

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**

**Meresüsteemide Insituut**

**Okeanograafia õppetool**

Margit Linno

**ESTUAARSE JA ÜMBERPÖÖRDUNUD ESTUAARSE  
TSIRKULATSIOONI MÕJU HAPNIKU JA TOITAINETE  
TINGIMUSTELE SOOME LAHES TALVEL 2013/2014**

Magistritöö

Juhendaja juhtivteadur Jaan Laanemets

Tallinn 2015

# 1 AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli magistrikraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikad ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Magistrikraadi taotleja: Margit Linno

Allkiri:

Kuupäev:

Juhendaja: Jaan Laanemets

Allkiri:

Kuupäev

## **2 TÄNUAVALDUS**

Minu siiras tänu kuulub kõigile järgnevaile isikutele: TTÜ Meresüsteemide Instituudi töötajad, U/L Salme meeskond, Meresüsteemide Instituudi Keemialabori meeskond (Inga Lips, Aet Meerits, Kati Lind ja Anne-Ly Sirel), Tarmo Kõutsile Tallinnamadala tuuleandmete eest ja magistritöö juhendajale Jaan Laanemets-ale.

### 3 SISUKORD

4	REFERAAT .....	5
5	ABSTRACT.....	7
6	SISSEJUHATUS .....	9
7	UURIMISPIIRKONNA KIRJELDUS .....	11
7.1	Soome lahe iseloomustus .....	11
7.2	Toitainete jaotused Soome lahes .....	13
7.2.1	Toitainete eraldumine setetest.....	14
7.2.2	Toitainete väline koormus.....	15
7.2.3	Füüsikaliste protsesside mõju toitainete jaotusele Soome lahes.....	16
8	KASUTATUD MÕÕTMISANDMED JA METOODIKA .....	18
8.1	Analüüsimeetodid.....	19
9	MÕÕTMISTULEMUSED .....	21
9.1	Tuule tingimused.....	21
9.2	Soolsuse muutused mõõtmiste transektil .....	22
9.3	Hapniku tingimuste muutused mõõtmiste transektil.....	25
9.4	Toitained.....	26
9.4.1	Fosfaadi kontsentratsiooni jaotused .....	26
9.4.2	Nitritite+nitraatide ja ammoniaagi jaotused.....	27
10	ARUTELU .....	30
11	KOKKUVÕTE .....	37
12	SUMMARY .....	39
13	KASUTATUD KIRJANDUS .....	41

## 4 REFERAAT

### **Estuaarse ja ümberpöördunud estuaarse tsirkulatsiooni mõju hapniku ja toitainete tingimustele Soome lahes talvel 2013/2014.**

Margit Linno

Märksõnad: Soome laht, estuaarne tsirkulatsioon, ümberpöördunud estuaarne tsirkulatsioon, hapniku jaotus, toitainete jaotus.

Estuaarse ja ümberpöördunud estuaarse tsirkulatsiooni mõju uurimiseks hapniku ja toitainete tingimustele Soome lahes kasutati U/L Salme (TTÜ Meresüsteemide Instituut) 2013–2014 talvel ja kevadel kogutud mõõtmisandmeid. Kuue uurimisreisi käigus teostati CTD (varustatud hapniku anduriga) sondeerimisi ja koguti veeproove 12 jaamas piki voolunõva (*thalweg*) lahe lääne- ja keskosas. Kaks kõige läänepoolsemat jaama asetsesid Ava-Läänemere kirdeosas, transekti pikkus oli ligikaudu 200 km. Jaamade vaheline kaugus varieerus vahemikus 10–30 km. Veeproovidest määrati nitrit-nitraat ( $\text{NO}_x$ ), fosfaadi ja ammoniaagi kontsentratsioonid.

Estuaarse tsirkulatsiooni perioodidel oli lahe süvakihis suur soolsus (tugev stratifikatsioon), hüpoksilised tingimused, suured fosfaadi ja ammoniaagi kontsentratsioonid. Kaks estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumist toimus perioodidel november–detsember 2013 ja 7–27 märts 2014. Esimese estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumisega kaasnes stratifikatsiooni kadu (veesamba läbisegunemine) ja hapnikutingimuste paranemine kogu transekti ulatuses 90 m sügavuseni. Fosfaadi ja  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonide jaotused veesambas olid homogeensed. Hüpoksiline, suure ammoniaagi- ja fosfaadisisaldusega põhjalähedane kiht esines läänepoolsemates jaamades, sügavuste vahemikus 90–125 m. Teine estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumine jäi kahe mõõtmisperioodi vahele ja ei olnud andmetes nii selgelt väljendunud.

Lineaarne regressioonanalüüs näitas tugevat negatiivset korrelatsiooni soolsuse ja hapnikusisalduse ja tugevat positiivset korrelatsiooni soolsuse ja fosfaadisisalduse

vahel. Hapniku- ja fosfaadisisalduse vahel oli tugev negatiivne korrelatsioon. See näitab, et Soome lahe põhjakihi vee omadused sõltuvad voolu režiimi muutustest ja estuaarse tsirkulatsiooni korral pärineb Soome lahe põhjakihi vesi Ava-Läänemere kirdeosast.

## 5 ABSTRACT

### **Influence of estuarine and estuarine circulation reversal on oxygen and nutrient conditions in winter 2013/2014 in the Gulf of Finland.**

Margit Linno

Keywords: Gulf of Finland, estuarine circulation, reversed estuarine circulation, oxygen distribution and nutrient distribution.

To study influence of estuarine and the reversal of estuarine circulation on oxygen and nutrient conditions field data was collected in the winter of 2013 and in the spring of 2014, onboard the R/V Salme, which belongs to Marine Systems Institute at Tallinn University of Technology. During six surveys performed along the thalweg of the gulf, in 12 stations CTD (equipped with oxygen sensor) vertical profiles were recorded and water samples were collected. Concentrations of nutrients (nitrite-nitrate ( $\text{NO}_x$ ), phosphate and ammonia) from water samples were measured. Two westernmost stations were located in the NE Baltic Proper and transect was approximately 200 km long. Distance between stations varied within a range of 10–30 km.

During estuarine circulation bottom layer of the gulf had strong salinity stratification, hypoxic, phosphate and ammonia rich conditions. Two reversals of estuarine circulations were observed, in November–December of 2013 and March 7–27, 2014. The first reversal of estuarine circulation led to disappearance of stratification and oxygen conditions improved along the thalweg, down to depth of 90 m. During this period the distributions of phosphate and  $\text{NO}_x$  concentrations were practically homogeneous throughout the water column. Hypoxic, ammonia and phosphate rich conditions were observed in the depth interval of 90–125 m in the westerly stations. Second reversal of estuarine circulation remained between two measurements and was not clearly reflected in the data.

Linear regression analysis showed high negative correlation between salinity and oxygen concentration and high positive correlation between salinity and phosphate concentration. Between oxygen and phosphate concentrations was high negative correlation. Thus, bottom layer water of the Gulf of Finland depended on alternation of flow regime and in the case of estuarine circulations was strongly influenced by water originating from the NE Baltic Proper.



## 6 SISSEJUHATUS

Soome laht on madal ja väljavenitatud estuaarile sarnanev bassein, mis asub Läänemere kirdeosas. Soome lahe hüdrograafiat iseloomustab nii suur temperatuuri ja soolsuse vertikaalne ning horisontaalne muutlikkus kui ka sesoonne käik. Suure välise toiteainete koormuse tõttu, mis põhjustab eutrofeerumist, on Soome laht Läänemere toitainerikkamaid basseine. Eutrofeerumine viib suurenenud bioloogilise produktsioonini, mida peetakse üheks peamiseks Soome lahe probleemiks.

Olulisemad toitaineid on lämmastik (N) ja fosfor (P), mis esinevad merevees nii lahustunud anorgaanilisel kui ka orgaanilisel kujul. Vees lahustunud anorgaanilistest ühendites on olulisemad lämmastikühendid (nitraadid— $\text{NO}_3^-$ , nitritid— $\text{NO}_2^-$  ja ammoniumühendid— $\text{NH}_4^+$ ) ja fosfaadid ( $\text{PO}_4^{-3}$ ).

Toitainete kontsentratsioonid mere ülemises kihis on maksimaalsed talvel ja minimaalsed kevadel-suvel. Talvised lahustunud anorgaanilise lämmastiku (DIN) ja lahustunud anorgaanilise fosfori (DIP) keskmised talvised väärtused on suurimad lahe idaosa pinnakihis ja heade hapnikutingimuste korral põhjalähedases kihis.

Soome lahes on stagneerunud hapnikutingimustega süvakihid. Hapnikusisaldused on madalaimad lahe lääne- ja keskosas. Hapnikusisalduse vähenemine süvakihtides on eutrofeerumise korral tavapärane nähtus, mis võib põhjustada süvakihtide hüpoksiat ja anoksiat.

Soome lahele on iseloomulik estuaarne tsirkulatsioon: ülemises kihis voolab vesi lahest välja ja süvakihtides voolab Ava-Läänemere kirdeosa vesi lahte. Tugevate edelatuulte korral võib tsirkulatsioon pöörduda vastupidiseks. Sügis-talvisel perioodil (puudub sesoonne termokliin) tugevate edelatuulte poolt tekitatud estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumised võivad viia kogu veesamba läbisegunemiseni.

Talvise estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumisega kaasneb süvakihtide hapnikusisalduse suurenemine. Negatiivseks küljeks on bioloogiliselt kättesaadava

fosfori transport veesamba ülemistesse kihtidesse, mis võib veelgi intensiivistada primaarproduksiooni.

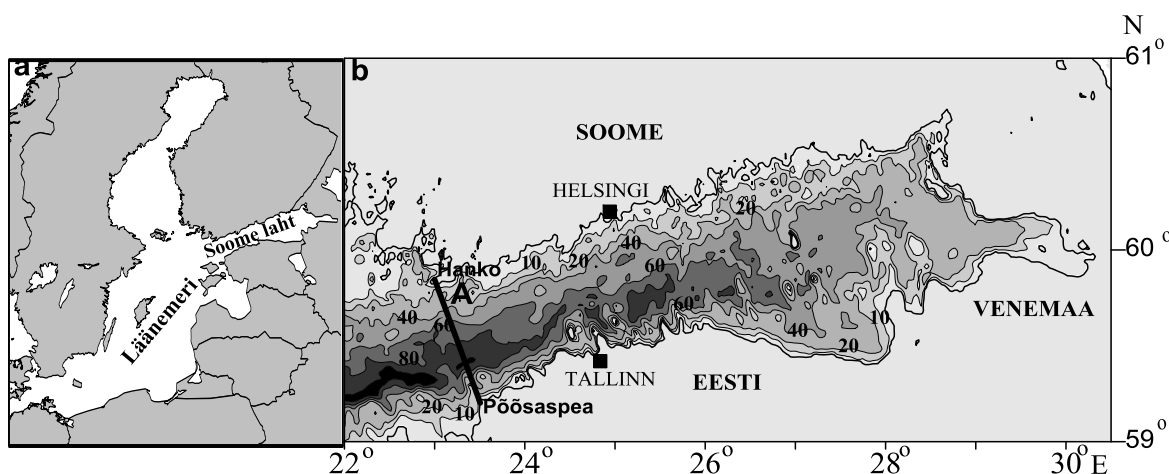
Magistritöö eesmärgiks on kirjeldada ja analüüsida Soome lahe estuaarse tsirkulatsiooni ja estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise mõju talvistele hapniku ja toitainete tingimustele süvakihis. Tuua välja süvakihi soolsuse, hapniku- ja fosfaadisisalduse omavahelised seosed ja seos Ava-Läänemere kirdeosa soolsuse, hapniku- ja fosfaadisisalduse muutustega.

