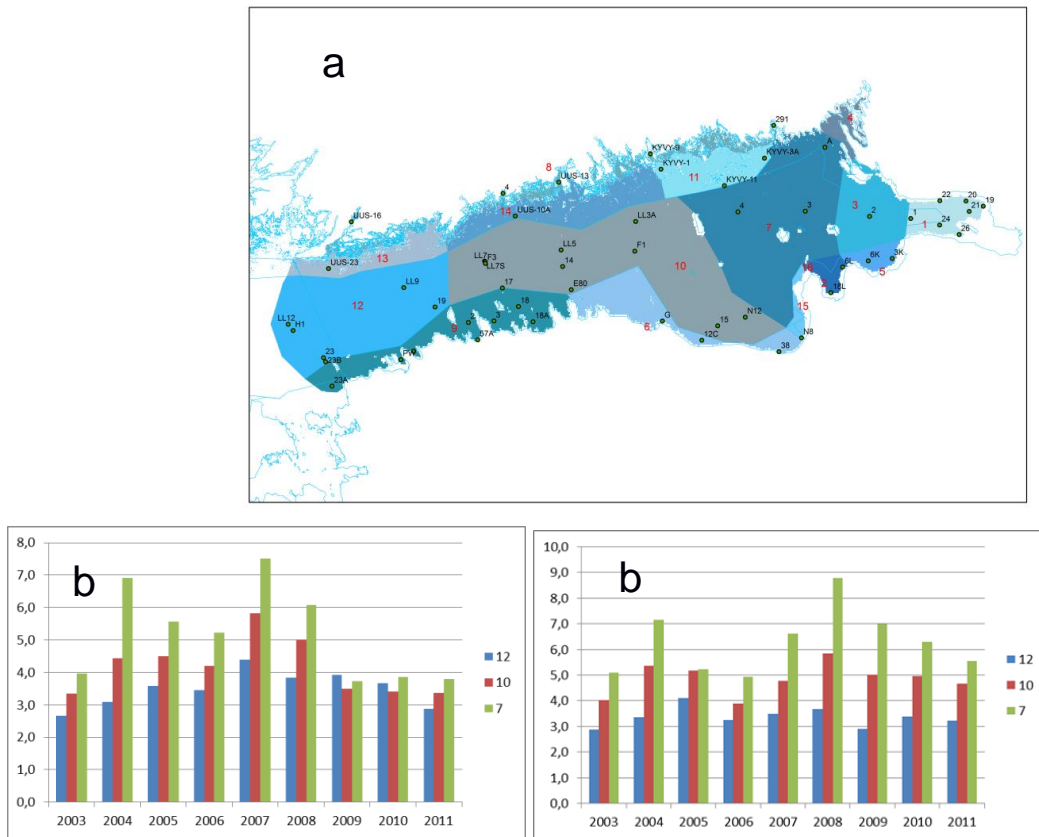
Havaintoaineistoon on koottu talvi- ja kesähavainnot eri vesikerroksista. Kuvaan 6.2.4 on koottu liuenneiden ravinteiden talvikonsentraatiot esimerkkinä aineistosta. Suomenlahden havaintoasemat koottiin edelleen yhteen, sillä selvää gradienttia ei ole. Selkämeren havainnoista poistettiin aseman F33 poikkeavat arvot ja ne korvattiin edellisen ja seuraavan vuoden keskiarvolla. IU1 poikkesi selvästi muista asemista ja se on käsitelty erikseen. Muut Selkämeren havaintoasemat yhdistettiin lopullisessa tarkastelussa. Selkämerellä näkyy hyvin fosforin nouseva taso.

Arandan havaintoaineisto on hyvin harva klorofyllin suhteen. Useimmiten asemalta on vuosittain tehty yksi määrittäminen kesällä. Klorofyllitason määrittämiseen käytettiin hyväksi kaukokartoitusaineistoja sekä Suomenlahdella että Selkämerellä. Kuvassa 6.2.5 on esitetty Suomenlahden kaukokartoitusaineiston aluejako sekä kevään (huhti-toukokuu) ja kesän (kesä-elokuu) keskimääräinen klorofyllin määrä avomerialueilla 7, 10 ja 12. Kevätjakson aineistoa tarkennettiin edelleen hakemalla kaukokartoitusaineistosta kevään maksimiklorofyllitasot. Sinilevien osuus klorofyllistä on arvioitu intensiiviasemilta ja avomeren havaintoasemilta tehtyjen mikroskooppilaskentojen mukaan. Sinilevien osuuden määrittämisessä on otettu huomioon mikroskooppisesti määritetyn biomassa-arvion rajoitukset pienimpien levien suhteen. Ne sisältyvät klorofylliarvoihin, mutta eivät kasviplanktonin kokonaisbiomassaan.

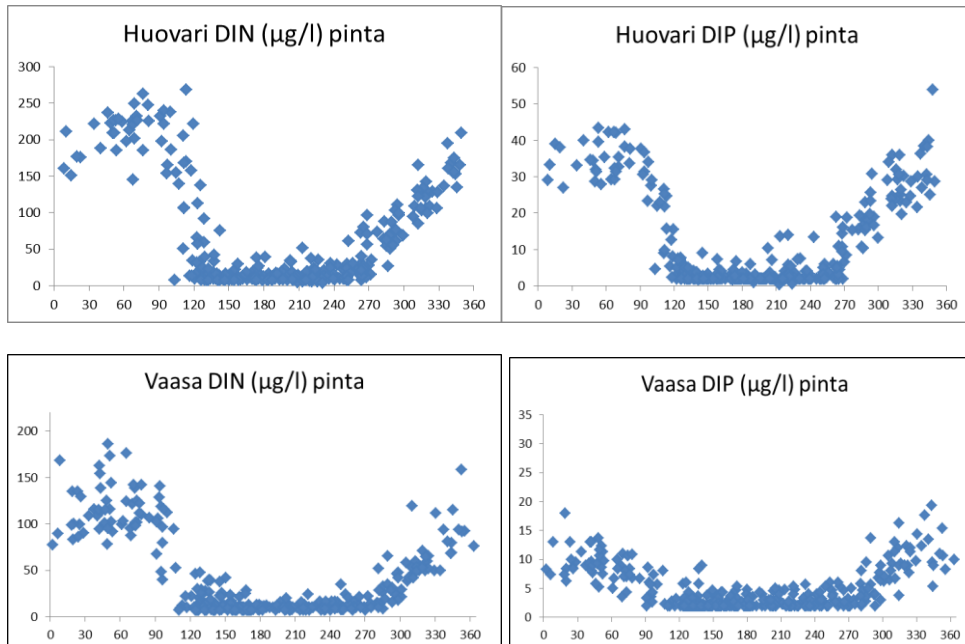
Avomeren havaintoaineisto on riittävän kattava antamaan talven ravinteiden tason sekä todentamaan liuenneiden ravinteiden kuluksen kesällä määrittämissä alapuolelle. Aineisto ei kuitenkaan anna kuvaa vuodenaikaisdynamikasta. Se voidaan kuitenkin arvioida rannikon luotettavasti Herta-tietokannassa olevista rannikon intensiiviasemien vakaasti käyttäytyvistä aikasarjahavainnoista. Kuvassa 6.2.6 on esitetty kahden intensiiviaseman, Suomenlahden itäisimmän osan Huovarin ja Selkämeren pohjoisimmän osan Vaasan (Vav-11), pintakerroksen (0 – 10 m) liuenneiden ravinteiden koottu aineisto. Aineistosta näkyy hyvin säännöllinen vuodenaikaisdynamikka.

Rannikon intensiiviasemien havaintoaineisto tarkistettiin virheiden suhteen. Havaintoaineisto jaettiin FICOS –mallin syvyysjaottelun mukaisesti pintakerrokseen (0 – 10 m) ja syvään kerrokseen (20 – 40 m). Kaikkiaan muuttujien kausittaisen dynamiikan kattavien reunaehtojuen laatimiseen tarvittiin asiantuntija-arviona sekä havaintoaineistojen interpolointia että ekstrapolointia. Vertailemalla avomeren havaintoaineistoa ja Suomenlahden intensiiviasemia havaittiin, että rannikon intensiiviasemat vertautuvat hyvin avomeren talven havaintoihin. Sen vuoksi rannikon intensiiviasemien havaintoja voidaan käyttää myös avomeren reunaehtoihin (Kuva 6.2.7). Rannikon intensiiviasemien aineistoakin jouduttiin osin täydentämään sellaisina jaksoina, jolloin mittauksia ei ollut. Esimerkiksi Utön ravinteiden puuttuvia vuotuisia talviarvoja on täydennetty kaikkien aseman talvimittausten (1995 – 2015) suhteellisen vakaalla keskiarvolla ja klorofylliaineistoa on täydennetty Algaline-aineistosta ja kaukokartoituksesta saadulla kevätkukinnan arvoilla.

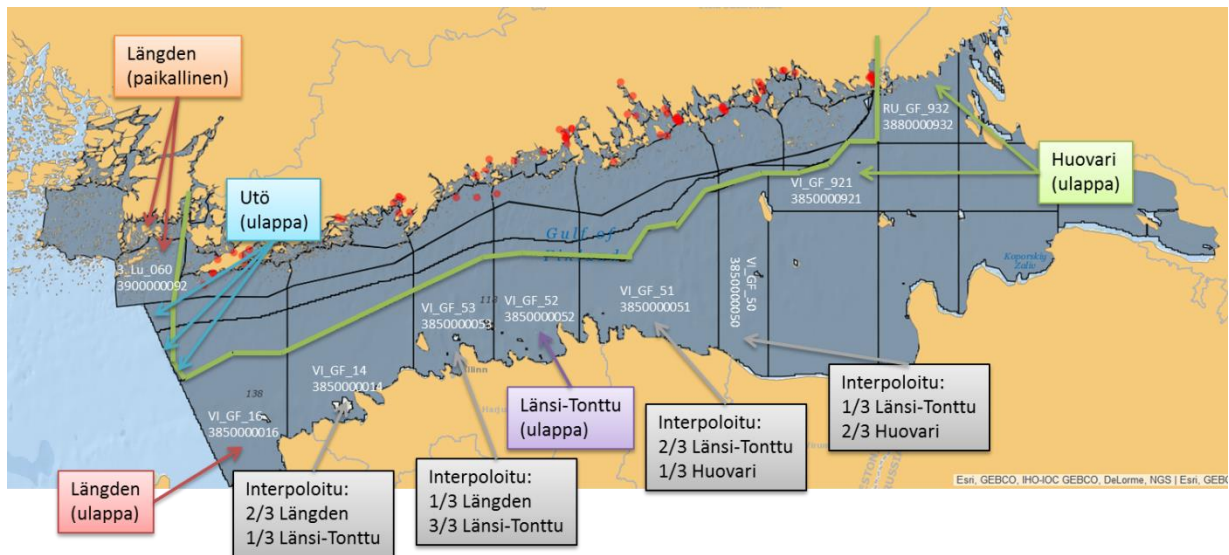
Kuvassa 6.2.8 esitetään Suomenlahden Längdenille estimoituja reunaehtoja: epäorgaanisten ravinteiden vuotuinen kehitys pintakerroksessa (0 – 10 m) 2006 – 2015. Koska asemalla on tehty ajallisesti kattavasti havaintoja, pintakerroksen liuenneiden ravinteiden määrissä näkyy kesän kumpuamisten vaikutus. Selkämeren esimerkki on mallialueen läntinen avomereireuna. Havaintoja on vähemmän, mutta fosforin tason nousu näkyy selvästi. Selkämeren reunaehtojuen määrittäminen oli Suomenlahtea yksinkertaisempaa, sillä avomeren havaintoaineiston mukaan valittu avomerialue on varsin yhtenäinen. Samoin Selkämeren rannikon etelä- ja pohjoispään intensiiviasemien (Brändö ja Vaasa) vuodenaikaisdynamikka on varsin yhteneväinen.



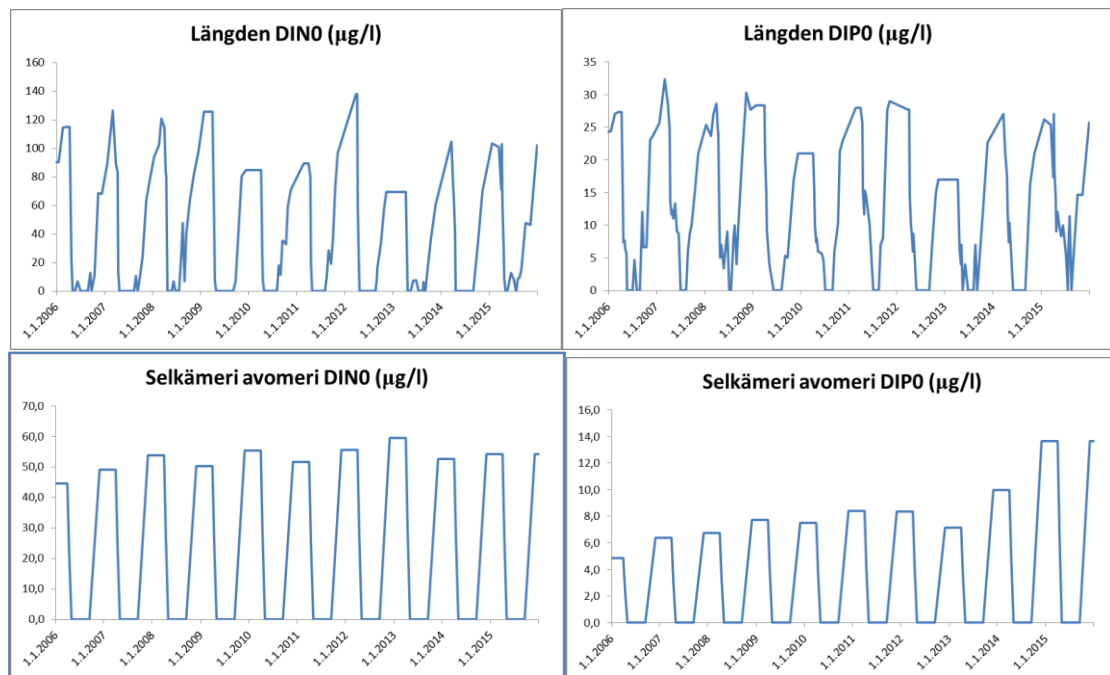
Kuva 6.2.5. (a) Suomenlahden kaukokartoitusaineiston aluejako (edellinen sivu). Tässä hankkeessa on hyödynnetty avomerialueita 7, 10 ja 12. (b) Suomenlahden klorofyllipitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$) avomerialueilla 12, 10 ja 7 vuosina 2003 – 2011 keväällä (vasen) ja kesällä (oikea) kaukokartoitusaineiston (MERIS) mukaan.



Kuva 6.2.6. Kahden rannikon intensiiviaseman (Huovari ja Vaasa) liuenneiden ravinteiden pintahavainnot vuosina 1995 – 2015 alkaen vuoden ensimmäisestä päivästä.



Kuva 6.2.7. Suomenlahden reunaehtojes laskennan periaatteet – olemassa olevien havaintoaineistojen hyödyntäminen interpolointia ja ekstrapolaation kautta. Asiantuntija-arviossa on hyödynnetty intensiiviasemien, Arandan, Algalinen ja kaukokartoituksen aineistoja.



Kuva 6.2.8. Reunaehtojes laskenta-alueita varten koottu havaintoaineistoihin perustuva Längdenin (Suomenlahti) ja Selkämeren läntisen avomerialueen pintakerroksen (0 – 10 m) vuotuinen vaihtelu. DIN = liuenneet typpi yhdisteet, DIP = liennut fosfori.

6.3 Sedimenttien fosforivarannot ja sisäinen kuormitus

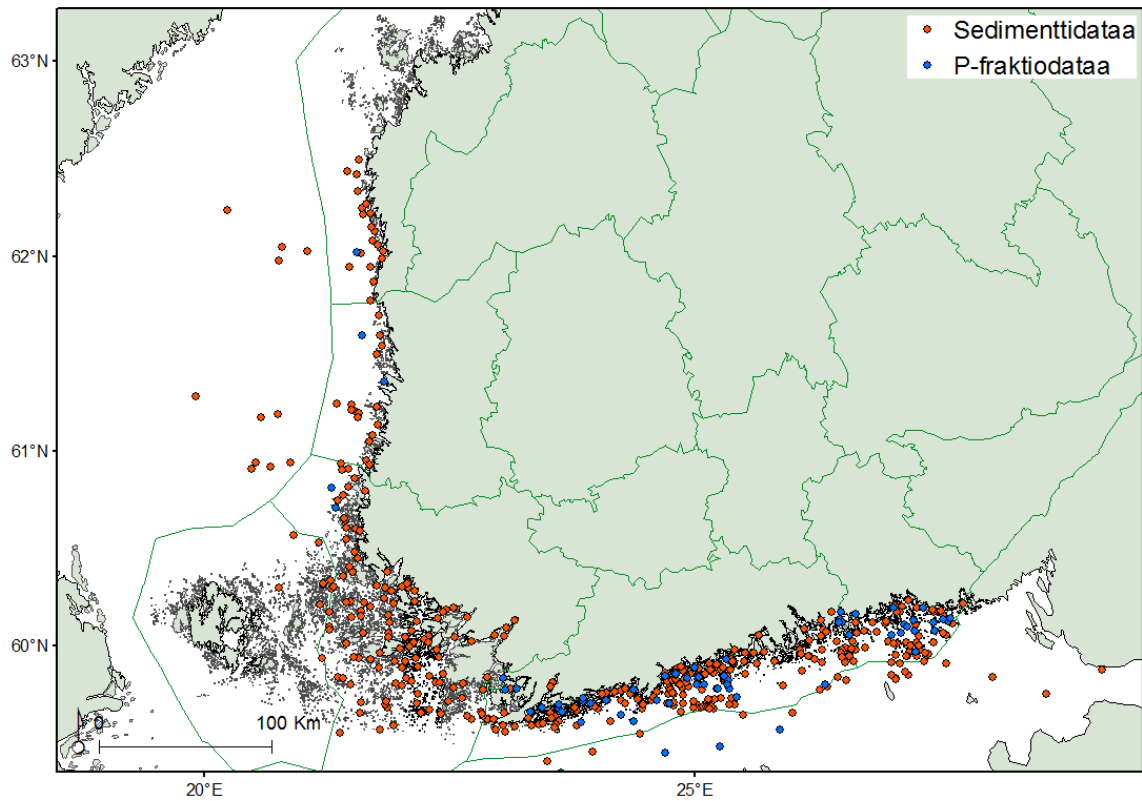
Mallin sisäisen kuormituksen syötteeksi laadittu arvio ajan myötä sedimentistä yläpuoliseen veteen vapautuvan epäorgaanisen fosforin määrästä perustuu havaintoaineistoon pintasedimentin fosforin potentiaalisesti mobiilien esiintymismuotojen (pääosin rautayhdisteisiin sitoutunutta ja orgaanista fosforia) pitoisuuksista. Näitä fosforimuotoja on pääasiassa pehmeillä orgaanispitoisilla akkumulaatiopohjilla, joiden esiintyvyys mallialueilla arvioitiin pohjatyypikartoilla. Alueilla, joilta havaintoaineistoa ei ollut, mikä oli ongelma erityisesti Selkämerellä, arviot fosforin esiintymismuodoista perustuvat sedimentin ominaisuuksiin ja vastaaventyypisiltä pohjilta tehtyihin havaintoihin. Erilaisten happiolosuhteiden vaikutuksia arvioitiin laatimalla mallialueille happiluokitukset. Suomenlahdelle tehtiin ns. todennäköisten happiolosuhteiden (Arvio 1) lisäksi hapen ääripäitä (2a ja 2b) edustavat arviot, mutta Selkämeren mallialueella pohjavesikerros oletettiin hapelliseksi. Arvion 1 mukaisilla oletuksilla mallin laskenta-alueille tulevat sisäisten fosforikuormitusten syötteet olisivat Suomenlahdella noin 1770 t P/a ja Selkämerellä noin 170 t P/a.

6.3.1. Sedimenteistä veteen vapautuvan fosfori

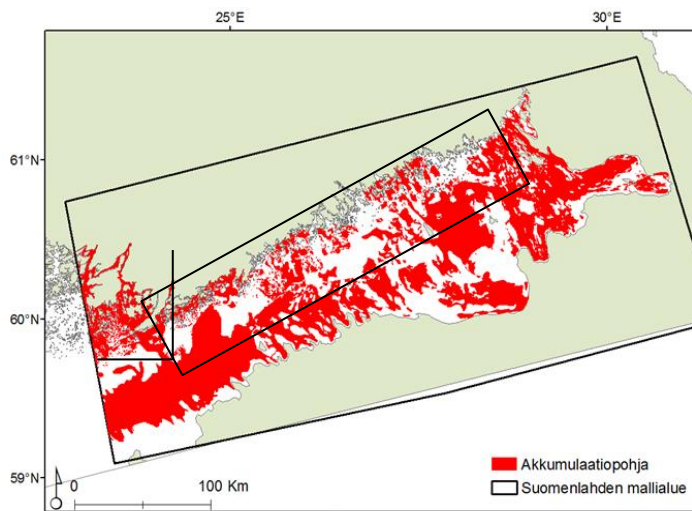
Mallin sisäisen fosforikuormituksen syötteeksi laadittu arvio siitä, minkä verran sedimentin pintakerroksesta vapautuu fosforia ajan myötä yläpuoliseen veteen, perustuu havaintoaineistoon sedimentin fosforin esiintymismuodoista ja sen pohjalta laskettuun ns. potentiaalisesti mobiilin, eli mahdollisesti vapautuvan, fosforin määrään. Tämä on pääosin rautaan sitoutunutta (Fe-P) ja labiilia orgaanista (OP) fosforia, ja lähtöoletuksena oli Saaristomerен laajan havaintoaineiston pohjalta, että näitä fosforimuotoja on pääasiassa pehmeillä, orgaanispitoisilla akkumulaatiopohjilla. Arviossa huomioitiin erilaiset happiolosuhteet, jotka vaikuttavat erityisesti rautaan sitoutuneen fosforin vapautumiseen. Happiolosuhteiden arviointi perustui tausta-aineistosta, pääosin seuranta- ja velvoitetarkkailuaineistoista, sekä VELMU-hankkeesta (Virtanen 2015) saatujen happitietojen pohjalta tehtyyn pohjan happiolosuhteiden luokitukseen. Sisäisen kuormituksen arviointitapa on esitetty yksityiskohtaisesti Liitteessä 2.

Suomenlahden mallialueelta havainto- ja tausta-aineistoa oli kohtuullisesti saatavilla (Kuva 6.3.1), joten sen osalta sisäisen fosforikuormituksen arvion tekeminen kolmella eri hapellisuusskenaariolla noudatteli samaa periaatetta kuin Saaristomerellä (Liite 2). Selkämereltä tausta-aineistoa sedimentin fosforin esiintymismuodoista oli kuitenkin niin niukasti, että tämän mallialueen Fe-P ja OP-pitoisuuksia jouduttiin arvioimaan perustuen pääasiassa vallitseviin pohjatyyppeihin, fosforin kokonaispitoisuuksiin ja muihin sedimentin ominaisuuksiin, sekä Saaristomereltä ja Suomenlahdelta vastaavilta pohjatyypeiltä määritettyihin fosforin esiintymismuotoihin. Tarkemman taustatiedon puuttuessa kaikille Selkämeren akkumulaatiopohjille oletettiin samanlaiset sekä OP:n että Fe-P:n pitoisuudet ja käytettiin niitä arvion perusteena. Happimallin mukaan Selkämeren Suomen puoleisen rannikon (mallin laskenta-alue) pohjavesikerros pysyi hapellisena, joten tällä mallialueella erilaisiin hapellisuusoloihin perustuneet kuormitusarviot eivät juuri eronneet toisistaan.

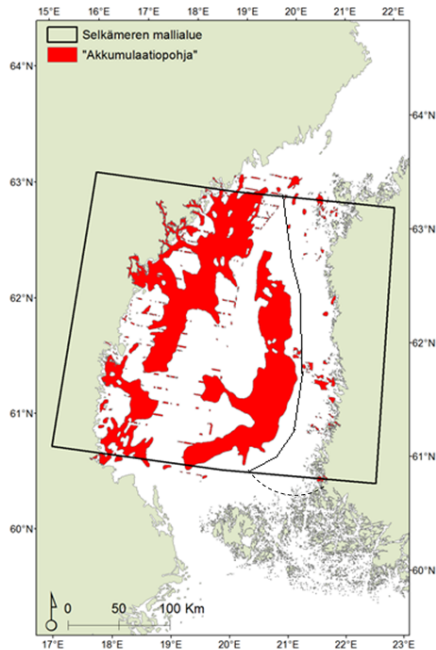
Suomenlahden ja Selkämeren pohjatyypikartat laadittiin yhdistämällä EMODnet- (<http://www.emodnet.eu/>) ja Balance-sedimenttikarttojen (al-Hamdani ja Reker 2007) tietoa ja täydentämällä niitä osin mallialueilta koottujen tausta-aineistojen perusteella. Kuvissa 6.3.2. ja 6.3.3. on esitetty Suomenlahdelle ja Selkämerelle pohjatyypikarttojen perusteella laaditut kartat akkumulaatiopohjista. Suurin osa Selkämeren akkumulaatioalueista on rannikon mallinnusalueemme ulkopuolella.



Kuva 6.3.1. Sedimenteistä koottu havaintoaineisto Suomenlahden ja Selkämeren rannikkoalueilla (kartta ei ole kattava Saaristomerellä havaintoaineiston osalta). Aineistoa sedimentin pintakerroksesta määritetyistä fosforin esiintymismuodoista oli käytettävissä sinisellä merkityiltä havaintopisteiltä.



Kuva 6.3.2. Akkumulaatiopohjat Suomenlahdella. Mallin laskenta-alue on hahmoteltu karttaan viivalla (sisempi suorakaide).



Kuva 6.3.3. Akkumulaatiopohjat Selkämerellä. Mallin laskenta-alueen länsireuna on hahmoteltu karttaan rannikkoa myötäilevällä kaarevalla viivalla.

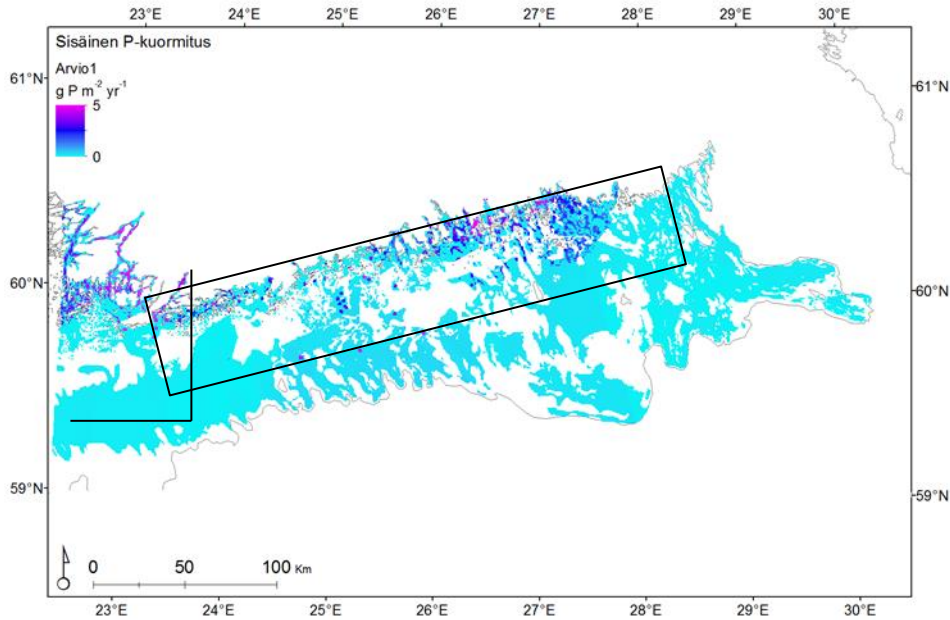
6.3.2. Sisäisen fosforikuormituksen arviointi

Suomenlahden alueella mallin sisäisen fosforikuormituksen syötteenä tehtiin vastaavat kolme erilaisiin happiolosuhteisiin perustuvaa arviota (1, 2a ja 2b) kuin Saaristomeren mallialueella (Liite 2). Arviossa 1 oletettiin alueelle tavanomaiset keskimääräiset hapellisuusolosuhteet ja Arviossa 2 oli kaksi kyseisen alueen havaintoaineistoon perustuvaa ääriolosuhdetta sellaisina, kuin ne olisivat havaintoaineiston perusteella voineet olla: Arviossa 2a oletettiin hapellisuusolosuhteet keskimääräistä paremmiksi, jolloin hapettomuutta esiintyisi vain niillä pohjilla, joilla sen on havaittu toistuvan joka vuosi, ja kaikilla muilla alueilla pohjan läheisen veden on oletettu pysyvän hapellisena läpi vuoden ja Arviossa 2b oletettiin puolestaan kesän aikana menevän hapettomiksi kaikkien niiden pohjien, joilla hapettomuutta on havaittu edes kerran tunnetun seurantajakson aikana. Tässä raportissa on esitetty Arvion 1 mukaiset sisäisen kuormituksen syötteiden arviot, koska ne ovat todennäköisesti realistisemmat, kuin hapellisuusolosuhteiden ääripäitä edustavat arviot.

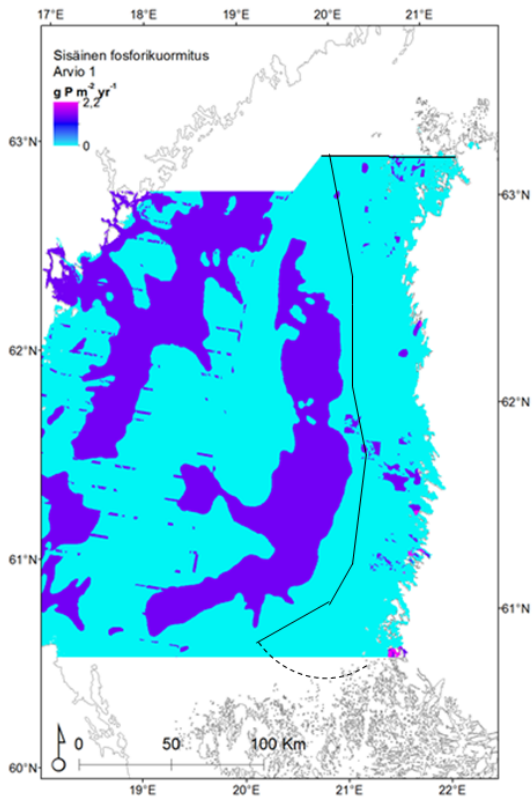
Kaikki arviot edustavat siis mallin syötteenä tehtyjä arvioita, eli fosforimäärää, joka tietyissä olosuhteissa voisi mahdollisesti vapautua sedimentistä sen yläpuoliseen veteen. Suomenlahden alueella sisäiselle fosforikuormitukselle käytettiin mallissa vastaavaa vuodenaikaisjakaumaa kuin Saaristomeren alueella siten, että kuormitus on voimakkaampaa kesän ja syksyn kuukausina. Selkämeren alueella happiolosuhteet eivät muutu niin selvästi, mutta tälle alueelle oletettiin vastaava vuodenaikaisjakauma, koska lämpötilan nousu kesäkuukausina kiihdyttää orgaanisen aineksen mineralisaatiota ja fosforin vapautumista siitä. Tässä raportissa on esitetty esimerkkikuvat Arvion 1 mukaisista sisäisen fosforikuormituksen määristä sekä Suomenlahdelle (kuva 6.3.4) että Selkämerelle (kuva 6.3.5.) ja esitetty näitä sisäisen kuormituksen syötteitä vastaavat mallin tuottamat fosfaatti- ja kokonaisfosforipitoisuudet pinnassa ja alemmassa vesikerroksessa (kuvat 6.3.6. ja 6.3.7.).

Kuvassa 6.3.4 on esitetty Arvion 1 happitilanteen mukainen sisäisen fosforikuormituksen karkeapiirteinen alueellinen jakauma Suomenlahdella. Mallin laskenta-alueelle (kuvan suorakaide) arvioitu koko vuoden sisäisen kuormituksen syöte on tällöin noin 1770 t P/a.

Kuvassa 6.3.5. on esitetty Arvion 1 happitilanteen mukainen sisäisen fosforikuormituksen syötteen karkeapiirteinen alueellinen jakauma Selkämerellä. Mallin laskenta-alueelle (kartassa kaarevan viivan ja Suomen rannikon välinen vyöhyke) arvioitu koko vuoden sisäisen kuormituksen syöte olisi tässä arvioissa noin 170 t P/a. Molemmilla merialueilla mallin laskenta-alueen ulkopuolelle jäävä osa sisäisestä fosforikuormituksesta tulee huomioiduksi mallissa vesimassan fosforipitoisuuksina reunaehdoissa.



Kuva 6.3.4. Suomenlahden sisäinen fosforikuormitus (Arvio 1; kts. Liite 2).



Kuva 6.3.5. Selkämeren sisäinen fosforikuormitus (Arvio 1; kts. Liite 2).

6.3.3. Pohjalle laskeutuvan kasviplanktonbiomassan hajoaminen

Syvässä meressä pintakerroksessa tuotettu vajoava kasviplanktonbiomassa ehtii hajota pitkälle jo vajoamisen aikana. Aminohapot, lipidit ja sokerit poistuvat orgaanisesta aineesta nopeasti ja jäljelle jääneen pohjalle laskeutuneen aineen hajoaminen on yleensä hitaampaa kuin tuoreen kasviplanktonin (esim. Heiskanen 1998). Itämeressä suuri osa kasviplanktonmateriaalin sedimentaatiosta tapahtuu tyypillisesti kevätkukinnan jälkeen. Muutamissa tutkimuksissa on havaittu, että n. 2 % pohjalle vajoavasta tuoreesta orgaanisesta aineesta (sestonista) hajoaa päivittäin (Enoksson ym. 1993, Heiskanen ja Leppänen 1995). Enoksson (1993) tutki ravinteiden vapautumista, joka seurasi *Skeletonema*-piileväkukinnan laskeutumista pohjalle läntisen Itämeren rannikkolahdessa. Ko. tutkimuksessa havaittiin, että leväbiomassan tyyppistä 33 % vapautui ammoniumina (NH_4^+) ja liukoisena orgaanisena typpinä (DON) 19 vuorokauden aikana ja fosfaattipitoisuuden (PO_4^{3-}) mittausten perusteella fosforin vapautumisnopeus leväbiomassasta oli sama, joten ravinteiden vapautumisen ”puoliintumisaika” oli noin neljä viikkoa. Neljän viikon puoliintumisaikan perusteella päivittäinen hajoamisnopeus oli n. $0,025 \text{ d}^{-1}$. Vastaavasti 33 % hajoaminen 19 päivässä tuottaa hajoamisnopeudelle arvon $0,021 \text{ d}^{-1}$. Myös Tvärminnen lähivesillä orgaanisen aineen hetkellinen päivittäinen hajoamisnopeus oli keskimäärin $0,022 \text{ d}^{-1}$ (sd 0.018) vaihteluvälin ollessa $0,005\text{-}0,079 \text{ d}^{-1}$ (Heiskanen ja Leppänen 1995).

Lämpötila säätelee sedimentin pinnan tuoreen orgaanisen aineen hapen kulutusta. Vaikka vuodenaikaiset erot sedimentin hapenkulutuksessa usein selittyvät lämpötilalla, tämä riippuvuus harvoin kuvaa tarkasti sedimentin pintakerroksessa tapahtuvaa aerobista hengitystä (Thamdrup ym. 1998). Tähän vaikuttaa se, että vain osa hapen kulutuksesta liittyy organotrofiseen hengitykseen (eli energian vapauttamiseen orgaanisia yhdisteitä hapettamalla) ja loppuosa liittyy pelkistyneiden epäorgaanisten yhdisteiden (NH_4 , Mn_2 , Fe^{2+} , ja pelkistyneet rikkiyhdisteet) hapetukseen (Thamdrup et al. 1998). Rannikkosedimenteissä nämä prosessit usein kattavat puolet tai jopa enemmänkin hapen kulutuksesta (Canfield et al. 1993, Jörgensen 1998 ref. Thamdrup et al. 1998). Tämä selittää miksi pohjalle vajonneen orgaanisen aineen hapenkulutuksessa voidaan Heiskanen ja Leppänen (1995) aineistossa havaita selvä lämpötilariippuvuus (joka noudattaa logistista mallia), mutta aineen hajoaminen ei kuitenkaan ollut selvästi lämpötilariippuvaista.

Edellä mainitut tutkimukset tehtiin n. $10 \text{ }^\circ\text{C}$:een tai sitä lämpimämmissä oloissa. Lämpötilassa $4 \text{ }^\circ\text{C}$ tehdyissä kokeissa vain noin 10 % mineralisoitui epäorgaaniseksi fosforiksi (DIP) ja ammoniumiksi (NH_4^+) 27 vuorokauden aikana (Conley and Johnson 1995), joten vain n. 0.4 % materiaalista hajosi vuorokaudessa. Em. tutkimuksen mukaan mineralisaatio vaihtelee sedimenttityypin, lämpötilan ja hajoavan aineen materiaalin mukaan, mutta toisaalta erot olivat pieniä koeyksiköiden välillä, joissa oli tai ei ollut sedimenttiä. Siinä kuitenkin havaittiin, että lisäämällä orgaanisen sedimentoituvan aineen määrää suhteellinen mineralisaatio lisääntyi.