Töös on kasutatud 2013/2014. aasta talvel ja kevadel TTÜ Meresüsteemide Instituudi poolt kogutud andmeid.

## 7 UURIMISPIIRKONNA KIRJELDUS

### 7.1 Soome lahe iseloomustus

Läänemeri (Joonis 1a) on poolsuletud, riimveeline sisemeri, kus looded on vähetähtsad. Läänemeri on ka üks suurimaid riimveelisi alasid maailmas. Läänemeri on madal, keskmise sügavusega ligikaudu 60 m. Suurimad sügavused on Gotlandi (250 m) ja Landsorti (459 m) süvikutes.



Joonis 1. (a) Läänemere ja Soome lahe (b) kaart (ümberrjoonistatud artiklist Laanemets *et al.* 2011). Soome lahe läänepoolne piir on kokkuleppeliselt määratud kui joon Põõsaspea ja Hanko poolsaarte vahel (joon A). Soome lahe sügavused on meetrites.

Soome laht (Joonis 1b) asub Läänemere kirdeosas. Soome lahe läänepiiriks loetakse kokkuleppeliselt joont Põõsaspea ja Hanko poolsaarte vahel. Soome laht on suhteliselt madal, väljavenitatud estuaarile sarnanev basseini. Laht on ligikaudu 400 km pikk ja laius varieerub 48 ja 135 km vahel. Lahe pindala on 29 600 km<sup>2</sup> ja ruumala 1100 km<sup>3</sup>, keskmine sügavus on 37 m ja suurim sügavus 123 m. Soome lahe vee viibeaeg on ligikaudu 2–3 aastat (Alenius *et al.* 1998).

Soome lahe hüdrograafia sarnaneb estuaari hüdrograafiaga, mida iseloomustab suur temperatuuri ja soolsuse vertikaalne ja horisontaalne muutlikkus. Kuna Soome lahe ja

Ava-Läänemere kirdeosa vahel puudub künnis, puuduvad topograafiliselt isoleeritud veemassid (Alenius *et al.* 1998).

Soome lahe temperatuuri vertikaalset jaotust iseloomustab tugev sesoonne käik (Alenius *et al.* 1998). Lahe sügavamates piirkondades on selgelt eristunud veesamba süvine kolmekihiline struktuur — ülemine segunenud kiht, külm vahekiht ja põhjalähedane kiht, mis on soolasem ja soojem. Neid kihte eraldavad kaks püknokliini — sesoone termokliin sügavuste vahemikus 10–20 m ja püsiv halokliin sügavuste vahemikus 60–70 m (Liblik *et al.* 2011). Suvise (juuni–august) segunenud ülemise kihi temperatuur jääb vahemikku 15–20 °C (Alenius *et al.* 1998). Termokliini all oleva külma vahekihi temperatuur on Liblik *et al.* (2011) andmeil 0.5–2 °C. Põhjalähedase kihi temperatuur jääb vahemikku 2–4 °C (Alenius *et al.* 1998).

Soome lahe soolsus suureneb idast lääne ja põhjast lõuna suunas. Pinnakihi soolsus varieerub vahemikus 5–7 lahe lääneosas ja 1–3 idaosas. Põhjakihi soolsus varieerub vahemikku 8–11. Soome lahe idaosas ja Soome lahe keskosa idaosas puudub halokliin (Alenius *et al.* 1998). Läänemere pikaajalised soolsuse muutused on seotud jõgede mageda vee sissevoolu muutustega ning Läänemere ja Põhjamere vahelisest veevahetusest läbi Taani väinade. Pikaajalised Ava-Läänemere kirdeosa soolsuse muutused mõjutavad ka Soome lahe soolsust. Soome lahte suubub Läänemere kõige suurem jõgi Neeva, aastase vooluhulgaga 77.6 km<sup>3</sup> (Bergström *et al.* 2001). Jõgede vooluhulkade sesoonne käik põhjustab soolsuse sesoonset muutlikkust. Lahe pinnakihi soolsus väheneb talvest kuni suve kesksuveni ja samal ajal sügavamates kihtides soolsus suureneb (Alenius *et al.* 1998).

Klassikaline Soome lahe lääneosa ülakihi pikaajaline keskmine tsirkulatsioon on tsükloonaalne: Ava-Läänemere kirdeosa soolane vesi voolab lahte piki Eesti rannikumerd ja magedam vesi voolab lahest välja piki Soome rannikumerd (Palmén, 1930). Ajamastaabis paarist päevast mõne nädalani on Soome lahes tähtsaks mõjuvaks jõuks muutlik tuulepinge, mis tekitab mesomastaapseid protsesse nagu apvelling, daunvelling, frondid, keerised (Alenius *et al.* 1998).

## 7.2 Toitainete jaotused Soome lahes

Soome laht on üks toitaineterikkamaid basseine Läänemeres. Toitainete jaotust iseloomustab tugev sesoonne ja vertikaalne muutlikus, mida mõjutavad bioloogiline produktsioon, hüdrodünaamika, väline toitainete koormus ja veevahetus Aava-Läänemere kirdeosaga (Pitkänen *et al.* 2008).

Olulisemad toidained lämmastik (N) ja fosfor (P) esinevad merevees nii lahustunud anorgaaniliste ühendite koosseisus kui ka seotuna vees hõljuvatesse orgaanilistesse osakestesse. Anorgaanilistest ühenditest on olulisemad lämmastikühendid (nitraadid— $\text{NO}_3^-$ , nitritid— $\text{NO}_2^-$  ja ammoniumühendid— $\text{NH}_4^+$ ) ja fosfaadid ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (Nehring 1994).

Toitainete kontsentratsioonid mere ülemises kihis on maksimaalsed talvel ja minimaalsed kevad-suvel. Lahustunud anorgaanilisel lämmastikul (DIN) on keskmised talvised väärtused ligikaudu  $7 \mu\text{mol m}^{-3}$  lääneosas ja  $21 \mu\text{mol m}^{-3}$  idaosas (Koshina *et al.* 2003). Rannikumeres võivad keskmised väärtused ulatuda kuni 28–45  $\mu\text{mol m}^{-3}$  piirkondades, mis on mõjutatud jõgede sissekandest (Pitkänen *et al.* 2008). Toitainete väärtused põhjalähedases kihis on märkimisväärselt kõrgemad kui ülakihis. DIN väärtused heade hapnikutingimuste korral põhjakihis võivad ulatuda kuni  $14 \mu\text{mol m}^{-3}$  (Pitkänen *et al.* 2003). Hapnikuvaegus põhjakihis takistab efektiivset nitrifikatsiooni ja sellele järgnevat denitrifikatsiooni, mille tulemusena on nitraatide väärtused vähenenud ja ammoniaagi väärtused kasvanud. (Pitkänen *et al.* 2008). Lukkari *et al.* (2009) andmeil on  $\text{NH}_4$  kontsentratsioon Soome lahes kevadel ja hilissuvel (aprill, august, september) sügavustel 58–89 m vahemikus 0.8–8.3  $\mu\text{M}$ . Haapala (1994) andmeil on apvellingu ajal Hanko poolsaare lähedal veesamba ülakihis ammoniaagi kontsentratsioonid suurenenud väärtustest 0.04–0.14 kuni 1.4  $\mu\text{M}$ . Soome lahes vabaneb  $\text{NH}_4$  settepinnalt kiirusega  $23 \text{ mg N m}^{-2} \text{ päev}^{-1}$  (Pitkänen *et al.* 2008). Ammoniaagi olemasolu põhjakihis ja kontsentratsiooni suurenemine sügavusega on indikaatoriks, et toimub orgaanilise materjali mineraliseerumine (Slomp *et al.* 2013). Talvise lahustunud anorgaanilise fosfori (DIP) väärtused segunenud pinnakihis muutuvad  $0.7 \mu\text{mol m}^{-3}$  lääneosas kuni  $1.3 \mu\text{mol m}^{-3}$  idaosas (Koshina *et al.* 2003). Põhjalähedases kihis jäävad Soome lahe kesk- ja idaosas DIP väärtused vahemikku 0.5–7.0  $\mu\text{mol m}^{-3}$ , sõltuvalt hapnikutingimustest (HELCOM-i andmebaas). Kevadise õitsengu ajal (aprilli lõpus/mai alguses) seotakse DIN ja ka

suurem osa DIP kiirelt fütoplanktoni poolt. Peale fütoplanktoni kevadist õitsengut on pinnalähedastes veekihtides DIN sisaldus allpool määramispiiri, DIP kontsentratsioonid on vahemikus 0.1–0.2  $\mu\text{mol m}^{-3}$ . Sesoonne termokliin takistab toitainete segunemist ülemistesse kihtidesse ja seetõttu asub fosfakliin madalamal kui nitrakliin (Laanemets *et al.* 2004). Organismi elutegevuse lõppedes settib surnud fütoplankton detriidina merepõhjas (Pitkänen *et al.* 2008).

Suvel on primaarproduksioon limiteeritud kas lämmastiku või siis lämmastiku ja fosfori poolt (Kivi *et al.* 1993). Kesk- ja hilissuvel on DIN ja DIP väärtused madalad ja ületavad määramispiiri vaid rannikulähedastel aladel. Fosfor akumulereb põhjalähedastes veekihtides just suvel. Suurenev süvavee fosfaadi kontsentratsioon Soome lahe avaosas sai alguse 1990ndate keskpaigast ja on seotud tugevnenud sooluse stratifikatsiooniga peale suurt soolase vee sissetungi Läänemerre läbi Taani väinade 1993. aastal. Vähenenud hapnikusisaldus ja teised bioloogilised ning keemilised protsessid on viinud bentilise fosfori vabanemiseni setetest veesambasee. Hapnikuvaegus akistab nitrifikatsiooni ja järgnevat denitrifikatsiooni, seeläbi on nitraatide kontsentratsioon vähenenud ja ammoniaagi ( $\text{NH}_4$ ) kontsentratsioon suurenenud (Pitkänen *et al.* 2008).

Ruumilisele toitainete muutlikkusele aitab kaasa Soome lahe idaosas paikneva Neeva jõe toitainerikka vee levik. Sellest tulenevalt on toitainete kontsentratsioonid suuremad lahe idaosas ja ka põhjapoolse rannikumere lähedal (HELCOM 2009).

### **7.2.1 Toitainete eraldumine setetest**

Fosfori ja lämmastiku kogused, mis on inimtegevuse tagajärjel vabanenud Läänemerre on viinud suurenenud primaarproduksioonini ja intensiivistunud hüpoksia kestvusele ja ruumilise ulatuse laienemisele (Savchuk *et al.* 2008). See mõjutab negatiivselt põhjaloomatikka (Karlsson *et al.* 2002) ja veekvaliteeti, just läbi eutrofeerumise.

Kuigi antropogeense fosfori koormus Soome lahte on viimastel aastakümnetel vähenenud, on ulatuslikud suvised tsüanobakterite õitsengud endiselt tavalised (HELCOM 2003). Enamasti seetõttu, et setetest vabanev või muunduv fosfor on veesambas bioloogiliselt kättesaadav. Klassikalise teooria kohaselt, kui hapnik on põhjalähedastes kihtides ammendunud, siis sellele järgneb raua redutseerumine, mille tagajärjel vabaneb fosfor Fe-oksühüdrosiididest. Hapniku ammendumine Soome lahe

süvakihtides on tavaline nähtus (HELCOM 2003), mis on peamiselt tingitud orgaanilise aine lagunemisest ja ebapiisavast vertikaalsest veesamba segunemisest.

Fosfori sidumisvorm settesse määrab, kas fosfor vabaneb setetest veesambasse või on mattunud ja eemaldatud toitaineringlusest (Lukkar *et al.* 2009). Igasugune fosfori vabanemine kergesti muunduvast P-vormist sette kohal olevasse veekihti võib intensiivistada primaarproduksiooni.

Lukkari *et al.* (2009) andmeil suureneb fosforit sisaldavate setete hulk Ava-Läänemere kirdeosast Soome lahe idaosani. See tuleneb orgaanilise aine hulga idasuunalisest suurenemisest. Olenemata sellest, et orgaaniline fosfor mattub Soome lahe põhja, on osa sellest lagunev ja idaosas on selle kogus suur, mis põhjustab aeglast aga pidevat fosfori vabanemist setetest.

Fosfori mattumise hulk Läänemeres on 13000–17000 tonni aastas (Mort *et al.* 2009).

### **7.2.2 Toitainete väline koormus**

Maismaalt pärinev toitainete koormus jõuab Soome lahte kas õhu või vee kaudu. Põhilisteks viisideks on jõgede sissekanne, sadestumine atmosfäärist ja vähesel määral ka laevadelt. Soome lahte suubub arvukalt jõgesid, mistõttu jõuab suur hulk toitaineid lahte. Aastatel 1994–2006 jäid DIN kogused vahemikku 30 000–45 000 tonni aastas. DIP kogused sel perioodil oli 1500–3800 tonni aastas (HELCOM 2009).

Lämmastikuühendite sadestumine atmosfäärist on ligikaudu 25% kogu antropogeensest lämmastiku koormusest Läänemerele, samas atmosfäärist tuleneva fosfori koormus on ainult mõni protsent kogu koormusest merre. Aastatel 1995–2006 oli Soome lahes atmosfäärist tuleneva lämmastiku koormus 9–13% (HELCOM 2009).

Laevaliiklus Läänemeres ja Soome lahel on kasvanud märgatavalt alates 2000. aastast ja arvatakse, et see kasvab veelgi (Kalli *et al.* 2012). 2009. aasta andmete alusel laev kas sisenes või lahkus lahest 38 396 korral (HELCOM 2010). Põhjalik ülevaade laevaliikluse heitgaaside emissioonist Läänemeres näitas 7% kasvu laevade poolt emiteeritavate oksüdeerunud lämmastiku (NO<sub>x</sub>) koguste kohta aastatel 2006–2009 (Jalkanen *et al.* 2013).

Raudsepp *et al.* (2013) andmetel on aastane laevadelt pärinev lämmastiku hulk Soome lahte 1600 tonni, mis on 12% kogu atmosfäärsest NO<sub>x</sub>-st. Laevadelt tuleva lämmastiku suhteline tähtsus on suurem suvel, kui see moodustab 30% kuu atmosfäärsest NO<sub>x</sub> kogusest.

### 7.2.3 Füüsiliste protsesside mõju toitainete jaotusele Soome lahes

Sügis-talvine veesamba segunemine on tuule poolt tekitatud segunemise ja pinnakihi temperatuuri alanemisega seotud konvektsiooni tulemus. Veemasmas seguneb püsiva halokliinini ja selle protsessiga kaasneb toitainete transport mere ülakihti. Madalamad rannikumere alad segunevad täielikult läbi.

Tuule tekitatud rannikumere apvelling on tüüpiline nähtus Läänemeres (Myrberg & Andrejev, 2003). Soome lahes on tuule tekitatud apvelling põhjustatud kas lääne- või idakaare tuulte poolt, mis on kestnud vähemalt 60 tundi (Haapala *et al.* 1994). Tulenevalt sellest, et valdavaks tuulesuunaks selles piirkonnas on edelatuuled (Soomere & Keevallik, 2003), siis on apvelling põhjakaldal sagedasem. Apvelling transpordib toitainerikast sügavamate kihtide vett eufootsesse pinakihti. Suvine toitainete kliin asub termokliinis, kusjuures fosfokliin on madalamal kui nitratkliin ja sellisest vertikaalsest jaotusest tulenevalt transporditakse fosfaati suures ülehulgas võrreldes nitraadiga Redfieldi suhte (DIN:DIP=16, Redfield, 1963) mõttes (Laanemets *et al.* 2004). Suvisel toitainete ammendumise perioodil on apvelling üks peamisi fosfori allikaid, mis soodustab lämmastiku fikseerivate tsüanobakterite õitsengute teket (Vahtera *et al.* 2005). Toitainete transpordi kogus ülemistesse veekihtidesse sõltub sellest, kas apvelling leiab aset Soome lahe põhja- või lõunarannikul (Laanemets *et al.* 2009). Lõunaranniku apvellingud transpordivad rohkem toitaineid mere ülemistesse kihtidesse.

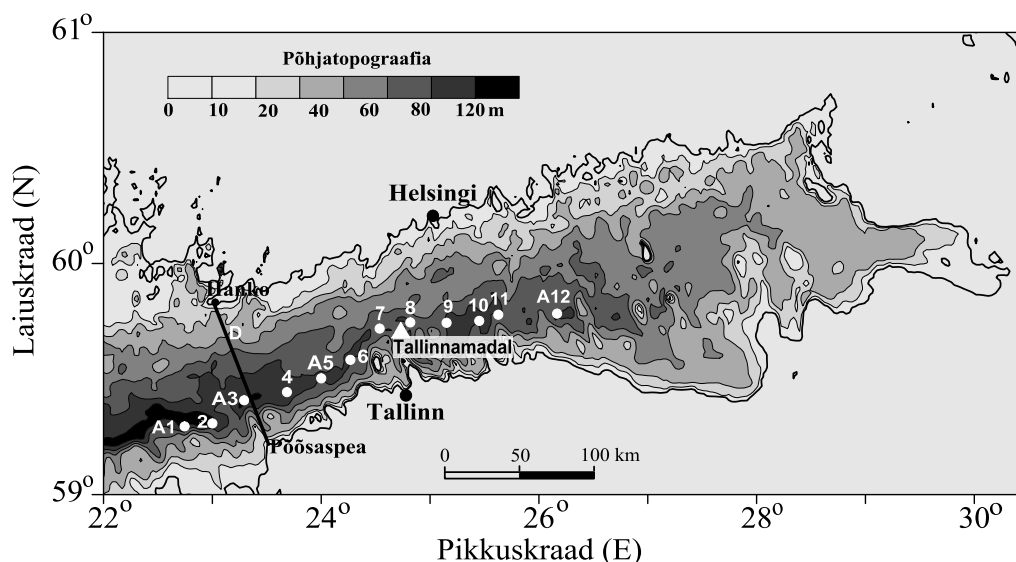
Estuaarse tsirkulatsiooni korral voolab vesi pinnakihis Soome lahest välja ja soolasem vesi Ava-Läänemere kirdeosast levib lahe põhjalähedastesse kihtidesse. Kirde- ja põhjatuuled toetavad standardset estuaarset tsirkulatsiooni, mille tulemuseks on tugevam stratifikatsioon (Elken *et al.* 2003) ning hapnikuvaese ja fosfaadirikka vee transport Ava-Läänemere halokliini ülemistest kihtidest lahte (Lips *et al.* 2008). Edelatuuled töötavad estuaarse tsirkulatsiooni vastu. Soome lahe lääneosas võib estuaarne tsirkulatsioon pöörduda vastupidiseks, pinnakihis voolab vesi lahte ja põhjalähedases kihis välja, kui edelatuul ületab keskmise väärtuse 4–5.5 m s<sup>-1</sup> võrra



(Elken *et al.* 2003). Talveperioodil kui puudub sesoonne termokliin on lahe stratifikatsioon nõrk. Sügis-talvisel perioodil tugevate edelatuulte poolt tekitatud estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumised viivad stratifikatsiooni kaoni, mille tulemusel toimub kogu veesamba läbisegunemine (Liblik *et al.* 2013, Elken *et al.* 2014). Veesamba läbisegunemisega kaasneb süvakihtide hapniku tingimuste paranemine ja toitainete transport mere ülakihti. Alates 1990ndatest on stratifikatsiooni kadude sagedus ja kestvus suurenenud tulenevalt tuulerežiimi muutusest, mis on seotud 1988nda aasta jaanuari ja veebruari kuu ülemise õhukihi tsonaalse tuulekomponendi järsu suurenemisega Põhja-Euroopas (Elken *et al.* 2014).

## 8 KASUTATUD MÕÕTMISANDMED JA METOODIKA

Töös on kasutatud TTÜ Meresüsteemide Instituudi (MSI) poolt mõõdetud andmeid. Andmed koguti kuue uurimisreisi käigus lahe voolunõva (*thalweg*) transektil 2013–2014. aasta talvel ja kevadel U/L Salme reisidel. Reised teostati 9–10 detsember (2013), 9–10 jaanuar, 3–4 veebruar, 4–5 märts, 3–4 aprill ja 5–6 mai (2014). CTD sondeerimise ja veeproovide kogumise jaamasid oli 12 (A1–A12) piki voolunõva lahe lääne- ja keskosas (Joonis 2). Kõige läänepoolsemad jaamad A1 ja A2 asetsesid Ava-Läänemere kirdeosas ja jaam A12 asetses umbes 200 km idapool jaamast A1. Jaamade vaheline kaugus varieerus vahemikus 10–30 km. CTD sondeerimised teostati Ocean Seven 320*plus* CTD sondiga (Idronaut S.r.l), millel on rõhu, temperatuuri, juhtivuse ja hapniku andurid. Andmed töödeldi sügavuse intervallile 0.5 m. Veeproovide kogumiseks kasutati sondiga ühendatud proovivõtu karuselli 12 Niskin'i batomeetriga (ruumala 1.7 l). Veeproovid toitainete analüüsideks võeti igast CDT jaamast 4–5 sügavuselt. Pinnakihist (5 m), keskmistelt sügavustelt (1–2 proovi), halokliini pealt ja põhjalähedasest kihist. Lahustunud anorgaaniliste toitainete ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{NO}_2+\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ) analüüsid teostati MSI laboris. Lahustunud hapniku sisaldus veeproovist määrati laeva pardal ja kasutati CTD sondi hapniku anduri kalibreerimiseks.



Joonis 2. Soome lahe uurimisala kaart (ümbertoonistatud artiklist Liblik *et al.* 2013). Valged ringid tähistavad CDT jaamade (A1-A12) asukohti. Valge kolmnurk tähistab Tallinnamadala majaka asukohta, kus mõõdeti tuuleandmed. Põhjatopograafia on joonistatud kasutades digitaalseid andmeid Seifert *et al.* (2001). Lahe läänepoolne piir on kokkuleppeliselt määratud kui joon Põõsaspea ja Hanko poolsaarte vahel (joon D).

## 8.1 Analüüsimeetodid

Nitraatide ja nitritite ning fosfaatide sisaldust veeproovis määrati laboris *Lachat QuikChem® 8500 Series 2* automaatanalüsaatoriga.