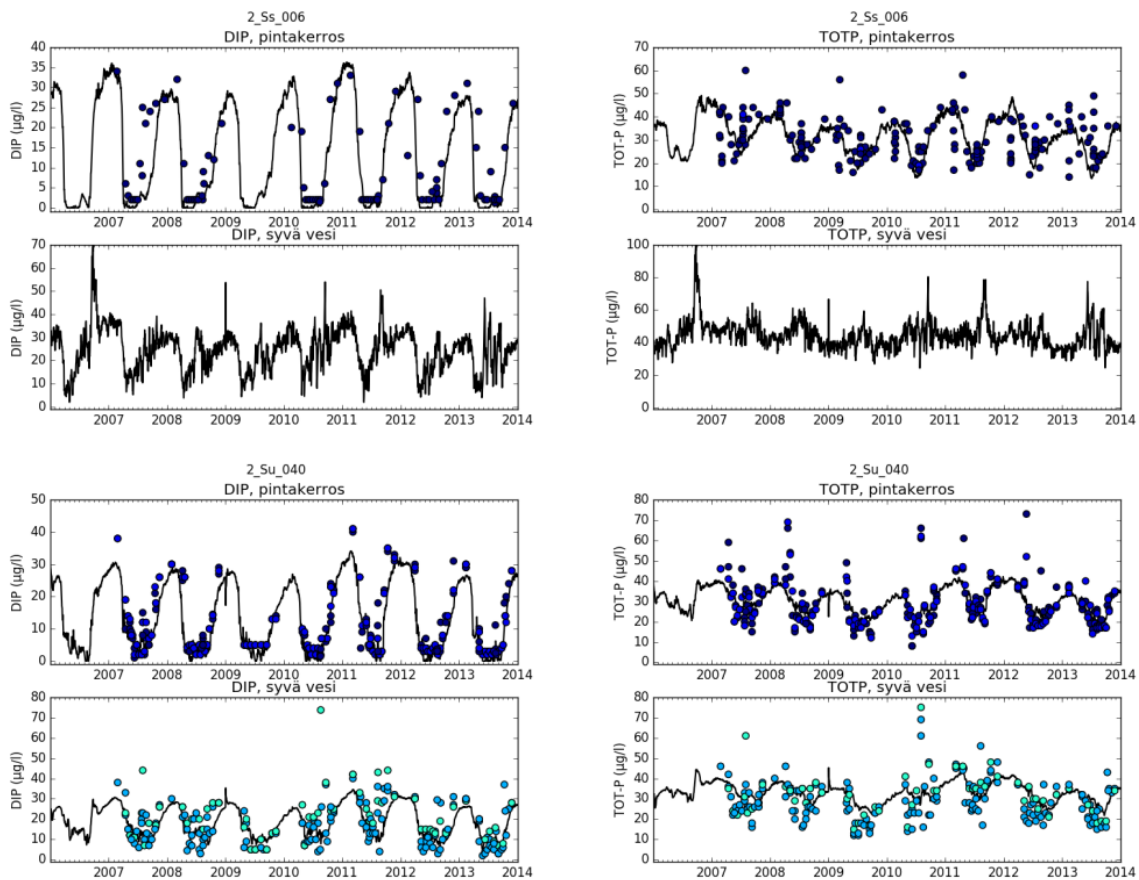
Jos oletetaan edellä mainittuihin muihin tutkimuksiin perustuen, että hajoamisnopeus oli n. 2 % $10 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa (mm. Heiskanen ja Leppänen 1995) ja vastaavasti 0.4 % $4 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa (Conley and Johnstone 1995), ja hajoamisen pysähtyvän lämpötilassa $0 \text{ }^\circ\text{C}$, **hetkelliset sedimentoituneen orgaanisen aineksen päivittäiset hajoamisnopeudet** voidaan kuvata mallilla $k = 0.00043T + 0.00016T^2$, missä T on lämpötila.

Malli ennustaa, että $20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa hajoamisnopeus saa arvon $0,074 \text{ d}^{-1}$, joka on lähellä Heiskanen ja Leppänen (1995) ilmoittaman vaihteluvälin ylärajaa, ja tällöin orgaanisesta aineesta hajoaa n. 7 % vuorokaudessa. Kun tämä tieto yhdistetään kasvukauden aikaiseen sedimentaation voimakkuuteen, voidaan sisäisen kuormituksen ajallinen kehitys arvioida.

6.3.4. Sisäinen kuormitus ja vesipatsaan fosfaattipitoisuus

Yllä esitettyjen Arvioiden 1 (Liite 2) mukaisia sisäisen fosforikuormituksen pitoisuuksia käytettiin syötteinä vedenlaatumallissa. Molemmilta merialueilta valittiin esimerkkikuviksi kaksi vesimuodostuma-aluetta, joista toinen sijaitsee sisäsaaristossa tai lähellä rannikkoa alueella, jossa sisäisen fosforikuormituksen voidaan olettaa olevan voimakasta (Kuvat 6.3.4 ja 6.3.5), ja toinen ulkosaaristossa, jossa sisäisen kuormituksen voidaan olettaa olevan vähäistä.

Kuvassa 6.3.6. on esitetty mallisimulaatio fosfaatti- ja kokonaisfosforipitoisuuksista itäisen Suomenlahden sisäsaariston ja ulkosaariston vesimuodostumien pinta- ja syvävesikerroksessa, kun sisäisen fosforikuormituksen syöte on Arvion 1 mukainen. Pisteet kuvissa edustavat havaintoja liukoisen fosfaatin ja kokonaisfosforin pitoisuuksista. Kuvassa 6.3.7. on esitetty vastaavat simulaatiot ja havainnot Selkämerelle.

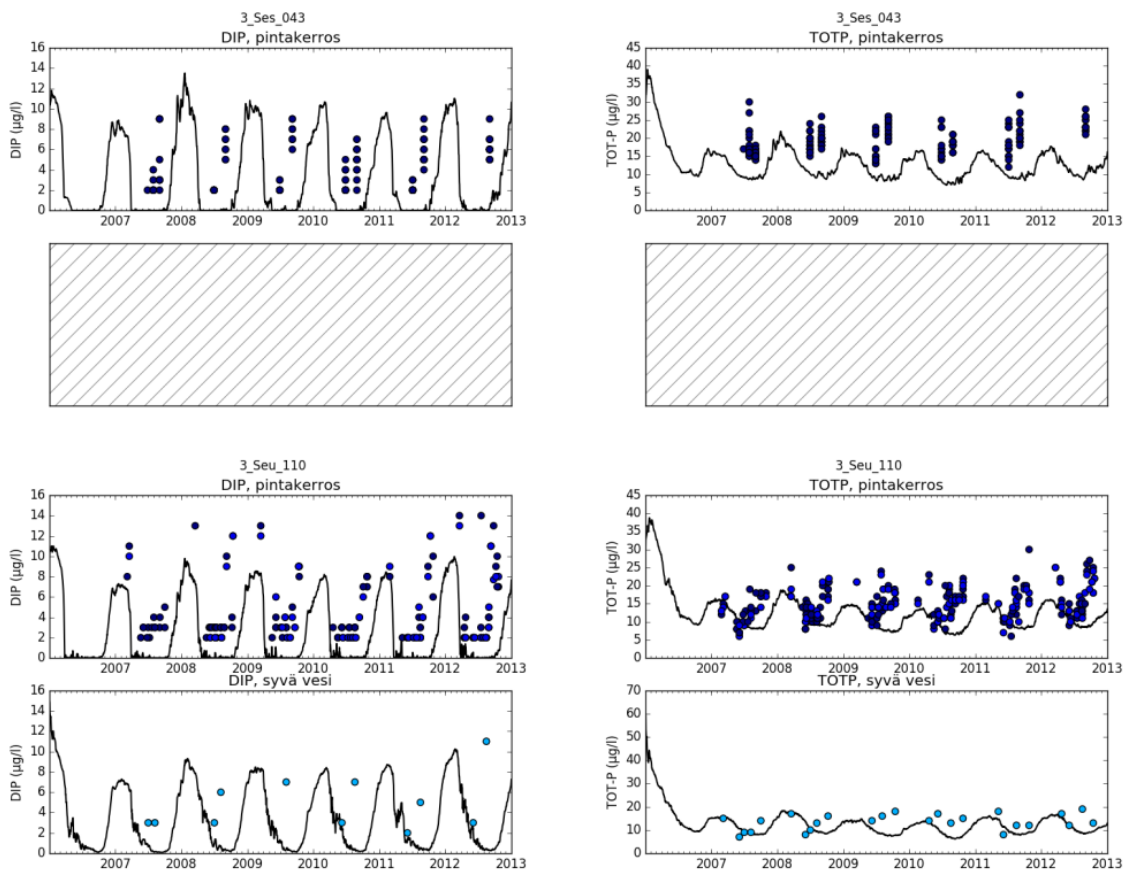


Kuva 6.3.6. Mallisimulaatio fosfaattipitoisuuksista (cDIP, vasemmanpuoleiset paneelit) ja kokonaisfosforipitoisuuksista (totP, paneelit oikealle puolella) itäisen Suomenlahden sisäsaariston (Ss_006) ja ulkosaariston (Su_040) vesimuodostumien pinta (0)- ja syvävesikerroksessa (1), kun sisäisen fosforikuormituksen syöte on Arvion 1 mukainen. Pisteet kuvissa edustavat havaintoja.

Sekä Suomenlahden ulko- että sisäsaariston vesimuodostumilla mallin simuloimat pitoisuudet ovat pääsääntöisesti havaintojen vaihteluvälillä (Kuva 6.3.6). Suomenlahden mallialueelle tehtiin myös happiolosuhteiden ääripäitä edustavat sisäisen fosforikuormituksen Arviot 2a ja 2b, ja havainnot olivat pääpiirteissään seuraavat. Arviossa 2a, jossa oli oletettu happiolosuhteet keskimääräistä paremmiksi ja sisäinen kuormitus vastaavasti pienemmäksi, jäivät erityisesti itäisen Suomenlahden sisäsaariston vesimuodostumissa mallin ennustamat fosfaatti- ja kokonaisfosforipitoisuudet alhaisemmiksi. Arviossa 2b, jossa puolestaan oli oletettu keskimääräistä huonommat happiolosuhteet, molemmat mallinnetut vesimassan fosforimuodot olivat lähempänä Arvion 1 mukaisen syötteen tuottamia mallituloksia happiolosuhteiden ollessa lähempänä toisiaan. Suomenlahden ulkosaariston vesimuodostumilla, joissa sisäisen

fosforikuormituksen määrä on yleensä pienempi, ja joissa reunaehdoilla on voimakkaampi vaikutus mallin tuottamaan fosfaatti- ja kokonaisfosforipitoisuuksiin, erilaisten arvioiden mukaisten sisäisen kuormituksen syötteiden veteen tuottamien fosforimuotojen pitoisuuserot ovat selvästi pienempiä kuin sisäsaariston vesimuodostumilla.

Selkämerellä mallin laskenta-alueella on suurimmaksi osaksi karkeita pohjatyyppejä ja sinne sijoittuu varsin vähän akkumulaatiopohjia, joille kerrostuisi eniten fosforia sisältäviä hienojakoinen orgaaninen ja epäorgaaninen aines. Tämän takia suuremmasta pinta-alasta huolimatta Selkämeren mallialueen sisäisen kuormituksen määrä on Suomen puoleisella rannikolla varsin pieni. Oletettavaa olikin, että tällä alueella reunaehdoilla on suurempi vaikutus vesimassan fosfaatti- ja kokonaisfosforipitoisuuksiin kuin sisäisellä kuormituksella. Lisäksi happiolosuhteet eivät vaihtele niin voimakkaasti sedimentin yläpuolisessa verikerroksessa, että se vaikuttaisi hapellisuusluokkiin, joiden perusteella rautaan sitoutuneen fosforin on arvioita laskiessa oletettu vapautuvan.



Kuva 6.3.7. Mallisimulaatio fosfaattipitoisuuksista (cDIP, vasemmanpuoleiset paneelit) ja kokonaisfosforipitoisuuksista (totP, paneelit oikealle puolella) itäisen selkämeren sisäsaariston (Ses_043) ja ulkosaariston (Seu_110) vesimuodostumien pinta (0)- ja syvävesikerroksessa (1), kun sisäisen fosforikuormituksen syöte on Arvion 1 mukainen. Pisteet kuvissa edustavat havaintoja.

6.3.5. Epävarmuustekijöiden tarkastelu

Saaristomerén kokonaiskuormitusmallin loppuraportissa (Lignell et al. 2016) tarkasteltiin useita sisäisen fosforikuormituksen arviointiin liittyviä epävarmuustekijöitä, sekä ylipäätään arvioinnin tekemisen epävarmuutta että tässä käytettyyn lähestymistapaan liittyviä epävarmuustekijöitä. Suomenlahden sisäsaaristossa on topografialtaan hyvin rikkonaisia alueita, joissa tulee esiin samoja epävarmuutta lisääviä tekijöitä kuin Saaristomerimallin alueella. Nämä liittyvät mm.

sedimenttikarttojen epätarkkuuteen ja pohjan suuren heterogeenisyyteen ja niiden mukanaan tuomaan fosforipitoisuuksien ja fosforin esiintymismuotojen ekstrapoloinnin vaikeuteen alueille, joilta havaintoja ei ole. Havaintojen puutteen tuoma epävarmuus on erityisen suuri Selkämerellä, jossa päädyttiinkin käyttämään vakioituja Fe-P- ja OP-pitoisuuksia kaikilla akkumulaatiopohjilla, koska ekstrapolointi olisi tuottanut hyvin epäluotettavia tuloksia. Alueellisesti vaihtelevien sedimentaationopeuksien aiheuttama epävarmuus on olennainen myös Suomenlahden ja erityisesti Selkämeren alueella. Suomenlahdella esimerkiksi jokien läheisyydessä sedimentin kerrostumisnopeus voi olla yli kymmenkertainen avomerren kerrostumisnopeuteen nähden. Selkämerellä puolestaan mallin laskenta-alueella akkumulaatiopohjia on ylipäätään hyvin vähän, koska ne keskittyvät Selkämeren keskiosaan ja Ruotsin puoleiselle rannikolle.

6.4 Kolmiulotteisen hydrodynamiikan mallinnus

Vedenlaatumallin tarvitsemat lämpötila- ja virtauskentät tuotettiin kolmiulotteisilla hydrodynaamisilla COHERENS ja NEMO -merimalleilla. Mallinnukseen käytettiin tarkan erottelukyvyn rannikomallin ja karkeamman erottelukyvyn Itämerimallin yksisuuntaista kytkentää; tässä hankkeessa laajennetulla Saaristomeren alueella ja Suomenlahdella rannikkosovelluksen horisontaalinen erottelukyky on noin 0.5 km (Selkämerellä 1.9 km) ja Itämerisovelluksen 3.7 km. Rannikon mallinnusalue on jaettu 40 kerroksen vertikaalisuunnassa. Mallitulosten tarkkuutta on arvioitu vertaamalla mallin laskemaa lämpötilaa ja suolaisuutta ao. rannikkoalueiden seuranta-aseilla tehtyihin havaintoihin. Malli kuvaa hyvin pintakerroksen lämpötilan vuotuista ja alueellista vaihtelua, sekä pintasuolaisuuden alueellista vaihtelua. Myös pohjanläheiset lämpötila- ja suolaisuusarvot tuotetaan luotettavasti monilla alueilla, mutta joillakin alueilla mallin saatavissa olevan pohjan topografia-aineiston epätarkkuus vaikuttaa mallin kykyyn kuvata pohjanläheistä vedenvaihtoa ulkosaariston ja sisäsaariston välillä. Rannikomalli pystyy simuloimaan myös kumpuamistilanteet, joita on verifioitu satelliittihavaintojen avulla.

Vedenlaadun mallintamiseen tarvittavat lämpötila- ja virtauskentät tuotetaan kolmiulotteisilla (3D) hydrodynaamisilla merimalleilla. 3D-merimallit ovat laskennallisesti vaativia ja siksi laskenta on toteutettu Ilmatieteen laitoksen (IL) suurteholaskentakoneella. Saaristomeren hydrodynamiikan mallintamisessa on käytetty COHERENS-mallia (Luyten, 2013), ja Suomenlahden sekä Selkämeren hydrodynamiikan mallintamisessa IL:n NEMO-mallia (V3.6) (Madec and the NEMO team, 2015) (kts. Liite 3).

Hydrodynaamiset merimallit tarvitsevat laskentaan sekä pakotteita että alku- ja reunaehtoja. Lähtötietoja ovat mm. alueen syvyystiedot sekä aloitusajankohdan lämpötila- ja suolaisuuskentät. Pakotteita ovat säätiedot (esim. lämpötila, ilmanpaine, tuulet, pilvisuus, sademäärä), jokivirtaamat ja reunaehdot puolestaan vedenkorkeus, virtaukset, lämpötila ja suolaisuus mallialueen avoimilla reunoilla.

Saaristomeren, Suomenlahden ja Selkämeren hydrodynamiikan mallintamiseen käytetään koko Itämeren kattavaa karkeamman erottelukyvyn mallia ja hiehoilaista alueellista mallia, joiden välillä on yhdensuuntainen kytkentä. Tämä tarkoittaa, että koko Itämeren kattavan mallin simulaatiot tehdään erikseen ja alueelliset mallit käyttävät avoimilla, ulapan puoleisilla reunoillaan valmiiksi laskettuja lämpötila-, suolaisuus- ja virtausprofiileja.

Seuraavissa kappaleissa esitellään Saaristomeren, Suomenlahden ja Selkämeren hydrodynaamiset merimallit ja niiden käyttämät syöttötiedot (Taulukko 6.4.1). Lisäksi mallien toimivuutta tarkastellaan vertailemalla mallinnettuja lämpötila- ja suolaisuusarvoja havaintoihin.

6.4.1. Saaristomerimallin laajennus

Saaristomeren kokonaiskuormitusmallihankkeessa kehitettyä Saaristomeren hydrodynaamisen COHERENS-mallin laskenta-alueita laajennettiin tässä hankkeessa itään päin Hankoniemen itäpuolelle. Laajennuksen tarkoituksena oli saattaa Suomenlahden mallin ja Saaristomerimallin reuna-alueet päällekkäin. Samalla mallin rantaviivan kuvausta parannettiin ja sen syvyystietoja muokattiin käyttämällä hyväksi VELMU -syvyysmallia (Vedenalaisen meriluonnon monimuotoisuuden inventointiohjelma, SYKE). Syvyystietojen muokkaamisen lisäksi mallin tarkkuutta sisäsaaristossa pyrittiin parantamaan kokeilemalla erilaisia parametrisointeja valon vaimenemisen kuvauksessa. Tällä hetkellä malli kuvaa sisäsaaristoa niin hyvin, kuin tällä horisontaalisella resoluutiolla on mahdollista.

Taulukko 6.4.1. Yhteenveto käytössä olevista hydrodynaamisista alueellisista malleista ja niiden syöttötiedoista (kts. Liite 3).

	Saaristomeri-malli	Suomenlahti-malli	Pohjanlahti-malli
<i>Ajanjakso</i>	2006–2014	2006–2013	2006–2013
<i>Mallikoodi</i>	COHERENS	NEMO	NEMO
<i>Erottelukyky</i>	0.25 nmi / 460 m	0.25 nmi / 460 m	1 nmi / 1850 m
<i>Syvyystietojen lähde</i>	VELMU-syvyysmalli	VELMU-syvyysmalli, BSBD-syvyystiedot	SMHI:n koostama aineisto
<i>Sääsyöte</i>	HIRLAM-sääennustemalli	EURO4M-mallin uusanalyysi	EURO4M-mallin uusanalyysi
<i>Jokisyöte</i>	VEMALA-malli	VEMALA-malli ja HydroMetin aineisto	HYPE- (SMHI) ja VEMALA-mallit
<i>Avoimet reunat</i>	Itämeren COHERENS-malli	Pohjanmeri-Itämeri-NEMO-malli	Pohjanmeri-Itämeri-NEMO-malli
<i>Viitteet</i>	Tuomi ym., 2018	Vankevich ym., 2016 Westerlund ym., 2018a, 2018b	(Ei julkaistu)

Saaristomeren hydrodynaamisen mallin horisontaalinen erottelukyky on 0.25 merimailia eli noin 460 m ja siinä on 40 vertikaalikerrosta. Avoimien reunojen lämpötila-, suolaisuus- ja virtausprofiilit saadaan koko Itämeren kattavasta mallista, jonka horisontaalinen erottelukyky on 2 merimailia eli noin 3.7 km ja jossa on 80 vertikaalikerrosta. Pintakerroksen paksuus on maksimissaan 1 m molemmissa malleissa.

Lämpötilan ja suolaisuuden alkukentät on luotu DAS-ohjelmalla (Sokolov ym., 1997), joka interpoloi kentät Itämeren alueen avoimissa tietokannoissa olevista havainnoista. Sääsyöteenä käytetään Ilmatieteen laitoksen numeerisen sääennustemalli HIRLAMin ennusteita vuosille 2006–2014. HIRLAM-aineiston alueellinen erottelukyky on neljä merimailia eli noin 7.4 km ja aika-askel kolme tuntia (HIRLAM-B, 2012). Suomen jokien virtaamatiedot saadaan VEMALA-mallista. Lisäksi Itämerimalli käyttää muiden kuin Suomen jokien osalta klimatologia kuukausikeskiarvoja (Bergström & Carlsson, 1994).

Itämerimallissa on avoin reuna Pohjanmerelle Tanskan salmissa. Lämpötila- ja suolaisuusprofiilit tällä reunalla on otettu Copernicus Marine Environment Monitoring Service -palvelun merimallituotteista ja vedenkorkeus SMHI:n havaintoaineistosta (Göteborgin mareografi).

Saaristomeren mallin toimintaa on verifioitu vertaamalla vuosille 2006–2014 simuloitua lämpötilaa ja suolaisuutta Saaristomeren seuranta-asetilla tehtyihin havaintoihin (Kuva 6.4.1). Vertailuun valittiin kolme intensiiviasemaa, Brändö, Seili ja Utö, joilta on saatavilla lähes kuukausittaisia havaintoja. Muilta alueen seuranta-asetilta on saatavilla lähinnä kesäkauden havaintoja.

Malli kuvaa hyvin pintakerroksen lämpötilan ja suolaisuuden vuosittaista vaihtelua (Kuva X.1). Mallinnetuissa arvoissa nähdään suurempaa vaihtelua kuin havainnoissa, koska havainnot ovat vain kuukauden välein. Mallinnettujen lämpötilojen vastaavuus havaintoihin vaihtelee eri vuosien välillä ja toisina vuosina osuvuus on parempi. Mallinnetun pintasuolaisuuden keskimääräinen taso vastaa havaintojen tasoa. Suurimmat erot, noin 1 psu, ovat Utön havaintoaseman kohdalla, mikä liittyy Saaristomerimallin ja Itämerimallin vuorovaikutukseen mallialueen eteläreunalla. Verrattuna aiempaan Saaristomerimallin versioon tulokset ovat samansuuntaiset ja joillain alueilla batymetrian tarkentaminen on myös parantanut mallin toimintaa (ei näytetä tässä).

Alkuperäistä, mallinnusalueelta suppeampaa Saaristomeren hydrodynamista mallia on validoitu tarkemmin Tuomen ym. (2018) artikkelissa¹, joka käsittelee Saaristomeren hydrografiaa, virtauskenttiä ja kulkeutumista. Tutkimuksessa todettiin mallin simuloivan alueen hydrodynamikkaa riittäväällä tarkkuudella vedenlaadun mallinnuksen tarpeisiin.

6.4.2. Suomenlahdimalli

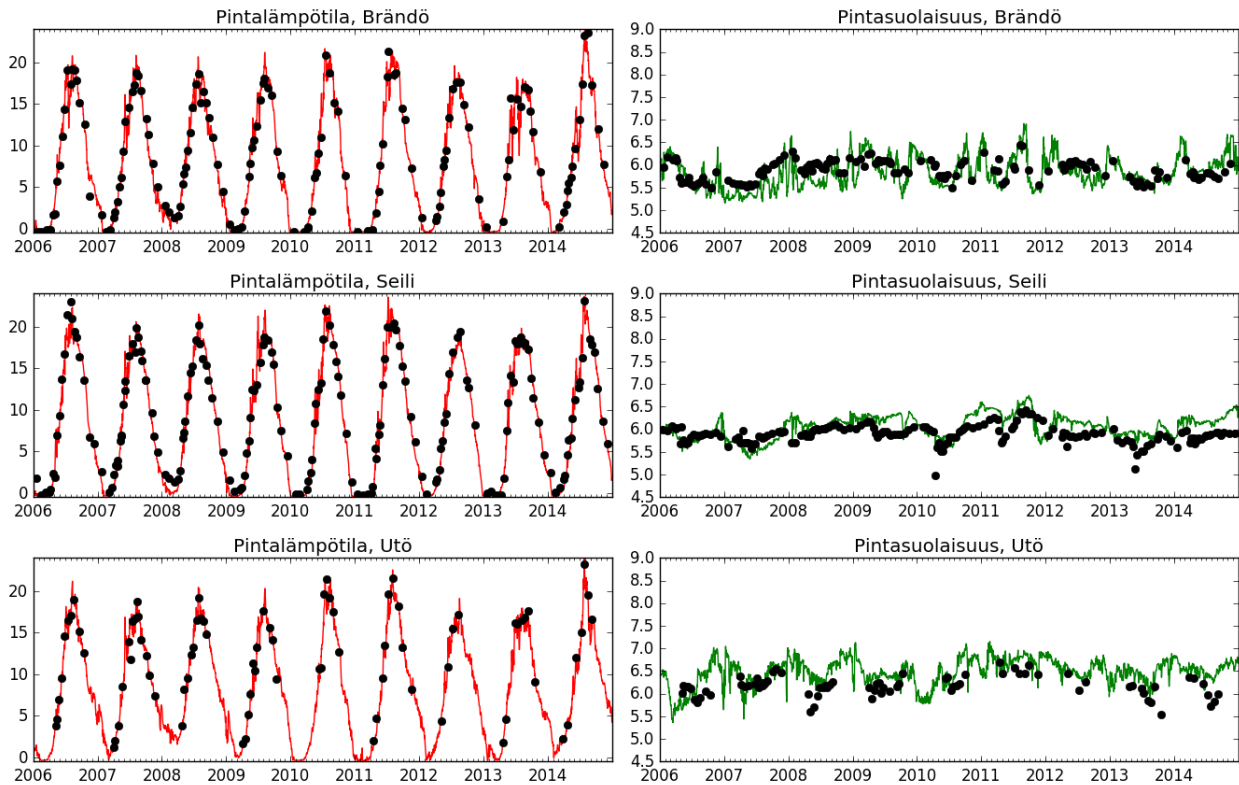
Suomenlahden hydrodynaminen malli pohjaa alueelle aikaisemmin tehtyyn NEMO -malliin (Vankevich ym., 2016, Westerlund ym., 2018a). Tässä hankkeessa mallia kehitettiin yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen kanssa laajentamalla laskentahilaa Hankoniemen länsipuolelle, tarkentamalla syvyystietoja ja Suomen rantaviivan kuvausta ja lisäämällä mukaan kaikki Suomen joet. Mallin horisontaalinen erottelukyky on 0.25 merimailia, ja siinä on 94 noin 1 m paksuista vertikaalikerrosta.

Suomenlahden hydrodynamisen mallin laskenta-alue kattaa koko Suomenlahden; läntinen reuna kulkee pitkin Vormsi–Kemiönsaari-linjaa noin pituuspiirillä 23 E. Syvyystiedot perustuvat VELMU -syvyysmalliin (Vedenalaisen meriluonnon monimuotoisuuden inventointiohjelma, SYKE) sekä BSBD:n aineistoihin (Baltic Sea Bathymetry Database, Baltic Sea Hydrographic Commission, 2013).

Mallisimulaation alkukentät lämpötilalle ja suolaisuudelle sekä lämpötila-, suolaisuus ja virtausprofiilit sekä vedenkorkeus mallialueen avoimella länsireunalla on otettu Pohjanmeri-Itämeri-NEMO-mallista (Nemo Nordic, Hordoir ym., 2018), jonka horisontaalinen erottelukyky on 2 merimailia. Simulaatioiden sääsyötteinä käytetään EURO4M-mallilla tehtyä uusanalyysia vuosille 2006–2013 (Dahlgren et al., 2016; Landelius et al., 2016).

Jokivalumat Suomen jokien osalta on otettu VEMALA-valuma-aluemallista. Suomen jokien lisäksi mallissa on kolme suurinta Suomenlahteen laskevaa jokea: Neva, Narva ja Luga. Niiden valumatieto on saatu HydroMetistä (North-West Interregional Territorial Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring) Suomenlahti-vuoden 2014 yhteydessä (<http://www.gulfoffinland.fi>).

¹ Artikkelin on julkaistu Journal of Marine Systems -lehdessä OpenAccess-lisenssillä ja on kaikkien vapaasti luettavissa.



Kuva 6.4.1: Mallinnettu lämpötila (vasemmalla) ja suolaisuus (oikealla) 5 m syvyydellä verrattuna Brändön (yllä), Seilin (keskellä) ja Utön (alla) intensiiviasemien havaintoihin (mustat pisteet) vuosina 2006–2014.

Suomenlahden mallin toimintaa on verifioitu vertaamalla vuosille 2006–2013 simuloitua lämpötilaa ja suolaisuutta vertaamalla niitä pintalämpötilan satelliittikuviin (Kuva 6.4.2) sekä Suomenlahden seuranta-asetimillä tehtyihin havaintoihin (Kuva 6.4.3). Vertailuun valittiin kolme rannikon intensiiviasemaa, Längden, Länsi-Tonttu ja Huovari, joilta on saatavilla lähes kuukausittaisia havaintoja.

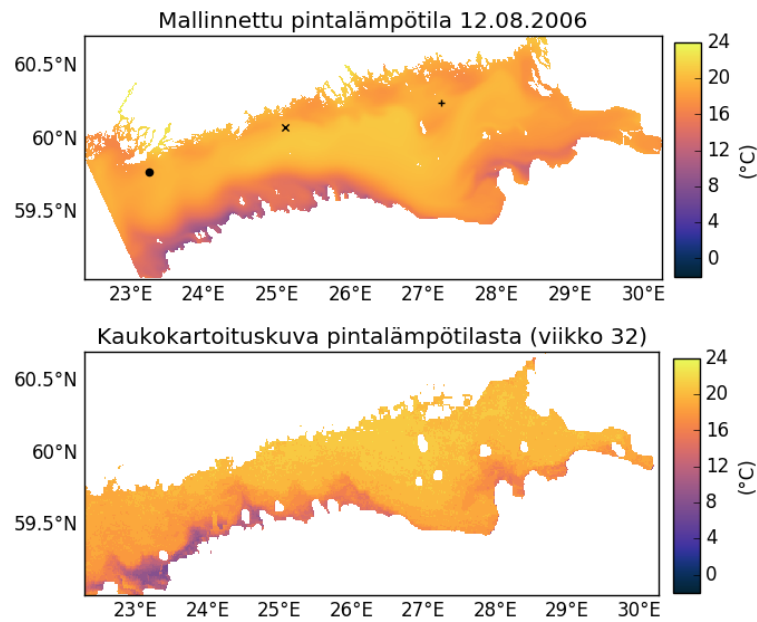
Mallinnettu pintalämpötila Suomenlahdella 12.8.2006 sekä kaukokartoituskuva pintalämpötilasta (Kuva 6.4.2) näyttävät, että malli pystyy tuottamaan kumpuamisilmion Suomenlahdella. Kuvissa nähdään selkeästi muita alueita viileämpää, alle 10°C vettä etelässä Viron rannikolla. Verrattaessa mallinnettua lämpötilaa ja suolaisuutta 5 m syvyydellä intensiiviasemien havaintoihin vuosina 2006–2013 (Kuva 6.4.3) nähdään, että mallinnettu lämpötila seuraa hyvin havaittua lämpötilaa. Mallinnettu suolaisuus on ajoittain korkeampi kuin havaittu suolaisuus, mutta malli seuraa havaittua ajallista vaihtelua.

Suomenlahden mallin vanhempi versio on validoitu (Westerlund ym. 2018a). Westerlundin ym. (2018b) mallitutkimuksessa tarkasteltiin puolestaan mm. Suomenlahden keskimääräistä pintavirtauskenttää eri vuodenaikoina. Voimakkaimmillaan keskimääräisvirtaukset ovat pääasiassa syksyllä ja talvella, jolloin tuulikin on voimakkaampaa, ja alhaisimmillaan keväällä. Kirjallisuudessa perinteisesti esitetty vastapäiväinen kiertoliike (sisäänvirtaus Viron rannikolla ja ulosvirtaus Suomen rannikolla) ei mallitutkimuksen mukaan ole kaikkina vuodenaikoina erotettavissa.

6.4.3. Selkämerimalli

Selkämeren hydrodynamiikan mallinnus tehdään Pohjanlahden NEMO-mallilla, jonka horisontaalinen erottelukyky on yksi merimaili eli noin 1.8 km. Malli pohjautuu SMHI:ssä kehitettyyn ja SMHI:n ja IL:n SmartSea-projektissa käyttämään mallikonfiguraatioon. Tässä

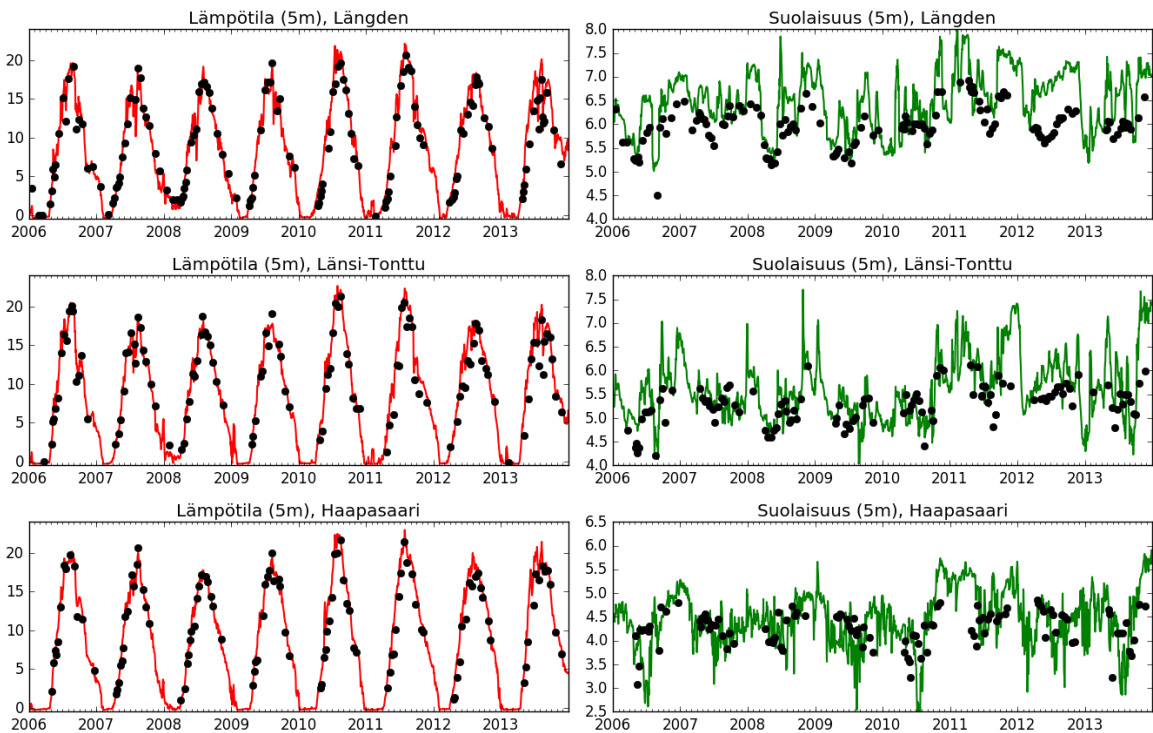
hankkeessa mallin batymetriaa muokattiin kuvaamaan Suomen rannikkoa tarkemmin käyttämällä hyväksi VELMU-syvyysmallia. Muilta osin batymetria on SMHI:n koostama.