Nitritite ja nitraatide ( $\text{NO}_x$ ) määramiseks kasutati *QuikChem®* meetodit 31-107-04-1-D, mille järgi nitraat redutseeritakse kaadmiumkolonnis kvantitatiivselt nitritiks. Seejärel nitriti (taandatud nitraat + originaal nitrit) reageerimisel sulfaniilamiidiga happelistes tingimustes moodustub diasooniumioon. Diasooniumioon omakorda moodustab N-(1-nafüül)-etüleendiamiin hüdrokloriidiga 540 nm juures kiirgust neelava roosa värvusega kompleksi, mille kontsentratsiooni on seega võimalik kolorimeetriselt määrata. Meetodi määramispiir on  $0.014 \mu\text{mol N l}^{-1}$  (Egan 2000).

Fosfaatide kontsentratsiooni määramiseks kasutati *QuikChem®* meetodit 31-115-01-1-I, mille järgi ammooniummolübdiaat ja antimonkaaliumtartraat reageerivad happelistes tingimustes fosfaadiga, moodustades antimon-fosfo-molübdiaadi kompleksi. See kompleks redutseeritakse askorbiinhappega tugeva sinise värvusega kompleksiks. Moodustunud värv on proportsionaalne fosfaadi kontsentratsiooniga proovis. Neeldumist mõõdetakse 880 nm juures. Meetodi määramispiir on  $0.008 \mu\text{mol P l}^{-1}$  (Ammermann 2001).

Ammoniumlämmastiku ( $\text{NH}_4$ ) kontsentratsiooni määramiseks kasutati spektrofotomeetrit *Thermo Helios  $\gamma$* . Määramise meetodika põhineb kirjandusel (Grasshoff 1999). Ammoonium reageerib leeliselises keskkonnas hüpokloritiga, kusjuures moodustub monoklooramiin, mis fenooli ja nitroprussiidioonide (katalüsaator) juuresolekul ning hüpokloriti liias annab indofenoolsinise värvaine. Proovi neeldumist mõõdetakse lainepikkusel 630 nm. Meetodi määramispiir on  $0.19 \mu\text{mol N l}^{-1}$ .

## 9 MÕÕTMISTULEMUSED

### 9.1 Tuule tingimused

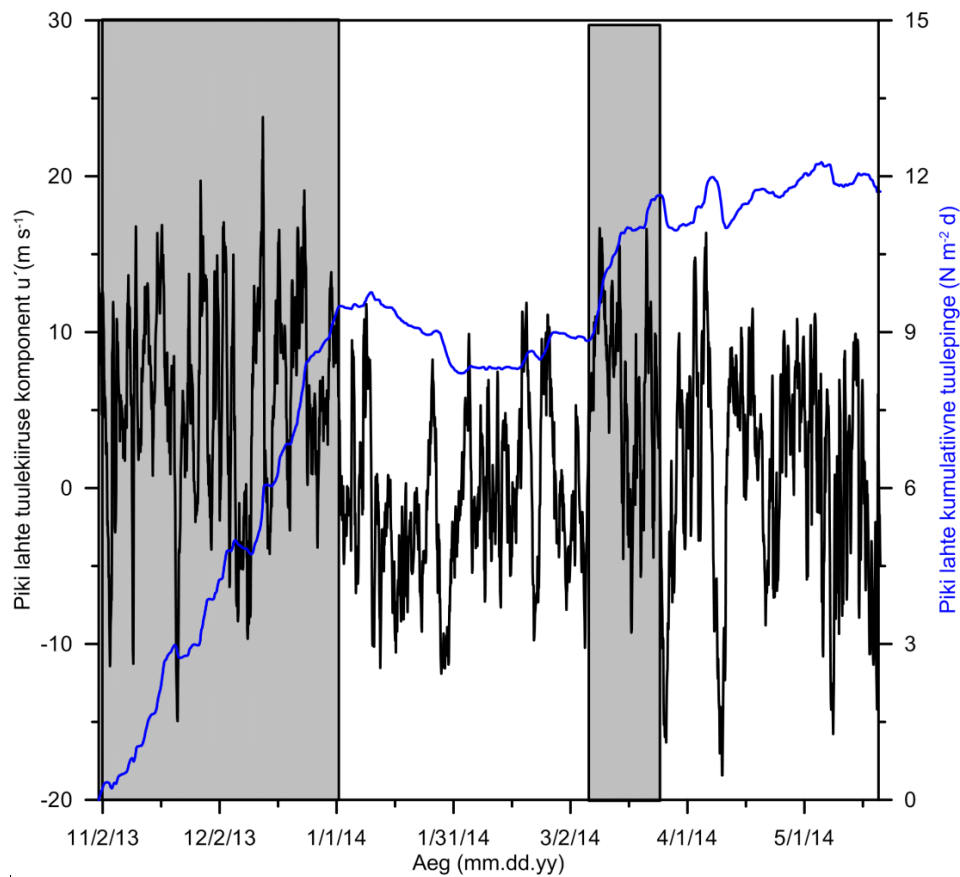
Töös on kasutatud Tallinnamadala majakal mõõdetud tuule andmeid perioodil 01.11.2013–20.05.2014. Piki lahte tuule kiiruse komponendi ( $u'$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) arvutuseks pöörati koordinaattelgi vastu kellaosuti suunda  $21^\circ$ . Piki lahte tuule pinge komponent ( $\tau$ ,  $\text{N m}^{-2}$ ) arvutati järgmise valemiga:  $\tau = \rho_a C_a U u'$ , kus  $U$  on tuule kiiruse moodul ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\rho_a$  on õhutihedus ( $1.2 \text{ kg m}^{-3}$ ) ja  $C_a$  on tuule hõõrde koefitsient ( $1.3 \cdot 10^{-3}$ ).

Perioodil november 2013–detsember 2013 domineerisid läänekaare tuuled, kusjuures maksimaalsed tuulekiiruse komponendi  $u'$  väärtused olid kuni  $24 \text{ m s}^{-1}$  (Joonis 3).

Jaanuari alguses tuulesuund muutus, sel kuul domineerisid idakaare tuuled ja  $u'$  väärtused ulatusid  $-12 \text{ m s}^{-1}$ . Veebruaris esines nii ida– kui läänekaare tuuli. Alates märtsi keskpaigast kuni märtsi lõpuni leidis aset teine suurem tuulesuuna muutus, sel perioodil domineerisid läänekaare tuuled. Aprilli algusest kuni perioodi lõpuni puhus vahelduva suunaga tuul ja ei esinenud domineerivat tuulesuunda. Sel perioodil ulatusid piki lahte tuulekiiruse komponendi  $u'$  väärtused  $-18 \text{ m s}^{-1}$ .

Kogu perioodi valdavaks tuulesuunaks võib lugeda edelatuult, mille keskmiseks piki lahte tuulekiiruse komponendi  $u'$  väärtuseks oli  $6.8 \text{ m s}^{-1}$ . Antud ajavahemiku maksimaalne tuulekiirus  $27.8 \text{ m s}^{-1}$  mõõdeti 13. detsembril 2013. aastal.

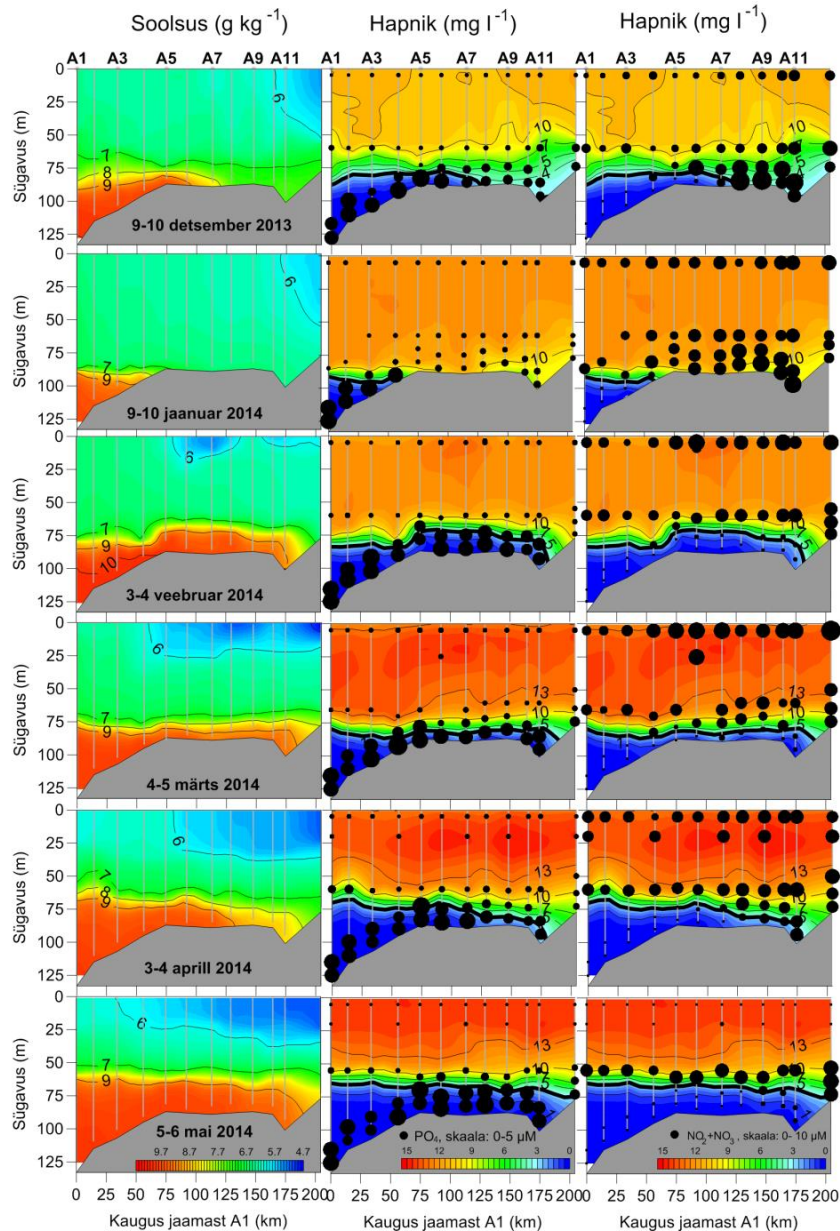
Piki lahte kumulatiivse tuulepinge käik (Joonis 3) näitas kahte estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumiseks soodsat tuule impulssi. Periood november–detsember 2013 ja 7–27 märts 2014. Esimesel perioodil oli tuule impulss  $9.4 \text{ N m}^{-2} \text{ d}$  (mõõtmiste ajal  $4.9 \text{ N m}^{-2} \text{ d}$ ) ja teisel perioodil  $2.2 \text{ N m}^{-2} \text{ d}$ .



Joonis 3. Piki lahte tuulekiiruse komponendi  $u'$  ajaline käik (must joon,  $\text{m s}^{-1}$ , positiivne ida suunas) ja piki lahte kumulatiivse tuulepinge muutused (sinine joon,  $\text{N m}^{-2} \text{ d}$ ). Estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumist soodustava tuule impulssi perioodid on tähistatud varjutatud alaga. Tuuleandmed perioodil 01.11.2013–20.05.2014 on mõõdetud Tallinnamadala majakal.

## 9.2 Soolsuse muutused mõõtmiste transektil

Soolsuse ajalis-ruumilised jaotused CTD sondeerimiste andmetel perioodil detsember 2013–mai 2014 on toodud Joonisel 4.



Joonis 4. Soolsuse (vasakpoolne paneel; intervall  $0.25 \text{ g kg}^{-1}$ ), hapniku (keskmine paneel; intervall  $0.5 \text{ mg l}^{-1}$ ), fosfaadi ja  $\text{NO}_x$  vertikaalsed lõiked (keskmine ja parempoolne paneel) 9–10 detsembril 2013, 9–10 jaanuaril, 3–4 veebruaril, 4–5 märtsil 3–4 aprillil ja 5–6 mail 2014 aastal piki Soome lahe voolunõva. Fosfaadi ja  $\text{NO}_x$  jaotused on kantud hapniku vertikaalsetele lõigetele. Fosfaadi ja  $\text{NO}_x$  skaalad on lineaarsed, vastavalt  $0\text{--}5$  ja  $0\text{--}10 \text{ }\mu\text{M}$ . Jäme must joon märgib hapniku lõigetel kontsentratsiooni  $2.9 \text{ mg l}^{-1}$  (hüpoksia piir). x-teljel on kaugused kõige läänepoolsemast jaamast (vt Joonis 2).

Detsembri alguses (9–10) oli pinnakihi soolsus vahemikus  $6\text{--}7 \text{ g kg}^{-1}$ , kuid kahes idapoolsemas jaamas A11–A12 oli soolsus väiksem, ligikaudu  $5 \text{ g kg}^{-1}$ . Soolsus suurenes märgatavalt jaamades A1–A5 sügavamal kui 90 m, kus väärtused olid üle  $9 \text{ g kg}^{-1}$ . Halokliin oli ainult lahe lääneosas.

Jaanuari alguses (9–10) oli pinnakihi soolsuse jaotus sarnane detsembri kuu jaotusele. Läänepoolsemate jaamade A1–A3 sügavamates kihtides, alates 90 m sügavuselt, muutusid soolsuse väärtused vahemikus 9–10 g kg<sup>-1</sup>. Kogu uurimisala ulatuses oli veesammas väiksematel sügavustel kui 90 m hästi läbi segunenud.

Veebruari alguses (3–4) oli pinnakihis väiksema soolsusega vee osakaal suurem. Jaamades A6–A8 ja A10–A12 oli kuni 20 m sügavuseni veekihi soolsus ligikaudu 5 g kg<sup>-1</sup>. Sügavamates põhjakihtides (80–125 m) oli soolase vee kiil (9–10 g kg<sup>-1</sup>) tunginud idapoolse, ja seda jaamade A1–A11 ulatuses. Oli formeerunud halokliin.

Märtsi alguses (4–5) oli pinnakihis väiksema soolsusega vee osakaal veelgi suurenenud. Jaamades A4–A12 ulatus väiksema soolsusega (<6 g kg<sup>-1</sup>) kiht 20 m sügavuseni. Sügavamates kihtides (80–125 m) jäi soolsus kogu uurimispiirkonna ulatuses (väljaarvatud jaam A12) vahemikku 9–10 g kg<sup>-1</sup>. Võrreldes veebruariga oli halokliin liikunud sügavamale, mis näitas soolase vee kiilu liikumine lahest välja.

Aprilli alguses (3–4) oli ülakihi magedama vee (<6 g kg<sup>-1</sup>) kihi vertikaalne ulatus suurenenud, ulatudes jaamades A5–A12 sügavuseni 30 m. Võrreldes märtsiga oli suurema soolsusega (8–9 g kg<sup>-1</sup>) vee kiil liikunud lahte sisse. Jaamades A1–A8 oli sügavuse vahemikus 70–125 m vesi, mille soolsus olid 9–10 g kg<sup>-1</sup>.

Mai alguses (5–6) oli väiksema soolsusega vee osakaal pinnakihis veelgi suurenenud. Jaamades A3–A12 oli pinnalt kuni sügavuseni 30 m soolsus <6 g kg<sup>-1</sup>. Halokliin oli kerkinud kogu uurimispiirkonna ulatuses, kuni 60 m sügavuseni (soolsus jäi vahemikku 9–10 g kg<sup>-1</sup>).

Iseloomulik oli, et kõige idapoolsemas jaamas (A12) olid soolsuse väärtused kogu uurimisperioodi vältel kõige väiksemad. Väikseimaks mõõdetud väärtuseks oli 4.7 g kg<sup>-1</sup>. Jaanuaris oli jaamades A5–A10 uurimisperioodi minimaalsem veesamba soolsuse vertikaalne muutlikus, vahemikus 0.2–0.4 g kg<sup>-1</sup>, mis näitab veesamba läbisegunemist.



### 9.3 Hapniku tingimuste muutused mõõtmiste transektil

Detsembri alguses (9–10) olid mõõdetud hapniku kontsentratsiooni väärtused sügavuseni kuni 60 m vahemikus 10–11 mg l<sup>-1</sup> (Joonis 4). Sügavuse kasvades hapniku sisaldus vees vähenes. Alates sügavusest 60 m kuni sügavuseni 75 m oli hapniku kontsentratsioon vahemikus 4–9 mg l<sup>-1</sup>. Sügavamates kihtides, alates 75 m, valitsesid hüpoksilised tingimused jaamades A1–A7.

Jaauari alguses (9–10) mõõdetud hapniku kontsentratsiooni väärtused erinesid detsembris mõõdetud väärtustest märgatavalt. Kuni sügavuseni 80 m jäid mõõdetud hapniku kontsentratsiooni väärtused 12 mg l<sup>-1</sup> ümbrusse. Hapnikurikkam kiht oli 20 m võrra sügavamal kui detsembris ja hüpoksilised tingimused esinesid kõige läänepoolsemates jaamades (A1–A4) alates 90 m sügavuselt.

Veebruari alguses (3–4) mõõdetud väärtuste põhjal ei ulatunud hapnikurikas kiht enam nii sügavale kui jaanuaris, mis oli seotud soolase hapnikuvaese vee sissetungiga Ava-Läänemere kirde osast. Sügavuste vahemikus 0–60 m jäid hapniku kontsentratsiooni väärtused vahemikku 10–12 mg l<sup>-1</sup>. Hüpoksiline kiht oli liikunud väiksematele sügavustele, alates sügavusest 75 m ja esines jaamades A1–A11.

Märtsis (4–5) mõõdetud andmete põhjal ulatus hapnikurikas kiht sügavamale kui veebruari algul ja mõõdetud hapniku kontsentratsiooni väärtused jäid vahemikku 10–13 mg l<sup>-1</sup>, kohati kuni 14 mg l<sup>-1</sup>. Hüpoksiline kiht algas kogu transekti ulatuses sügavuselt 80 m.

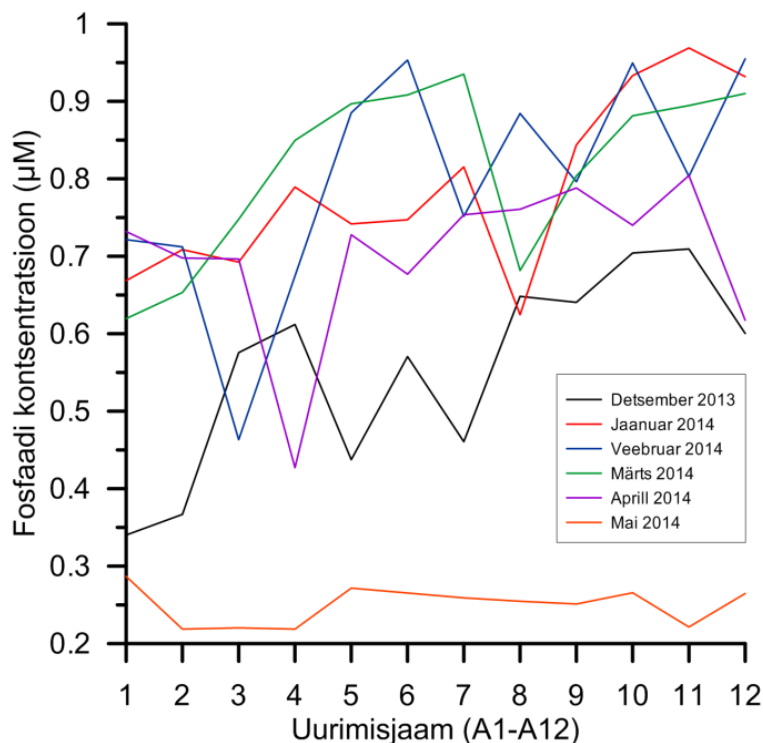
Aprilli alguse (3–4) mõõtmisandmete kohaselt oli hapnikurikas kiht liikunud väiksematele sügavustele, ulatudes maksimaalselt 60 m sügavuseni ja mõõdetud hapniku kontsentratsioonid jäid vahemikku 10–13 mg l<sup>-1</sup>, kohati kuni 14 mg l<sup>-1</sup>. Hüpoksiline kiht esines jaamades A1–A11, alates jaamas A1 70 m sügavuselt ja jaamas A11 ligikaudu 100 m sügavuselt.

Mais algul (5–6) mõõdetud hapnikusisaldus näitas selget veesamba kihistumist. Suurima hapnikusisaldusega kiht jäi sügavuste vahemikku 0–25 m, kus hapniku kontsentratsiooni väärtused olid 14–15 mg l<sup>-1</sup>. Sügavuste vahemikus 25–50 m olid hapniku kontsentratsiooni väärtused vahemikus 10–13 mg l<sup>-1</sup>. Hüpoksiline kiht algas sügavuselt 65 m ja seda kogu transekti ulatuses.

## 9.4 Toitained

### 9.4.1 Fosfaadi kontsentratsiooni jaotused

Kogu uurimisperioodi vältel, alates 2013. aasta detsembrist kuni 2014. aasta maini, esinesid kõrgemad (3–5  $\mu\text{M}$ ) fosfaadi kontsentratsiooni väärtused hüpoksilises kihis (Joonis 4). Väiksemad fosfaadi kontsentratsiooni väärtused (0.2–2  $\mu\text{M}$ ) esinesid kogu transekti ulatuses nii pinnakihis kui ka halokliinis, viimane jääb sügavuste vahemikku 60–80 m. Erandiks olid jaanuari alguse fosfaadi kontsentratsioonid jaamades A4–A12, kus mõõdetud väärtused näitasid sügavuste vahemikus 60–90 m (kuni põhjani) fosfaatide sisalduse kihistumist kontsentratsioonide vahemikus 0.5–2  $\mu\text{M}$ .



Joonis 5. Fosfaatide kontsentratsioonid pinnakihis jaamades A1-A12 uurimisperioodi jooksul.

Pinnakihi fosfaatide kontsentratsiooni iseloomustas suur muutlikkus (Joonis 5). Detsembri alguses jäi fosfaatide kontsentratsioon vahemikku 0.35–0.7  $\mu\text{M}$ .

Jaanuari alguses oli fosfaatide kontsentratsioon märgatavalt kõrgem kui detsembris, minimaalseks väärtuseks oli 0.6 ja maksimaalseks 0.95  $\mu\text{M}$ .

Veebruari alguses mõõdetud fosfaatide kontsentratsioonid olid muutlikud. Minimaalseks väärtuseks oli 0.45  $\mu\text{M}$ , mis mõõdeti jaamas A3. Maksimaalseks

väärtuseks oli 0.95  $\mu\text{M}$ , mis mõõdeti jaamas A6. Idapoolsetes jaamades A7–A12 oli muutlikus väiksem, kontsentratsioonid muutusid vahemikus 0.75–0.95  $\mu\text{M}$ .

Märtsi algul mõõdetud fosfaatide kontsentratsioonid jäid vahemikku 0.6–0.9  $\mu\text{M}$ , ja muutlikkus oli väiksem kui veebruari algul.