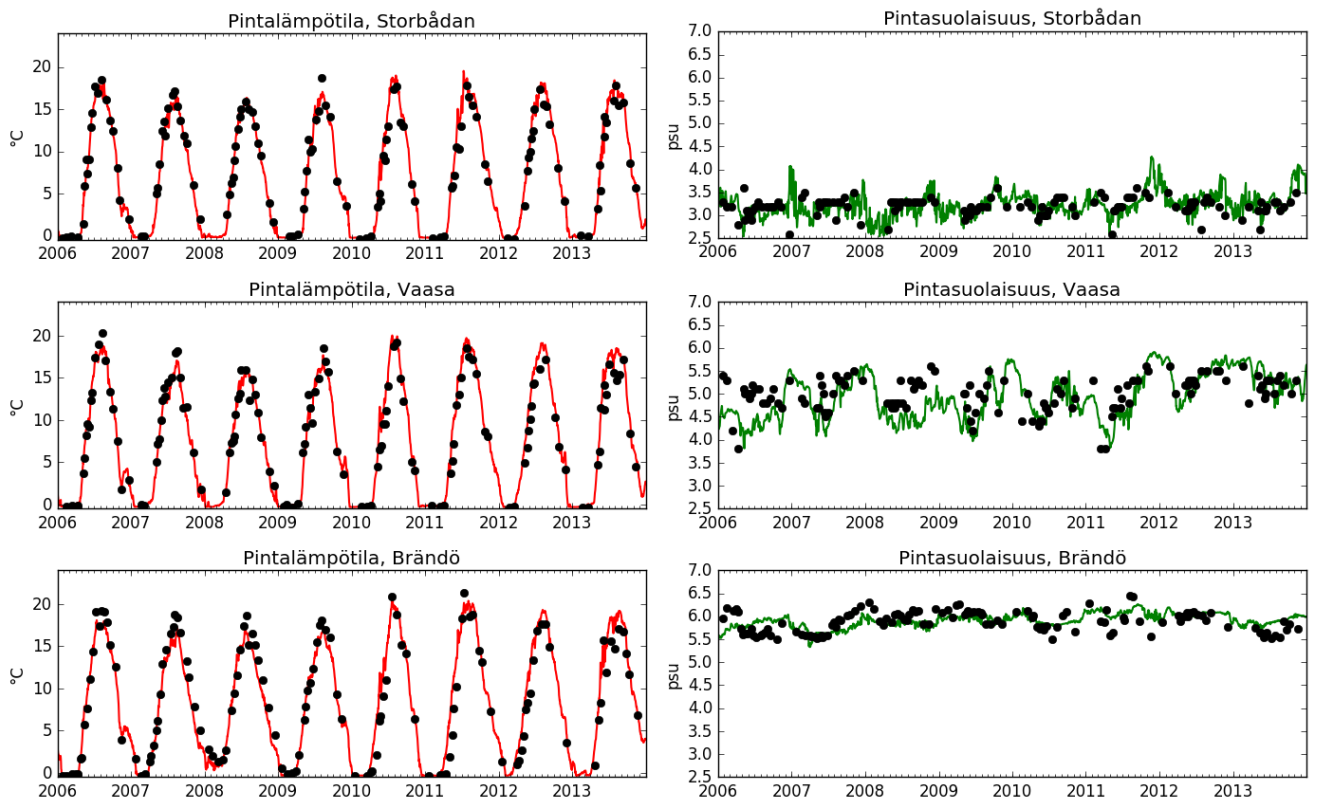
Kuva 6.4.2: Mallinnettu Suomenlahden pintalämpötila 12.8.2006 (ylhällä) ja samaa ajankohtaa vastaava kaukokartoituskuva pintalämpötilasta viikolta 32 (alhaalla). Yläkuvassa intensiiviasemien sijainnit lännestä itään: Längden (o), Länsi-Tonttu (x) ja Haapasaari (+)

Pohjanlahden malli saa reunaehdonsa samalta Itämeren ja Pohjanmeren kattavalta NEMO-mallilta (Nemo Nordic, Hordoir ym., 2018) kuin Suomenlahden malli. Sääsytteinä käytetään niin ikään samaa EURO4M-mallilla tehtyä uusanalyysia vuosille 2006–2012 (Dahlgren et al., 2016; Landelius et al., 2016). Ruotsin jokien osalta jokivalumat saadaan SMHI:n HYPE-mallista (<http://hypeweb.smhi.se/>) ja Suomen jokien osalta VEMALA-mallista.

Mallinnettua pintalämpötilaa ja -suolaisuutta verrattiin 1 m syvyydeltä mitattuihin havaintoihin kolmelta Pohjanlahden rannikon intensiiviasemalta, Storbådan (Vavy-19), Vaasa (Vav-11 V-4) ja Brändö (Kuva 6.4.4). Mallinnettu pintalämpötila seuraa hyvin havaittua vuodenaikaisvaihtelua, joskin keväällä malli lämpenee havaintoja hitaammin ja vastaavasti syksyllä viilenee hitaammin. Joinain vuosina malli myös aliarvioi kesäkuukausien korkeimpia lämpötiloja. Malli tuottaa pintasuolaisuuden havaitun alueellisen jakauman: Merenkurkun pohjoispuolella Storbådanin havaintoasemalla suolaisuus on noin 3-3.5 psu ja etelässä Brändön havaintoasemalla 6 psu.



Kuva 6.4.3: Mallinnettu lämpötila (vasemmalla) ja suolaisuus (oikealla) 5 m syvyydellä verrattuna Längdenin (yllä), Länsi-Tontun (keskellä) ja Haapasaaren (alla) intensiiviasemien havaintoihin (mustat pisteet) vuosina 2006–2013.



Kuva 6.4.4: Mallinnettu pintakerroksen lämpötila (vasemmalla) ja suolaisuus (oikealla) verrattuna Storbådanin (Vavy-19, yllä), Vaasan (Vav-11, keskellä) ja Brändön (alla) intensiiviasemien havaintoihin (mustat pisteet) vuosina 2006–2012.

6.5 FICOS-mallijärjestelmä ja vesipatsaan ravinnekiertojen mallinnus

Rannikon vedenlaatuasteiden mallinnusjärjestelmä, FICOS kytkee hankkeessa koostetut ja tuotetut lähtötiedot, pakotteet, 3D hydrodynamiikan sekä ravinnesyötteet, ja mallintaa niiden yhteisvaikutuksena tuottaman vesipatsaan biogeokemian dynamiikan.

*FICOS -vedenlaatumoduulin tulosmuuttujina ovat pintakerroksen ja termokliinin alapuolisen syväveden epäorgaaniset ja kokonaisravinnepitoisuudet, leväbiomassa ja *a*-klorofyllipitoisuus laskenta-alueittain (resoluutio 0.5 km - vesimuodostuma).*

Vedenlaatumallinnus käynnistetään käyttöliittymän kautta, missä voidaan tehdä halutut valinnat kuormittajien, kuormitusskenaarioiden, mallinnusajanjakson ja alueellisen resoluution suhteen; lasketut tulokset ohjautuvat automaattisesti käyttöliittymään tarkasteltaviksi. Järjestelmän sisältämä biogeokemiallinen malli on parametrisoitu, formuloitu ja kalibroitu hankkeessa, ja se pystyy realistisesti simuloimaan leväbiomassan kasvukauden aikaisen kehityksen vesimuodostumissa sekä ravinteiden vuotuisen dynamiikan rannikoillamme.

6.5.1 Mallijärjestelmän rakenne ja toiminta

Rannikon mallinnusjärjestelmän vedenlaatumoduuli (Finnish Coastal Nutrient Load Model, FICOS, kts. Liite 3) koostuu neljästä osasta, joilla vesialueiden kuormitusvasteet simuloidaan:

1. Syöttötietojen (kuormitus, hydrodynamiikka ym.) haku ja esikäsittely vedenlaatumallia varten;
2. Syötteiden kytkeminen ja niiden synnyttämien vasteiden laskeminen ravinnekiertomallilla;
3. Mallinnustulosten jälkikäsittely (mm. tulosten ajallinen ja alueellinen skaalaus);
4. Meta- ja status-, ja tulostietojen päivitys käyttöliittymärajapinnalle

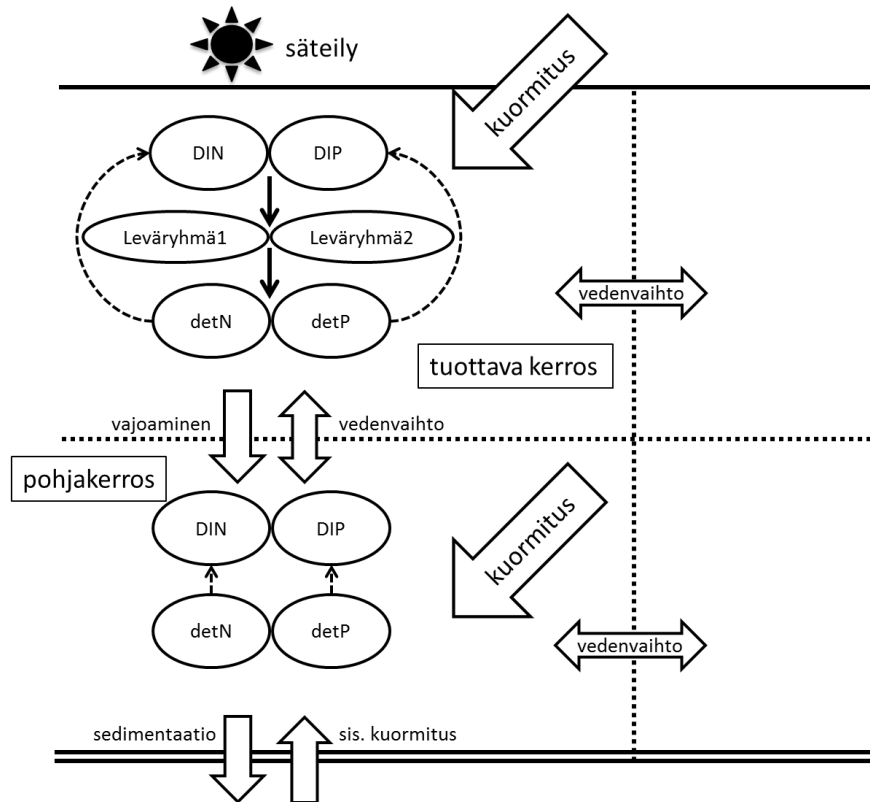
Mallijärjestelmän vedenlaatumoduulin yhteyteen on rakennettu kokoelma apuohjelmia, jotka pitävät huolen moduulin tiedonvaihdosta käyttöliittymärajapinnan kanssa (kts. Kuva 2.2). Ohjelmat huolehtivat uuden malliajon käynnistämisestä, syöttötietojen hakemisesta ja käsittelystä, tulostietojen välittämisestä käyttöliittymään sekä metatietojen (esim. ajoaika) vaihdosta vedenlaatumoduulin ja käyttöliittymän välillä. Kaikki tämä tapahtuu automaattisesti käyttäjän käynnistettyä malliajon käyttöliittymän kautta (Liite 1); mallin toiminta on kuvattu Liitteessä 4.

SEABED –hankkeen taannoin Saaristomerelle soveltamasta ravinnekiertomallista (Kiirikki ym. 2001) FICOSin tarpeisiin muokkaamamme biogeokemiallisen mallin toimintakaavio on esitetty Kuvassa 6.5.1. Malli sisältää dynaamisina muuttujina epäorgaanisen tyyppien ja fosforin lisäksi kaksi leväryhmää (N_2 -sitovat rihmamaiset sinilevät ja muut levät), joiden hävikkiterminä on kuolevuus detritukseksi; näin muodostuneiden kahden detritus -komponentin (N ja P) välityksellä simuloidaan ravintoverkon sedimentaatiohävikki ja epäorgaanisten ravinteiden kierrätys (remineralisaatio). Malli on formuloitu ja parametrisoitu tarpeellisilta osin uudelleen realististen rehevöitymisvasteiden tuottamiseksi (vrt. Lignell ym. 2013).

Mallin ravinnesyötteinä ovat valuma-alueen kuormitus (VEMALA –malli; mallien lyhenteet ja lyhyt kuvaus ovat Liitteessä 3), ilmalaskeuma, ulapalta tuleva taustakuormitus sekä empiiristen aineistojen pohjalta arvioidut pistekuormitus ja alueellisesti ja ajallisesti vaihteleva sisäinen kuormitus (6.3). Kokonaisravinteet lasketaan konservatiivisesti (olettaen ne passiivisiksi merkkiaineiksi) mallin laskemaa detrituksen sedimentaatiohävikkiin perustuvaa korjausta lukuun ottamatta. Mallin leväryhmien biomassat lasketaan sekä märkápainona että *a*-klorofyllinä.

FICOS käyttää syöttötietoinaan myös auringon säteilyä sekä 3D hydrodynaamisen mallimme laskemaa virtaus-, lämpötila- ja suolaisuusdataa, jota on saatavilla 0.5 km alueellisella tarkkuudella ja 40 syvyyskerroksessa. FICOS keskiarvoistaa ao. datan pinta- (0-10 m) ja

syvävesikerroksen (yli 10 m syvyys) hydrodynamiikaksi, ja rannikon 3D hydrodynaamisen mallin laskentahilan laajuus määrittää myös vedenlaatumallinnuksen alueellisen kattavuuden.



Kuva 6.5.1. Vesipatsaan ravinnekiertomallin toimintakaavio. Selitykset: Leväryhmä1 = N_2 -sitovat sinilevät, Leväryhmä2 = Muut levät; DIN ja DIP = epäorgaaninen N ja P. Mallin ravinnesyötteet sisältävät valuma-alueen ja ulapan ulkoisen taustakuormituksen, ilmalaskeuman, pistekuormituksen sekä sedimenttien sisäisen kuormituksen. Kuvasta puuttuvat kokonaisravinteet selkeyden vuoksi; niitä käsitellään konservatiivisina merkkiaineina mallin laskemaa detrituksen (detN ja detP) vajoamishävikkiä lukuun ottamatta.

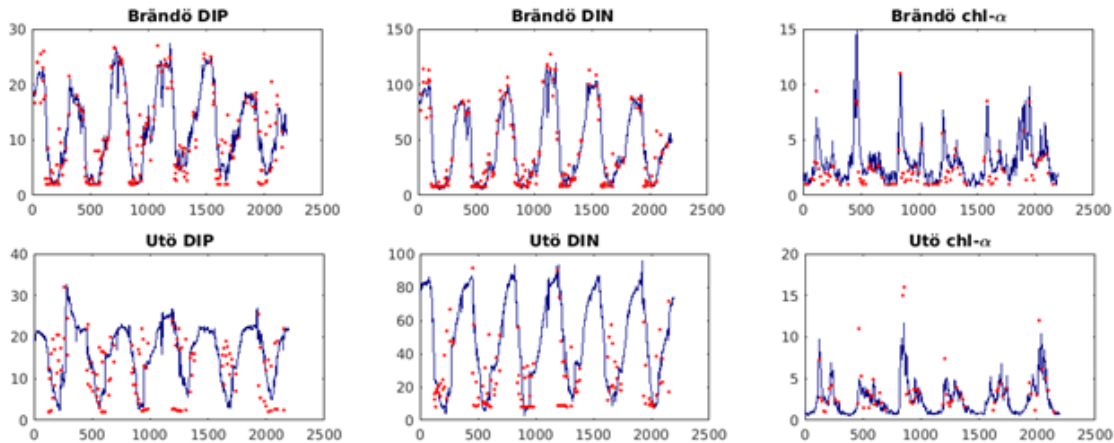
6.5.2. Mallin parametrisointi ja epävarmuusanalyysi

Malleissa on luontaista epävarmuutta liittyen havaintoihin, mallin formulointeihin, parametrisointeihin ja ennusteisiin. Parametrien epävarmuustarkastelu pohjautuu tilastolliseen bayesilaiseen menetelmään, jossa FICOSin ravinnekiertomallin simuloimaa vedenlaatua verrataan mitattuun vedenlaatuaineistoon. Lähestymistapaa on selvennetty Kuvassa 6.5.2. Nämä analyysit operoivat parametrien *todennäköisyysjakaumilla* (piste-estimaattien ja niiden vaihteluvälin sijasta), mikä mahdollistaa modernien, tehokkaimpien tilastollisten menetelmien soveltamisen. Parametreihin liittyvä epävarmuus on tarkoitus ottaa huomioon mallinnetuissa skenaarioennusteissa; tämä menetelmä on esitetty yksityiskohtaisemmin Liitteessä 5.

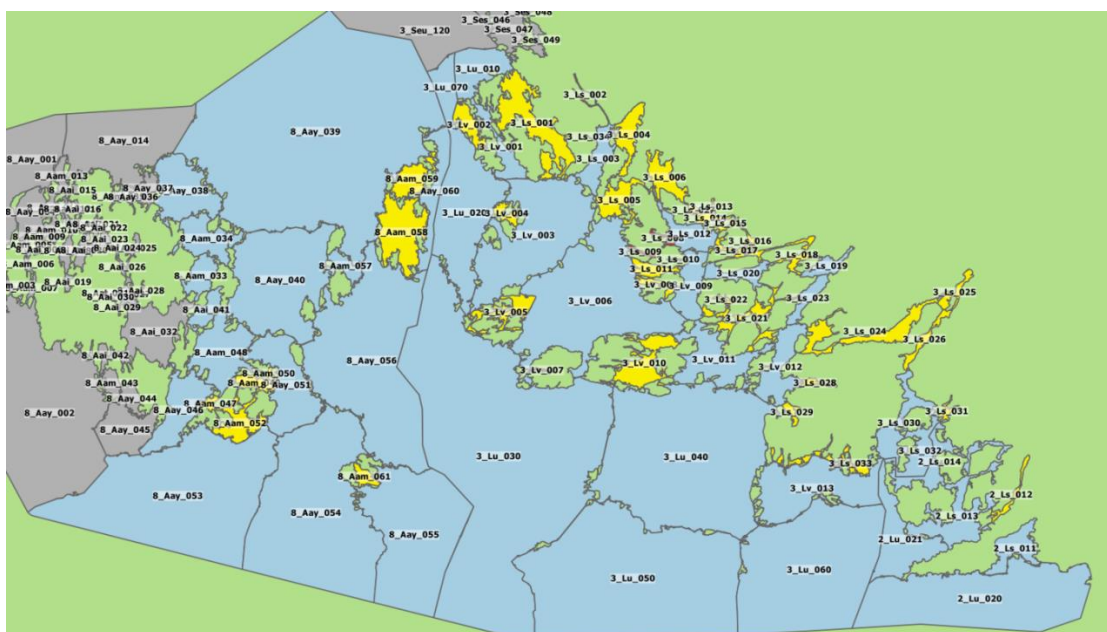
6.5.3. Mallinnusalueet

FICOSin mallinnusalueet Saaristomerellä, Suomenlahdella ja Selkämerellä on esitetty Kuvissa 6.5.3 - 6.5.5. Saaristomerellä 3D hydrodynaamisen mallinnuksen potentiaaliset katvealueet on merkitty karttaan keltaisella (matalia, usein osin suljettuja vesialueita); malli voi toimia ao. alueilla, mutta sen toimivuus tulee testata erikseen havaintoaineistolla. Suomenlahden vastaavat katvealueet kartoitetaan – ja mahdollisuuksien mukaan saatetaan toimivan mallinnuksen piiriin – kun mallista saadaan kattavampia käyttö- ja sovellutuskokemuksia, ja mallisimulaatioita päästään vertaamaan havaintoihin potentiaalisesti hankalilla alueilla. Selkämeren osalta tilanne on jo

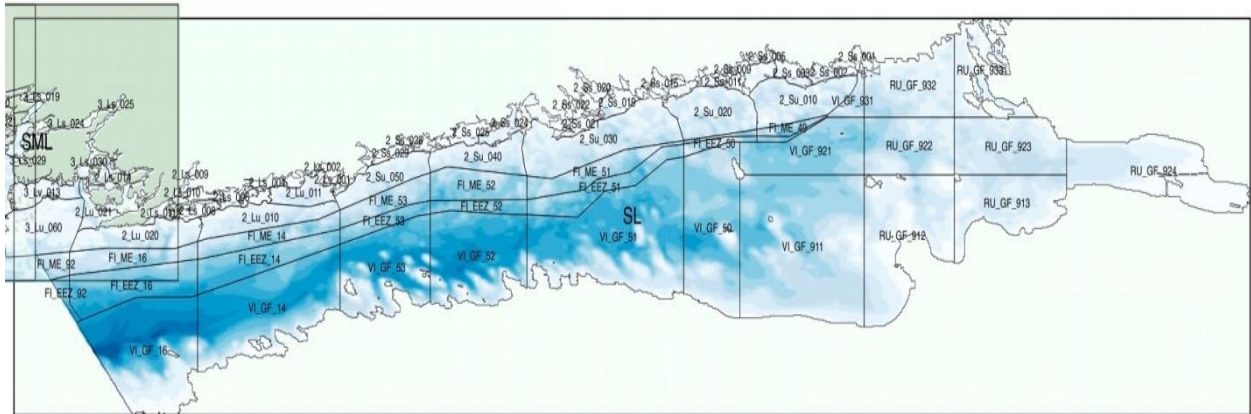
lähtökohtaisesti hankalampi, etenkin sisäsaariston matalilla, mosaiikkimaisilla vesimuodostumilla, ja tätä problematiikkaa on käsitelty perusteellisemmin seuraavan kappaleen (6.5.4 Vedenlaatumallin simulaatiot) lopussa. Kun mallin katvealueet kahdelle viimeksi mainitulle alueelle on saatu selville, pystytään myös niille tuottamaan vastaava kartta kuin Saaristomerelle (Kuva 6.5.3).



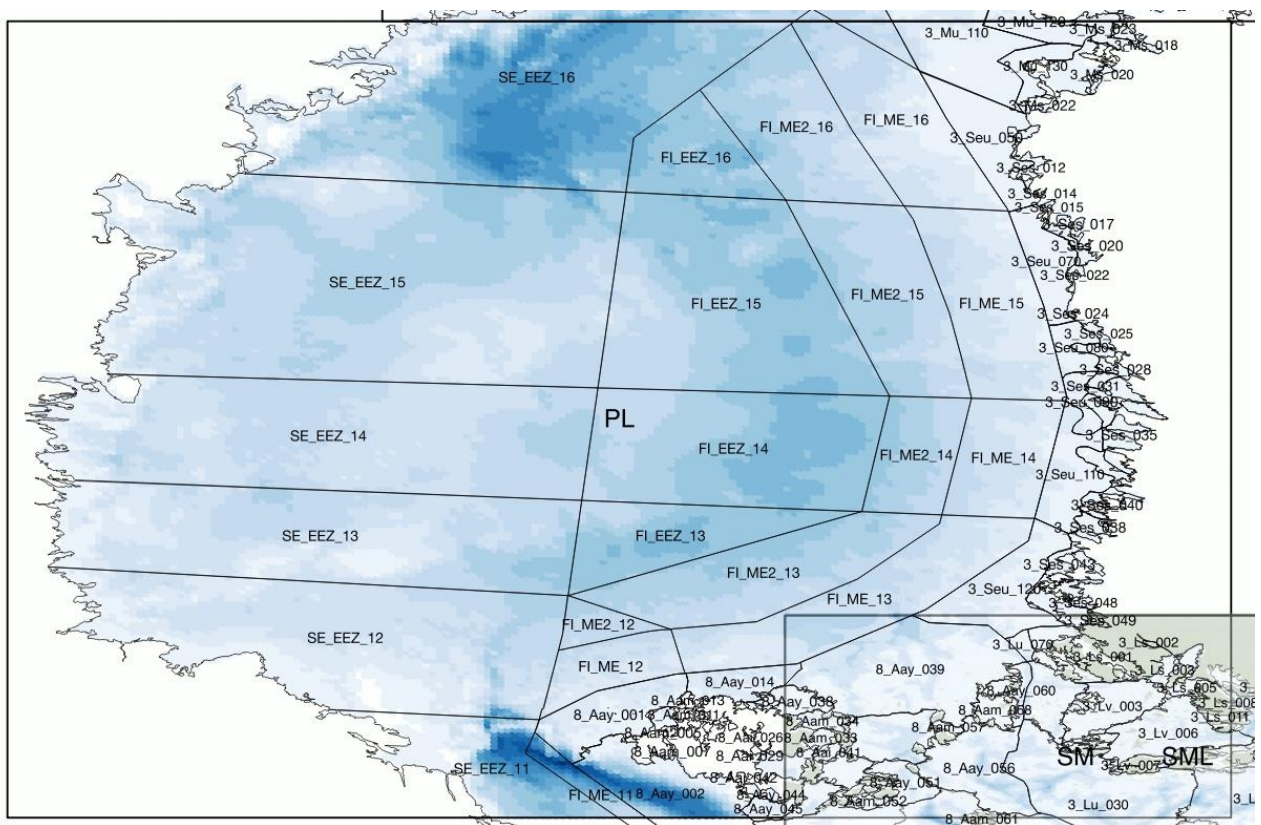
Kuva 6.5.2. FICOS -vedenlaatumoduulin simulaatioiden vertailu kalibrointiaineistoon. Sininen viiva esittää mallin simulaatiotulosta Saaristomerellä epäorgaanisille fosfori- (DIP) ja typpi- (DIN) ravinteille sekä *a*-klorofyllipitoisuudelle (Chl-a) kahdella intensiiviseuranta- asemalla (Brändö ja Utö), vuosina 2006 - 2011. Simulaatioiden aikaresoluutio on päivä (kumuloiduva arvo, x-akseli). Kalibrointiin käytetty havaintoaineisto seuranta- asemilta on kuvattu punaisilla pisteillä. FICOS -mallin simulaatiotulos vaihtelee eri parametrien arvoilla, jolloin myös mallituloksen ja mitattujen arvojen välinen ero vaihtelee. Mallin parametrien estimoitu, nk. *posteriori*-jakauma määrittyy sen mukaan, kuinka hyvin mallin ennuste vastaa kalibrointiaineistoa ja kuinka hyvin parametriarvot vastaavat niistä olevaa ennakkotietoa (teoreettiset ja mitatut arvot). Parametriarvojen soveltamisen tuloksena saatava *posteriori*-todennäköisyys on sitä isompi mitä paremmin mallin ennuste vastaa kalibrointiaineistoa, ja sitä enemmän näillä parametriarvoilla tehtäviä skenaarioennusteita painotetaan.



Kuva 6.5.3. Saaristomerellä mallinnusalue. 3D hydrodynaamisen mallinnuksen potentiaaliset katvealueet on merkitty keltaisella.



Kuva 6.5.4. Suomenlahden mallinnusalue. Vesimuodostumien ulkopuoliset alueet ovat reunaehtoien laskenta-alueita.

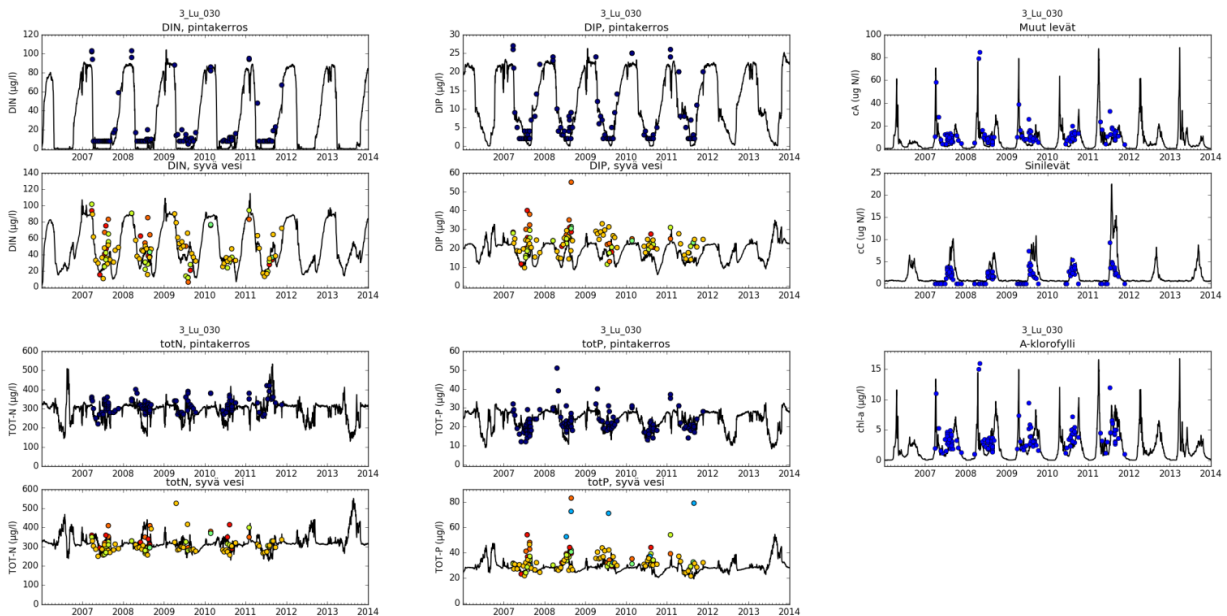


Kuva 6.5.5. Selkämeren mallinnusalue. Vesimuodostumien ulkopuoliset alueet ovat reunaehtoien laskenta-alueita.

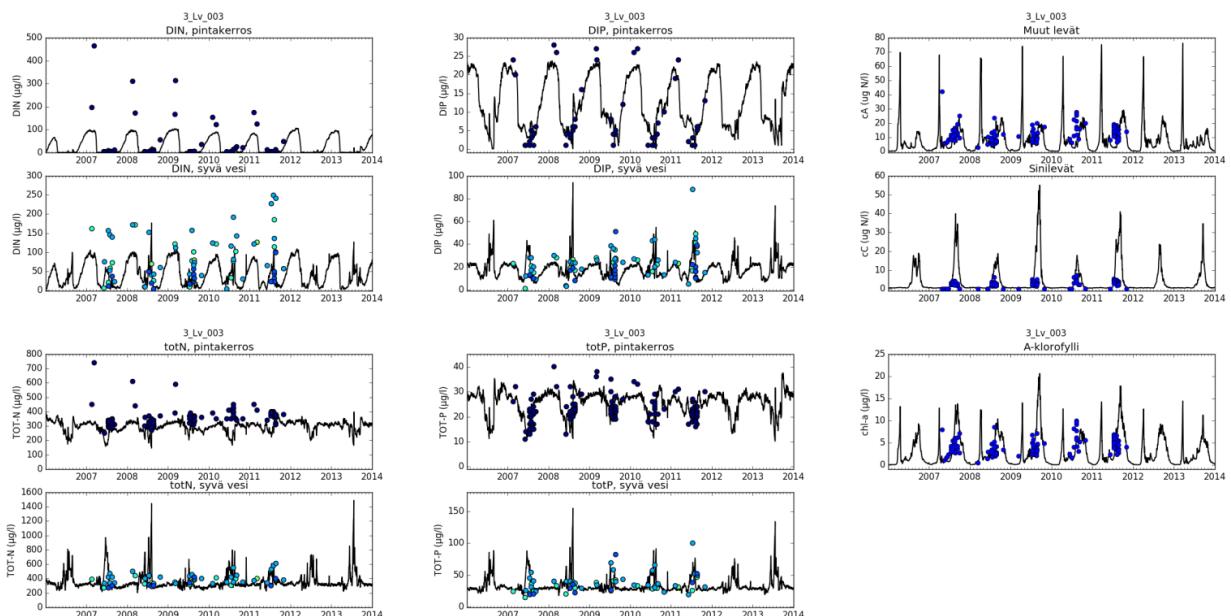
6.5.4. Vedenlaatumallin simulaatiot

Vedenlaatumallia on yleisemmin testattu vertaamalla vesimuodostumien havaintojaksojen aineistoja mallin simulointeihin. Simuloinnit perustuvat hankkeessa estimoiduilla pistekuormittajien sekä muun ulkoisen kuormituksen ja sisäisen kuormituksen (Arvio 1; kts. Liite 2) kytkentään vedenlaatumallissa ja mallin niistä prosessoimiin vesipatsaan biogeokemiallisiin vasteisiin (kokonais- ja epäorgaaniset ravinnepitoisuudet sekä *a*-klorofylli).

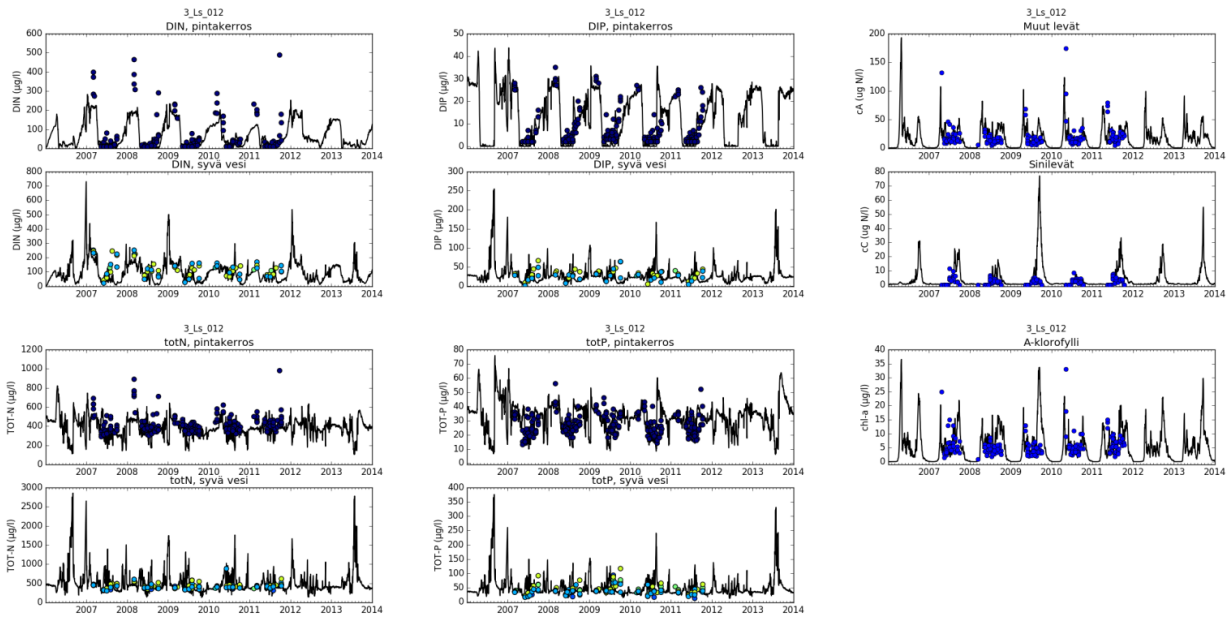
Seuraavassa esitetään Saaristomeren, Suomenlahden ja Selkämeren havainnot vs. simulaatiot tyypillisiltä mallinnusalueiden vesimuodostumalta (Kuvat 6.5.6 -6.5.12).



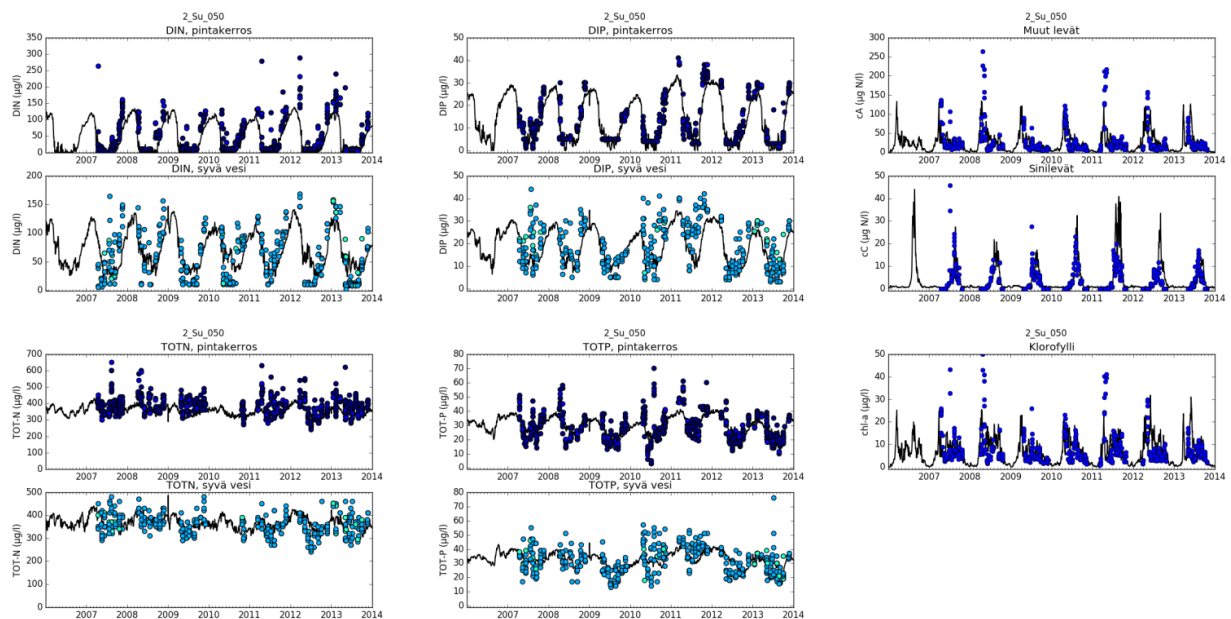
Kuva 6.5.6. A-klorofyllin, planktonlevien (N_2 -sitovat sinilevät ja muut levät) ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Saaristomeren eteläisessä ulkosaaristossa (Lu_030): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Selitykset: DIN ja DIP = epäorgaaninen N ja P, TOT-N ja TOT-P = kokonais- N ja P; vesimuodostuman sijainti (blokki nro suluissa): kts. karttakuva 6.5.3. HUOM: pisteet edustavat havaintoja eri puolella vesimuodostumaa!



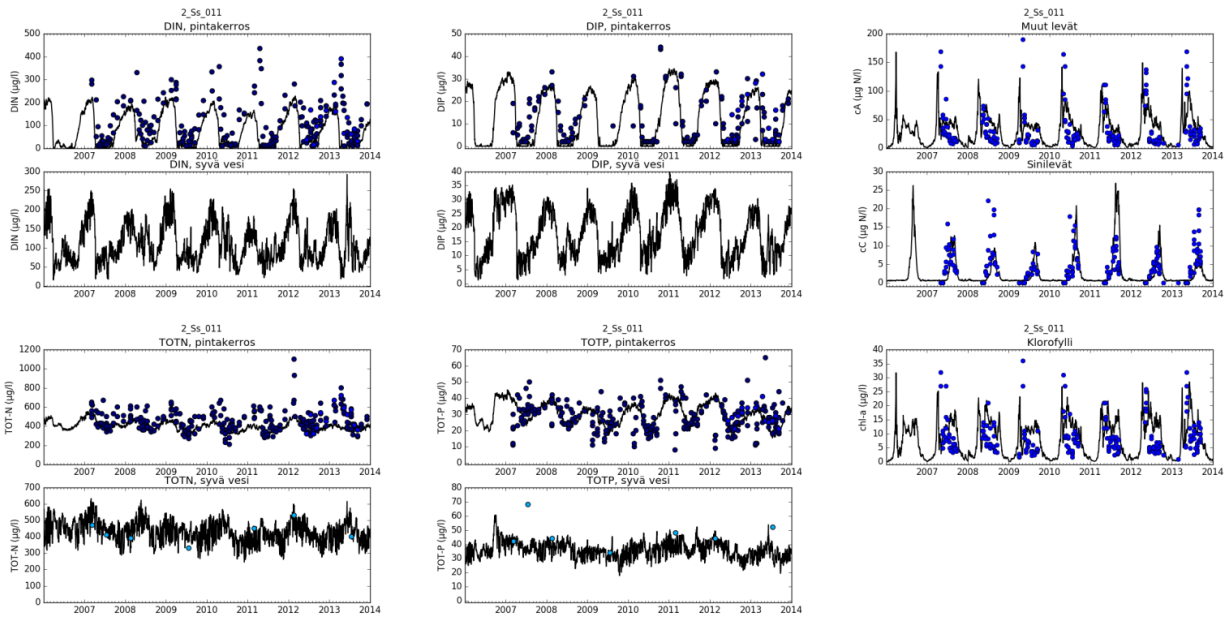
Kuva 6.5.7. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Saaristomeren välisaaristossa (Lv_003): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6.



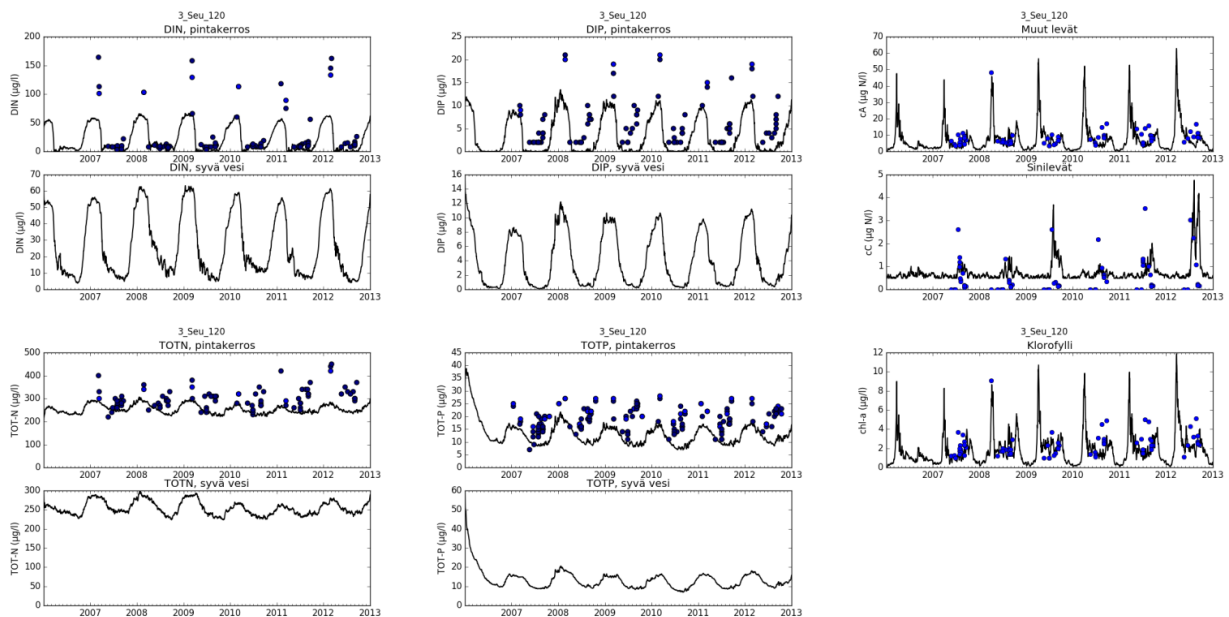
Kuva 6.5.8. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Saaristomeren sisäsaaristossa (Ls_012): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6.



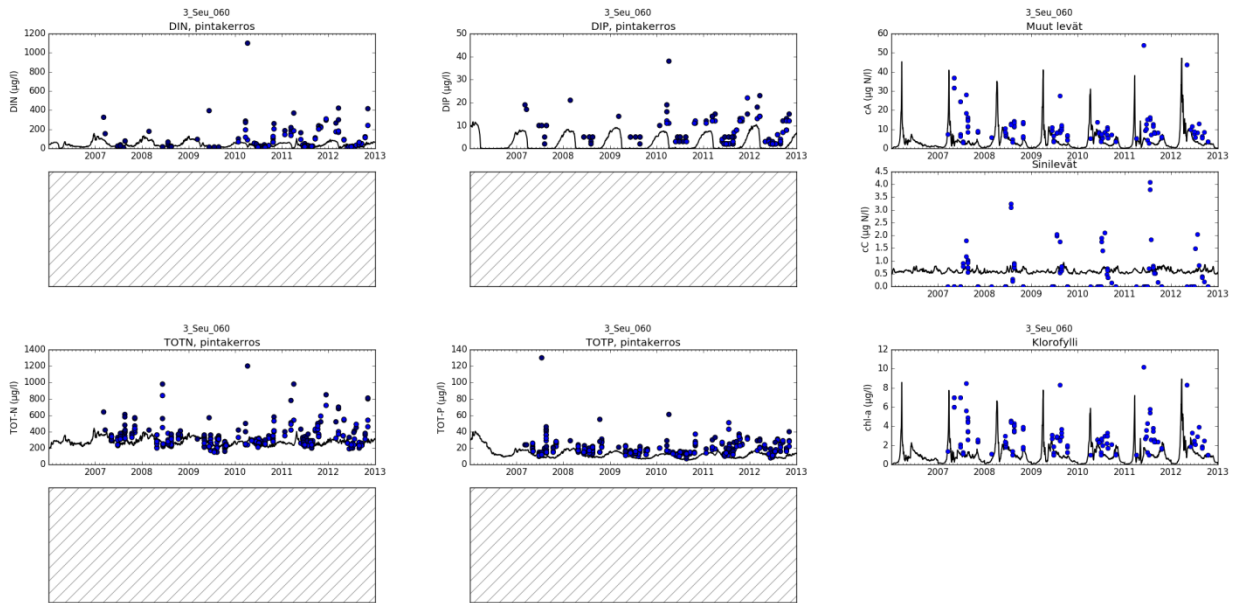
Kuva 6.5.9. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Suomenlahden ulkosaaristossa (Su_050): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6.



Kuva 6.5.10. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Suomenlahden sisäsaaristossa (Ss_011): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6. Mallialueen mataluuden vuoksi vain pintakerroksen havainnot ja simulaatiot ovat relevanteja.



Kuva 6.5.11. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Selkämeren eteläisessä ulkosaaristossa (Seu_120): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Syväveden havainnot on jätetty pois mittauspisteiden mataluuden vuoksi (syvyys 10-17 m). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6.

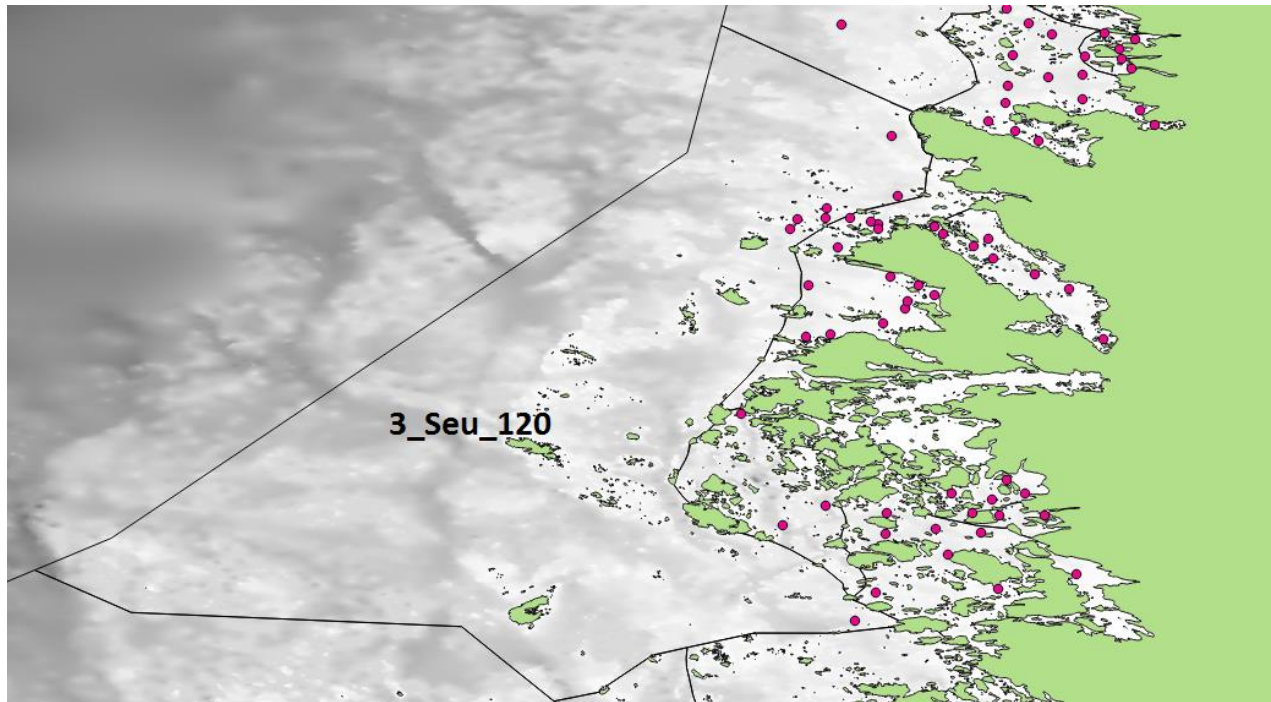


Kuva 6.5.12. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Selkämeren pohjoisessa ulkosaaristossa (Seu_060): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6.

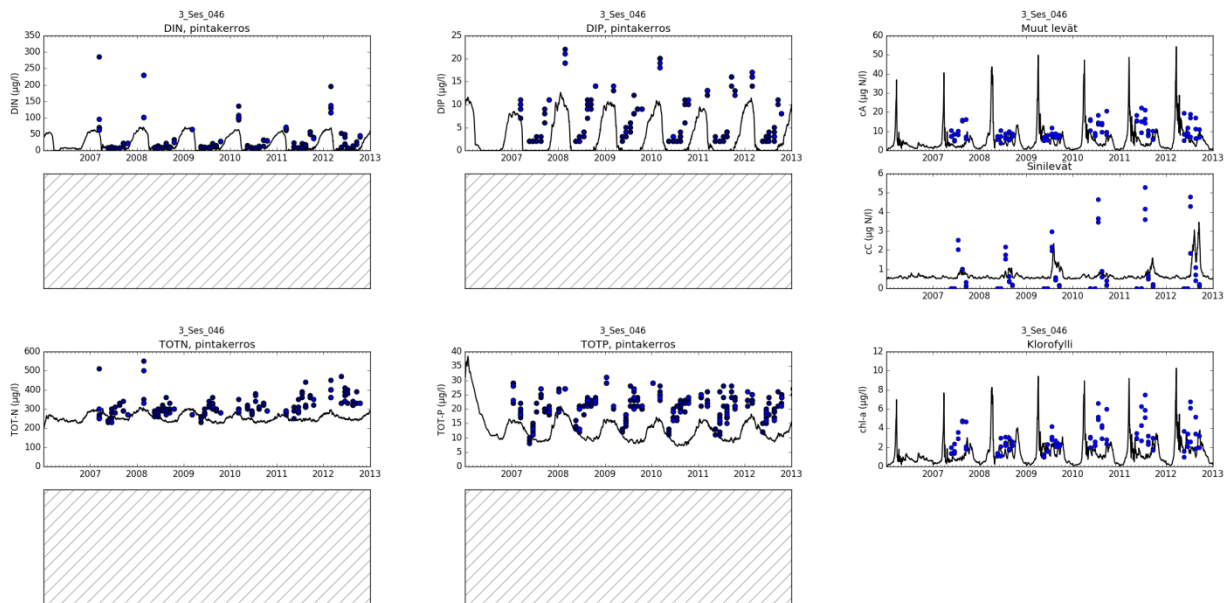
Suomenlahdella ja Saaristomerellä vedenlaatumalli pystyy varsin hyvin simuloimaan leväbiomassan (*a*-klorofyllin), N_2 -sitovien sinilevien ja muiden levien sekä epäorgaanisten ravinteiden vuotuisen kehityksen tason (konsentraatiot) ja dynamiikan (Kuvat 6.5.6 - 6.5.10). Tässä yhteydessä on huomattava, että pistehavainnot ovat peräisin koko vesimuodostuman alueelta, mikä lisää ao. aineiston luontaista hajontaa. Kokonaisravinteiden ajallinen kehitys simuloidaan myös suhteellisen realistisesti tason osalta. Mallia ei ole erikseen sovitettu koko ao. aineistoon, joten kaikkiaan mallin verfiointuminen on lupaavaa erityisesti biologisten vasteiden osalta.

Selkämerellä on mielenkiintoisena ilmiönä systeemin vaihtuminen mallin mukaan rannikon pohjoisosassa ensisijaisesti N-rajoitteisesta P-rajoitteiseksi (Kuvat 6.5. 11 ja 12)! Selkämeren ulkosaariston eteläpäässä malli simuloi varsin hyvin *a*-klorofyllin ja kasviplanktonin kehityksen (pieniä ja voimakkaasti vaihtelevia sinileväpitoisuuksia lukuun ottamatta; Kuva 6.5.11); sen sijaan kokonaisravinteiden pitoisuutta aliarvioidaan jonkin verran. Alueen pohjoispäässä havaitut *a*-klorofyllin arvot ovat selvästi simuloituja suuremmat (Kuva 6.5.12). Osin jälkimmäinen tulos johtuu siitä, että malli antaa alhaisia arvoja alueen reunaehtoihinkin (2-3 µg Chl*a*/L) verraten. Toisaalta ongelmia aiheuttaa Selkämeren rannikon mataluus ja vesimuodostumien näytteenottopisteiden sijainti tulosten edustavuuden kannalta: Esimerkiksi pohjoisella ulkosaariston vesimuodostumalla Seu_050 havaintoasemia on 5 ja niistä 3 on hyvin matalia, ja niillä on ilmeisesti ulkoisesta kuormituksesta johtuen korkeita kokonaisfosforipitoisuuksia kesällä; samoin eteläisellä ulkosaariston vesimuodostumalla Seu_120 havaintoasemat ovat 6-17 m syvyisiä ja sijaitsevat enimmäkseen rannikon puoleisella alueella (Kuva 6.5.13) eli lähellä sisäsaariston vesimuodostumia.

Erityisen ongelman muodostaa Selkämeren sisäsaariston lukuisten pienten ja matalien vesimuodostumien mallintaminen, joka ylisummaan onnistuu suhteellisen realistisesti 3D hydrodynamiikan menetelmillä vain osalla alueista (Kuva 6.5.14). Monille sisäsaariston alueille tuleekin jatkossa kehittää ja soveltaa SYKEN tilastollista CLR (Coastal Load Response) mallinnusta (Niina Kotamäki, henk. koht. tiedonanto)



Kuva 6.5.13. Selkämeren rannikon eteläosan, mukaan lukien ulkosaariston vesimuodostuman (Seu_120), näytteenottopisteet (merkitty punaisella).



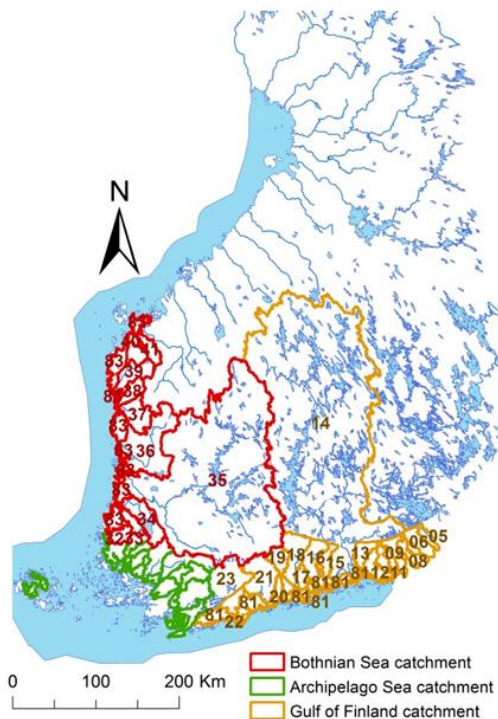
Kuva 6.5.14. A-klorofyllin, planktonlevien ja ravinteiden ajallinen vaihtelu Selkämeren eteläisessä sisäsaaristossa (Ses_046): mallisimulointi (yhtenäinen viiva) vs. havainnot (pisteet). Muut selitykset kuten Kuvassa 6.5.6.

6.6 Valuma-alueen kuormitus

VEMALA ja ICECREAM –malleilla arvioitiin valuma-alueelta Saaristomereen, Suomenlahteen ja Selkämereen tuleva ravinnekuormitus sekä ilmastonmuutoksen ja maatalouden kuormitusta vähentävien toimenpiteiden vaikutus siihen v. 2030-2100. Malleja kehitettiin biologisesti käyttökelpoisten ravinnefraktioiden päästöjen arvioimiseksi perinteisten kokonaisravinteiden ohella. Maatalouden maksimitoimenpiteillä mereen päätyvä nitraattityyppien ainevirtaama vähenisi jaksolla 2030-2100 n. 25% ja fosfaatin ainevirtaama n. 14 % verrattuna siihen, että jatkettaisiin nykytoimenpiteillä. Ilmastonmuutoksen aiheuttama lisääntynyt sadanta ja sen myötä huuhtoutuva lisäkuormitus heikentää osin ravinnekuormituksen vähentämiseen tähtäävien toimenpiteiden vaikutusta.

VEMALA-malli on operatiivinen, koko Suomen kattava ravinnekuormitusmalli vesistöille (Huttunen et al. 2015). Se simuloi ravinteiden prosesseja, huuhtoutumista ja kulkeutumista maalla, joissa ja järvissä. Malli simuloi ravinteiden kokonaiskuormaa vesistöihin, pidättymistä ja Suomen vesistöistä Itämereen lähtevää kuormaa. VEMALA koostuu pääosin kahdesta osamallista: hydrologiaa simuloivasta WSFS-mallista (Vehviläinen 1994) ja ravinneprosesseja simuloivasta VEMALA-mallista (Huttunen et al., 2015) (kts. Liite 6). VEMALA v.3 (Korppoo et al., 2017) on implementoitu tämän projektin puitteissa, Suomenlahden ja Selkämeren jokien valuma-alueille (Kuva 6.6.1), jotta näillä alueilla voidaan simuloida biologisesti saatavilla olevia epäorgaanisia DIN ja DIP sekä kokonaistyyppien ja –fosforin kuormia rannikkomerimallin

lähtötiedoiksi. Projektissa otettiin myös käyttöön uusi uoma- ja järviverkostokuvaus VEMALA-mallissa. Myös suurten järvien ravinnekiertoprosessien simulointia kehitettiin. VEMALAn tarkasteluissa hyödynnettävät vaihtoehtoiset ilmastonmuutos-skenaariot on esitetty Liitteessä 7.



Kuva 6.6.1: RAM hankkeessa simuloidut valuma-alueet keltaisella (Suomenlahti) ja punaisella (Selkämeri).

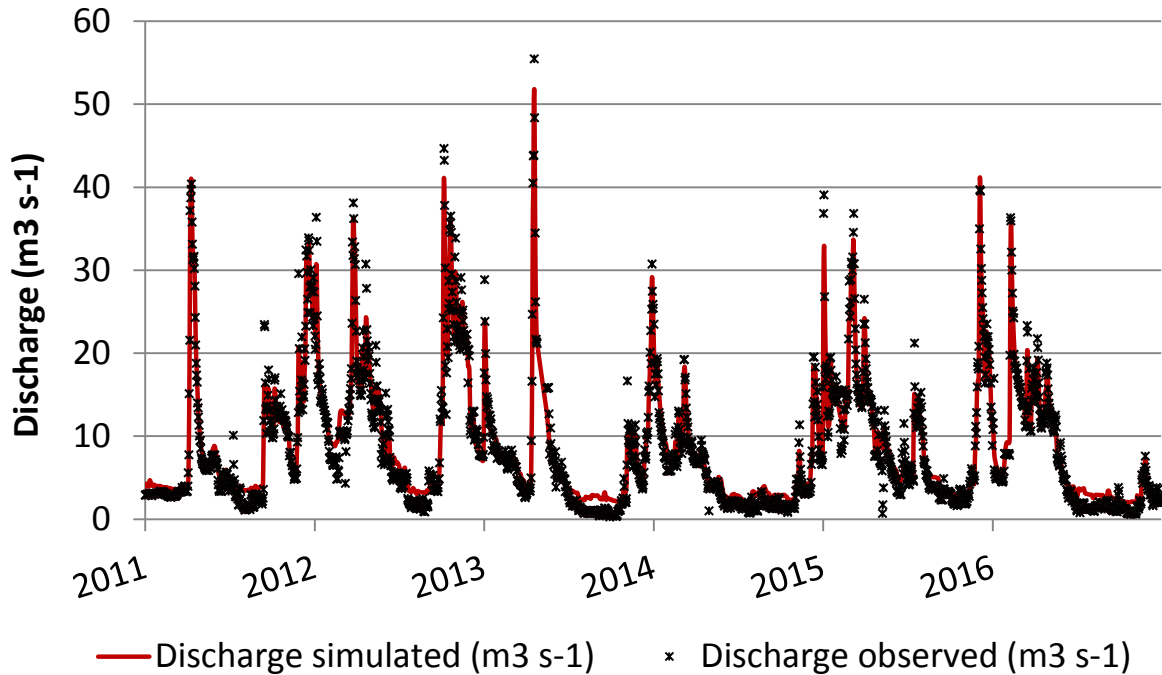
versiossa osa orgaanisesta kokonaishiilestä (TOC) ja kasviplanktonista sedimentoituu järvien pohjaan. Mineralisaatioprosessi sedimentissä taas vapauttaa ammoniumtyyppiä ja fosfaattia vesipilariin (sisäinen kuormitus), kun taas osa ravinteista pakkautuu syvempään, inerttiin sedimenttikerrokseen (Liite 6).

Kasviplanktonin dynamiikka ja orgaanisen kokonaishiilen prosessit ovat VEMALA v3 mallin **ydinasiaa** ja määrittävät ravinteiden kierron makeassa vedessä orgaanisesta muodosta epäorgaaniseen muotoon. Suomessa suurin osa orgaanisesta kokonaishiilestä (TOC) on liukoisessa muodossa (Mattsson, 2010), eli vain osa TOC:stä voi laskeutua pohjasedimenttiin.

Järvien ravinnekiertoprosessien kehittäminen on edistänyt Itämeren valuma-alueiden kokonaisravinnekuormituksen simulointia. Suurin vaikutus on nähtävissä suurten järvien kohdalla.

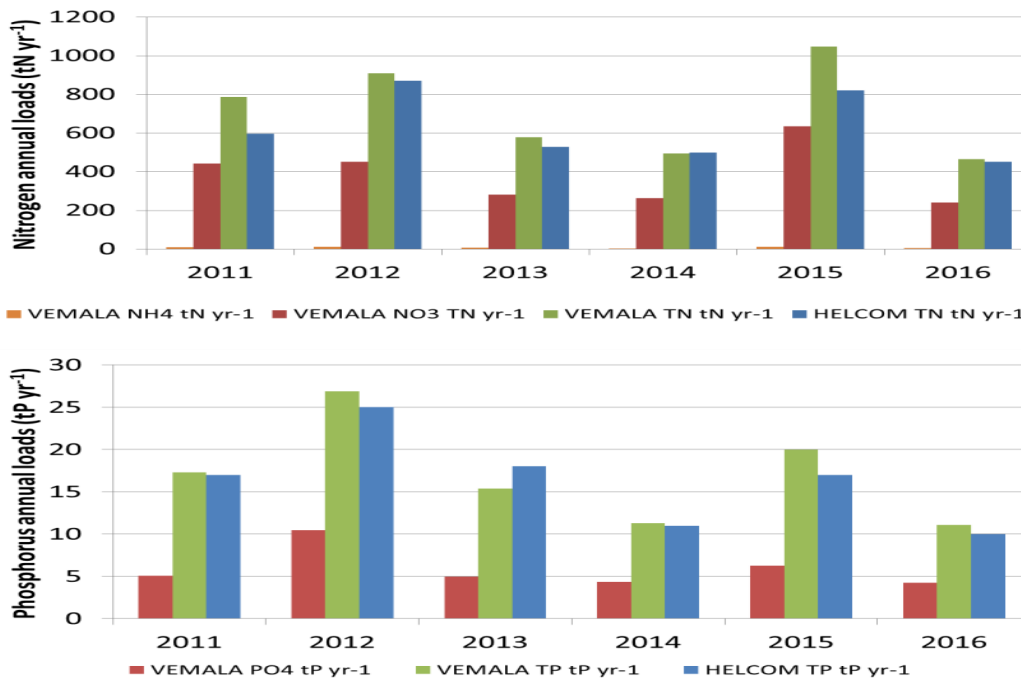
6.6.1. Esimerkkituloksia Eurajoen valuma-alueelta

Eurajoen valuma-alueen purkupisteen virtaama simuloidaan mallissa hyvin Nash-Sutcliffe kriteerin perusteella (arvo 0.96 jaksolla 2011-2016, Kuva 6.6.2; ao. kriteeri on kuvattu Liitteessä 8).



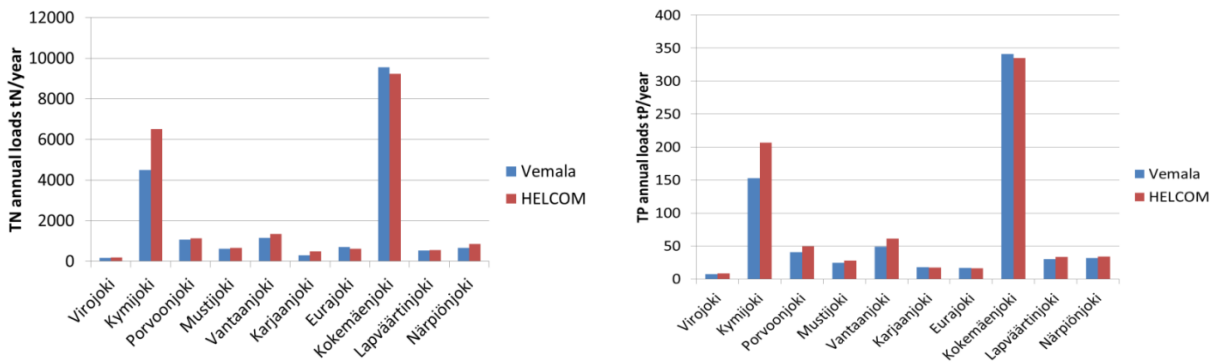
Kuva 6.6.2. Havaittu ja simuloitu virtaama ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) Pappilankoskella (34_012), Eurajoen valuma-alueen alimmalla virtaamahavaintopisteellä.

Eurajoen valuma-alueen VEMALAn simuloimia vuotuisia kokonaistypen ja –fosforin kuormia voidaan vertailla Antti Räikkeen HELCOM-julkaisuihin tekemiin, vedenlaatuhavaintoihin ja keskiarvoistamiseen perustuvaan arvioihin (2011). Keskimääräinen kokonaistypen nettokuormitus Selkämereen ajanjaksolla 2011-2016 on simuloinneissa samaa suuruusluokkaa (714 tn/year) kuin arvioissa (628 tn/vuosi). Kokonaistypen vuotuiset simuloitut kuormitusarvot vaihtelevat -1% ja +24% välillä arvioihin verrattuna (Kuva 6.6.3). Myös kokonaisfosforin vuotuiset kuormitusarvot Eurajoen valuma-alueelta Selkämereen vertautuvat hyvin arvioihin (Kuva 6.6.4). Keskimääräinen fosforikuormitus jaksolta 2011-2016 on simuloitien mukaan 17 tn per vuosi ja HELCOM-arvio on 16 tn per vuosi. Kokonaisfosforin vuosittaiset kuormat vaihtelevat simuloinneissa -17% ja +15% välillä arvioihin verrattuna. Näissä tuloksissa on otettu huomioon uusimmat kehitykset mallin järvien ravinnekierron kuvauksessa.



Kuva 6.6.3. Vuosittaiset ammoniumtyypen (NH₄), nitraatin (NO₃) ja kokonaistypen (TN) VEMALA v3-malliversiolla simuloitunut kuormitusarvot (tn per vuosi) Eurajoen purkupisteessä vuosilta 2011-2016 verrattuna HELCOM-julkaisun kokonaistypen (TN) vuosittaisiin ravinnekuormitusarvioihin. Vuosittaiset fosfaatin (PO₄) ja kokonaisfosforin (TP) VEMALA v3-malliversiolla simuloitunut kuormitusarvot (tn per vuosi) Eurajoen purkupisteessä vuosilta 2011-2016 verrattuna HELCOM-julkaisun kokonaisfosforin (TP) vuosittaisiin ravinnekuormitusarvioihin.

6.6.2 Kokonaiskuormitus Suomenlahteen ja Selkämereen



Kuva 6.6.4. Kokonaistypen (TN) keskimääräiset vuosittaiset kuormat Suomenlahteen ja Selkämereen vuosilta 2011-2016 VEMALA v.3-mallin simuloimana ja verrattuna HELCOM-julkaisun tuloksiin (tn per vuosi). Kokonaisfosforin (TP) keskimääräiset vuosittaiset kuormat Suomenlahteen ja Selkämereen vuosilta 2011-2016 VEMALA v.3-mallin simuloimana ja verrattuna HELCOM-julkaisun tuloksiin (tn per vuosi).

Vuosittaisten keskimääräisten kokonaistypikuormien summa Suomenlahteen Virojoen, Kymijoen, Porvoonjoen, Mustijoen, Vantaanjoen ja Karjaanjoen valuma-alueilta jaksolla 2011-2016 on VEMALA v3 version simulointien mukaan 7790 tn per vuosi ja Räikeen arvioin mukaan 10343 tn per vuosi. Kokonaiskuorman aliarvio johtuu siitä, että Kymijoen valuma-alueen ravinnekuormitus on noin 30 % pienempi kuin arvioissa. Eroa selittää se, että tätä raporttia kirjoitettaessa VEMALA mallin sovitukset Kymijoen alueella on vielä osittain kesken. Mallin

automaattinen sovitusalgoritmi vaatii suurilla vesistöillä huomattavan pitkän ajoajan. Tulokset kuitenkin päivittyvät skenaarioihin automaattisesti mallin sovituksen edetessä.

Vuosittaisten keskimääräisten kokonaistyyppikuormien summa Selkämereen Eurajoen, Kokemäenjoen, Lapväärtinjoen ja Närpiönjoen valuma-alueilta jaksolla 2011-2016 on samaa suuruusluokkaa VEMALA v3 version simuloinneissa (11449 tn per vuosi) ja Räikeen arvioissa (11267 tn per vuosi). Kokonaisfosforin osalta VEMALA v3 myös aliarvioi keskimääräisten vuosikuormien summan Suomenlahteen (292 tn per vuosi) verrattuna arvioon (370 tn per vuosi). Kymijoen ravinnekuorma on keskimäärin noin 26 % liian pieni jaksolla 2011-2016. Selkämeren valuma-alueiden keskimääräisten kokonaisfosforin ravinnekuormien summa samalla jaksolla on samaa suuruusluokkaa VEMALA v3-mallissa (420 tn per vuosi) ja arvioissa (419 tn per vuosi).

6.6.3 VEMALA mallin kuormituslähteet

VEMALA mallin kuormituslähteiden tietoja on tarkennettu nyt käytössä olevaan versioon haja-asutuksen, metsätalouden ja pistekuormituksen osalta. Pistekuormitustiedot liitetään VEMALA laskentaan Vahti järjestelmästä sillä aikatarckuudella ja niillä koordinaateilla, jolla ne on ilmoitettu Vahti järjestelmään. Tyypillisesti Vahti järjestelmään ilmoitetaan kuormitukset 1 kk – 1 v jaksoissa.

Haja-asutuksen kuormituksen laskentaan on arvioitu kiinteistörekisteristä ne kiinteistöt, jotka eivät ole liittyneet viemäriverkoston. Selkämeren valuma-alueella on arviolta 220 000 asukasta ja 82 000 loma-asuntoa viemäriverkon ulkopuolella. Suomenlahden valuma-alueella vastaavasti 280 000 asukasta ja 110 000 loma-asuntoa viemäriverkon ulkopuolella. Näistä vesistöön päätyvä kuorma arvioidaan käyttäen alueittaisia arvioita kiinteistöjen puhdistusratkaisuista ja niiden puhdistustehosta. Lisäksi kullekin kiinteistölle on laskettu sen etäisyys vesistöä ja etäisyydestä riippuva pidättyminen.

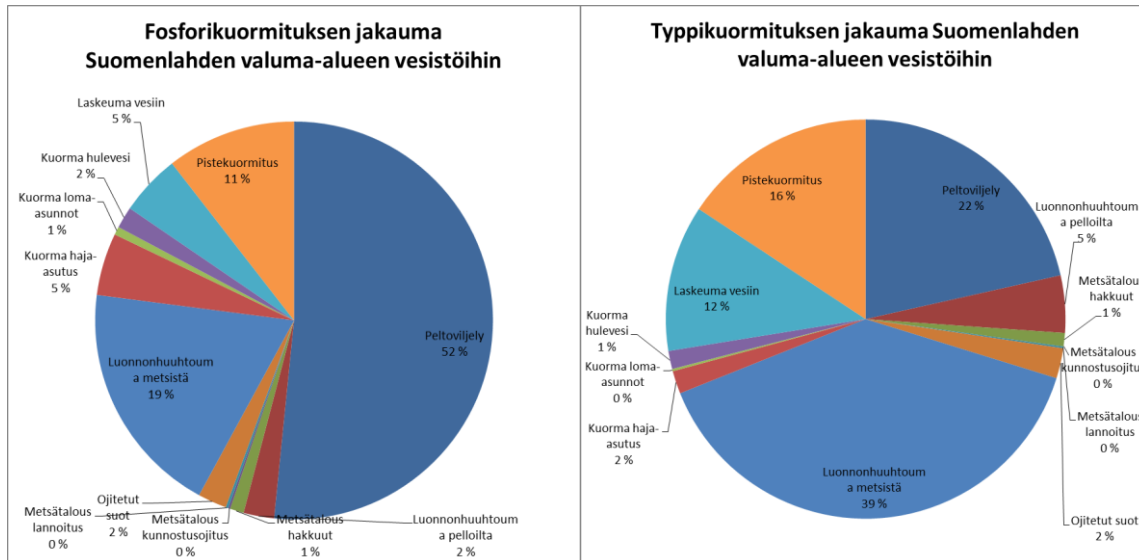
Metsätalouden kuormitus on arvioitu erikseen hakkuille, kunnostusojituksille, lannoitukselle ja vanhoille ojitetuille soille. Hakkuiden kuormitustiedot perustuvat todellisiin metsäkuviokohtaisiin hakkuutietoihin. Kunnostusojitusten ja lannoituksen toimenpiteet perustuvat alueittaisiin tilastoihin ja näiden kuormitus arvioidaan Kalle työkalun laskentaperusteista. Vanhojen ojitettujen soiden on todettu viimeaikaisissa tutkimuksissa kuormittavan aikaisemmin arvioitua enemmän. Arvio soiden kuormituksesta on kuitenkin vielä epävarma. VEMALA laskennassa on käytössä alustava arvio vanhojen ojitettujen soiden kuormituksesta.

Kuvassa 6.6.5 on esitetty Suomenlahden valuma-alueen vesistöihin tulevan fosfori- ja typpikuormituksen lähteiden jakauma. Vastaavasti Selkämeren valuma-alueen tiedot ovat Kuvassa 6.6.6.