Aprilli algul oli fosfaatide kontsentratsioonid vahemikus 0.4–0.8  $\mu\text{M}$ . Madalaimad väärtused mõõdeti jaamades A4 ja A12, kus fosfaatide kontsentratsioonid olid vastavalt 0.4 ja 0.6  $\mu\text{M}$ . Ülejäänud jaamades olid fosfaatide kontsentratsioonid lähedased väärtusele 0.7  $\mu\text{M}$  või sellest suuremad.

Mais mõõdetud fosfaatide kontsentratsioonid olid võrreldes eelnevate kuudega oluliselt väiksemad ja jäid vahemikku 0.2–0.3  $\mu\text{M}$ .

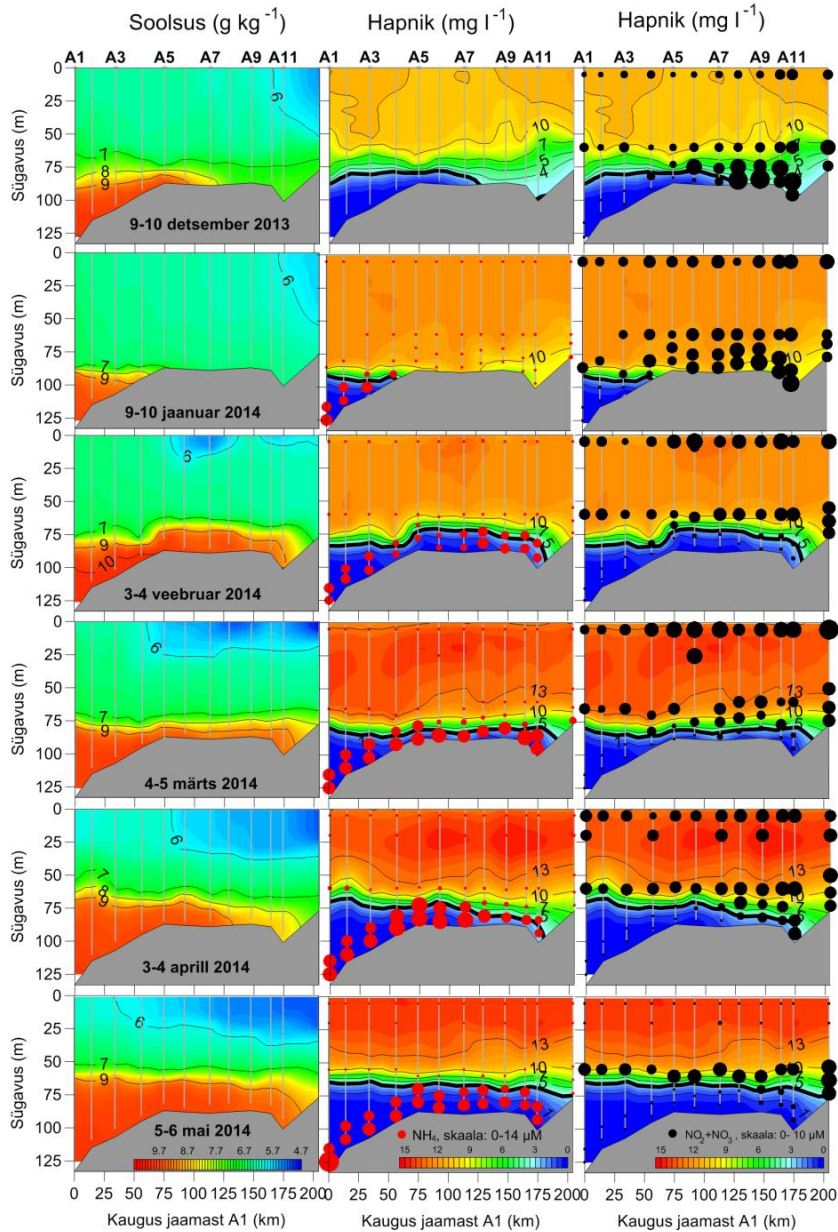
#### **9.4.2 Nitritite+nitraatide ja ammoniaagi jaotused**

Hüpoksilises kihis jäid nitritite+nitraatide ( $\text{NO}_x$ ) kontsentratsioonide väärtused vahemikku 0.2–1.5  $\mu\text{M}$  ja seda kogu uurimisperioodi vältel (Joonis 6). Samas hapnikurikastes kihtides olid  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid suuremad, ulatudes kuni 10  $\mu\text{M}$ . Ammoniaaki ( $\text{NH}_4$ ) esines peamiselt hüpoksilises kihis ja kontsentratsioonid jäid vahemikku 0–14.4  $\mu\text{M}$ . Ülemistes kihtides oli ammoniaagi sisaldus alla määramispiiri. Hüpoksilises kihis olid  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid väga väikesed või olid allpool määramispiiri.

Detsembri algul mõõdetud  $\text{NO}_x$  sisaldused näitasid  $\text{NO}_x$  kihistumist. Mere pinnalt kuini 60 m sügavuseni muutusid kontsentratsioonide väärtused vahemikus 2–8  $\mu\text{M}$ . Suurimad kontsentratsioonide väärtused (8–10  $\mu\text{M}$ ) olid jaamade A8–A12 põhjalähedases kihis, kus puudus hüpoksia. Ammoniaagi mõõtmisi sellel kuul ei teostatud.

Jaauari algul olid  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid pinnakihis suurenenud ja jäid vahemikku 3–6  $\mu\text{M}$ . Sügavamates kihtides oli samuti märgata  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonide suurenemist ja seda sügavuste vahemikus 60–80 m ning jaamades A4–A12. Sügavuste vahemikus 90–125 m jaamades A1–A4 jäid  $\text{NH}_4$  kontsentratsioonid vahemikku 0.3–7.6  $\mu\text{M}$ .

Veebruari algul esines veesambas kaks selgelt eristunud  $\text{NO}_x$  kihti. Suurimad  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid olid sügavuste vahemikus 5–55 m, kus väärtused varieerusid vahemikus 2–6  $\mu\text{M}$ . Hüpoksilises kihis olid  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid väga väikesed.



Joonis 6. Soolsuse (vasakpoolne paneel; intervall  $0.25 \text{ g kg}^{-1}$ ), hapniku (keskmine paneel; intervall  $0.5 \text{ mg l}^{-1}$ ), ammoniaagi ja  $\text{NO}_x$  vertikaalsed lõiked (keskmine ja parempoolne paneel) 9–10 detsembril 2013, 9–10 jaanuaril, 3–4 veebruaril, 4–5 märtsil 3–4 aprillil ja 5–6 mail 2014 aastal piki Soome lahe voolunõva. Ammoniaagi ja  $\text{NO}_x$  jaotused on kantud hapniku vertikaalsetele lõigetele. Ammoniaagi ja  $\text{NO}_x$  skaalad on lineaarsed, vastavalt 0–14 ja 0–10  $\mu\text{M}$ . Jäme must joon märgib hapniku lõigetele kontsentratsiooni  $2.9 \text{ mg l}^{-1}$  (hüpoksia piir). x-teljel on kaugused kõige läänepoolsemast jaamast (vt Joonis 2).

Ammoniaaki sisaldav kiht oli sügavuste vahemikus 75–125 m levinud üle kogu uurimispiirkonna ja  $\text{NH}_4$  kontsentratsioonid oli vahemikus 0.4–7.1  $\mu\text{M}$ .

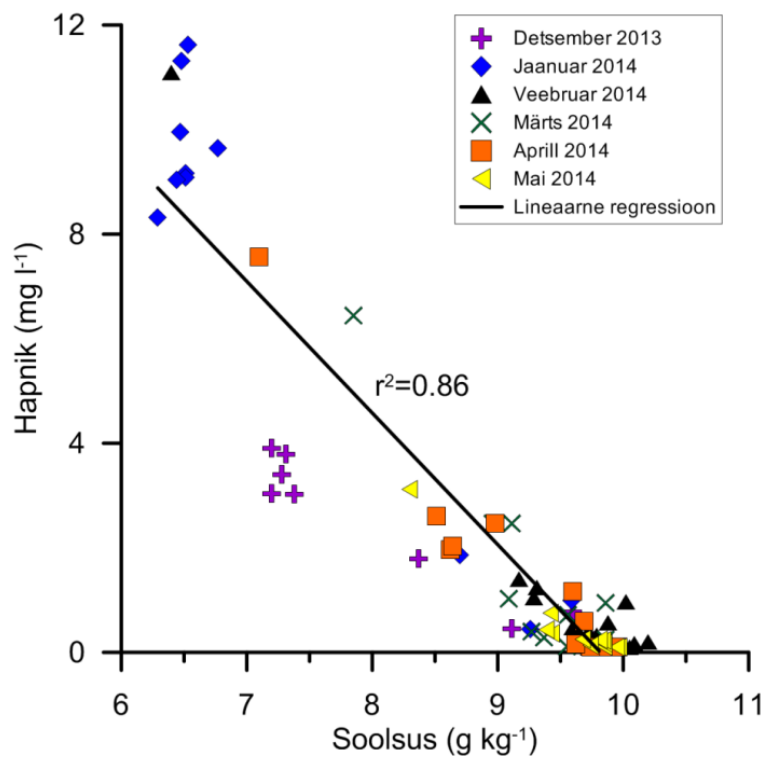
Märtsis domineerisid suurimad  $\text{NO}_x$  sisaldused pinnakihis, seda eriti just idapoolsemas osas, kus väärtused olid 10  $\mu\text{M}$  lähedal. Halokliini peal olid  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid vahemikus 2–5  $\mu\text{M}$ . Ammoniaaki sisaldav kiht oli võrreldes veebruariga liikunud sügavamale, jäädes sügavuste vahemikku 80–125 m.  $\text{NH}_4$  kontsentratsioonid oli vahemikus 0.4–10.4  $\mu\text{M}$ .

Aprilli algul olid märtsiga võrreldes pinnakihi  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid väiksemad, kuid sügavusel 60–70 m olid kontsentratsioonid suurenenud. Ammoniaaki sisaldav hüpoksiline kiht oli võrreldes märtsiga tõusnud madalamatele sügavustele (ligikaudu 70 m) ja ulatus jaamani A11.  $\text{NH}_4$  kontsentratsioon jäi vahemikku 0.4–11.2  $\mu\text{M}$ .

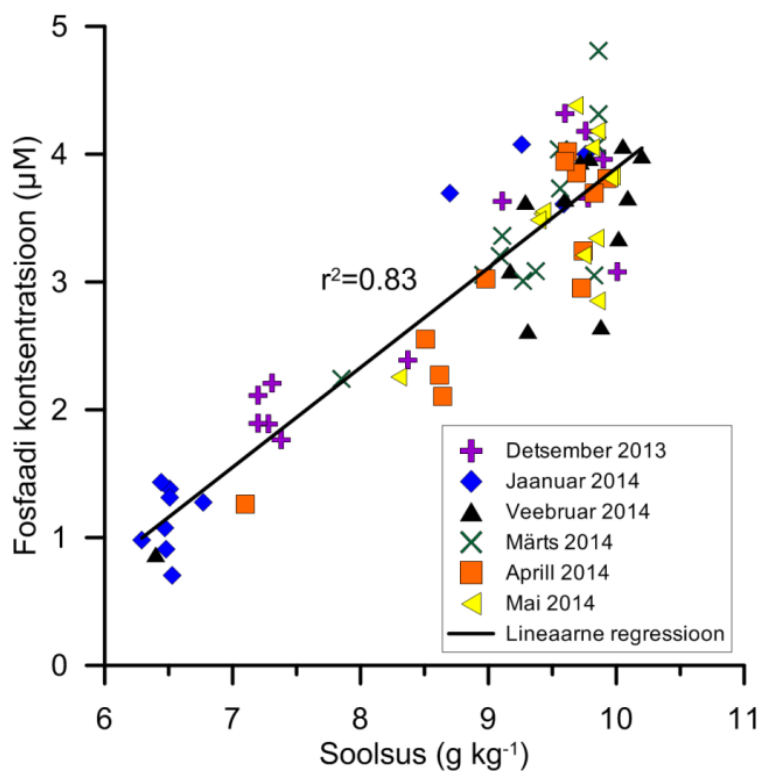
Maikuus olid peaaegu kõik nitritid ja nitraadid pinnakihis fütoplanktoni poolt tarbitud. Sügavustel 60–70 m mõõdetud  $\text{NO}_x$  kontsentratsiooni väärtused jäid vahemikku 4–7  $\mu\text{M}$ . Ammoniaaki sisaldav hüpoksiline kiht oli jäänud püsima samale sügavusel mis aprillis (70 m), ulatudes jaamani A11.  $\text{NH}_4$  kontsentratsioonid jäid vahemikku 0–8.5  $\mu\text{M}$ .

## 10 ARUTELU

Käesoleva uurimustöö käigus analüüsitud soolsuse, hapniku ja toitainete andmed näitasid nii suurt ajalis-ruumilist muutlikkust kui ka nende väljade tugevaid omavahelisi seoseid. Liblik *et al.* (2013) näitasid, et Soome lahe süvakihi hapnikusisaldus ja soolsus on tugevas korrelatsioonis ja süvakihi hapnikutingimused sõltusid soolase vee kiilu liikumisest. Estuaarse tsirkulatsiooni korral liikus soolane ja hüpoksiline vee kiil Soome lahte sisse, estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise korral liikus soolase vee kiil lahest välja ja toimus veesamba segunemine. Lahe süvakihi voolurežiimi oluliseks mõjutajaks on tuul. Liblik *et al.* (2013) näitasid, et kirdetuule mõju ja sissevoolu vaheline ajanihe oli 18 tundi. Käesolevas töös analüüsitud perioodil esines kaks tugevat tuule impulssi, mis soodustasid estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumist. Soolsuse ja hapniku vahel oli tugev negatiivne korrelatsioon (Joonis 7,  $r^2=0.86$ ), st hapniku kontsentratsioon oli suurem väiksema soolsusega piirkondades ja soolsuse suurenedes vähenes hapniku sisaldus. Viimast põhjustas estuaarse tsirkulatsiooni korral hüpoksilise soolase vee, mis pärines Ava-Läänemere kirdeosast 90–110 m sügavuselt, liikumine Soome lahte. Uuritava perioodi suurimad hapnikusisaldused ja väiksemad soolsused esinesid jaanuaris kaheksas jaamas.

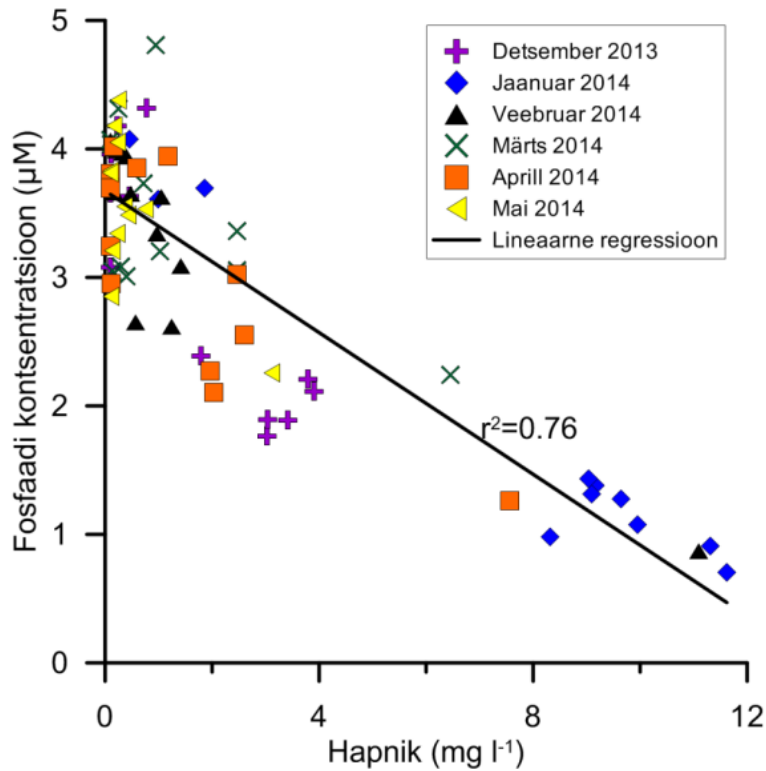


Joonis 7. Hapniku kontsentratsiooni ja soolsuse vaheline seos uurimisalal. Must jäme joon on lineaarne regressioon.



Joonis 8. Fosfaadi kontsentratsiooni ja soolsuse vaheline seos uurimisalal. Must jäme joon on lineaarne regressioon.

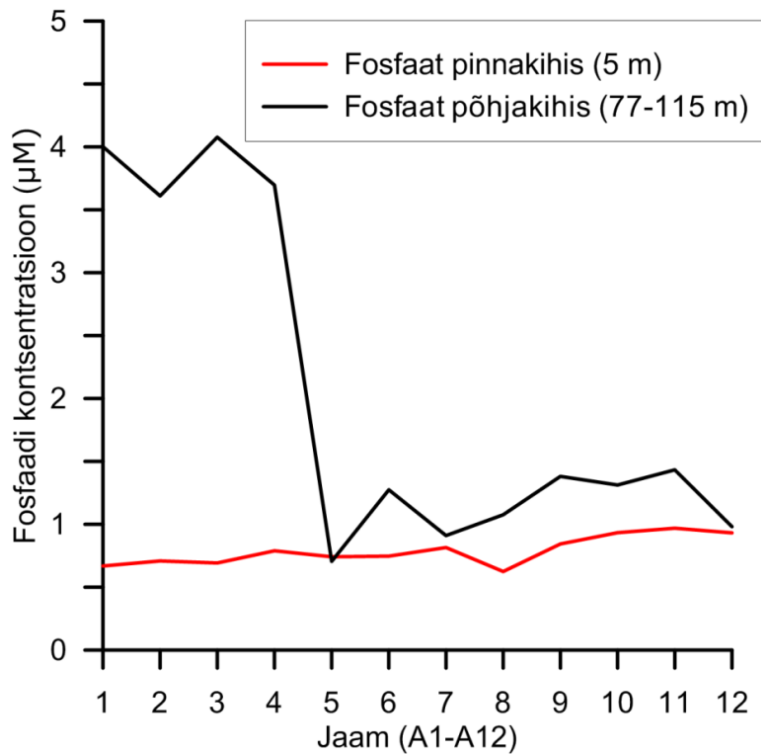
Fosfaadi kontsentratsiooni ja soolsuse vahel oli tugev positiivne korrelatsioon (Joonis 8,  $r^2=0.76$ ). Soolsuse suurenedes suurenes ka fosfaadisisaldus põhjalähedases kihis. See näitab, et sügavamates veekihtides, kus on suurem soolsus, esinevad ka kõrgemad fosfaadisisaldused.



Joonis 9. Fosfaadi ja hapniku kontsentratsiooni vaheline seos uurimisalal. Must jäme joon on lineaarne regressioon.

Fosfaadi ja hapniku kontsentratsiooni vahel on tugev negatiivne korrelatsioon (Joonis 9,  $r^2=0.76$ ). Hapnikusisalduse suurenedes vähenes fosfaadisisaldus ja vastupidi, peegeldades tsirkulatsiooni režiimi muutusi põhjalähedases kihis.





Joonis 10. Fosfaadi kontsentratsioon jaamade A1–A12 ulatuses.

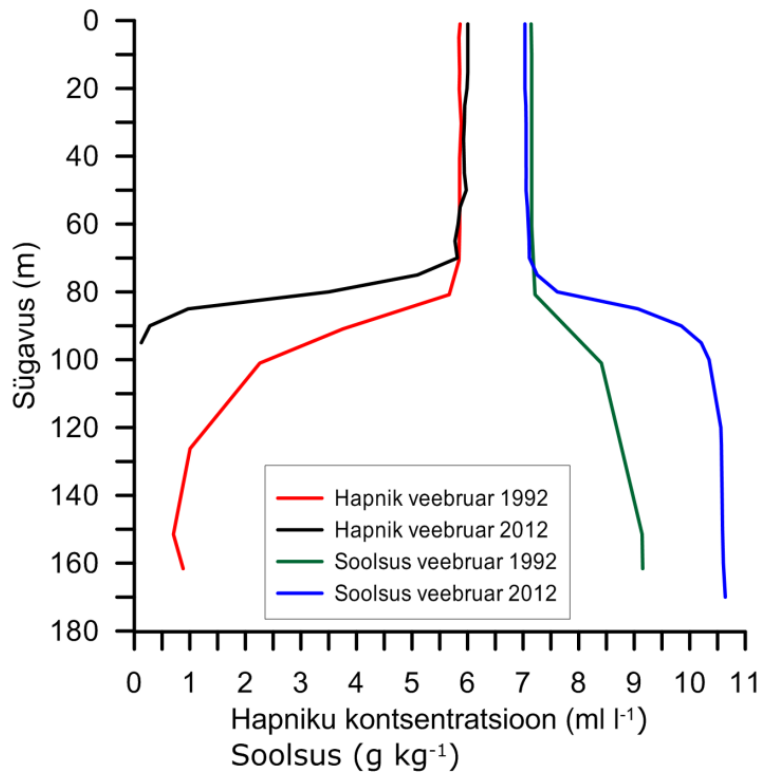
Jaamade A1–A12 jaanuari alguse fosfaadi kontsentratsioonid pinnakihis ja põhjalähedases kihis on toodud Joonisel 10. Jaamades A1–A4 oli fosfaadisisaldus põhjalähedases kihis kuni 4 µM võrra suuremad kui jaamades A5–A12. Jaamad A1 ja A2 paiknesid Soome lahest väljas, st Ava-Läänemere kirdeosas. Jaamades A5–A12 oli selgelt näha estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise mõju, pinnakihi ja põhjakihi fosfaadisisaldused olid ligilähedased. Veetasandil oli praktiliselt kuni põhjani läbisegunenud (Joonis 4) ja seeläbi toimus fosfaadi transport ülakihti. Soome lahe põhjalähedase kihi fosfori sisaldus ei sõltu anult veevahetusest Ava-Läänemere kirdeosaga. Lukkari *et al.* (2009) andmetel oli Soome lahes 17–18 aastase perioodi (1986–2004) keskmine aastane fosfori vabanemine hapnikuvaestes tingimustes põhjakihi setteist, sügavamal kui 60 m, miinimaalselt 19 kg P km<sup>-2</sup>. Hüppoksid tingimustes on mattumismäär 74% kogu fosforist, see tähendab, et 26% kogu settinud fosforist vabaneb uuesti veesambasse.