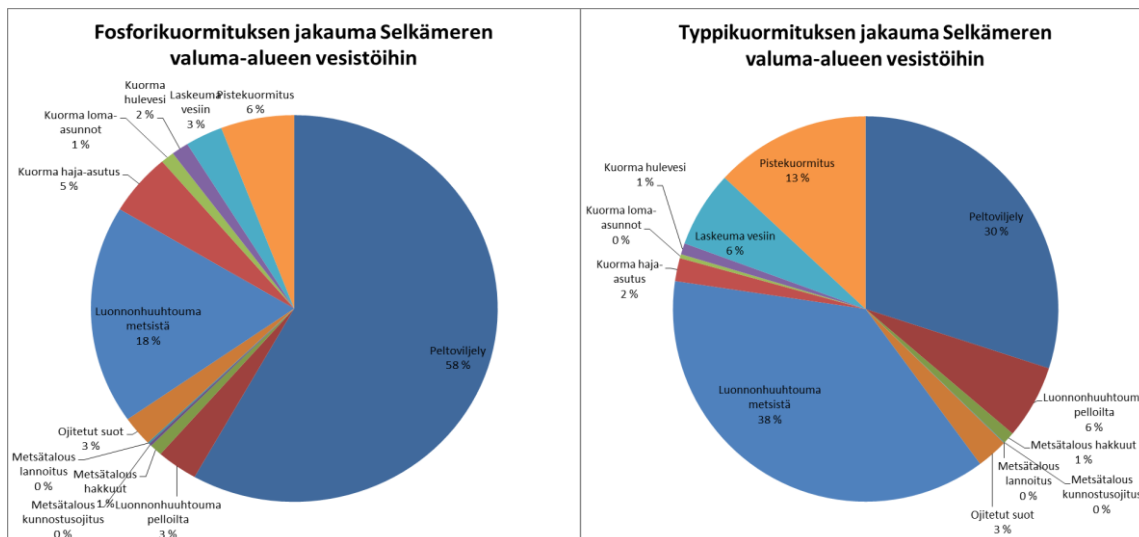
6.6.4. Skenaariot

Toteutetulla VEMALA v.3 mallilla ja siihen liitettyllä ICECREAM peltomallilla voidaan tuottaa erilaisia skenaarioita muuttuvan ilmaston ja ihmistoimintojen muutosten vaikutuksista ravinnekuormitukseen ja mahdollisuuksista on toimenpiteillä vähentää ravinnekuormitusta. Päämääränä on pystyä arvioimaan millä toimenpiteillä ja toimenpidemäärillä tulevaisuudessa ravinnekuormitus voidaan saada vesistöjen ja meren hyvää tilaa vastaavalle tasolle.

VEMALA ja ICECREAM malleilla voidaan laskea valmiiksi skenaarioita ilmastonmuutoksen ja maatalouden toimenpiteiden vaikutuksista mereen päätyviin ravinteiden ainevirtaamiin. Maatalouden kuormitus nykytilassa ja maatalouden toimenpideskenaario mahdollisesta kuormitusvähennyksestä lasketaan ICECREAM mallilla. Lisäksi erillisellä skenaariokäyttöliittymällä voidaan muodostaa jokiskenaarioita määrittelemällä kuormituksen vähennysmäärät myös pistekuormitukselle, haja-asutukselle ja metsätaloudelle.



Kuva 6.6.5: Fosfori- ja typpekuormituksen lähteet Suomenlahden valuma-alueen vesistöissä.



Kuva 6.6.6: Fosfori- ja typpekuormituksen lähteet Selkämeren valuma-alueen vesistöissä.

Maatalouden toimenpideskenaariossa tarkastellaan seuraavien toimenpiteiden vaikutuksia jakson 2020-30 ilmastossa:

- tarkennettu lannoitus
- talviaikainen kasvipeitteisyys
- suojavaiohyökkeen käyttöä
- lietteen sijoitusta nurmilla
- kerääjäkasvien käyttöä kevätiljoilla

Maatalouden toimenpideskenaariossa toimenpiteet valitaan peltolohkokohtaisesti. Toimenpiteen vaikutus tietyllä loholla riippuu lohkon ominaispiirteistä (kaltevuus, maalaji, P-luku) ja viljelykasveista. Skenaariossa kyseinen toimenpide valittiin lohkolle, jos se vähentää ravinnekuormitusta kyseisellä loholla. Toimenpidettä valitessa tarkasteltiin sekä P että N kuormitusta, eli ei valittu toimenpidettä joka vähentää toista ja samanaikaisesti lisää toista merkittävästi. Toimenpiteet valittiin seuraavassa järjestyksessä:

1. Tarkennettu lannoitus. Tämä toimenpide on käytössä kaikilla lohkoilla. Tarkennetussa lannoituksessa P tase on +1 kg/v ja N tase +40 kg/v. Lisäksi jos lohkon P viljavuusluokka nousee tasolle tyydyttävä tai korkeampi, ei käytetä lainkaan P lannoitusta.
2. Talviaikainen kasvipeitteisyys. Tämä valittiin, jos lohkolle suorakylvön käyttö vähentää kuormitusta syyskylvöön verrattuna.
3. Suojavyöhykkeen käyttö. Lohkolle otettiin käyttöön 15 m suojavyöhyke, jos se vähentää lohkon P kuormitusta vähintään 0,1 kg/ha/v tai N kuormitusta 1 kg/ha/v.
4. Lietteen sijoitus nurmilla. Verrattiin lietteen sijoitusta ja pintalevitystä.
5. Kerääjäkasvien käyttö kevätiljoilla. Kerääjäkasvi joko jätetään pellolle talven yli tai kynnetään peltoon, riippuen käytetäänkö kyseisellä pellolla suorakylvöä vai syyskylvöä.

Lopputuloksena maataloudelle saatiin skenaario, paljonko edellä mainituilla toimenpiteillä voidaan maksimissaan vähentää peltojen kuormitusta, jos viljelykasvien jakauma säilyy nykyisenlaisena. Luotaessa skenaariokäyttöliittymällä skenaariota jokikuormitukselle voidaan valita joko tätä maksimi toimenpidemäärää vastaava ravinnekuormituksen pienennys tai jokin pienempi prosenttimäärä muutoksesta.

VEMALA mallissa on käytettävissä seitsemän eri ilmastonmuutosskenaariota. Nämä skenaariot perustuvat eri ilmastomallien tuloksiin. Ilmastoskenaarioiden vaihteluväli kuvaa ilmastoskenaarioiden epävarmuutta. Ravinnekuormitusta tulisi tarkastella eri ilmastoskenaarioissa jotta nähdään ilmastonmuutoksen aiheuttama epävarmuus tulevaisuuden ravinnekuormitukseen.

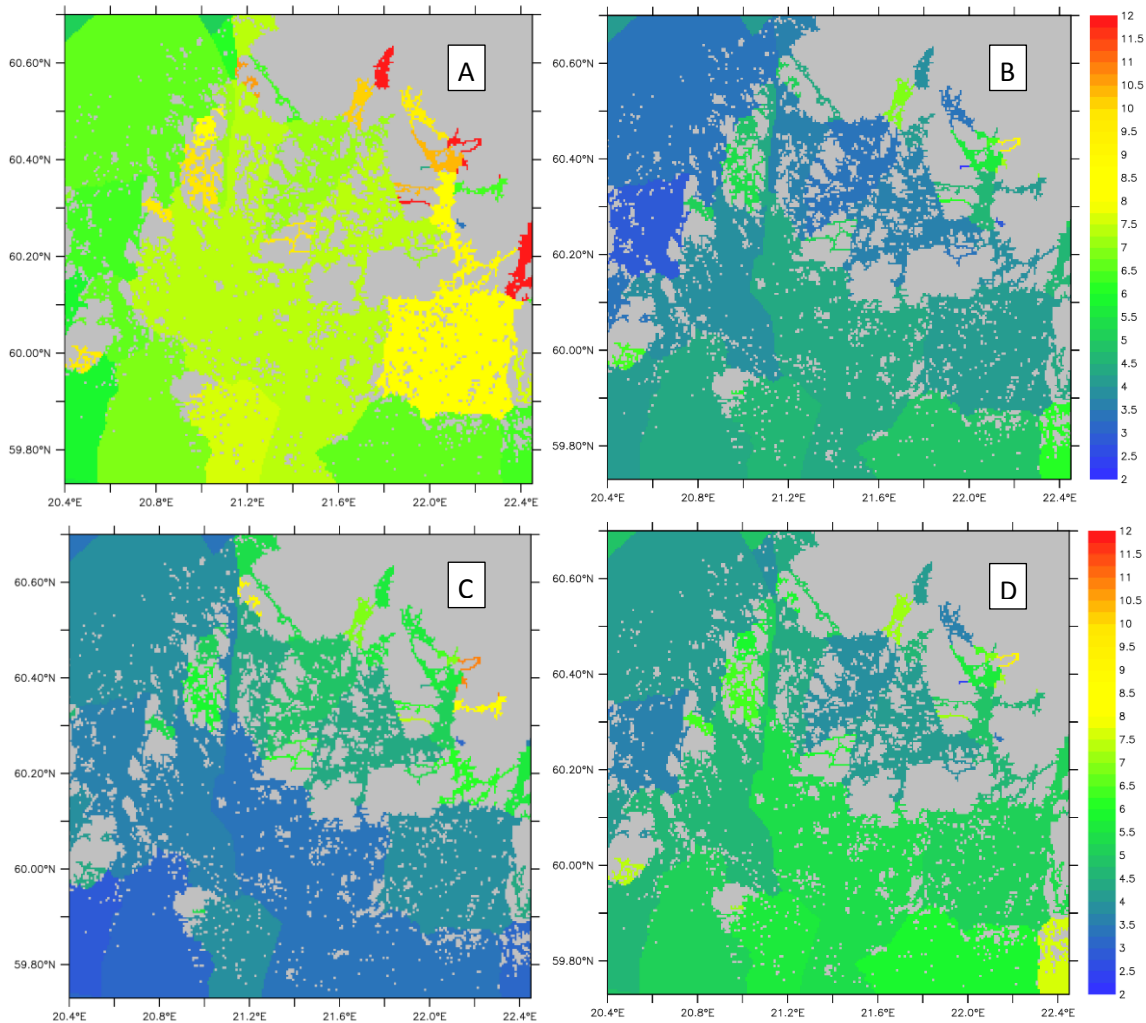
Jatkossa valmiisiin skenaariokäyttöliittymän kautta käytettäviin skenaarioihin voidaan lisätä myös arvio kipsikäsittelyllä saavutettavissa olevasta ravinnekuormituksen pienennyksestä.

Mallituloksissa on jo valmiina tiedot savipelloilta syntyvästä liukoisen- ja partikkelifosforin kuormituksesta. Kipsikäsittelyn vaikutuksista on alustava arvio, paljonko se pienentää näitä fosforin jakeita. Lisäksi laskennassa täytyy huomioida, että lohko ei sijaitse järven valuma-alueella.

6.7 Kuormitusvähennysten vaikutus Saaristomeren rehevöitymiseen

Rannikomallilla tarkasteltiin Saaristomeren 2030-2100 tilaennusteita (a-klorofylli), joiden skenaarioissa vaihtoehtoisina ulkoisina ravinnesyötteinä oli jatkaminen nykytoimenpiteillä (BAU) tai Itämeren maiden BSAP-kuormitusvähennysten (HELCOM) toteuttaminen yhdessä maksimaalisen saavutettavissa olevan valuma-alueen peltojen päästövähennysten (ΔDIN ja $\Delta DIP = -25\%$ ja -14%) kanssa. Ilmastonmuutoksen myötä lisääntyvä sadanta ja ravinnehuuhtouma heikentävät kuormituksen vähennystoimenpiteiden vaikutusta. BSAP ja maksimaalinen peltokuormituksen vähentäminen vaikuttavat voimakkaimmin ulkosaaristossa (vs. BAU): keväällä 2050 ja 2100 a-klorofyllin vähenemä on n. 25% ja 30% ja kesällä vastaavasti suhteellisen vakaasti n. 10%.

Ravinnekuormituksen vähennysskenaariot 2030-2100, sisältäen ”keskimääräisen” ilmastonmuutosskenaarion (lämpötila nousee 2 °C v. 2100 mennessä), ja niiden vaikutukset veden laatuun (a-klorofyllipitoisuus) esitetään tässä raportissa Saaristomerelle. Syksyllä 2018 tuotetaan vastaavat tarkastelut Suomenlahdelle ja Selkämerelle mm. meneillään olevan Meren- ja vesienhoidon suunnittelukierroksen tarpeisiin, kun FICOSin soveltamisesta ao. alueille on saatu enemmän kokemusta.

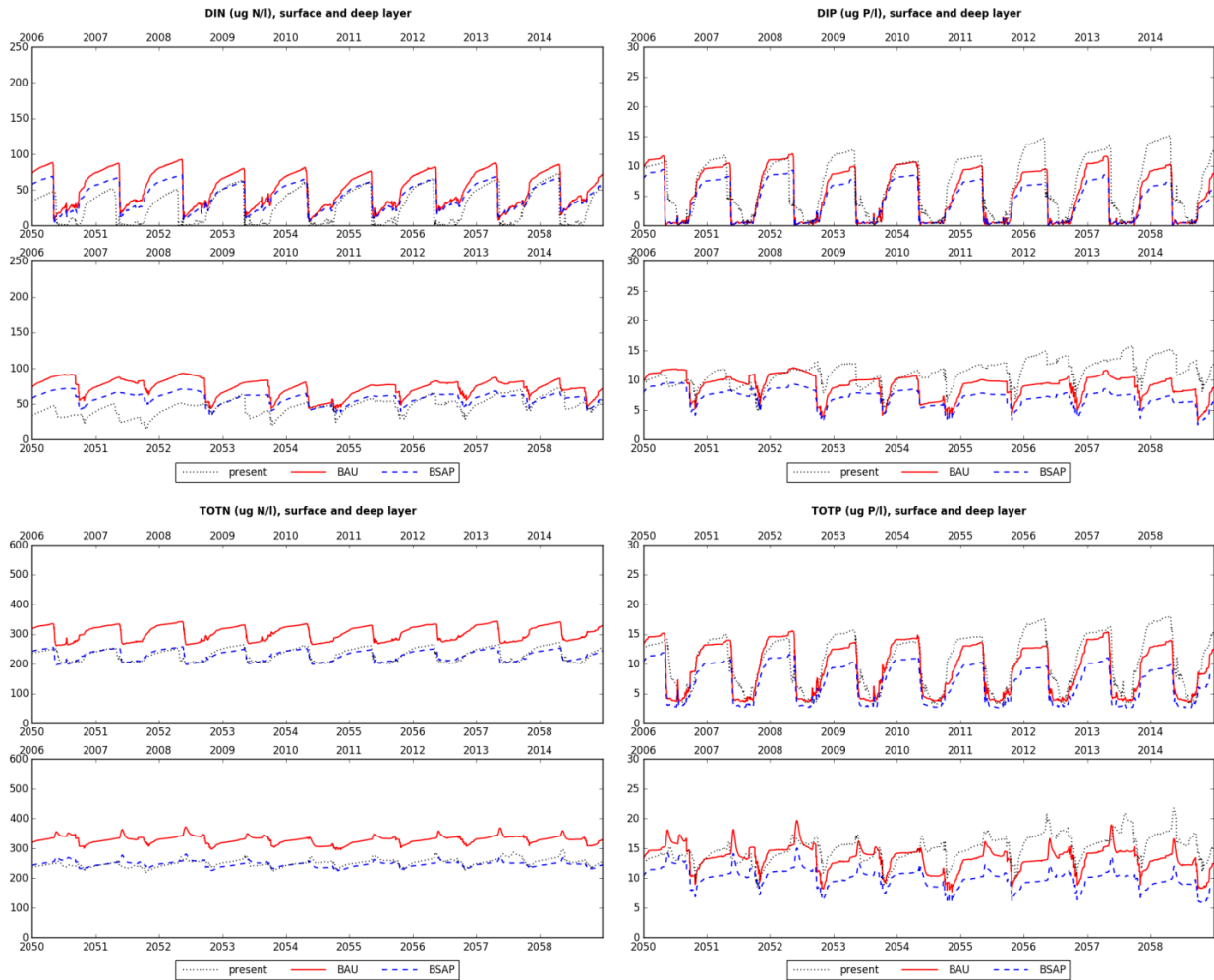


Kuva 6.7.1. Mallin simuloima keskimääräinen *a*-klorofylli -pitoisuus ($\mu\text{g/l}$) Saaristomerellä kasvukaudella 2011: Kevät (A, huhti-toukokuu), kesä (B, kesä-elokuu), syksy (C, syys-lokakuu) sekä loppukesä (D, heinä-elokuu; VARELYN kesänäytteenoton jakso).

Aiemmin olemme jo osittaneet, että mallijärjestelmämme tuottaa realistisen arvion leväbiomassan kasvukauden aikaisesta alueellisesta kehityksestä (Kuva 6.7.1: kts. luku 6.5). Tätä näkemystä tukevat myös heinä-elokuun 2011 simulaatiot (alkukesän biomassaminimin vaihe puuttuu; Kuva 6.7.1D), jotka sopivat hyvin VARELYN vastaavan jakson havaintoihin (Janne Suomela, henk.koht.).

VEMALA -mallilla laadittiin valuma-alueiden epäorgaanisten ravinnepäästöjen vähennysskenaariota, ja maatalouden maksimitoimenpiteillä peltokuorman vähenemä on 2030-2100 keskimäärin 25% (epäorgaaninen typpi, DIN) ja 14% (fosfaatti, DIP); muihin kuormituslähteisiin, kuten metsätalouteen, ei oleteta tehtävän muutoksia. Rannikkomallimme kulkeutumissimulaatioista puolestaan nähdään, että valuma-aluekuormituksen vaikutusalue rajoittuu lähinnä sisä- ja välisaaristoon (Kuva 6.8.1).

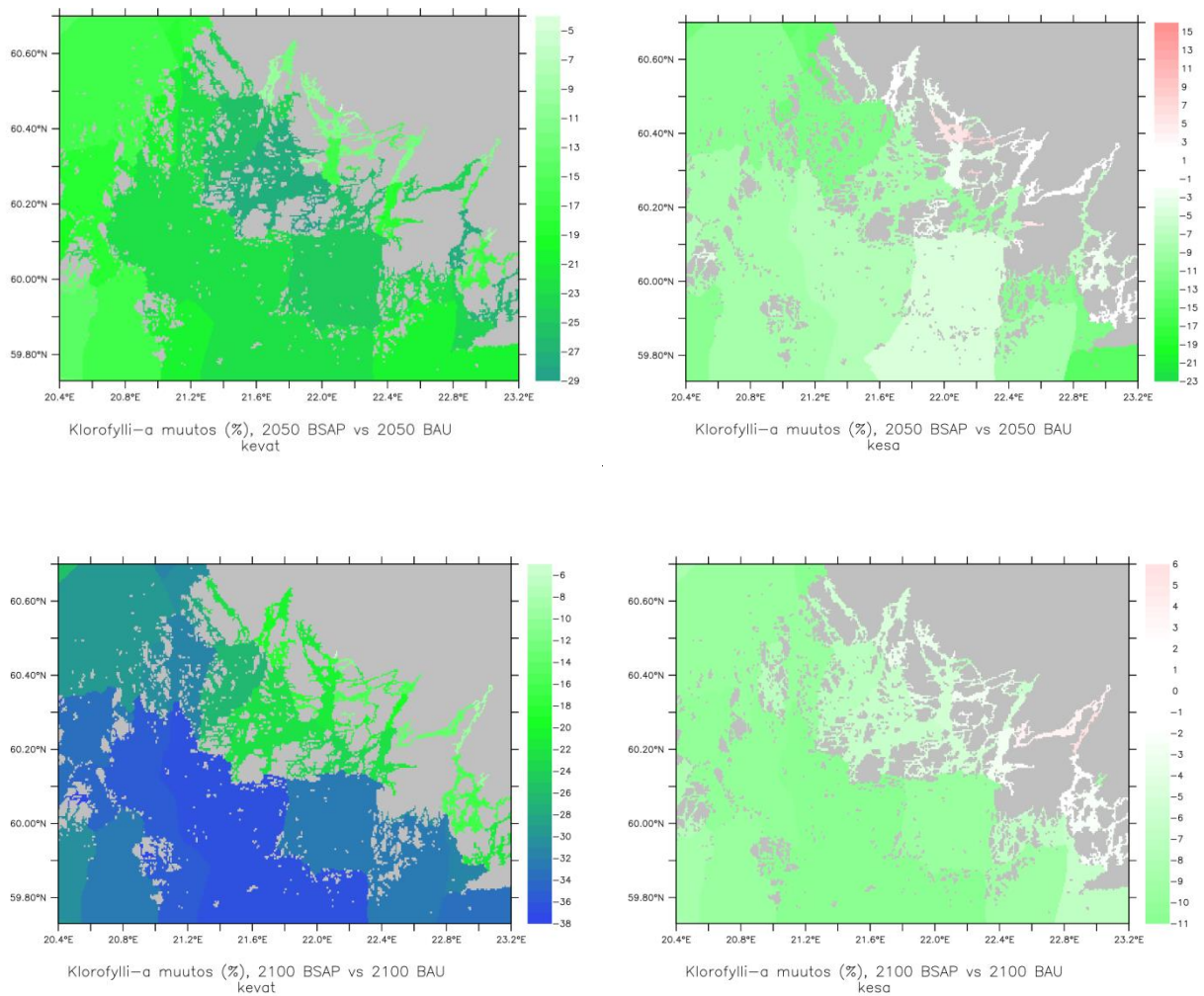
BSAP -tavoitteiden toteuttaminen vähentäisi ravinnekuormaa ja rehevöitymistä verrattuna nykytoimenpiteisiin (Kuva 6.7.2). Toisaalta ilmastonmuutoksen aiheuttama lisääntynyt sadanta ja ravinnehuuhtouma vähentävät ao. toimenpiteiden vaikutusta, ja pohjoisella Itämerellä näiden skenaarioiden nettotuloksena on ulkoisen DIN -kuormituksen kasvu tai pysyminen ennallaan ja DIP -kuormituksen väheneminen tulevaisuudessa (Kuva 6.7.2).



Kuva 6.7.2. Selkämeren ravinnedynamiikka 2006-2014 vs. skenaariot 2050-2059 (BAU ja BSAP). Selitykset: Muuttujina DIN, DIP, totN ja totP ($\mu\text{g/L}$); pinta- ja syväkerros = ylempi ja alempi paneeli); present = 2006-2014 (pisteviiva), BAU = nykytoimenpiteet jatkuvat vuoteen 2059 (punainen viiva), BSAP = HELCOMIN ravinnekuormituksen vähentämisen BSAP -toimenpidesuosituksia toteutetaan Itämerellä (sininen katkoviiva). (BNI:n BALTSEM -skenaarioajat, Dr Bo Gustafsson ja Dr Erik Gustafsson, henk. koht. tiedoanto)

BNI:n BALTSEM -mallin BSAP -vähennysskenaario yhdistettynä VEMALA –kuormitus-skenaarioon, jossa toteutetaan maatalouden ravinnepäästöjen maksimaaliset vähennykset, johtavat 2050-2100 keväällä 10-20% ja kesällä 0-10% *a*-klorofylli -pitoisuuden laskuun rannikon ja sisäsaariston alueella (Kuva 6.7.4). BSAP:n ja maksimaalinen peltokuormituksen kombinaatio vaikuttaakin voimakkaimmin ulkosaaristossa (vs. BAU): keväällä 2050 ja 2100 *a*-klorofyllin vähenemä on n. 25% ja 30%, kesällä vastaavasti suhteellisen vakaasti n. 10%.

Saaristomeren jokikuormituksen vaikutusalueen tilan vähäisempään kohenemiseen peltokuormituksen vähennyksen maksimitoimenpiteillä vaikuttaa todennäköisesti osaltaan ilmastonmuutoksesta johtuvan lisääntyneen sadannan aiheuttama ravinnepuhouhtouman kasvun vastavaikutus. Toisaalta kesällä sadanta ja jokivirtaama ovat alhaisia, mikä pienentää kuormitusmuutosten vaikutusta. Näin ollen on ennusteiden mukaan mahdollista, ettei alueen hyvän tilan kriteereitä (loppukesän *a*-klorofyllipitoisuus sisä-ulkosaaristossa 3.0-2.3 $\mu\text{g/L}$) tulla saavuttamaan vuoteen 2100 mennessä.



Kuva 6.7.4. Itämeren BSAP -toimenpideohjelman (HELCOM) ja valuma-alueen peltokuormituksen maksimaalisen vähentämisen (ΔDIN ja $\Delta\text{DIP} = -25\%$ ja -14% ; VEMALA -malli) vaikutus Saaristomerellä: *a*-klorofylli -pitoisuuden keskimääräinen (7 v jakson) prosentuaalinen muutos nykytoimenpiteiden (BAU) jatkumiseen verrattuna keväällä ja kesällä 2050 (vasen ja oikea yläpaneeli) ja 2100 (vastaavat alapaneelit).

Saaristomeren tilan kohenemisen kannalta kevätkukinnan ja sitä seuraavan sedimentaatiohuipun pieneneminen on kuitenkin tärkeää. Tämä vähentää sedimentteihin kukinnan jälkeen vajoavien levien sisältämän orgaanisen aineksen ja ravinteiden määrää. Mikrobit hajottavat leväsolut pohjalla, mikä vapauttaa ravinteita ja kuluttaa happea voimistaen näin alueen sisäistä kuormitusta. Tavoitteena onkin pienentää leviin sitoutuvaa epäorgaanista ravinnekuormitusta siten, että kasvukauden aikana sedimentoituvien levien myötä pohjalle päätyvä ravinnevuoto olisi pienempi kuin sisäinen kuormitus. Tällöin sedimentit ajan myötä vapautuisivat ylimääräisistä, ihmisperäisen kuormituksen aiheuttamista ravinnevarannoista ("antropogeenisestä muistista"), mikä puolestaan pienentäisi rannikoidemme keskeisen ekologisen ongelman, sisäisen kuormituksen takaisinkytkentää ja parantaisi samalla pohjan happioloja.

6.8 Ulkoisen ja sisäisen kuormituksen merkitys Saaristomerellä

FICOS–mallijärjestelmän luomat mahdollisuudet mutkikkaiden rannikkoekosysteemien toiminnan ymmärtämiseksi demonstroidaan arvioimalla eri ravinnekuormitussyötteiden merkitys Saaristomerellä. Mallinsimme yksittäisten kuormitussyötteiden (valuma-alue, ulappa, sedimentti ja pistelähteet) vaikutusalueen, suhteellisen merkityksen tuottavan pintakerroksen ravinnelähteinä sekä jakautumisen pinta- ja syvävesikerrokseen. Suurimmillaan valuma-alueen (30-80% kokonais-DIN), sisäisen (30-70% kokonais-DIP) ja pistekuormituksen vaikutus oli kasvukaudella (huhti-syyskuu) sisä-välisaariston alueella. Mallialueen ulkopuolelta tuleva ulapan taustakuormitus dominoi täysin ulkosaariston ravinnevoita. Mallitulostemme mukaan noin puolet sedimenttien sisäisestä kuormituksesta päätyy pintakerrokseen tämän osuuden ollessa suurimmillaan matalassa sisäsaaristossa. Etenkin fosforisyötteenä sisäinen kuormitus on näin ollen keskeisessä asemassa Saaristomeren sisäosissa.

Saaristomeren eri kuormituslähteiden merkitystä kasvukausien (huhti-syyskuu) pinta- ja syvävesikerroksen ravinnesyötteinä arvioitiin tekemällä malliajoja yksi lähde kerrallaan (muut lähteet suljettu ja levien ravinteiden otto pois päältä). Erillisajojen ravinnesyötteinä oli vuorollaan valuma-alueen kuormitus, taustakuormitus, sisäinen kuormitus ja pistekuormitus, ja vertailuajossa kaikki ao. syötteet olivat päällä (referenssi; Kuva 6.8.1). Suurimmillaan valuma-alueen (30-80% DIN), sisäisen (30-70% DIP) ja pistekuormituksen vaikutus pintakerroksen ravinnelähteinä oli sisä-välisaariston alueella (% referenssiajon tuottamista pitoisuuksista).

Malliajojen 2006-2011 vuosisidynamiikka osoitti, ettei alueelle akkumuloidu näissä erillistarkasteluissa vuodesta toiseen ravinteita, joten eri vuosien ajoista voitiin käyttää keskiarvoa. Tuloksien perusteella arviointiin, kuinka suuri osa kunkin kuormituslähteen syötteestä päätyi pintaan ja syväveteen (ilmalaskeman oletettiin päätyvän pintaan). Saaristomeren sisä-, väli- ja ulkosaariston kuormituslähteiden DIN ja DIP syötteiden keskimääräinen (tilavuus-korjattu) jakautuminen pinta- ja syvävesikerrokseen kasvukausilla (huhti-syyskuu) on esitetty Kuvassa 6.8.2 ja Taulukossa 6.8.1.

Saaristomeren taustakuormituksen määrää ei tunnettu, joten se laskettiin tunnetuista syötteistä, eli jokikuormituksesta (A), sisäisestä kuormituksesta (B) ja pistekuormituksesta (C) (Taulukko 6.8.1) sekä taustakuormituksen tilavuus-korjatusta osuudesta ravinteiden syötteenä (Kuva 6.8.2). Esimerkiksi taustakuormituksen osuus pintakerroksen kokonais-DIN -syötteestä oli noin 66%, jolloin kasvukaudella sen määrä oli (tn; kts. Taulukko 6.8.1):

$$[(A+B+C)/(1-0.66)] - (A+B+C) = [(1295 + 1304 + 865)/0.34] - (1295 + 1304 + 865) = 6817$$

Mallialueen ulkopuolelta tuleva taustakuormitus dominoi täysin ulkosaariston ja ulapan ravinnevuorauksia, kun levien ravinteiden otto oli malliajossa pois päältä; levien ravinteiden otolla toiminnassa taustakuormituksen vaikutus sisäsaaristossa saakka oli luonnollisesti pieni kasvua rajoittavan DIN:in osalta. Vuosien välinen luontainen vaihtelu on mm. sääolosuhteiden (tuulet, lämpötila, säteily jne.) vaihtelun vuoksi suurta, mikä heijastuu kasvukauden jokikuormituksen ja taustakuormituksen suurissa variaatiokertoimissa (Taulukko 6.8.2).

Taustakuormituksen suuri osuus rannikon kuormituksesta korostaa Itämeren maiden keskinäisten sopimusten ja niihin sitoutumisen merkitystä (esimerkiksi HELCOM-yhteistyö). Itämeren ekosysteemi ei tunne valtioiden välisiä rajoja, ja vain pitkäaikainen yhteinen panostus kuormituksen vähentämiseen (kuten BSAP-sopimus) voi katkaista sen sisäisen kuormituksen noidankehän.

Sisäisestä kuormituksesta päätyi Saaristomerellä kaikkiaan noin puolet pintakerrokseen. Tämä ehkä hieman yllättävä tulos selittyy pääosin sillä, että matalilla sisäsaariston alueilla, jotka ovat

suurimmaksi osaksi alle 10 m syvyisiä, sisäinen kuormitus päätyi enimmäkseen suoraan pintakerrokseen vastaten noin puolet pinnan ao. kokonaissyötteestä. Lisäksi väli- ja ulkosaariston syvävedestä osa päätyi pintaan matalille alueille kulkeutumisen ja kumpuamisen kautta. Sisä- ja välisaaristossa sisäinen kuormitus on (taustakuormituksen ohella) varsinkin epäorgaanisen fosforin lähteenä ja siten N₂-sitovien sinilevien kukintojen edistäjänä avainasemassa (Taulukko 6.8.1), ja tällä tuloksella on huomattava ekologinen ja vesienhoidollinen merkitys.

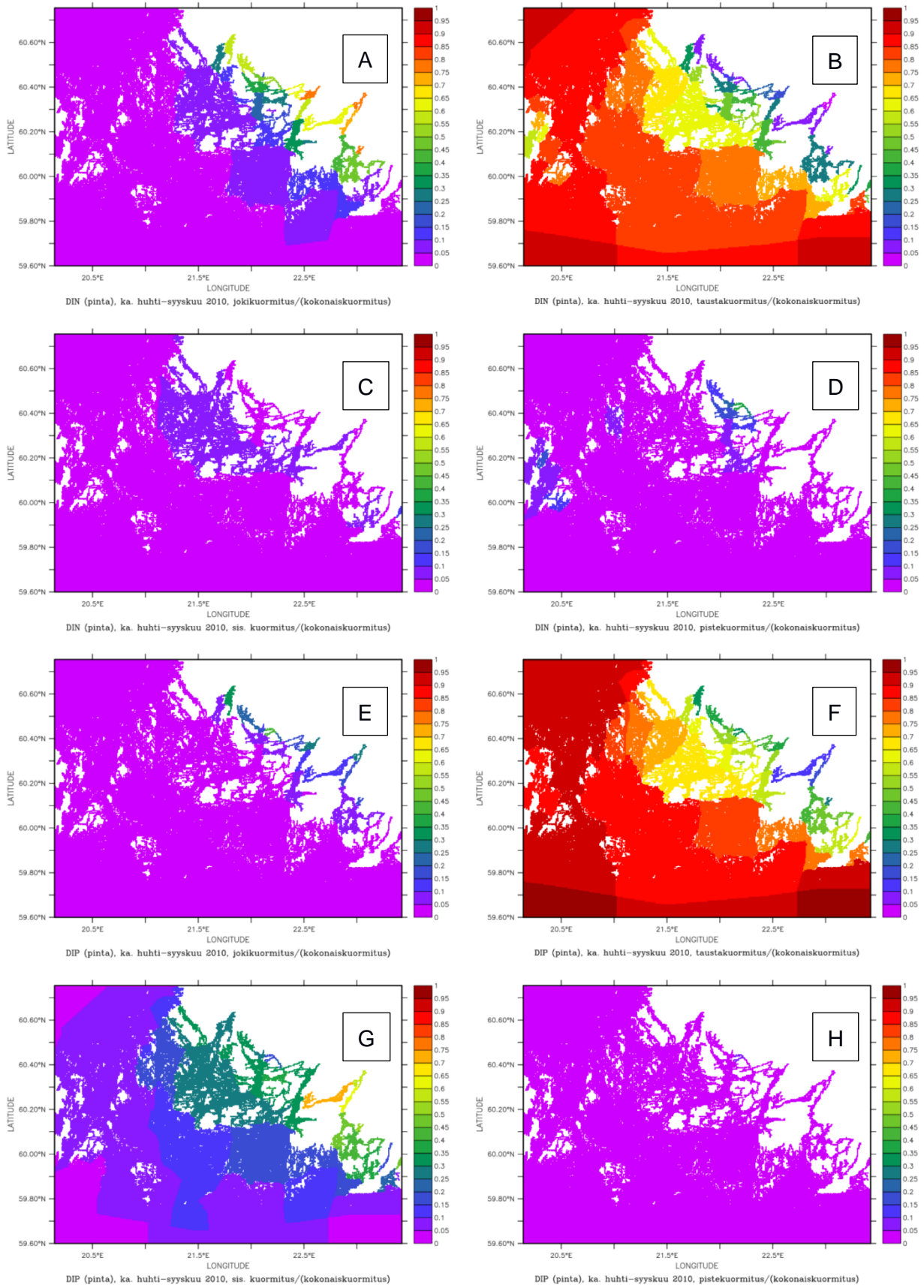
Kaikkiaan Saaristomeren malliajot osoittavat, että Suomen oma ravinnekuormitus keskittyy lähinnä sisä- ja välisaaristoon (Kuva 6.8.1 ja Taulukko 6.8.1). Täten myös esimerkiksi näille alueille kohdistuvan kuormituksen kompensatioiden (kuten hoitokalastus) tulisi keskittyä samoille alueille. Kun vähennämme riittävästi kuormitusta mm. maataloudessa ja kalankasvattamoissa, rehevöityminen, sedimentaatio ja sisäinen kuormitus vähenevät noilla alueilla pohjan happitilanteen vastavuoroisesti kohentuessa. Vaikutamme siis suoraan omien rannikkovesiemme tilaan, mikä kannustaa jatkamaan pitkäjänteisiä vesien hoitotoimenpiteitä omalla takapihallaamme.

Taulukko 6.8.1. Saaristomeren ravinnekuormitusyötteiden mallinnettu keskimääräinen jakautuminen pinta- ja syvävesikerrokseen kasvukausilla (huhti-syyskuu) 2006-2014. Mallinnuksen alkutilanteessa sisäinen kuormitus tulee syväveteen (paitsi matalilla, <10 m syvyisillä alueilla), jokikuormat ja ilmalaskeuma pintakerrokseen, ja tausta- sekä pistekuormitus jakautuvat vertikaalisti lähteen mukaan.

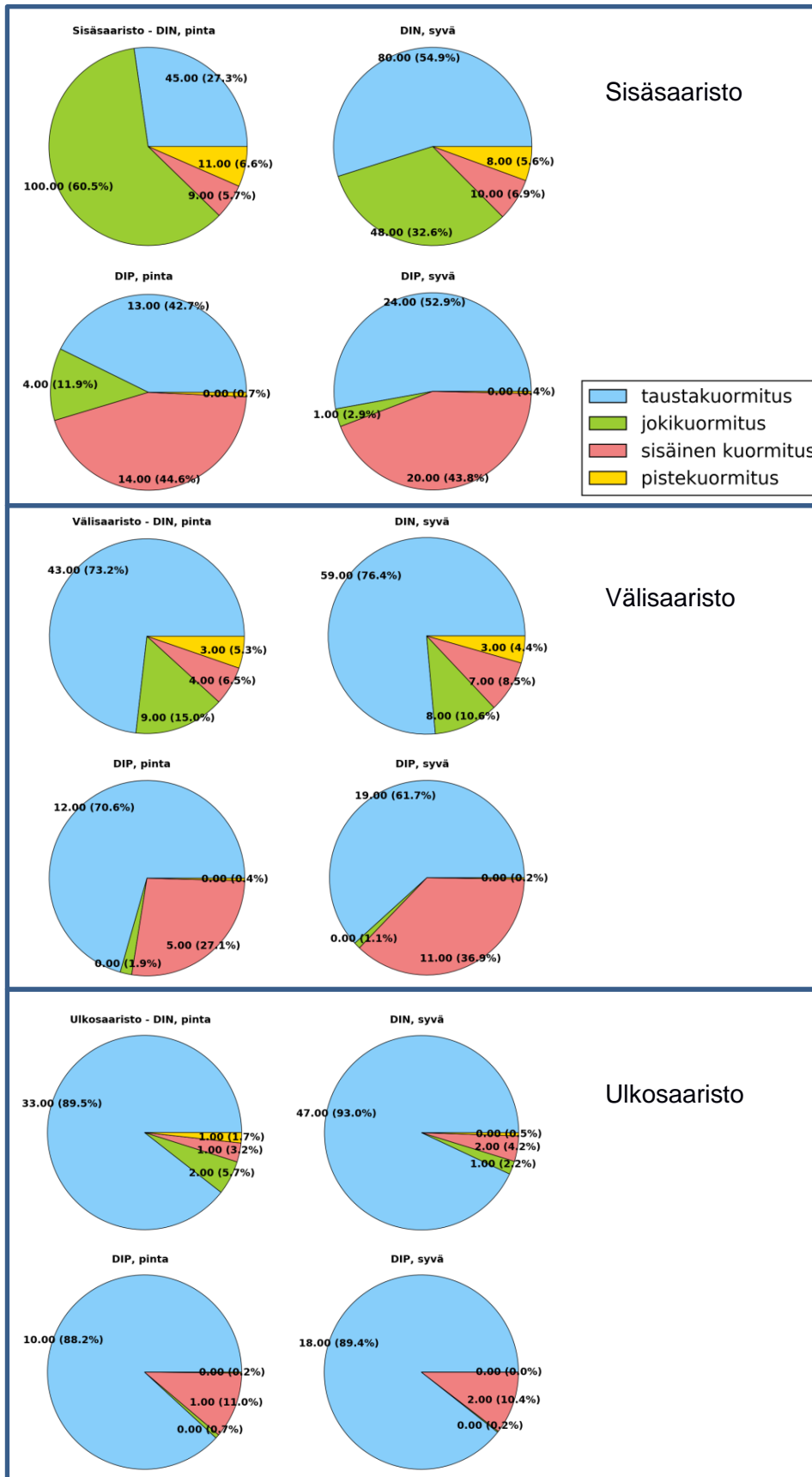
Kuormituslähde	DIN (tn)		DIP (tn)		totN (tn)		totP (tn)	
	pinta	syvä	pinta	syvä	pinta	syvä	pinta	syvä
Sisäinen kuormitus	1295	1256	1220	1182	1295	1256	1220	1182
Jokikuormitus	1304	216	39	6	1969	325	125	21
Pistekuormitus	865	240	32	9	1065	296	111	31
Taustakuormitus	6817	15753	3710	7005	53390	96891	7212	11105
Ilmalaskeuma	1238	0	54	0	1238	0	54	0
Yhteensä	11520	17464	5054	8202	58956	98768	8722	12339

Taulukko 6.8.2. Saaristomeren ravinnekuormitusyötteiden vuosittainen vaihtelu (%CV) kasvukausilla (huhti-syyskuu) 2006-2014. Tarkasteltavissa malliajoissa (Kuvat 6.8.1 ja 6.8.2) käytettiin sisäiselle kuormitukselle vakioarvoa ("Arvio 1"; Liite 2) ja ilmalaskeumalle vertailukelpoisuuden vuoksi BNI:n BALTSEM-malliajoissa käytettyä, Itämeren ilmakehän kulkeutumismallinnuksesta saatua vakioarvoa (vrt. Taulukko 6.8.1).

Kuormituslähde	DIN	DIP	totN	totP
Sisäinen kuormitus	-	-	-	-
Jokikuormitus	47 %	44 %	48 %	57 %
Pistekuormitus	12 %	16 %	12 %	14 %
Taustakuormitus	62 %	57 %	89 %	78 %
Ilmalaskeuma	-	-	-	-



Kuva 6.8.1. Saaristomeren eri DIN (A-D) ja DIP (E-H) kuormituslähteiden vaikutusalueet ja keskimääräinen suhteellinen merkitys kasvukaudella (huhti–syyskuu) 2010 pintakerroksen ravinnesyötteinä (vs. kokonaiskuormitus): Jokikuormitus (A, E), tuleva taustakuormitus (B, F), sisäinen kuormitus (C, G) ja pistekuormitus (D, H).



Kuva 6.8.2. Saaristomeren sisä-, väli- ja ulkosaariston kuormituslähteiden DIN ja DIP syötteiden keskimääräinen (tilavuuskorjattu) jakautuminen pinta- ja syvävesikerroksiin kasvukausilla (huhtisyysskuu) 2006-2011. Tulokset on esitetty yksittäisten syötteiden synnyttäminä pitoisuuksina ($\mu\text{g/L}$; pinnassa levien ravinteiden otto pois päältä) sekä prosentteina ao. pitoisuuksien summasta (= kokonaiskuormituksen vaste); taustakuormitus = ulapalta tuleva kuormitus.

7. TULOSTEN KESTÄVYYS JA HYÖDYNTÄMINEN

Rannikon kokonaiskuormituksen mallijärjestelmän (FICOS) suunnittelu ja testaaminen sekä havaintoaineistojen, lähtötietojen ja meteorologisten pakotteiden kartoitustyö luovat lujan pohjan ao. aineistojen ja FICOSin jatkojalostukselle. Hankkeessa on laadittu suunnitelman myös Merenkurkku-Perämeren alueen mallintamiseksi, jonka jälkeen malli kattaa koko Suomen rannikon. Tämä mallijärjestelmä ja siitä edelleen kehitettävät versiot vahvistavat rannikkoalueiden vesiensuojelullisen suunnittelun ja päätöksenteon kvantitatiivista, tieteellistä pohjaa. Samalla FICOS kytkee jo nykyään vahvalla pohjalla olevat sisävesien mallinnuksen ja ulappamallinnuksen – tämä vesiekosysteemien jatkumon synnyttäminen on tärkeä edistysaskel, sillä nykyisin käytössä olevista Itämerimalleista puuttuu rannikkokomponentti. FICOS-mallijärjestelmän hyödyntäminen onkin sisällytetty Suomen uuteen Itämeri-strategiaan.

FICOS on laadittu avoimella lähdekoodilla ja rakenteeltaan joustavaksi, jolloin sitä voidaan sujuvasti jatkuvasti kehittää, ja koko kansainvälinen mallinnusyhteisö voi osallistua sen kehittämiseen ja hyödyntämiseen. Mutkikkaiden mallien (kuten sää-, ilmasto- ja ekosysteemimallit) ennusteiden epävarmuuksien estimointi on nykyään keskeinen tilastomatematiikan kehityskohde, ja tällä rintamalla tehdään yhteistyötä myös jatkossa alan kansainvälisesti johtaviin tutkijoihin lukeutuvan Prof. Jarno Vanhatalon (HY) kanssa. Tuotetulla mallinnustyökälulla saadut arviot rannikon ravinnekuormituksen vesistövaikutuksista sopivat ao. analyysien välityksellä myös kytkettäväksi sosioekonomisiin, ohjaus-, politiikka- ja riskianalyysiin vesiensuojelutoimenpiteitä kehitettäessä ja niiden yhteiskuntatason vaikutuksia arvioitaessa. Näiden tavoitteiden toteutuminen voidaan todentaa mm. vesiensuojelutoimien ennustettavuuden ja kustannustehokkuuden parantumisesta sekä onnistuneista veden tilan kohentamistoimenpiteistä. Mallin julkiset versiot mahdollistavat myös kansalaisten, kansalaisjärjestöjen (ml. ympäristönsuojelujärjestöt), median ym. asianosaisten syventymisen ja valistuneet kannanotot rannikkoalueiden ympäristönsuojelullisiin kysymyksiin.

FICOSin merimallia on tähän mennessä hyödynnetty menestyksekkäästi taannoisen Harjavallan nikkelpäästöönnettömyyden yhteydessä (nikkelin kulkeutuminen Kokemäenjoen ulkopuolisella merialueella) sekä pohjoisella Saaristomerellä sijaitsevan Loukeenkarin kalankasvattamon ravinnepäästöjen kulkeutumisen ja ympäristövaikutusten arvioimisessa (Maa- ja metsätalousministeriön hanke). Tuotettu mallijärjestelmä pystyy vastaamaan vesiekologisesta relevanssista myös laajoissa, yhteiskuntatason hankkeissa (kts. yllä), ja tällä haavaa FICOS tuottaakin tällaisessa hankkeessa (BlueAdapt, STN-Akatemia) Saaristomeren kuormitusskenaarioiden vaste-ennusteet ja niihin liittyvät epävarmuusjakaumat. Lisäksi FICOSia hyödynnetään paraikaa kalankasvatuksen sijainnihjauksen ja ympäristövaikutusten arvioinnin kehityshankkeessa (INNOVESI, EAKR).

Merenhoidon ja vesienhoidon suunnittelukierros on 6 vuotta. Merenhoidossa on käynnissä toinen ja vesienhoidossa kolmas suunnittelukausi. Molemmissa tulee toimenpideohjelmat olla valmiina vuoden 2021 aikana. Merenhoitosuunnitelman hyvän tilan määrittelyä ja sen indikaattoreita on tarkennettu toista suunnittelukautta varten vuonna 2018. Sekä vesienhoidossa että merenhoidossa tarvitaan työkaluja, joilla pystytään arvioimaan tehtyjen toimenpiteiden ympäristövaikutuksia.

Tavoitteena on, että jatkossa Suomi pystyy tekemään oman tarkoituksenmukaisimmilla laskentamenetelmillä ja datoilla toteutetun arvion kansallisista kuormituksen vähennystarpeista ja -vaikutuksista. Arviot suhteessa rajat ylittäviin vaikutuksiin voidaan tehdä tulevaisuudessa kytkemällä hankkeessa laadittu rannikon kuormitusmallijärjestelmä asianmukaiseen koko Itämeren ravinnekiertomalliin. FICOSilla voidaan esimerkiksi arvioida, miten Venäjän, Viron ja Ruotsin ravinnekuormitusten lyhyen ja pitkän aikavälin muutokset vaikuttavat Suomen rannikkoalueiden tilaan kytkemällä FICOS BNI:n BALTSEM-mallilla tehtyihin koko Itämeren

allaskohtaisiin ennusteisiin². Lisäksi on tarpeen pystyä arvioimaan, miten varsinaisen Itämeren pääaltaan ravinnetaseen muutokset ja luontaiset hydrodynamiikan vaihtelut (ja niiden säätelemät syväveden ravinnesyötöt) vaikuttavat Suomen rannikkoalueilla. Tätä tarkoitusta varten FICOS voidaan kytkeä Euroopan Meripalvelun (Copernicus CMEMS) ylläpitämiin koko Itämeren ravinnekiertomalleihin (esimerkiksi HBM-ERGOM; marine.copernicus.eu), jotka ovat vapaasti käytettävissä ja nimenomaan laadittu tukemaan korkean resoluution alueellista mallinnusta. FICOSin alueellisilla sovelluksilla on ulappamalleja tarkempi paikkaresoluutio, mutta sen käyttöä rajoittaa kuitenkin rannikon läheisyydessä, etenkin osin suljetuilla, ahtailla ja matalilla vesialueilla mallin hilakoko ja se, ettei kaikkia pieniä, mutkikkaita alueita voida eikä kannata käydä läpi nykyisillä resursseilla.

FICOS-mallijärjestelmää kehittävän hankkeen yhteistyöverkosto koostuu pääosin SYKEssä Merikeskuksen, Vesikeskuksen ja Tietokeskuksen tutkijoista. SYKEN pääjohtaja Lea Kauppi on suhtautunut myönteisesti Vesistömallinnusympäristön yhteistyöverkoston perustamiseen. Vesistömallinnusympäristön tutkijaverkoston erityistehtävänä on ylläpitää ja kehittää FICOSia vesien ja merenhoidon suunnitteluun ja vaikutusten arviointiin soveltuvana viranomaisten ja tutkijoiden työkaluna sekä opastaa loppukäyttäjiä sen käyttämisessä (etenkin ELY -keskukset, YM ja SYKE). Hankkeen mallin kehittäjät työskentelevät myös jatkossa kiinteässä yhteistyössä ELY -keskusten ja YM:n meriasiantuntijaryhmän kanssa, ja merenhoitosuunnitelman kuormitusvähennystarpeet rannikollamme arvioidaan yhteistyönä tämän hankkeen tutkijoiden kanssa.

Hankkeessa on laadittu mallin käyttöopas, jota ELY-keskusten ja YM:n loppukäyttäjät ovat tervehtineet ilolla. Opasta tullaan myös tulevaisuudessa jatkuvasti päivittämään ja kehittämään loppukäyttäjiltä saadun palautteen pohjalta. Palautteen mukaisesti SYKEN Vesistömallinnusympäristön käyttötuki tulee oppaan ohella olemaan tärkeä mallinnustulosten kestävyyttä ja hyödyntämistä edistävä elementti. Lisäksi ao. tutkijaverkoston tuki on välttämätön vastattaessa moniin loppukäyttäjien räätälöityihin tarpeisiin (esimerkiksi tarkan resoluution mallinnukset kuormituksen ”hot spot” alueille). Mallin kehittäminen on jatkossakin kytkettävä elimelliseksi osaksi SYKE-YM Mallitiekarttaa, jossa keskeiset uudet kehitystarpeet identifioidaan ja priorisoidaan, myös mahdollisen YM-rahoituksen osalta.

ELY-keskukset teettävät paljon selvityksiä myös konsulteilla (VARELYn ja UDELYn tiedonanto; Harri Helminen ja Antti Mäntyselä), ja muutenkin yritykset ja konsultit ovat potentiaalisia mallin ja sen käyttötuen hyödyntäjiä. Niin viranomaisten kuin ulkopuolisten konsulttienkin tuki vaatii resursseja SYKeltä (työaika, laitekapasiteettia ym.), ja mallin käyttöä ylläpitävän Vesistömallinnusympäristön ansaintalogiikka tulee näiden tehtävien osalta ratkaista SYKEN ja YM:n yhteisessä neuvonpidossa, mieluiten jo syksyn 2018 aikana! Mikäli hankkeen YM:ään jättämä Merenkurkku-Perämeri –alueen mallinnuksen hankehakemus hyväksytään, tulee myös viranomaistahojen käyttäjätuki jatkamaan hankkeen ajan.

² Itämeren toimintaohjelman (Baltic Sea Action Plan, BSAP) mukainen ravinnekuormituksen vähentämisen maakohtaiset tavoitearviot tehdään Tukholman yliopiston (BNI:n) toimesta (BALTSEM malli). Tavoitteena on pystyä tekemään oma riippumaton arvio BNI:n koko Itämeren kattavien, allaskohtaisten mallitulosten (taustakuormitus) ja Suomen omien vähentämistoimenpiteiden rehevöitymisvasteista rannikkoalueillamme, joihin omien toimenpiteidemme primäärivaikutukset pääosin kohdistuvat.

8. JATKOKEHITYSTARPEET

8.1. Käyttöliittymä

Käyttöliittymää toteutettaessa ja käytettäessä on voitu todeta, että käyttöliittymä toimii nykyään ripeällä vasteajalla ja suunnitellut toiminnot saadaan suoritettua. Osa käytön aikana esiin tulleista muutokset/lisäystarpeista on ollut varsin yksinkertaisia toteuttaa, kun taas toiset vaativat selkeästi enemmän työpanosta.

Ensimmäisessä vaiheessa ei järjestelmän käyttöä rajoitettu käyttäjähallinnalla muuten kuin normaalein palomuurisäännöin. Jatkossa käyttäjähallintaan on syytä kiinnittää huomiota. Toteutus voi olla varsin kevyt ja tukeutua olemassa olevaan infraan. Modulaarisena toteutuksena voidaan käyttöliittymästä rajata helposti toiminnallisuuksia käyttäjäryhmittäin ja tarvittaessa lisärajoituksia voidaan toteuttaa myös rajapinnan puolella. Rajapintapalvelut on syytä siirtää tietokantaan. Osa käyttötarpeista olisi hyvä tuottaa automaattisesti riittävän korkealaatuinen tulostus liitettäväksi asiakirjoihin.

8.2 Sisäinen kuormitus

Rannikkoalueiden fosforin kierto sedimentin ja veden välillä on huomattavan monimutkainen prosessi ja siihen liittyy myös useita tekijöitä, joiden vaikutusta ei tunneta. Pelkästään alueen pohjan suuren heterogeenisyyden takia Saaristomeren näyteasemien sedimentistä mitatuista fosforipitoisuuksista tehtyyn ekstrapolaatioon niille alueille, joilta ao. suoria havaintoja ei juurikaan ole (Suomenlahti ja Selkämeri), sisältyy epävarmuutta, joka voi johtaa joko yli- tai aliarvioon vapautuvan fosforin määrästä. Toinen suuri epävarmuutta tuova tekijä on sedimentaationopeuksien ja siten sedimentin reaktiivisen pintakerroksen paksuuden vaihtelu alueellisesti. Joillakin alueilla sedimentaationopeus on huomattavasti suurempi kuin arvioissa käytetty keskimääräinen 1 cm:n vuosittainen kerrostumisnopeus. Tällöin myös sedimentoituvan aineksen fosforin ja orgaanisen aineksen pitoisuudet saattavat olla huomattavastikin keskimääräistä korkeampia, ja myös fosforin vapautuminen voi olla arvioitua voimakkaampaa.

Arvioon tuovat epävarmuutta myös pohjalla vallitsevien olosuhteiden ja fosforin sisäisen kuormituksen ajallinen vaihtelu, jota tunnetaan huonosti. Sedimentinäytteet, joiden fraktiointituloksia tässä arvioissa on käytetty laskelmien pohjana, on otettu pääosin kultakin alueelta vain yhtenä ajankohtana vuodessa, vaikka fosforin vapautumisen kannalta reaktiivisen sedimentin pinnan potentiaalisesti mobiilien fosforimuotojen määrät voivat vaihdella ajallisesti paljon eri vuosien välillä ja myös saman vuoden aikana eri vuodenaikoina (esim. SEABED -aineisto, Lukkari 2008, Thouvenot-Korppoo et al. 2012). Lisäksi tutkimustietoa fosforin kierrosta sedimentin ja veden välillä hapellisilta pohjilta, joita peittää vähän orgaanista ainesta sisältävä lasiaali- tai postglasiaalisavi, on olemassa hyvin vähän, joten niiden rooli joko fosforin sitojana tai vapauttajana tunnetaan huonosti. Mallialueen pinta-alasta huomattava osa on kovia savipohjia.

8.3 FICOS

Mallijärjestelmän osat on alusta alkaen suunniteltu toisistaan erillisiksi moduuleiksi, joita voidaan kehittää samaan aikaan toimivaksi todetun tuotantoversion toimintaa häiritsemättä ja soveltaa joustavasti uusille mallinnusalueille. Seuraava keskeinen tavoite onkin soveltaa FICOS vielä Merenkurkun ja Perämeren alueelle (hankkeen tutkimussuunnitelma on laadittu). Nykyinen mallijärjestelmä sisältää pelkistetyn kuvauksen ravinnekierron dynamiikasta, jota voidaan kehittää usealla osa-alueella. Ensimmäisiä kehitettäviä asioita on vedenvaihdon tarkentaminen 3D hydrodynaamisesta mallista saaduilla syöttötiedoilla. Ravinnekiertokuvausta on mahdollisuus myös kehittää monella tavalla: esimerkiksi sedimentaation ja sisäisen kuormituksen dynaaminen kytkeä, useamman planktonryhmän (mukaan lukien eläinplankton ja bakteerit) sekä hiilen ja hapen dynamiikan sisällyttäminen ravinnekiertomalliin. Mallin ominaisuuksia on jo kehitetty

erillisissä YM:n TEAS –hankkeissa (nopeampi Fortran käännös, hydrodynamiikan kehittyneempi kuvaus ja kytkentä 3D COHERENS –malliin sekä mallin kalibrointi, parametrisointi ja epävarmuustarkastelut).

8.4 Valuma-aluemalli

Arvioitaessa peltojen fosforikuormitusta laskentamalleilla on oleellista pystyä yhdistämään tieto peltolohkon kaltevuudesta, maalajista ja P-luvusta. Jos peltolohkon P-luku on korkea, sen vaikutus fosforikuormitukseen riippuu merkittävästi pellon kaltevuudesta ja maalajista. Jotta peltojen fosforikuormituksen laskentatuloksia pystyttäisiin vertaamaan pitoisuusmittauksiin joissa ja sitä kautta tarkentamaan ja validoimaan laskentamallia, tarvitaan lisäksi viljavuusanalyysin paikkatieto. Eli on oleellista tietää millaisia peltoja jokaisen jokihavaintopisteen valuma-alueella on. Tämän hetken suuri ongelma on peltolohkojen P-lukujen huono saatavuus, mihin olisi saatava parannus! Esimerkiksi TEHO-hankkeella on paljon relevanttia tietoa, mutta sen jakaminen ulkopuolisille on rajattua. Osa olemassa olevista tiedoista on hankala saada mm. yksityisyyden suojan vuoksi.

VEMALA malliin liitettyllä ICECREAM peltomallissa peltojen lähtötiedot perustuvat eri viljavuusanalyysilaboratorioista tutkimuskäyttöön saatuun viljavuusanalyysiaineistoon. Tässä aineistossa on viljavuusanalyysijä vuodesta 2000 alkaen ja koko maan pelloista aineisto kattaa noin 41 %. Aineisto sisältää peltolohkokohtaisen tiedon lisäksi myös analyysijä, joista tiedetään pellon sijaintikunta mutta ei itse peltolohkoa. Näiden kuntakohtaisten tietojen perusteella arvioidaan loppujen peltojen lähtötiedot kuormituslaskentaan. Peltojen lähtötiedoissa on ainakin seuraavat puutteet:

- Peltojen nykytilaa kuvaamaan käytetään kaikkia viljavuusanalyysijä v. 2000 jälkeen, jotta edes 41 % kattavuus saadaan. Osa tiedoista on kuitenkin jo 15 v vanhoja.
- Lohkokohtaiset tiedot puuttuvat 59 % pelloilta. Näiden tiedot arvioidaan kuntatason tiedoista. Tästä aiheutuu merkittävä epävarmuus kuormitusarvioon, jota kuvataan jäljempänä.
- Kuntatason tiedoista ei ole tietoa ovatko ne pelloilta vai esim. kotipuutarhasta.
- Erikoiskasvien, mm. sokerijuurikaspeltojen tiedoissa kattavuus on muita huonompi.
- Viljavuusanalyysitietojen kattavuus vaihtelee huomattavasti eri puolilla maata.

Fosforikuormitusarviot erityisesti rannikko- ja merialueilla ovat epävarmoja, koska viljavuusanalyysijä on vähän ja kuormitusarvioita ei voida korjata vesistöjen pitoisuusmittausten perusteella. Rannikko- ja merialueilla kuormitus menee suoraan tai pieniä uomia mereen ja siksi pitoisuustietoja vesistöstä ei voida mitata kattavasti.

ICECREAM -mallilla arvioitiin Saaristomeren valuma-alueella millaisen epävarmuuden kuormitusarvioihin puuttuvat viljavuusanalyysit aiheuttavat. Laskennan lähtötiedoksi täytyy arvioida maalaji ja P-luku myös peltolohkoille, joilta ei ole viljavuusanalyysiä. P-lukuna käytetään satunnaista P-lukua kuntatiedoista ja maalaji arvioidaan maannostietokannan perusteella. Näiden epävarmuuden vaikutusta fosforikuormitukseen arvioitiin muodostamalla 10 kpl erilaisia lähtötietoyhdistelmiä ja laskemalla vesistöalueittain peltojen fosforikuormitus näillä eri lähtötiedoilla. Lähtötiedoissa vaihtelevat peltojen P-luvut ja maalajit ja kuormitustuloksiin vaikuttaa erityisesti millaisia P-luku/maalaji/kaltevuus yhdistelmiä pelloille muodostuu. Kuormitustuloksen epävarmuuteen vaikuttaa, paljonko lohkoikohtaisia tietoja alueelta puuttuu ja toisaalta miten paljon peltojen ominaisuudet vaihtelevat alueella. Saaristomeren valuma-alueen 3. jakovaiheen vesistöalueilla epätarkkuus on tyypillisesti alle 20 %, mutta yksittäisillä alueilla se voi olla huomattavasti suurempi.

WSFS-Vemala laskentajärjestelmässä on käytössä tutkimuskäyttöön saatu aineisto viljavuusanalyysistä. Aineistoa käytetään niin, että analyysitiedot pidetään salassa. Analyysitietojen perusteella järjestelmä tuottaa arvioita peltojen ravinnekuormituksesta

nykytilassa ja eri viljelytoimenpidevaihtoehtoilla, mutta lähtötiedot eivät ole näkyvissä tai tulkittavissa tuloksista.

Jos peltolohkojen P-luku- ja maalajitiedot olisivat kattavia ja ajantasaisia, siitä saataisiin ainakin seuraavat hyödyt:

- Arvio peltojen ravinnekuormituksen osuudesta nykyisestä vesistöjen kokonaisuormituksesta tarkentuisi
- Arviot mahdollisuuksista vaikuttaa viljelytoimenpiteillä vesistöjen ravinnekuormitukseen tarkentuisivat. Nämä arviot ovat lähtötietona mm. vesien- ja merenhoidon suunnittelussa.
- Laskentamalleilla pystyttäisiin arvioimaan peltolohkokohtaisesti eri kuormitusvähennystoimenpiteiden hyötyjä lohkolla. Mm. paljonko suojakaista tai talviaikainen kasvipeitteisyys vaikuttaa lohkon ravinnekuormitukseen. Tämä olisi arvokas lähtötieto kohdennettaessa toimenpiteitä kustannustehokkaimmalla tavalla.

KIRJALLISUUSVIITTEET

- Al-Hamdani, Z. and Reker, J. (eds.) 2007. Towards marine landscapes in the Baltic Sea. BALANCE interim report #10.
- Arnosti et al. 1998. Temperature dependence of microbial degradation of organic matter in marine sediments: polysaccharide hydrolysis, oxygen consumption, and sulfate reduction. *Marine Ecology Progress* 165, 59-70.
- Baltic Sea Hydrographic Commission, 2013, Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3. Downloaded from <http://data.bshc.pro/> on 25.8.2014.
- Bergström, S., Carlsson, B., 1994. River runoff to the Baltic Sea 1950–1990. *AMBIO* Vol. 23, No. 4-5, 280–287.
- Canfield, D.E. et al. 1993 Pathways of organic carbon oxidation in three continental margin sediments. *Mar. Geol.* 113, 27-40.
- Conley, D.J. and Johnstone, R.W. 1995. Biogeochemistry of N, P and Si in Baltic Sea sediments: response to a simulated deposition of a spring diatom bloom. *Marine Ecology Progress Series* 122, 265-276.
- Dahlgren, P., Landelius, T., Källberg, P., Gollvik, S., 2016. A high-resolution regional reanalysis for Europe. Part 1: Three-dimensional reanalysis with the regional High-Resolution Limited-Area Model (HIRLAM). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142 (698), 2119–2131. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.2807>
- EMODnet. <http://www.emodnet.eu/>
- Enoksson, V. 1993: Nutrient recycling by coastal sediments: effects of added algal material. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 92, 245–254.
- Heiskanen, A-S. 1998. Factors governing sedimentation and pelagic nutrient cycles in the Northern Baltic Sea. PhD. thesis. Monographs of the Boreal Environmental Research. No.8. 80 s.
- Heiskanen, A-S. and Leppänen, J-M. 1995,. Estimation of export production in the coastal Baltic Sea: effect of resuspension and microbial decomposition on sedimentation measurements. *Hydrobiologia* 316: 211-214.
- HELCOM 2011. The Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5). *Baltic Sea Environment Proceedings*, 128.
- Helminen, H, E Juntura, J Koponen, P Laihonen, H Ylinen. 1998. Assessing of long-distance background nutrient loading to the Archipelago Sea, northern Baltic, with a hydrodynamic model. *Environmental Modelling & Software* 13: 511-518.
- HIRLAM-B, 2012. System documentation. <http://hirlam.org/>.
- Hordoir, R., Axell, L., Höglund, A., Dieterich, C., Fransner, F., Gröger, M., Liu, Y., Pemberton, P., Schimanke, S., Andersson, H., Ljungemyr, P., Nygren, P., Falahat, S., Nord, A., Jönsson, A., Lake, I., Döös, K., Hieronymus, M., Dietze, H., Löptien, U., Kuznetsov, I., Westerlund, A., Tuomi, L., Haapala, J. Nemo-Nordic 1.0: A NEMO based ocean model for Baltic & North Seas, research and operational applications, In *Geoscientific Model Development Discussions*, volume 2018, 2018. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-2018-2>
- Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., Tattari, S. & Vehviläinen, B. 2015. A national scale nutrient loading model for Finnish watersheds – VEMALA. *Environmental Modeling and Assessment* doi: 10.1007/s10666-015-9470-6.
- Jørgensen, B.B. 1982. Mineralization of organic matter in the sea bed - role of sulfate reduction. *Nature* 296, 643-645.
- Kiirikki, M., Inkala, A., Kuosa, H., Pitkänen, H., Kuusisto, M. & Sarkkula, J. 2001. Evaluating the effects of nutrient load reductions on the biomass of toxic nitrogen-fixing cyanobacteria in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Boreal Env. Res.* 6: 131–146.
- Korppoo, M., Huttunen, M., Huttunen, I., Piirainen, V., Vehviläinen, B., 2017. Simulation of bioavailable phosphorus and nitrogen loading in an agricultural river basin in Finland using VEMALA v.3. *Journal of Hydrology* 549 (2017) 363–373.

- Landelius, T., Dahlgren, P., Gollvik, S., Jansson, A., Olsson, E., 2016. A high-resolution regional reanalysis for Europe. Part 2: 2D analysis of surface temperature, precipitation and wind. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142 (698), 2132–2142. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.2813>
- Lignell, R., H. Haario, M. Laine, and T. F. Thingstad. 2013. Getting the "right" parameter values for models of the pelagic microbial food web. *Limnology and Oceanography* 58:301-313.
- Lignell, R., Miettunen, E., Tuomi, L., Ropponen, J., Puttonen, I., Lukkari, K., Huttunen, M., Korppoo, M., Tikka, K., Piiparinen, J., Kuosa, H. ja Attila, J. 2016. Saaristomeren kokonaiskuormitusmallin kehittäminen – loppuraportti (VI 2013-X 2015). 85 s.
- Lignell R., E. Miettunen, L. Tuomi, J. Ropponen, K. Lukkari, M. Huttunen. 2014. Saaristomeren kokonaiskuormitusmallin kehittäminen - aloitusvaiheen loppuraportti (VI-XII 2013). 18 s.
- Luyten, P. (Editor) 2013. COHERENS—A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation. Version 2.5.1. RBINS-MUMM Report, Royal Belgian Institute of Natural Sciences.
- Madec, G. and the NEMO system team: NEMO Ocean Engine, Version 3.6 Stable, Tech. rep., IPSL, <http://www.nemo-ocean.eu/>, note du 655 Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace No 27, 2015.
- Mattsson, T., 2010. Export of organic matter, sulfate and base cations from boreal headwater catchments downstream to the coast: impacts of land use and climate. *Monograph Boreal Environ Res*, 36, 1–45.
- Savchuck, O.P., Bo G. Gustafsson, Miguel Rodríguez Medina, Alexander V. Sokolov, Fredrik V. Wulff. External nutrient loads to the Baltic Sea, 1970-2006. (2012) Baltic Nest Institute, Technical Report No. 5.
- Seifert, T., Kayser, B., 1995. A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. *Meeresw Berichte (Marine science reports)* (9), 72–88.
- Siddorn, J.R., Furner, R., 2013. An analytical stretching function that combines the best attributes of geopotential and terrain-following vertical coordinates. *Ocean Modelling*, 66:113.
- Sokolov A., Andrejev, O., Wulff, F., Rodriguez Medina, M., 1997. The data assimilation system for data analysis in the Baltic Sea. Technical report, Stockholm University, Sweden.
- STRÅNG - a mesoscale model for solar radiation, <http://strang.smhi.se/>
- Ståhlberg, C., Bastviken, D., Svensson B.H., Rahm, L. 2006. Mineralisation of organic matter in coastal sediments at different frequency and duration of resuspension. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70: 317-325.
- Thamdrup, B., Hansen, B., W. and Barker, B. Jørgensen 1998 Temperature dependence of aerobic respiration in a coastal sediment. *Microbiology Ecology* 25, 189-200.
- Tuomi L., Miettunen E., Alenius P., Myrberg K., 2018. Evaluating hydrography, circulation and transport in a coastal archipelago using a high-resolution 3D hydrodynamic model. *Journal of Marine Systems*, 180, pp. 24–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.12.006>
- Vehviläinen, B., 1994. The watershed simulation and forecasting system in the National Board of Waters and the Environment. Publications of the Water and Environment Research Institute. National Board of Waters and the Environment, Finland No. 17.
- Westerlund, A., Tuomi, L., Alenius, P., Miettunen, E., Vankevich, R. E., 2018a. Attributing mean circulation patterns to physical phenomena in the Gulf of Finland. *Oceanologia* 60 (1), 16–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceano.2017.05.003>
- Westerlund, A., Tuomi, L., Alenius, P., Myrberg, K., Miettunen, E., Vankevich, R. E., Hordoir, R., 2018b. Circulation patterns in the Gulf of Finland from daily to seasonal time scales. (Käsikirjoitus lähetetty)
- Virtanen, E. 2015. Happimalli Suomen rannikkoalueille. VELMUn taustamuuttujamallinnus, SYKE.

LIITTEET

Liite 1. Opas vedenlaatumallijärjestelmän käyttöön

Käyttöliittymä on jaettu kuuteen sivuun (Kuva 1):

1. Mallitulosten tulosten tarkastelu ("Malliajojen tarkastelu")
2. Malliajojen hallinta ja siirto ajojonoon ("Listaa malliajot")
3. Uusien malliajojen määrittely ("Luo malliajo")
4. Kuormituspisteiden tarkastelu ("Kuormituspistelista")
5. Käytössä olevien VEMALA-ajojen listaus ("Vemala-skenaariolista")
6. Vesimuodostumen ekologinen tila ("Ekologinen tila")

Yksinkertaisimmillaan käyttäjä määrittelee uuden malliajon sivulla "3. Luo Malliajo", lähettää sen laskentaan sivun "2. Listaa malliajot" listasta ja malliajon valmistuttua tarkastelee tuloksia sivun "1. Malliajojen tarkastelu" kautta.

Halutessaan käyttäjä voi muokata käytettävien kuormituspisteiden joukkoa sivulla "4. Kuormituspistelista". Tämä on tapahduttava ennen kuin malliajoa on laitettu ajojonoon.

Käyttäjällä voi tarkastella listanäkymissä (sivut 2, 4 ja 5) malliajojen, kuormituspisteiden ja valuma-alueen VEMALA -kuormitusskenaarioiden taustatietoja. Malliajoissa ja kuormituspisteissä tämä tapahtuu ao. listalla osoittamalla ja klikkaamalla haluttua riviä (malliajo/kuormituspiste). VEMALAn skenaarioista FICOSin käyttöliittymän listalla näytetään vain yleistiedot, jotka on syötetty ao. skenaariota VEMALAn omassa käyttöliittymässä luotaessa.

Sivun "6. Ekologinen tila" kartalla näytetään SYKEN karttapalvelussa tallennettu vesimuodostumien ekologinen tila. Tämä tilaindeksi lasketaan muutaman vuoden välein.

The screenshot shows the VEMALA web application interface. At the top, there are navigation tabs: "Malliajojen tulokset", "Listaa malliajot", "Luo malliajo", "Kuormituspistelista", "VEMALA-skenaariolista", and "Ekologinen tila". Below the tabs, there are checkboxes for "Näytä vesimuodostumien rajat" and "Näytä kuormituspisteet". On the left, there is a map of the Baltic Sea region with a grid overlay. On the right, there is a table with the following columns: "Tunniste", "Ajon nimi", "Käynnistäjä", "Ajon päivämäärä", "Aikaväli", and "Vertailukepoisia malliajoja". The table contains several rows of data.

Tunniste	Ajon nimi	Käynnistäjä	Ajon päivämäärä	Aikaväli	Vertailukepoisia malliajoja
pi-36	Sis.kuorm.test...	jm	06.06.2018	01.01.2006 - 31.12.2007	2
pi-37	Elkämeri testiS...	jm	06.06.2018	01.01.2006 - 31.07.2009	1
pi-30	Elkämeri testiS	Janne R	06.06.2018	01.01.2006 - 31.07.2009	1
pi-27	Sis.kuorm.test...	Janne R	04.06.2018	01.01.2006 - 31.12.2007	2
pi-25	Sis.kuorm.test	Janne Ropponen	04.06.2018	01.01.2006 - 31.12.2007	2
pi-24	JM testiajo th...	jm	31.05.2018	01.01.2006 - 31.12.2006	1

Kuva 1. Käyttöliittymän aloitusnäky, Selkämeren malli.

Malliajon määrittely

Perustiedot

Uutta malliajoa määritettäessä ensimmäisessä vaiheessa annetaan mallin perustiedot (malliajon nimi ja käyttäjä) sekä valitaan käytettävä VEMALA -skenaario pudotusvalikosta (Kuva 2). VEMALA -skenaario määrittää malliajon mahdollisen aikavälin, joka valitaan seuraavaksi. Mallille voidaan antaa myös lyhyehkö kuvaileva teksti, joka auttaa erottelemaan malliajot.

Kuva 2. Malliajon perustietojen syöttäminen.

Laskenta-alueäärittelyt

Toisessa vaiheessa määritetään käytettävät laskenta-alueet eli tihennykset (Kuva 3). Tihennykset voidaan valita vesimuodostumakohtaisesti valitsemalla kartalta vesimuodostuma ja sen jälkeen pudotusvalikosta vastaava käytettävä tihennys.

Kuva 3. Laskenta-alueiden määrittäminen.

Kuormituspisteiden käsittely

Kolmannessa vaiheessa muokataan kuormituspisteitä (Kuva 4). Muokkaaminen tapahtuu valitsemalla kartalta muokattava piste. Sen jälkeen voidaan pisteen kuormitusta ja tyyppiä vaihtaa. Tarvittaessa voidaan myös syöttää hetkellinen ylimääräinen kuormitus. Kuormituspisteille määritellään peruskuormitus vuosikuormana [kg/vuosi] käyttäen muuttujina epäorgaanista typpeä ja fosforia sekä kokonais-typpeä ja -fosforia.

Mallilaskennassa käytetään päiväkuormitusta, ja vuosikuormitus jaetaan kuormituspisteen tyyppin mukaista jakaumaa käyttäen päiväkuormiksi. Mikäli käyttäjä haluaa käyttää omaa jakaumaansa kuormituksen jakoon, tapahtuu se määrittämällä uusi jakaumamalli, jolle annetaan kuukausittaiset prosenttiosuudet vuosikuormasta. Toistaiseksi jakaumamallin lisäämisen hoitaa järjestelmän ylläpitäjä. Hetkellinen kuormituspiikki määritetään päiväkuormana [kg/päivä] antamalla piikin alkupäivä ja kesto (annettu kuormitus lisätään joka päivälle).

Kuormituspisteet

Valittu Vemala-skenaario: Perusskenaario 1: 01.01.2000 - 31.12.2030

Lisää uusi piste
Muokkaa valittua pistettä - sm-442

<p>Pisteen tunnistus</p> <p>sm-442</p> <p>Pisteen nimi</p> <p>HEIMON KALA OY, YTTERSTO (442)</p> <p>Pisteen lisääjä</p> <p>Jonna Pilparinen</p> <p>Sijainti</p> <p>60,3111 ° leveyttä</p> <p>21,27768 ° pituutta</p> <p> Päivitä vanha piste Peruuta </p>	<p>Jakaumamalli:</p> <p>Kalankasvattamo_1</p> <table style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">DIN</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">DIP</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">TN</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">TP</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">2006</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">2006</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">2006</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">2006</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">2554.3</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">102.00</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">3274.8</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">408</td> </tr> </table>	DIN	DIP	TN	TP	2006	2006	2006	2006	2554.3	102.00	3274.8	408	<p style="text-align: right;">Peruuta</p> <p>kuormituspiikin aloituspäivä</p> <p>27-04-2006 📅</p> <p>piikin kesto päivinä</p> <p>10 📅</p> <p>DIN 📅</p> <p>DIP 📅</p> <p>TN 📅</p> <p>TP 10 📅</p>
DIN	DIP	TN	TP											
2006	2006	2006	2006											
2554.3	102.00	3274.8	408											

Kuva 4. Kuormituspisteen muokkaaminen.

Yhteenveto

Neljännessä vaiheessa tarkastetaan malliajon tiedot, ja jos ne ovat kunnossa, malliajo voidaan siirtää malliajolistalle (Kuva 5). Malliajolistalla uudet mallit voidaan siirtää järjestelmän ajojonoon (Kuva 6). Ennen kuin malliajoa on siirretty ajojonoon odottamaan suoritustaan, voidaan kuormituspistejoukkoa vielä muokata Kuormituspiste-lista-sivulla. Listalla valitaan ensin käsiteltävä malli ja sen jälkeen voidaan suorittaa tarpeelliset operaatiot (poistot palautukset; Kuva 7).

Kuvassa 8 on esitetty yhteenvetona kaavio malliajon toteuttamisesta.

Malliajojen tulokset Listaa malliajot Luo malliajo Kuormituspistelista VEMALA-skenaariolista Ekologinen tila

Ajon tiedot:

Ajon nimi: väritesti
 Aloituspäivä: 01.01.2006 00:00 +0200
 Vemala-skenaario: Perusskenaario 1
 Lopetuspäivä: 31.01.2006 00:00 +0200


Valitut vesialueet (5)
 Lisäytyt kuormituspisteet (0)
 Ei lisäytyjä pisteitä

TUNNISTE: Grid 0.25km Grid 1km Grid 2km Grid 4km
 Muokatut kuormituspisteet (1)
 [190000817 - Helsingin Kaupunkien Vesilaitokset]

Takaisin, muutan vielä jotain Kaikki on oikein. Siirrä uusi malliajo jonoon

Ei tallenneta

4 / 4



Kuva 5. Malliajon määrittelyn yhteenveto.

Malliajojen tulokset Listaa malliajot Luo malliajo Kuormituspistelista VEMALA-skenaariolista Ekol

Nimi	Käynnistäjä	pvm	Aikaväli	Tila	Suoritus aika	Laskenta-alueet	Toiminnot	ID
kimmo								
Kloro (fixed)	Kimmo Tikka	04.12.2017	01.01.2006 - 31.12.2013	ajo valmis	2,6 h	[0,424,95,46,97]	Kopioi Poista	sl-196
Kloro (kopio)	Kimmo Tikka	04.12.2017	01.01.2006 - 30.11.2013	ajo valmis	2,6 h	[277,424,95,46,94]	Kopioi Poista	sl-197
Tihennystesti_1/2018	Kimmo Tikka	18.01.2018	01.01.2006 - 30.04.2006	ajo valmis	12 min	[256,180,57,11,101]	Kopioi Poista	sl-243
Uusi malli	Kimmo Tikka	06.03.2018	01.05.2006 - 31.08.2006	uusi		[0,0,0,0,105]	Siirrä jonoon Kopioi Poista	sl-277

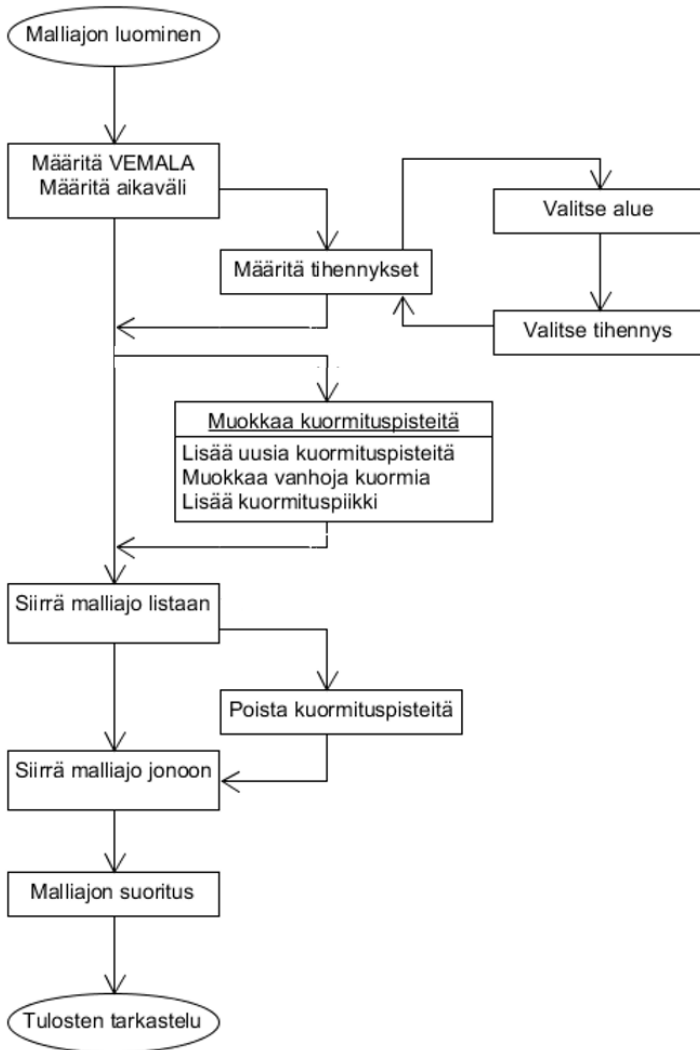
Kuva 6. Malliajolistanäkymä.

Malliajojen tulokset Listaa malliajot Luo malliajo Kuormituspistelista VEMALA-skenaariolista Ekologin

Uusi malli - muokattu kopio (kopio) Mallin id: sl-279/uusi Poista kaikki Palauta kaikki Vaihda kaikki Näytä poistetut

ID	Nimi	Tyyppi	Kuormitus	Latitudi	Longitudi	Status
hels						
190000817	Helsingin kaupunki, rakentamispalvelu. Stara, Viikin maanainesten välivarastointialue	jätteenkäsittely	4	60.22466	24.99932	alkuperäinen Poista
401	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Viikinmäen jätevedenpuhdistamo	jätevedenpuhdistamo	2	60.08786	24.91180	alkuperäinen Poista

Kuva 7. Kuormituspistejoukon käsittely.



Kuva 8. Kaavio uuden malliajon määrittelystä.

Malliajon tulosten tarkastelu

Malliajon tulosten tarkastelu tapahtuu 1. sivun kautta (Kuva 9). Aluksi käyttäjä valitsee tarkasteltavan malliajon listalta klikkaamalla malliajon riviä. Tämän jälkeen, kun on valittu tarkasteltavat alueet joko yksitellen tai aiemmin määritettyjä listoja käyttäen (pudotusvalikko) ja päätetty tarkastelunäkökulma (päivittäinen tai kk-keskiarvot) voidaan siirtyä varsinaiseen tulosten tarkasteluun.

Tuloksien tarkastelussa kartalla näytetään yhden päivän yhden muuttujan hetkellinen tilanne. Tarkasteltava päivä valitaan kalenterivalinnasta ja tarkasteltava muuttuja pudotusvalikosta (Kuva 10).

Aikasarja-näkymässä voidaan tarkastella koko ajanjakson aikasarjaa (Kuva 11). Aikasarjatarkasteluun tulevat alueet valitaan kartalta klikkaamalla. Kartalla on käytössä normaali zoomaustoiminto. Aikasarja-kaaviossa näytetään oletuksena koko malliajon aika. Tarkasteltavaa ajanjaksoa voidaan lyhentää (ja siirtää) käyttäen kaavion alapuolella olevaa aikajanaa.

Yhteenvedo tulosten tarkastelusta on esitetty myös kaaviona (Kuva 11).

Malliajojen tulokset Listaa malliajot Luo malliajo Kuormituspistelista VEMALA-skenaariolista Ekologinen tila

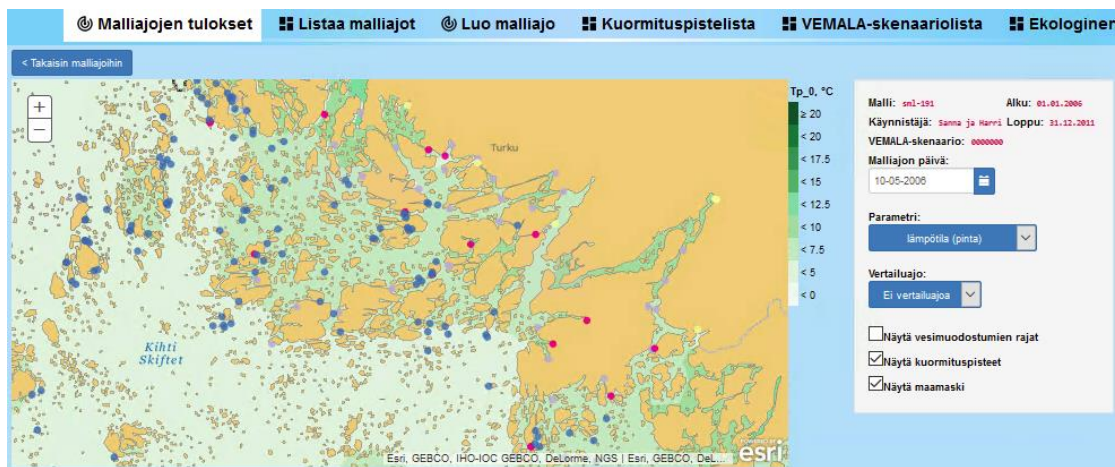
Ajon nimi	Käynnistäjä	Aika	Vertailukelpoisia malliajoja	Kuvaus	Tunniste
Perusajo	Janne Ropponen	12.06.2018	0	-	si-372
Esimerkkiajo 2018-07-06 (kopio) (kopio)	jrn	07.06.2018	1	Esimerkkiajo ko...	si-371
Violatti ja edusta	Jouni Törnönen	07.06.2018	0	Violahden kala...	si-369
Esimerkkiajo 2018-07-06 (kopio)	Janne Mäyrä	07.06.2018	1	Esimerkkiajo ko...	si-365
eGOF testiajo idässä	Jouni Törnönen	07.06.2018	0	Testausta Kymi...	si-363

1 2

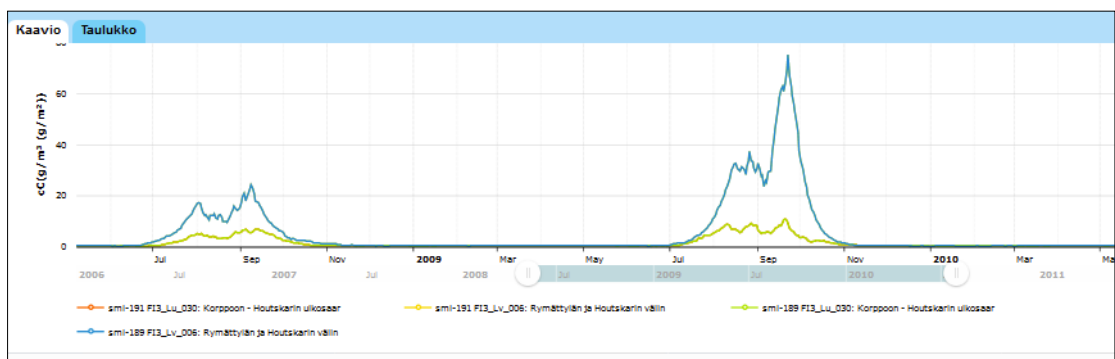
Näytä vesimuodostumien rajat Näytä kuormituspisteet

laskenta-alueet Tyhjennä valinnat Tarkastele päivittäisiä arvoja Tarkastele kuukausittaisia arvoja

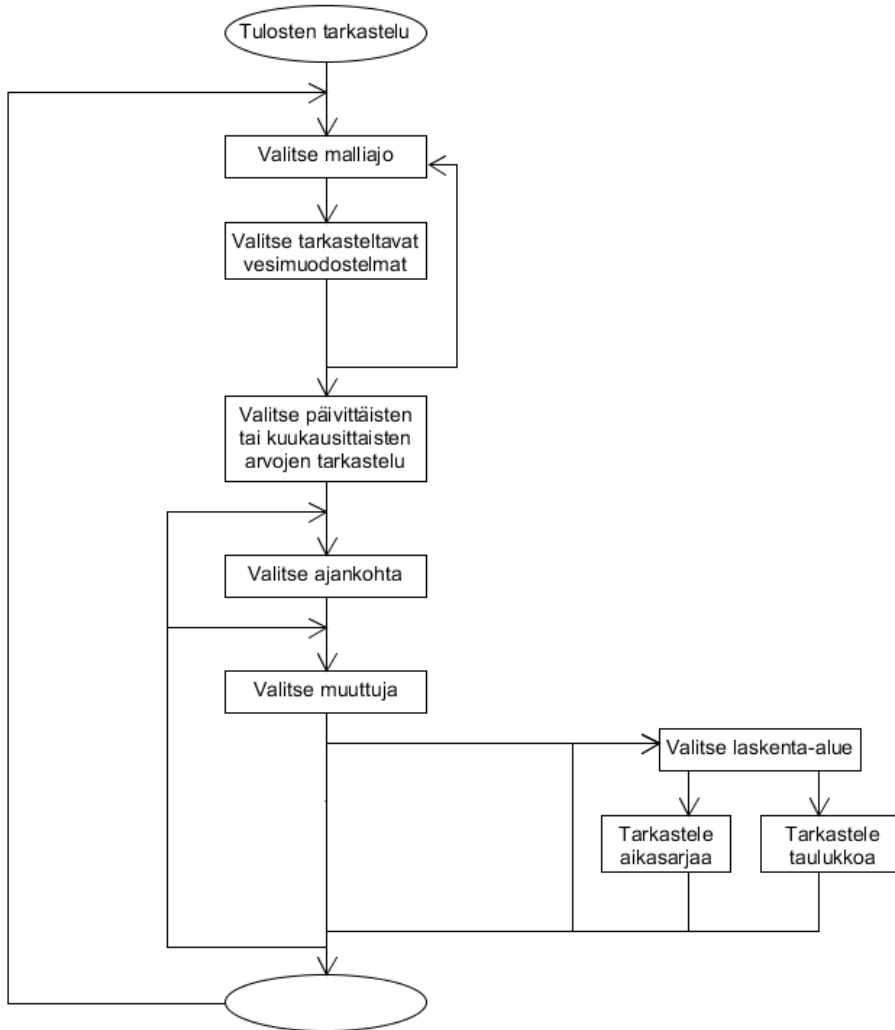
Kuva 9. Mallitulosten tarkastelu.



Kuva 10. Mallitulokset karttanäkymässä.



Kuva 11. Mallitulokset aikasarjana.



Kuva 12. Kaavio malliajon tulosten tarkastelusta.

Malliajojen vertailu

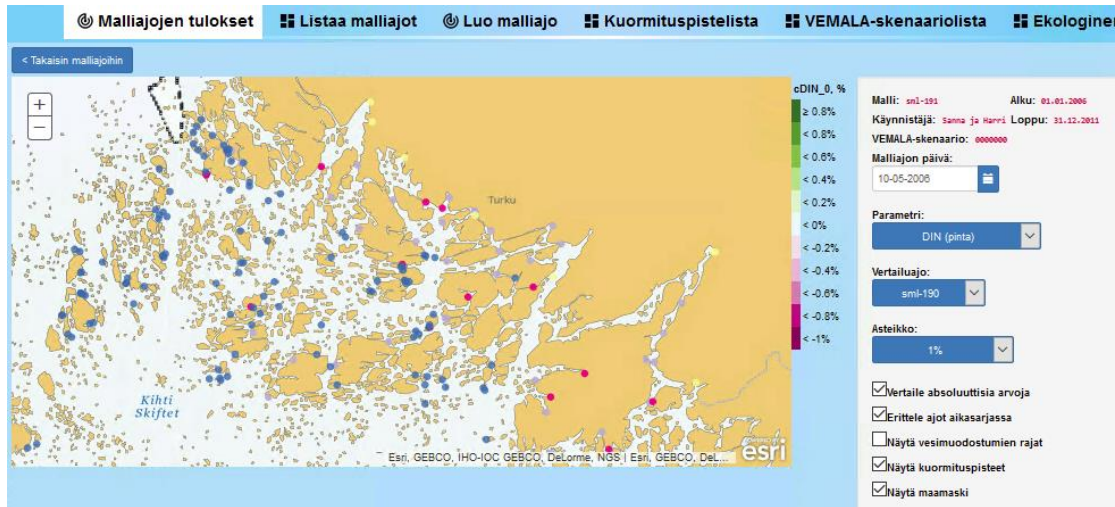
Vertailukelpoisia malliajoja voidaan määrittellä ”Listaa Malliajot”-sivun kopioi-toiminnolla. Järjestelmässä on mahdollista vertailla kahden malliajon tuloksia keskenään. Malliajot ovat vertailukelpoisia mikäli

1. ajot on tehty samalla malliversiolla (käyttäjä ei voi vaikuttaa);
2. tulokset on laskettu käyttäen samoja laskenta-alueita (tihennyksiä); ja
3. malliajon aikaväli on sama.

Kopioi -toiminta tekee malliajon määrittelyistä kopion (uuden malliajon), joita voi muokata. Kopioon on syötettävä vähintään malliajon määrittelijän nimi. Vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi on laskenta-aika ja laskenta-alueet pidettävä samoina. Muuttaa voidaan VEMALA –skenaarion valintaa ja kuormituspisteiden tietoja.

Mallivertailussa kartalla näytetään aina mallien välinen ero osuuksina (skaalaus valinnan mukaan pudotusvalikosta; Kuva 13). Aikasarjaverailuun esitettäväksi voidaan valita myös absoluuttiset

arvot. Aikasarjassa voidaan myös esittää sekä malliajajen ero että kummankin malliajajon aikasarjat erikseen.



Kuva 13. Mallitulosten vertailu.

VEMALA -skenaariolista

VEMALA -skenaarioiden määrittely ja laskenta tapahtuu VEMALAn oman laskentajärjestelmän avulla. Vedenlaatumallin käyttöliittymään tuodaan vain perustiedot (Kuva 14). Laskentapalvelin hakee skenaarion tulokset suoraan VEMALA -palvelimelta. Perustietojen päivytystä varten on VEMALA -sivulla painike, jota painamalla järjestelmä hakee perustiedot uudelleen.

Nimi	Alkupvm	Loppupvm	Kuvaus	Tallentaja	ID
Perusskenaario 1	01.01.2000	31.12.2030	Nykytoimenpiteet. Ilmastoskenaario A1B.	Markus Huttunen / 29.09.2015	0000000
Perusskenaario 2	01.01.2000	31.12.2030	Nykytoimenpiteet. Ilmastoskenaario RCA3-EA1B.	Markus Huttunen / 29.09.2015	0000001
Perusskenaario 3	01.01.2000	31.12.2030	Nykytoimenpiteet. Ilmastoskenaario REMO-EA1B.	Markus Huttunen / 29.09.2015	0000002
Perusskenaario 4	01.01.2000	31.12.2030	Nykytoimenpiteet. Ilmastoskenaario RCA3-HA1B.	Markus Huttunen / 29.09.2015	0000003
Perusskenaario 5	01.01.2000	31.12.2030	Nykytoimenpiteet. Ilmastoskenaario HadRMHA1B.	Markus Huttunen / 29.09.2015	0000004

Kuva 14. VEMALA skenaariot.

Liite 2. Menetelmä sedimentin prosesseissa veteen vapautuvan fosforin määrän arvioimiseksi

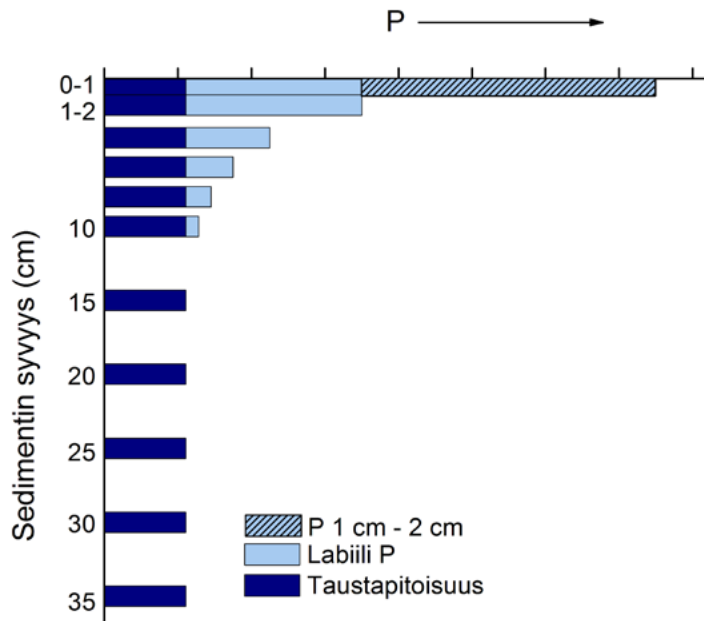
Arvio sedimentin prosesseissa ajan myötä veteen vapautuvan fosforin määrästä perustuu havaintoaineiston sekventiaalisella uutolla (Lukkari ym. 2008) määritetyn sedimentin fosforifraktiodatan (SEABED -hanke) pohjalta laskettuun ns. potentiaalisesti mobiiliin fosforin määrään sedimentin pinnassa. Tämä on pääosin rautaan sitoutunutta (Fe-P) ja labiilia orgaanista (OP) fosforia. Fosforin sekventiaaliseen uuttoon liittyy aina menetelmästä aiheutuvaa epätarkkuutta: uutto laboratorioissa antaa tulokseksi hieman suuremman pitoisuuden, kuin mitä sedimentistä luonnossa vapautuu. Toisaalta potentiaalisesti mobiilista fosforista osa voi prosesseissa muuttua pysyvään muotoon, tai muuten hautautua pysyvästi sedimenttiin.

Mahdollisesti vapautuvan fosforin määrän arvion tarkentamiseksi sedimentin pintakerroksessa ko. fraktioille määritettiin näyteasemakohtainen taustapitoisuus, eli arvio sedimenttiin pysyvästi hautautuvasta määrästä (Kuva 1). Taustapitoisuus valittiin syvyydeltä 10 cm, koska tämän alapuolella syvyysuuntaiset pitoisuusvaihtelut yleensä tasaantuvat akkumulaatiopohjilla (pehmeillä, orgaanispitoisten partikkeleiden kerrostumisalueilla). Niillä asemilla, joilla fosforin fraktiointituloksia ei ollut käytettävissä 10 cm:n alapuolelta, käytettiin taustapitoisuuksina akkumulaatiopohjien keskimääräisiä Fe-P ja OP-fraktioiden pitoisuuksia yli 10 cm:n syvyydellä. Pintasedimentin irtotiheyden (g cm^{-3}), vesipitoisuuden ja hehikutushäviön avulla (Håkanson & Jansson 1983) muutettiin labiiliin Fe-P:n ja OP:n pitoisuudet sedimentin pintakerroksessa yksikköön $\mu\text{g P cm}^{-3}$. Asemakohtaiset Fe-P- ja OP-pitoisuudet interpoloitiin koko mallialueelle eri pohjatyypin mukaan käyttäen pohjatietona Balance -sedimenttikartan tietoja ja SEABED-hankkeessa tehtyjä merenpohjan kaikuluotauksia sekä sedimentinäytteiden luokitteluja (al-Hamdani et al. 2007, Puttonen et al. 2014; Kuva 6.3.1).

Reaktiivisen, fosforia veteen vapauttavan sedimentin pintakerroksen paksuudeksi koko mallialueella arvioitiin keskimäärin 1 cm. Tällä tarkoitetaan sitä, että noin yhden senttimetrin paksuisen kerroksen sisältämä labiili fosfori voisi olosuhteiden salliessa vapautua yhden vuoden aikana. Oletus on karkea ja perustuu kirjallisuudesta saataviin arvoihin sedimentin kerrostumisnopeudesta (Nordmyr 2002, Mattila et al. 2006). Sedimentaationopeuksia eri alueilla ei tunneta, mutta tiedetään, että ne vaihtelevat paljon mallialueen sisällä ja voivat olla noin nollassa jopa noin 3 cm:iin vuodessa.

Sedimentin 1 cm pintakerroksen sisältämästä labiilista fosforista (Fe-P ja OP) vuoden aikana vapautuvaa osuutta arvioitiin vähentämällä ko. kerroksen potentiaalisesti labiilien Fe-P:n ja OP:n varannoista sen alapuolella, 1-2 cm:n syvyydellä, olevat vastaavat pitoisuudet (Kuva 1). Näin laskien pintakerroksen labiilista Fe-P:sta vapautuisi keskimäärin 55 % ja labiilista OP:sta keskimäärin 30 % yhden vuoden aikana. Asemakohtaiset Fe-P ja OP pitoisuudet interpoloitiin koko mallialueelle sedimenttityypeittäin siten, että pehmeiltä orgaanispitoisilta pohjilta mitatut fosforipitoisuudet ekstrapoloitiin sedimenttikartan (Kuvat 6.3.2 ja 6.3.3) ja pohjatietojen perusteella koko mallialueen pehmeille, orgaanispitoisille pohjille.

Rautaan sitoutunut fosfori voi vapautua verraten nopeasti hapettomissa olosuhteissa, joten Fe-P:n vapautumista tarkennettiin lisäksi (ajoittain) hapettomien pohjien osalta. Tämä tehtiin taustaineistosta (pääosin seuranta- ja velvoitetarkkailuaineistoista ja VELMU-hankkeesta (Virtanen 2015)) saatujen happitietojen pohjalta tehdyn mallialueen pohjan happiolosuhteiden luokituksen avulla. Happiluokitustieto yleistettiin tunnetuilta alueilta IDW-interpolaatiolla koko mallialueelle käyttäen apuna sedimentin laatutietoja ja muita pohjatietoja.



Kuva 1. Kaavakuva fosforipitoisuudesta sedimentissä. Potentiaalisesti mobiilin fosforin taustapitoisuutena vähennettiin keskimääräinen orgaanisen P:n (OP) ja rautaan sitoutuneen P:n (Fe-P) pitoisuus yli 10 cm:n syvyydellä. Vuoden aikana vapautuvaksi määräksi arvioitiin sedimentin pintakerroksen (0–1 cm) ja syvyydeltä 1–2 cm uutetun fosforipitoisuuden keskimääräinen erotus.

Mallialueen pohjien luokittelu fosforin vapautumisherkkyyden suhteen

Pohjatyypin kartoituksessa mallialueen sedimentit luokiteltiin havaintoaineiston ja käytettävissä olevien sedimenttikarttojen perusteella neljään luokkaan sen mukaan, missä määrin niiden voidaan olettaa aiheuttavan sisäistä fosforikuormitusta (esim. kallio ja karkea hiekka tai sorapohja vs. orgaanispitoinen mutapohja). Lisäksi pohjat luokiteltiin potentiaalisesti mobiilin fosforin (Fe-P ja OP), huonoissa happioloissa pelkistyvään rautaan sitoutuneen fosforin (Fe-P), labiilin orgaanisen fosforin (OP), orgaanisen aineksen määrää heijastelevan sedimentin hehikutushäviön (LOI) ja pohjaveden happipitoisuuden mukaan ja kaikkien em. muuttujien luokat ekstrapoloitiin koko mallialueelle ja tarkasteltiin niiden alueellista jakautumista. Tätä havainnollistettiin visuaalisesti päällekkäisten rasterointien kartalla, joka osoittaa näiden fosforin vapautumiseen olennaisesti vaikuttavien tekijöiden yhtäaikaisen vaihtelun ja samalla rajaa uusia muuttujien luokkakombinaatioita, jotka puolestaan voidaan luokitella toisistaan olosuhteiltaan ja siten fosforin vapautumisherkkyytensä osalta eroaviksi aluetyypeiksi.

Esimerkiksi alue, jossa on paljon rautaan sitoutunutta fosforia, ja joka sijaitsee alueella, jossa on esiintynyt ajoittain hapettomuutta, edustaa aluetta, josta happitilanteen huonontuessa voi vapautua lyhyellä aikavälillä paljon fosforia sen rautaan sitoutuneesta muodosta. Toisaalta jollakin alueella voi olla paljon rautaan sitoutunutta fosforia, mutta jos se sijaitsee aina hapellisena pysyvällä alueella, rautaan sitoutuneen fosforin vapautumisherkkyyks on pienempi. Toisaalta taas alue, jossa on paljon orgaanista fosforia ja orgaanista ainesta, vapauttaa todennäköisesti vähitellen fosforia sekä hapellisissa että hapettomissa oloissa mineralisaation seurauksena, mutta hapellisena pysyvällä alueella suurempi osa tästä mineralisaatioissa vapautuneesta fosforista voi sitoutua sedimenttiin.

Kaikille mallialueella esiintyville erilaisille luokkakombinaatioille laskettiin ensin potentiaalisesti vapautuvan fosforin (Fe-P ja OP) minimi- ja maksimiarvot vesimuodostumakohtaisesti ja jokaiselle hilapisteelle erikseen valitsemalla kartalta kunkin vesimuodostuman alueella ja hilapisteen kohdalla vallitsevana esiintyvä luokkakombinaatio.

Seuraavaksi arvioita sedimentistä vapautuvan fosforin määrästä tarkennettiin vielä asteittain lisäämällä rajausehtoja eri kriteerein, jotka liittyvät sedimentin fosforin esiintymismuotoihin, sedimentin muihin ominaisuuksiin ja kyseisellä alueella vallitseviin olosuhteisiin. Fosforia ei vapaudu merenpohjasta tasaisesti kautta vuoden, vaan pohjalla vallitsevat olosuhteet vaikuttavat vapautumisen intensiteettiin. Hapen puute kiihdyttää etenkin rautaan sitoutuneen, mutta myös labiilin orgaanisen fosforin vapautumista mineralisaation kiihtyessä. Pohjanläheisen veden happipitoisuus alenee Saaristomerellä tyypillisesti loppukesää kohti, kun kevään levätuotannosta pohjaan vajoavan orgaanisen aineksen hajotus kuluttaa happea pohjanläheisestä vedestä. Vesipatsaan voimakas lämpötilakerrostuneisuus estää hapekkaan pintaveden pääsyn pohjalle ja hajotustoiminnan seurauksena happi kuluu joillakin alueilla loppuun pohjanläheisestä vedestä ja sedimentin pinnasta.

Liite 3. Mallilyhenteet ja niiden selitykset

COHERENS ja NEMO: Vedenlaatumallin tarvitsemat lämpötila- ja virtauskentät tuotetaan kolmiulotteisella (3D) hydrodynaamisella merimallilla. Hydrodynamiikan mallinnukseen käytettiin Saaristomerellä COHERENS -mallia (Luyten, 2013), joka on kehitetty rannikkoalueiden ja reunamerien mallinnukseen. Tämä mallimme sisältää hienohilaisen (0.5 km) Saaristomerren mallin kytkettynä karkeampaan (3.7 km hila) koko Itämeren malliin. Suomenlahdelle ja Selkämerelle siirryttiin käyttämään vastaavaa NEMO –mallia (V3.6; Madec & NEMO team, 2015), jotta pystytään tehokkaammin hyödyntämään IL:ssä ja muualla Itämerellä tehtävää mallikehitystyötä.

FICOS (Finnish COaStal nutrient load model): SEABED –hankkeen (ÅA, KHT) taannoin Saaristomerelle soveltaman vedenlaatumoduulin pohjalta tämän hankkeen tarpeisiin kehitetty mallijärjestelmä rannikon eri ravinnekuormituslähteiden tuottaman rehevöitymisvasteen arviointiin (kokonais- ja epäorgaaniset ravinteet (N ja P) sekä leväbiomassa (N₂-sitovat sinilevät ja muut levät) ja *a*-klorofylli; kts. Kuva 2.2). FICOS hyödyntää 3D hydrodynaamisen merimallinnuksen lämpötila-, suolaisuus- ja virtausdataa, ja se kytkee rannikon eri ravinnesyötteen (valuma-alue, ilmalaskeuma, ulappa, sedimentit ja pistekuormitus) vesipatsaan biogeokemialliseen (ravinnekierto-)malliin (Kuva 6.5.1; Tyrrell 1999, Kiirikki ym. 2001); ravinnekiertomalli on puolestaan formuloitu ja parametrisoitu hankkeessa tarpeellisilta osin uudelleen realististen rehevöitymisvasteiden tuottamiseksi (vrt. Lignell ym. 2013).

SEABED: Aiemmassa hankkeessa (SEABED) Saaristomerelle sovellettu vedenlaatumoduuli, jonka ravinnekiertomallin muuttujina ovat kokonais- ja epäorgaaniset ravinteet (N ja P) sekä leväbiomassa ja *a*-klorofylli.

VEMALA: Vesistömallijärjestelmän vedenlaatuosio. Koko Suomen kattava järjestelmä, joka kuvaa ravinnekuormitusta vesistöihin, kuormituksen kulkeutumista ja pidättymistä vesistöissä ja kuormitusta mereen. VEMALA v3 versio sisältää kokonaisravinteiden lisäksi ravinnejakeet typelle ja fosforille.

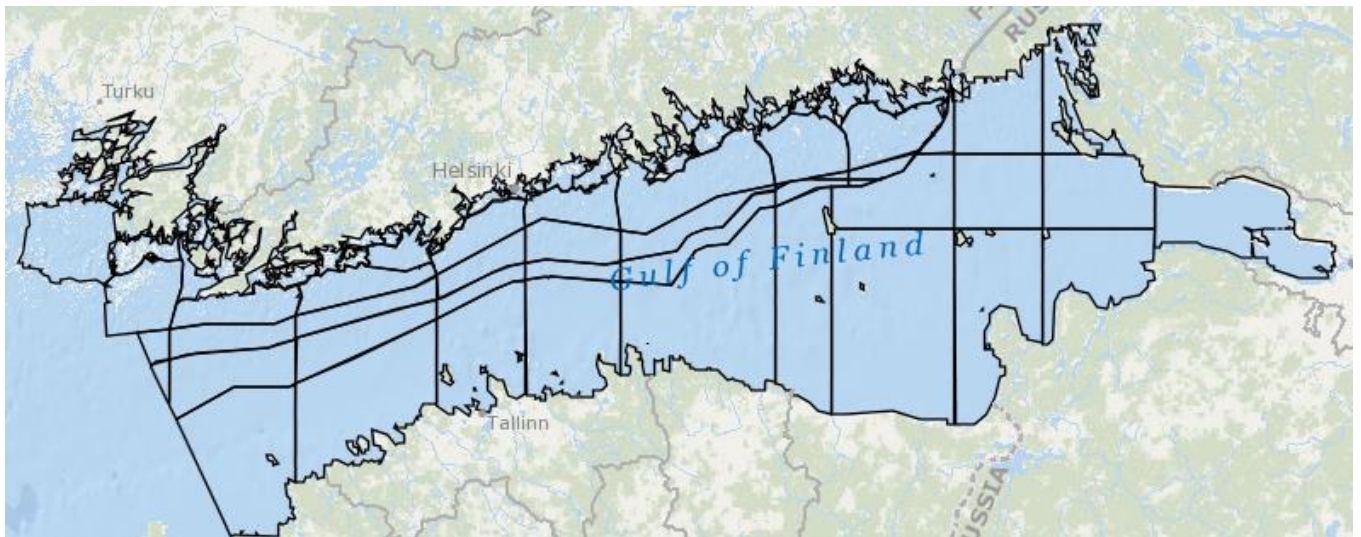
ICECREAM: Peltojen ravinnekuormitusta kuvaava malli. ICECREAM on dynaaminen peltolohkokohtainen malli, joka kuvaa ravinnekuormitusta peltolohkon ominaispiirteiden ja viljelytoimenpiteiden perusteella.

Liite 4. FICOS -mallijärjestelmän toiminta

Vedenlaatumoduuli, FICOS toimii yhden vuorokauden aika-askeleella eli sekä mallin syöttötiedot että sen tuottamat suureet ilmoitetaan vuorokauden keskiarvotuloksina. Vesipatsas jaetaan mallinnuksessa kahteen kerrokseen: 10 m syvyiseen pintakerrokseen ja loput vesipatsaasta kattavaan syväkerrokseen. Koska merimallin tuottamat virtaus-, lämpötila- ja suolaisuustiedot on laskettu huomattavasti suuremmalla kerrosmäärällä, keskiarvoistetaan merimallin tulokset pystysuunnassa vedenlaatumoduulin käyttämään kahden kerroksen jakoon. Mikäli laskenta-alue on hyvin matala tai pohjakerroksen tilavuus verrattuna pinta-kerroksen tilavuuteen jäisi hyvin pieneksi, malli käyttää laskennassa pelkästään yhtä kerrosta.

FICOSin alueellinen tarkkuus on parhaimmillaan sama kuin merimallin resoluutio eli 0,25 merimailia Suomenlahdella ja Saaristomerellä ja 1 merimaili Selkämerellä.

Oletusmallinnustarkkuus on kuitenkin huomattavasti karkeampi ja noudattaa EU:n vesipuitedirektiivin mukaan rannikon läheisyydessä määriteltyjä vesimuodostumarajoja, ja kauempana rannikosta niitä mukailevia laajempia rajoja (esimerkki tästä Kuvassa 1). Mallinnusjärjestelmän käyttäjä voi joustavasti valita oletusmallinnustarkkuutta tarkemman laskentatarkkuuden haluamilleen alueille. Vedenlaatumalli keskiarvoistaa tarvittaessa automaattisesti merimallin tuottaman lämpötila-, suolaisuus- ja pinnankorkeussyötteen vastaamaan alueellista mallinnustarkkuutta. Laskentayksiköiden välisillä rajoilla käytetään merimallin tuottamaa virtaustietoa sellaisenaan, jotta alueiden välinen vedenvaihto tulee huomioitua mahdollisimman realistisesti. Mallinnustarkkuutta kasvatettaessa myös mallin ajamiseen tarvittava aika kasvaa merkittävästi. sekä empiiristen aineistojen pohjalta arvioidut Vesimuodostumat ovat mallin peruslaskentayksikköinä, mutta tiheennetyt mallinnusalueet soveltuvat hyvin esimerkiksi kulkeutumiseen liittyvien ilmiöiden ja topografialtaan kompleksisten alueiden lähempään tarkasteluun.



Kuva 1. Oletusmallinnusrajaukset Suomenlahdella. Lähellä Suomen rannikkoa rajaukset noudattavat vesimuodostumarajoja. Jokainen rajaus voidaan toisistaan riippumatta tiheittää laskettavaksi tarkemmalla resoluutiolla aina merimallin resoluutioon asti.

Vedenlaatumoduulilla simuloitava ajallinen jakso perustuu syöttötietojen kattamaan yhteiseen jaksoon. Tarvittavat yhteiset syöttötiedot ovat olemassa Suomenlahdelle vuosille 2006—2013, Selkämerelle vuosille 2006—2012 ja Saaristomerelle vuosille 2006—2011 (osittaiset tiedot 2014 asti). Mallinnusjaksoja on mahdollista pidentää tulevaisuudessa keräämällä tarvittavat lähtötiedot. Koska käytettävät syöttötiedot perustuvat todellisiin sää- ja kuormitustietoihin, ovat

mallinnusvuodet luonnostaan toisistaan eroavia. Esimerkiksi kuormitusmuutosten vaikutusten arvioinnissa mallin tuottamia tuloksia kannattaakin tarkastella usean eri vuoden jaksoilla, jolloin nähdään mallin vaste erilaisissa, luonnollisesti vaihtelevissa ympäristön olosuhteissa.

Kuormitustietojen, reunaehtojen ja säteilysyötteen käsittely

Ravinteiden kuormitustiedot syötetään FICOSiin päivittäisinä kuormituksina laskentayksiköittäin joko pinta- tai pohjakerrokseen kuormitustyypin mukaan. Jokainen laskentayksikkö sisältää osuuden sisäisestä kuormituksesta ja ilmakehäkuormituksesta. Sisäinen kuormitus jaetaan pinta- tai pohjakerrokseen syvyyksien perusteella siten, että laskentayksikköön kuuluvien alle 10 m syvien alueiden osuus sisäisestä kuormituksesta sijoitetaan pintakerrokseen ja sitä syvempien alueiden osuus syvävesikerrokseen. Lisäksi sisäisen kuormituksen osuus vaihtelee kuukausittain. Ilmakehäkuormitus sijoitetaan pintakerrokseen ja se vaihtelee ajallisesti, mutta sen osuus ei vaihtele laskentayksiköittäin. Jokaisella mallinnusalueella (Suomenlahti, Saaristomeri, Selkämeri) on käytössä oma Baltic Nest Institutessa (BNI) BALTSEM-mallia varten koostettu arvio ilmakehästä tulevalle kuormitukselle (Savchuck ym. 2012). Ilmakehäkuormituksen taso ja vuodenaikaisvaihtelut perustuvat vuoden 2006 aineistoihin, jolloin ne samalla ovat vertailukelpoisia käyttämäämme BNI:n dataan.

Valuma-aluekuormitus otetaan huomioon mallissa VEMALA -järjestelmän tuottamien päivittäisten ravinnekuormitustietojen perusteella. Kuormitustietoja on jokien lisäksi sadoista muista pisteistä, jotka sijaitsevat rannikolla ja saaristossa. VEMALAN laskemat kuormat sijoitetaan koordinaattien perusteella vedenlaatumalliin oikean laskentayksikön pintakerrokseen. Erilaisia VEMALA -skenaarioita on mallinnusjärjestelmän käyttäjän valittavissa useita.

Avomerellä vedenlaatumalli käyttää ravinne- ja leväbiomassapakotteina intensiiviasemien ja luotauslinjojen perusteella muodostettuja reunaehtoja (kts. 6.2). Varsinaiselta mallinnusalueelta virtaa ravinteita reunojen yli pois ja vastaavasti reunan yli tulee mallialueelle reunaehdon määrittelemä ravinnemäärä. Vedenvaihdon määrä määräytyy tässäkin merimallin laskemien virtaustietojen perusteella. Reunaehdot on määritelty erikseen pintakerrokselle ja syvän veden kerrokselle.

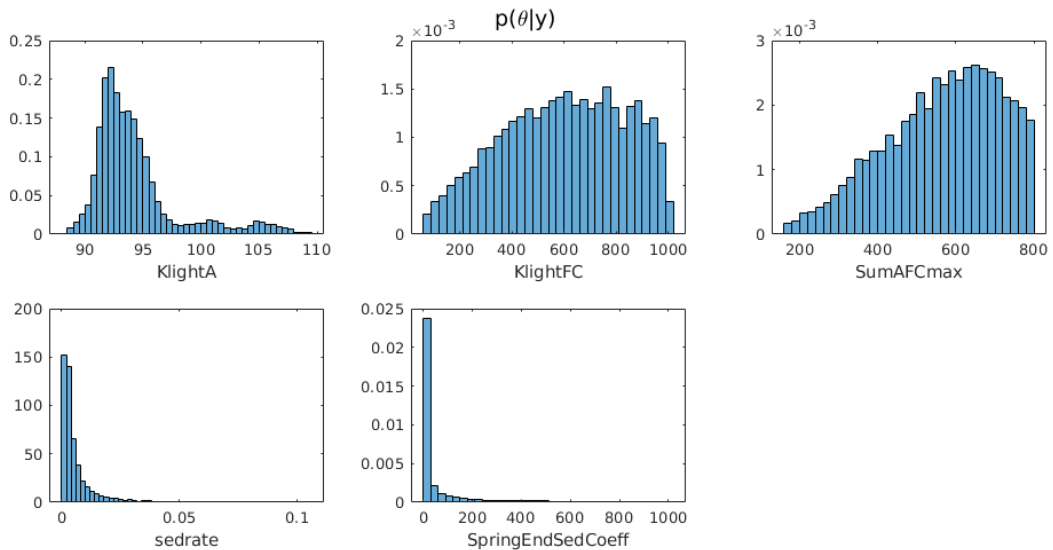
FICOS tarvitsee levän kasvun mallinnusta varten myös tiedot alueen globaalista (auringon) säteilystä. Tätä varten tiedot on haettu SMHI:n STRÅNG-mallista (<http://strang.smhi.se/>) kullekin mallinnusalueelle erikseen yhden vuorokauden keskiarvoina. Vedenlaatumalli käyttää mallinnusalueen keskeltä valitun pisteen säteilyarvoja edustamaan koko mallinnusalueetta.

Liite 5. Mallin parametrisointi ja bayeslainen epävarmuusanalyysi

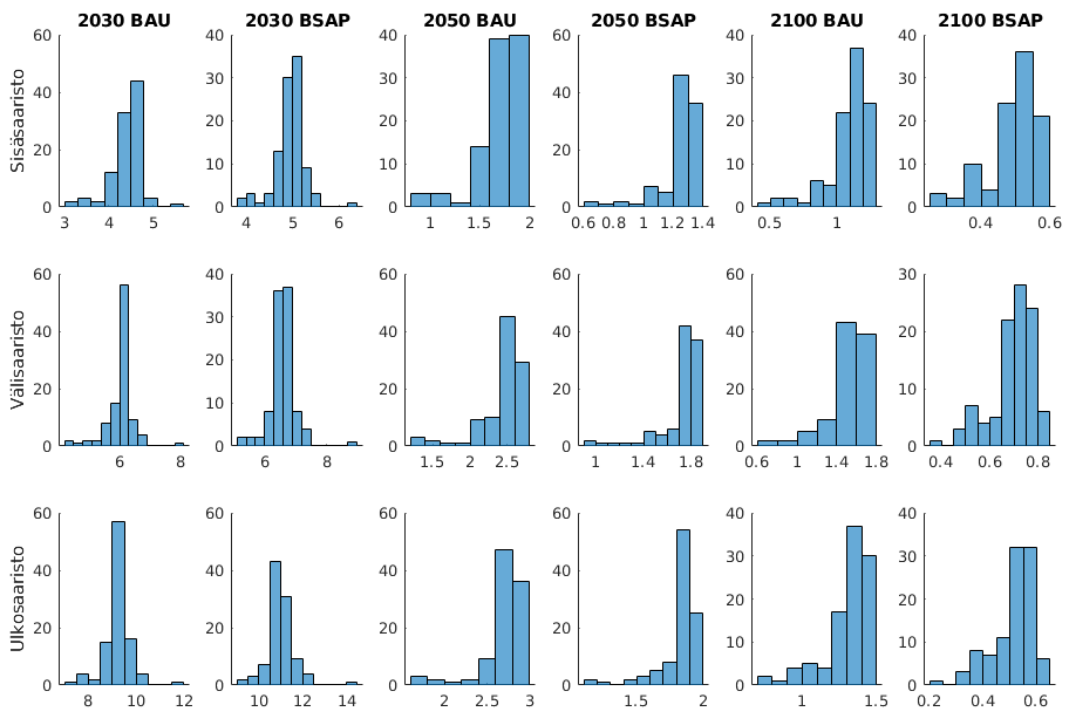
Mutkikkaiden mallien epävarmuusanalyysijä tarvitaan, jotta voidaan arvioida mallien pohjalta tehtävän vesienhoidollisen päätöksenteon ja panostuksen riskejä sekä kytkeä mallituloksia sosioekonomisiin, politiikka- ym. analyysihin. Nykyisiin Itämerellä käytössä oleviin ekosysteemimalleihin ei sisälly riittävän laadukkaita, modernit tilastomatemattiset kriteerit täyttäviä epävarmuustarkasteluja. Tämä vähentää merkittävästi näiden mallien kykyä vastata kvantitatiivisiin, todellisen luonnon ekosysteemin toimintaa ja sen ihmisperäisten kuormitusten ja paineiden vasteita koskeviin viranomaiskysymyksiin.

Parametrien epävarmuustarkastelu pohjautuu tilastolliseen bayesilaiseen menetelmään, jossa FICOS -mallin simuloimaa vedenlaatua verrataan mitattuun vedenlaatuaineistoon. Nämä analyysit operoivat parametrien *todennäköisyysjakaumilla* (piste-estimaattien ja niiden vaihteluvälin sijasta), mikä mahdollistaa modernien, tehokkaimpien tilastollisten menetelmien soveltamisen. Lopputuloksena analyysistä saadaan kullekin mallin parametrille *posteriorijakauma*, joka kuvaa kyseisen parametrin lukuarvoon liittyvää epävarmuutta. Kuvassa 1 on esitetty epävarmuustarkasteluun otettujen viiden tuntemattoman parametrin posteriorijakaumat. Parametreihin liittyvä epävarmuus voidaan ottaa huomioon FICOS -mallilla tehtävissä skenaarioennusteissa painottamalla mallin ennusteita parametrien *posteriori*-todennäköisyydellä. Tätä on havainnollistettu Kuvassa 2, jossa on kuvattu epävarmuus FICOS -mallin ennusteissa. Kuvassa esitetty posteriorijakauma kuvaa ainoastaan sitä ennuste-epävarmuutta, joka johtuu FICOS -mallin parametrien lukuarvojen epävarmuudesta (Kuva 1).

Teknisesti mallin simulaation ja kalibrointiaineiston vertailu tehdään seuraavasti. Ensimmäisenä määrittelimme mallin parametreille nk. *priori* -jakaumat, jotka kuvaavat niihin liittyvää ennakkotietoa (teoreettiset ja mitatut arvot ja niiden vaihteluväli). Tämän jälkeen määrittelimme tilastollisen mallin FICOS -mallin tuottaman simulaation (ennusteen) ja kalibrointiaineiston erolle, eli *mallivirheelle*. Tässä työssä käytimme Gaussin jakaumaa, joka vastaa oletusta, että FICOS -mallin ennusteiden ja kalibrointiaineiston välillä on satunnaista kohinaa mutta ei systemaattista virhettä. Tämän satunnaisen kohinan voidaan tulkita johtuvan monesta riippumattomasta virhelähteestä, kuten esimerkiksi mittauksiin liittyvästä kohinasta ja FICOS -mallin ja mittausdatan alueellisen kattavuuden eroista. Kalibrointiaineisto koostuu pistemittauksista kun taas malli kuvaa alueellisia keskiarvoja. Tästä syystä eroa mallin ja mittauksen välille tulee jo siitä, miten hyvin pistemittaukset kuvaavat alueellisia keskiarvoja. Riippumaton Gaussin jakauma on yksinkertaistus, joka ei kaikilta osin vastaa riittävän hyvin oletuksia FICOS -mallin ja kalibrointiaineiston välisistä eroista. Se ei esimerkiksi huomioi mahdollisia systemaattisia mallivirheitä tai temporaalista autokorrelaatiota mittauskohinassa. Helsingin yliopiston rahoittamassa jatkohankkeessamme keskitymme mallivirheen kehittämiseen realistisemmaksi vuosien 2018-2019 aikana.



Kuva 1. FICOS –mallin simulaatioajoista estimoidut tuntemattomien parametrien posteriorijakaumat. Histogrammit kuvaavat posteriorijakaumasta otettujen satunnaisten parametriarvojen jakaumaa. FICOS -mallin simulointitulokset vastaa sitä paremmin kalibrointiaineistoa ja parametreista olevaa prioritietoa mitä suurempi posteriorijakauman tiheys (histogrammin korkeus) on. Selitykset: KlightFC ja KlightA = sinilevien ja muiden levien valorajoitteisuuden puolikyllästysvakiot, SumAFCmax = itse-varjostuksen maksimibiomassa (systemin kantokyky), sedrate = sedimentaationopeus, SpringEndSedCoeff = kevätukinnan lopun laskeutumisenopeus.



Kuva 2. Muutos Saaristomeren keskimääräisessä klorofyllipitoisuudessa loppukesällä (1.7.-7.9) eri tulevaisuusskenaarioilla, v. 2030-2100. Joko nykytoimenpiteet jatkuvat (BAU) tai BSAP -tavoitteet toteutetaan kaikissa Itämeren valtioissa

Liite 6. VEMALA ja ICECREAM –mallien kuvaukset

The VEMALA model is an operational, national scale nutrient loading model for Finnish watersheds (Huttunen et al., 2015). It simulates nutrient processes, leaching and transport on land, and in rivers and lakes. The model simulates nutrient gross load, retention and net load from Finnish watersheds to the Baltic Sea. It includes two main sub-models, the WSFS hydrological model (Vehviläinen, 1994) and the VEMALA water quality model (Huttunen et al., 2015).

In the present simulations the VEMALA model uses results from the ICECREAM model for the agricultural input of nitrogen and phosphorus. This development allows the simulation of agricultural scenarios for both phosphorus and nitrogen using ICECREAM (Table 1).

Table 1: Sub-models used in the VEMALA v.3 model

Version	Substance	Hydrological model	Terrestrial model		River model	Lake model
			agricultural loading	non-agricultural loading		
VEMALA v.3	TN, TP, SS, TOC, PO ₄ ³⁻ , PP, Porg, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Norg, Phytoplankton, O ₂	WSFS	VEMALA-ICECREAM (PP, Porg, PO ₄ ³⁻ , SS, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Norg), VEMALA 1.1 (TOC)	VEMALA-N (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Norg), VEMALA 1.1 (TOC,SS)	Biogeochemical model	Biogeochemical model

Agricultural input with ICECREAM model

ICECREAM model is based on CREAMS (Knisel 1980) and GLEAMS (Knisel 1993) models, applied to Finnish conditions by Rekolainen and Posch (1993), and further developed for simulation of phosphorus loading from Finnish fields by Tattari et al. (2001), Yli-Halla et al. (2005), Bärlund et al. (2009) and Jaakkola et al. (2012). After coupling ICECREAM with VEMALA in 2011, the ICECREAM model has been developed as a part of the VEMALA modelling system (see Huttunen et al. 2015). The development project is continuous, and ICECREAM has also been further developed during the Archipelago Sea Modelling project. Not all the changes applied to the model have been reported in publications. These changes include the modifications to the water flow and nitrogen loading simulation (described in detail in the 6th progress report of the Archipelago Sea Modelling project), erosion processes, catch crop simulation and the leaching of dissolved phosphorus from crop residues left on the soil surface over winter.

In VEMALA, the ICECREAM model is applied to each field plot in every 3rd level sub-catchment. The total daily loading is simulated from each field and daily total agricultural loading is simulated as a sum of loadings from each field in a 3rd level sub-catchment.

The water flow simulation in ICECREAM is based on the Richards equation and is described in detail in the 6th progress report of the Archipelago Sea Modelling project. The dependence of hydraulic conductivity on soil water content is calculated according to Haverkamp et al. (1977). Soil water content is calculated as a function of soil water potential also according to Haverkamp et al. (1977). The SCS curve number method is used for calculating surface runoff (Soil Conservation Service 1972). For clay soils, macropore flow is simulated as a fraction of the surface runoff. Evapotranspiration is calculated with the Penman-Monteith method (Monteith & Unsworth 1995).

The phosphorus simulation is based on the flow between three mineral P pools (stable, active and labile P) and three organic P pools (manure, fresh organic and stable organic P). The initial inorganic P content is calculated from the concentration of acid ammonium acetate extractable P which is routinely tested from agricultural fields in Finland. The simulated P loading consists of particulate phosphorus (PP) and dissolved phosphorus (DP). They are lost via surface runoff and in clay soils also via macropore flow. In addition, dissolved phosphorus is lost via the water percolating through the soil profile. Losses of PP in surface runoff and macropore flow are linked

to soil erosion, which are calculated with the USLE model modified according to Foster (1982). A schematic presentation of the phosphorus flows in the model is shown in Fig. 1.

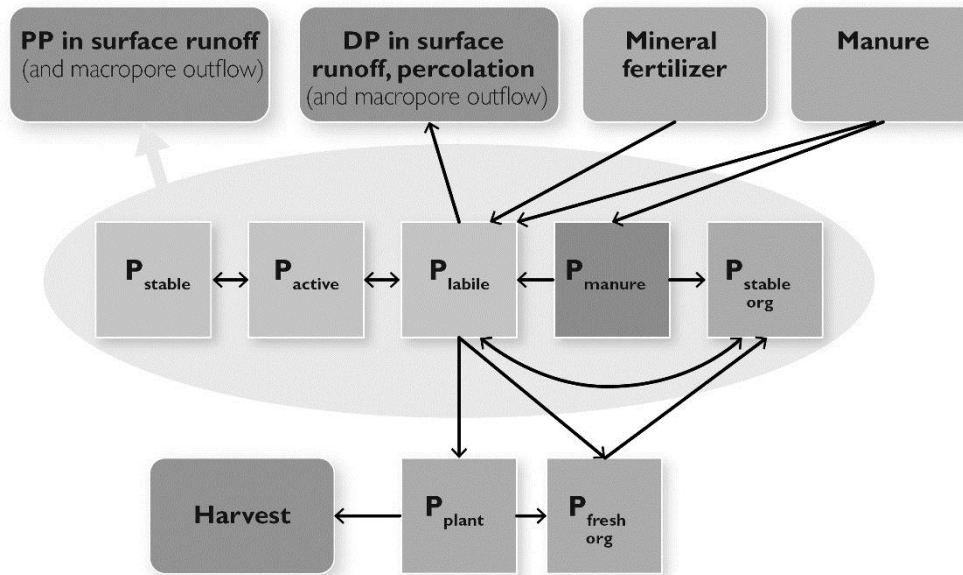


Figure 1: Simulation of phosphorus flows in the ICECREAM model.

Nitrogen reactions in the soil are mainly governed by organic matter degradation, nitrification and denitrification. Nitrate and ammonium can be immobilized to microbial biomass if, for example, plant material with a high C:N ratio is added to the soil. However, in traditional management systems with regular ploughing of the soil, the organic matter content decreases over the years (Heikkinen et al. 2013) and mineral nitrogen is thus released to the soil in the long run. Nitrification and denitrification are calculated according to Chatskikh et al. (2005). Nitrate is not retained in the soil, and it moves freely with soil water. Ammonium is bound to sediment, and it can be transported either as dissolved or along with eroded sediment according to the GLEAMS model (Knisel 1993). Also organic N can be transported with the sediment along surface runoff and macropore flow. A detailed description of the nitrogen reactions and flows can be found in the 6th progress report of the Archipelago Sea Modelling project and a schematic presentation is shown in Fig. 2.

VEMALA v.3 nutrient loading catchment model

A new version of the VEMALA nutrient loading catchment model was developed during the Archipelago Sea Modelling project to include the differentiation of total nutrients into bioavailable and non-bioavailable nutrient species (VEMALA v.3). The model is developed towards a more process-based model by describing the biogeochemical processes affecting each species along its travel from the headwaters to the Sea. VEMALA v.3 is built on the WSFS hydrological model and uses VEMALA 1.1, VEMALA-N and VEMALA-ICECREAM as terrestrial models (Table 1).

The biogeochemical deterministic models are built on the simple and well-known enzyme-catalysed reactions (e.g. Michaelis-Menten) that simulate the limiting reactions in the environment driving the entire ecosystem. Most of these reaction rates can be experimentally measured, thus reducing the uncertainty of the model calibration. The relationships between rate constants are also easier to analyze (e.g. sensitivity analysis) (Chen et al., 2010). The deterministic biogeochemical models allow the same processes to be modeled through the aquatic continuum, i.e. the rates are constant, but the conditions (temperature, flow, light...) change therefore the processes vary accordingly. Thus, these models can be applied over large areas without extra calibration. In this study, we implemented a simplification of the ecological model RIVE in the

VEMALA model. RIVE was developed by Billen et al. (1994) and is used in the RIVERSTRAHLER (Garnier et al. 1995) and SENEQUE (Ruelland et al., 2007) models. The state variables included in the model are oxygen, nutrients (organic nitrogen, nitrate (NO_3^-) and ammonium (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}), organic phosphorus and inorganic particulate phosphorus), suspended sediments and total organic carbon (Figure 3). Phytoplankton is the only biological species explicitly simulated in the model. The similarities between the phosphorus and nitrogen cycles are important. Indeed, nitrogen and phosphorus are both linked to algal growth and the mineralization process (degradation of the organic matter), which provides energy for the microbial growth. At this stage in the development, the impact of sediment processes (early diagenesis) on the water quality is not included.

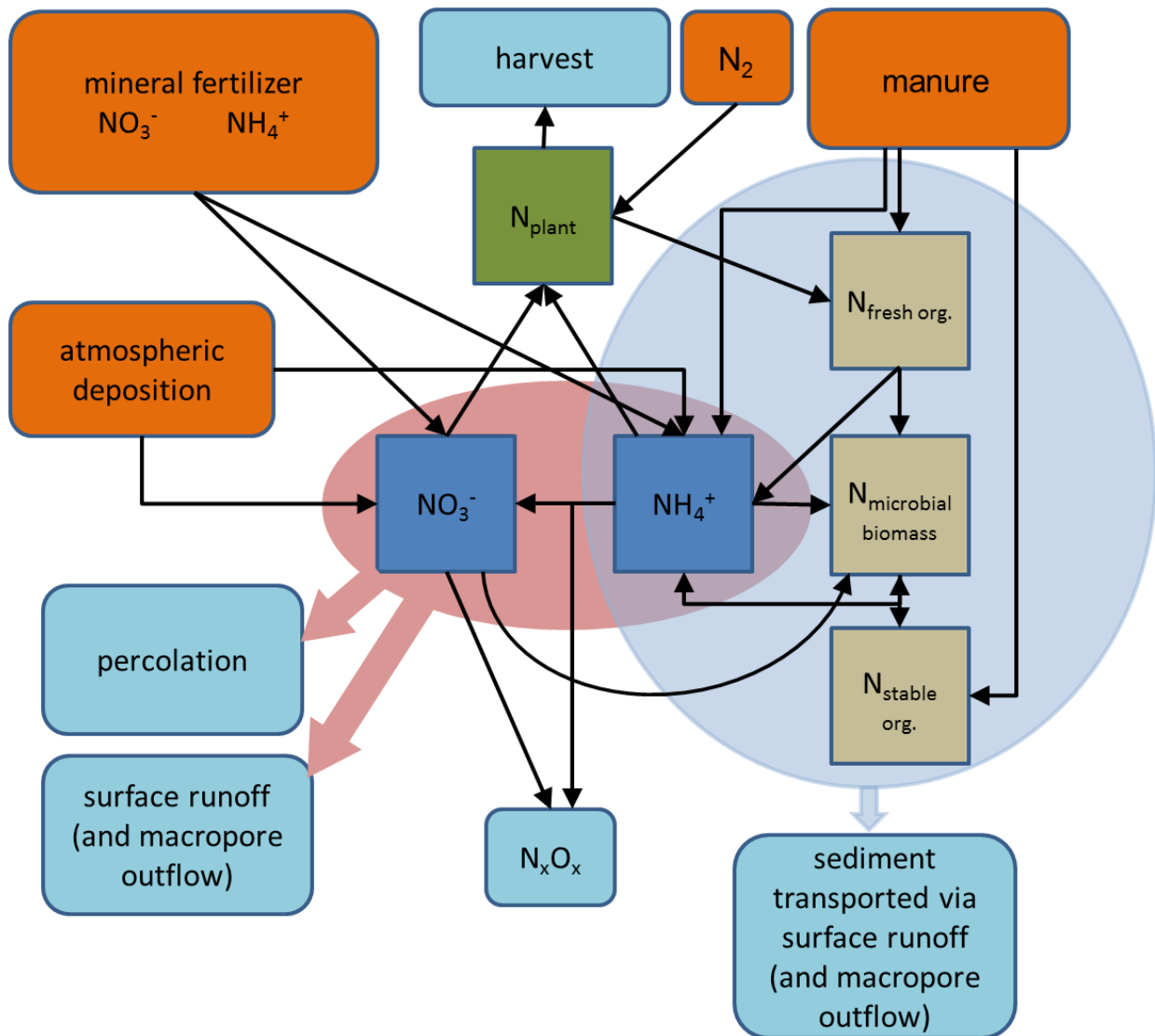


Figure 2: Nitrogen reactions and flows in the ICECREAM model.

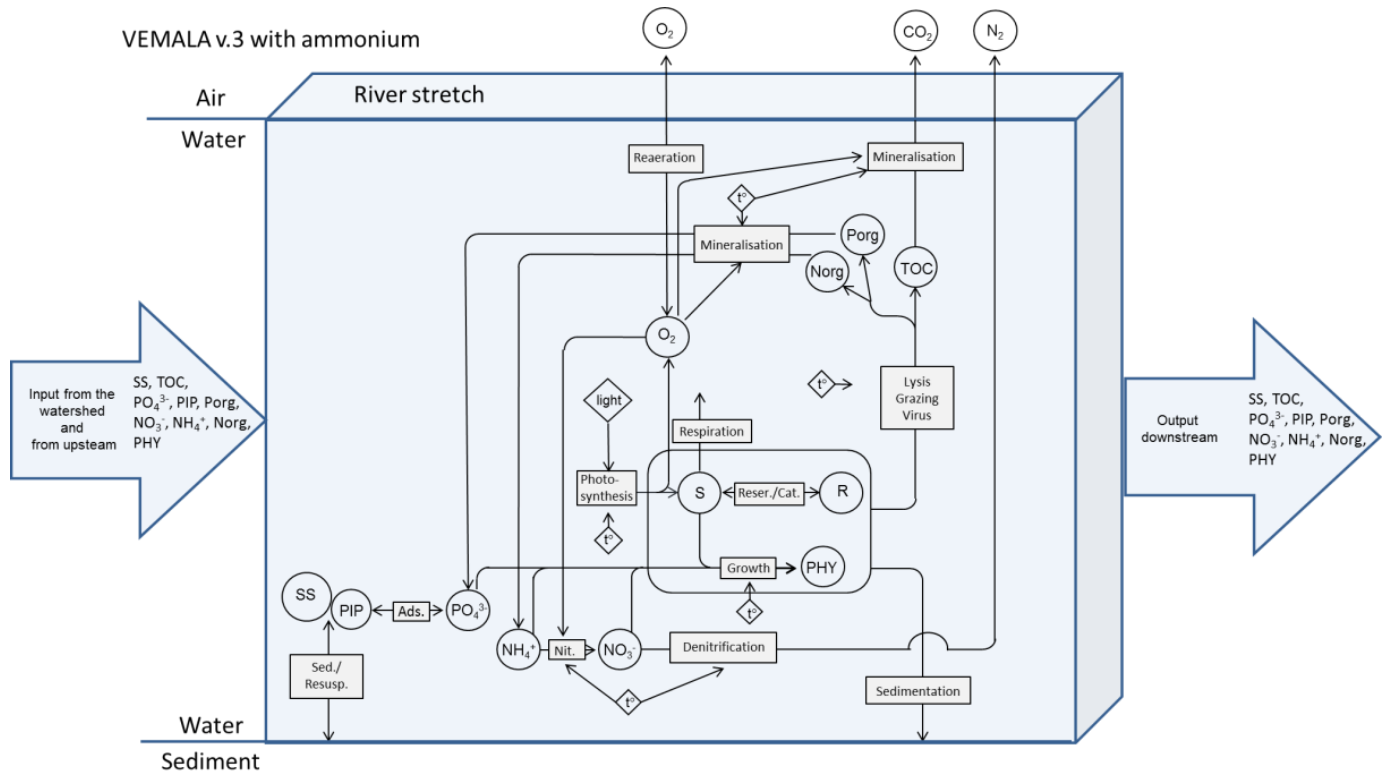


Figure 3: Biogeochemical sub-model used in VEMALA v.3

Liite 7. VEMALAn ilmastoskenaariot

Tarkasteluissa käytettiin yhteensä 7 eri ilmastoskenaariota. Ilmastoskenaariot tärkeimmät määrittelyt ovat:

- Mihin globaaliin ilmastomalliin skenaario perustuu. Globaali malli kuvaa sään vaihtelua koko maapallolla. Globaalin mallin tuloksista otetaan reunaehdot tarkemmalle lähialueen mallille, jolla varsinainen skenaario muodostetaan.
- Mihin lähialueen ilmastomalliin skenaario perustuu. Lähialueen malli laskee ilmaston muutokset tarkemmin paikallisesti.
- Mihin hiilidioksidin päästöskenaarioon ilmastoskenaario perustuu.

Tässä käytetyissä ilmastoskenaarioissa referenssijaksona käytetään jaksoa 1970-99, jonka sademääriin ja keskilämpötiloihin tulevaa ilmastoa verrataan. Taulukossa 1 on esitetty vuoden keskilämpötilan ja sadesumman muutokset eri skenaarioissa jaksolle 2040-69.

Lyhenne	Globaali ilmastomalli	Lähialueen ilmastomalli	Päästöskenaario	Lämpötilan muutos astetta jaksolta 1970-99 jaksolle 2040-69	Sateen muutos prosenttia jaksolta 1970-99 jaksolle 2040-69
RCA3-EA1B	ECHAM5/MPI-OM	RCA3	A1B	2.1	12
REMO-EA1B	ECHAM5/MPI-OM	REMO	A1B	2	8.3
RCA3-HA1B	UKMO-HadCM3-Q3 ^b	RCA3	A1B	2.5	16.2
HadRMHA1B	UKMO-HadCM3-Q0 ^a	HadRM	A1B	4	15.1
HIRH-AA1B	ARPEGE/CNMR-CM3	HIRHAM	A1B	2.6	4.7
HIRH-BA1B	BCM	HIRHAM	A1B	2.9	12.8
A1Bmean	19 mallin keskiarvo	no RCM	A1B	3.2	11.5

Taulukko 1. Käytetyt ilmastoskenaariot ja niiden tunnusluvut.

Liite 8. Nash-Sutcliffe -kerroin

Nash-Sutcliffe -kerrointa (NSE, Kaava 1) käytetään yleisesti arvioimaan valuma-aluemallien vastaavuutta mitatun havaintoaineiston kanssa (Moriassi ym., 2007). Se sopii virtaaman mukaan vaihtelevien prosessien kuten valuma-alueen ravinnekuormituksen simulaatioiden tarkkuuden arviointiin. Kerroin voi saada arvot $-\infty - 1$. Kertoimen arvo 1 kuvaa mallin simuloinnin täydellistä yhteneväisyyttä havaintojen kanssa. Arvo 0 kertoo simuloinnin vastaavan havaintojen keskiarvoa. Malleilta vaaditaan hyväksyttävään tarkkuuteen yleensä NSE arvoja 0,4 – 1.

$$(1) \text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\text{Load}_{\text{obs}}^t - \text{Load}_{\text{sim}}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (\text{Load}_{\text{obs}}^t - \overline{\text{Load}_{\text{obs}}})^2}$$

jossa Load_{obs} on mitattujen ravinnekuormituksen keskiarvo, $\text{Load}_{\text{obs}}^t$ on mitattu kuormitus ajankohdalla t , ja $\text{Load}_{\text{sim}}^t$ on mallilla simuloitu kuormitus ajankohdalla t .