Uurimisperioodil mõõdetud NO<sub>x</sub> väärtused näitasid kuni maikuuni pinnakihis ja halokliini kohal olevates veekihtides suuri väärtusi. Erandiks oli mai, kus pinnakihis oli NO<sub>x</sub> kevadise õitsengu ajal ära tarbitud. Ammoniaak esines põhjalähedases kihis kõigis jaamades, kus oli hüppoksidia.

Kõige idapoolsemas jaamas A12 (Soome lahe keskosas) püsisid head hapnikutingimused, madal ammoniaagi- ja fosfaadi- ning kõrge NO<sub>x</sub>-sisaldus põhjalähedases kihis mai alguseni. See kinnitab Liblik *et al.* (2013) tulemusi, et estuaarse tsirkulatsiooni mõju säilib Soome lahe keskosas kauem.

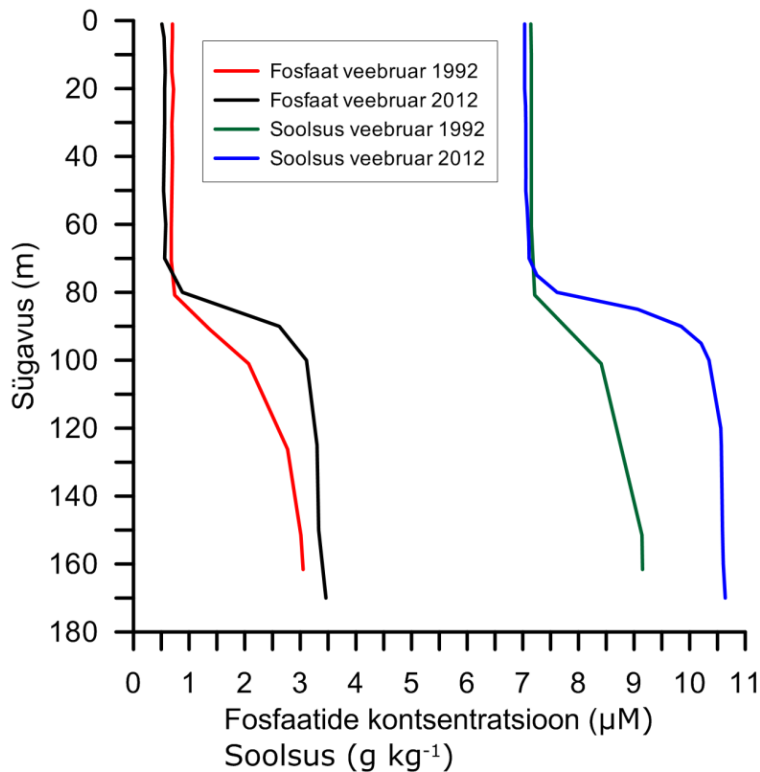
Süvakihi hapnikutingimused ja toitainete dünaamika Soome lahe lääneosas sõltuvad veevahetusest Ava-Läänemere kirdeosaga ja sealsetest hapniku ja toitainete tingimustest. Estuaarse tsirkulatsiooni korral voolab Ava-Läänemere kirdeosast vesi Soome lahe põhjakihti. Ava-Läänemere hapniku ja toitainete tingimused sõltuvad Põhjamere vee suurtest sissetungidest Läänemerre (viimased toimusid 1993. ja 2003. aastal).

HELCOM-i andmebaasist saadud Ava-Läänemere kirdeosa seirejaama LL15 mõõtmistulemusi 1992-e (enne suurt soolase vee sissetungi Läänemerre 1993. a.) ja 2012-nda aasta veebruarist kasutati pikaajaliste muutuste illustreerimiseks. Võrreldes 2012. aasta Ava-Läänemere kirdeosas mõõdetud andmeid stagnatsiooni perioodi lõpus (1992. aastal) tehtud mõõtmistega, oli halokliin liikunud madalamale sügavusele ja oluliselt tugevnenud (Joonis 11). Soolsus oli 90 m sügavusel 2012. aastal 2.4 g kg<sup>-1</sup> võrra suurem kui 1992. aastal mõõdetud soolsus. Tugevnenud halokliin takistab segunemist ja halokliini rikastamist hapnikuga. Hapniku kontsentratsiooni mõõtmised 2012 a. näitasid kiiret langust alates 70 m sügavuselt ja hüpoksilise kihi algust 80 m sügavuselt. Hüpoksiline kiht algas 1992. a. mõõtmisandmetel ligikaudu 100 m sügavuselt.



Joonis 11. Hapniku kontsentratsiooni ja soolsuse vertikaalsed profiilid. Mõõtmised jaamas LL15, veebruar 1992 ja 2012.

Ava-Läänemere kirdeosa halokliini ülemiseosa fosfaadisisaldus oli 1992. a. väiksem võrreldes 2012. a. mõõtmistega (Joonis 12). Nii oli 90 m sügavusel fosfaadi kontsentratsioon 1992. aastal 1.4  $\mu\text{M}$  võrreldes 2012. aastal mõõdetud fosfaadi kontsentratsiooniga 2.6  $\mu\text{M}$ . Mõlema aasta fosfaadisisalduse mõõtmistulemused näitavad samuti tugevat seost soolsusega.



Joonis 12. Fosfaadi kontsentratsiooni ja soolsuse vertikaalsed profiilid. Mõõtmised jaamas LL15, veebruar 1992 ja 2012.

Ava-Läänemere kirdeosast pärinev vesi määrab suurel määral Soome lahe süvakihi hapniku- ja toitainetingimused. Stagnatsiooni perioodil lahe põhjalähedase kihi hapnikutingimused paranevad, fosfaadisaldus väheneb ja nitraatide sisaldus suureneb.

Conley *et al* (2002) leidsid, et stagnatsiooni perioodid Ava-Läänemeres viivad süvakihi hapniku defitsiidini, kuid sel ajal on Soome lahte jõudev Ava-Läänemere halokliini ülaosa vee hapnikusisaldus kõrgem kui peale Põhjameri soolase ja hapnikurikka vee sissetungi perioode. Estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumised transpordivad toitaineid mere ülakihti lisaks sügis-talvisele segunemisele. Selle tagajärjel jõuavad pinnakihti fosfaadid, mis on hapnikuvaestes tingimustes settepinna vabanenud ja ka transporditud Ava-Läänemere kirdeosast Soome lahe põhjalähedasse kihti. Fosfaadi sisalduse suurenemine eufotilises kihis intensiivistab eutrofeerumist läbi tsüanobakterite õitsengute. Tsüanobakterid on  $\text{NO}_x$  defitsiidi korral võimelised omastama lahustunud atmosfääri lämmastikku. Seeläbi toimub uue lämmastiku transport veesambasse.

## 11 KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärk oli kirjeldada ja analüüsida Soome lahe estuaarse tsirkulatsiooni ja estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise mõju talviste hapniku ja toitainete tingimustele süvakihis. Töös kasutati Soome lahes U/L Salme (TTÜ Meresüsteemide Instituut) 2013–2014 talvel ja kevadel kogutud mõõtmisandmeid. Kuue uurimisreisi käigus teostati CTD (varustatud hapniku anduriga) sondeerimisi ja koguti veeproove 12 jaamas (A1–A12) piki voolunõva (*thalweg*) lahe lääne- ja keskosas. Veeproovidest määrati toitainete (nitrit-nitraat ( $\text{NO}_x$ ), fosfaat ja ammoniaak) kontsentratsioonid. Kõige läänepoolsemad jaamad (A1 ja A2) asetsevad Ava-Läänemere kirdeosas ja jaam A12 oli ligikaudu 200 km idapool jaamast A1. Jaamade vaheline kaugus varieerus vahemikus 10–30 km.

Tallinnamadala majakal mõõdetud tuule andmetel esines perioodidel november–detsember 2013 ja 7–27 märts 2014 kaks estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumiseks soodsat tuule impulssi.

Esimese estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumisega (mõõtmised jaanuari algul), mis oli hästi väljaarenenud, kaasnes stratifikatsiooni kadu (veesamba läbisegunemine) ja hapnikutingimuste paranemine kogu transekti ulatuses 90 m sügavuseni. Sellel perioodil olid ka fosfaadi ja  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonide jaotused veesambas praktiliselt homogeensed. Ammoniaak esines kõige läänepoolsemates jaamades hüpoksilises kihis. Teine estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumine, mis oli nõrgem, toimus märtsis. Aprilli alguses teostatud mõõtmised näitasid estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise jälge idapoolsemates jaamades. Läänepoolsetes jaamades oli näha soolase, hapnikuvaese ja fosfaadirikka vee kiilu levikut lahte. Estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumine on suhteliselt lühiajaline nähtus. Selle käigus toimub hapnikutingimuste paranemine ja põhjakihi fosfaadi transport veesamba ülakihti. Veesamba ülakihti transporditud lisa fosfaat võib soodustada ulatuslikke suviseid tsüanobakterite õitsenguid.

Estuaarse tsirkulatsiooni korral mõjutab Soome lahe põhjakihi soolsust, hapniku- ja fosfaadisisaldust Ava-Läänemere kirdeosa vee levik lahte. Soolase vee leviku tulemusel lahe põhjakihti tekkis tugev halokliin 60—80 m sügavusel. Pinnakihis levis jõgede sissevoolust tingitud magedam vesi. Hapnikutingimused halokliini peal olid head, halokliinis olid hüpoksilised tingimused. Estuaarse tsirkulatsiooni korral olid fosfaadi ja ammoniaagi kontsentratsioonid põhjalähedases kihis hüpoksia tingimustes suured.

Lineaarne regressioonanalüüs näitas tugevat negatiivset korrelatsiooni soolsuse ja hapnikusisalduse ja tugevat positiivset korrelatsiooni soolsuse ja fosfaadi sisalduse vahel. Hapniku- ja fosfaadisisalduse vahel oli tugev negatiivne korrelatsioon. See näitab, et Soome lahe põhjakihi vee omadused sõltuvad voolurežiimi muutustest ja estuaarse tsirkulatsiooni korral pärineb Soome lahe põhjakihi vesi Ava-Läänemere kirdeosast, kus on suure soolsuse, hüpoksia ja suure fosfaadisisaldusega vesi.

Veevahetus Ava-Läänemere kirdeosaga ei ole ainus Soome lahe süvakihi fosfaadi sisaldust määrav tegur. Oluline osa on ka põhjakihi setetest hüpoksilistes tingimustest vabaneval fosforil. Fosfori sidumisvorm settesse määrab, kas fosfor vabaneb setetest veesambasse või mattub ja on toitaineringlusest eemaldatud.

Töö tulemusena on näidatud, et estuaarse tsirkulatsiooni korral esinesid Soome lahe lääne- ja keskosa põhjakihis tugev stratifikatsioon, hüpoksilised, fosfaadi- ja ammoniaagirikkad tingimused.  $\text{NO}_x$  kontsentratsioonid olid väga väikesed. Estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise korral toimus veesamba läbisegunemine, põhjakihi hapnikutingimuste lühiajaline paranemine ja fosfaadi transport põhjakihist ülakihti.

## 12 SUMMARY

The aim of this dissertation was to describe and analyze the influence of estuarine circulation and reversal of estuarine circulation in winter oxygen and nutrient conditions in deep layer of the Gulf of Finland. Field data used in this dissertation was collected in winter of 2013 and in the spring of 2014 onboard the R/V Salme, which belongs to Marine Systems Institute at Tallinn University of Technology. During the six performed surveys along the thalweg of the gulf, in 12 stations (A1–A12) CTD (equipped with oxygen sensor) vertical profiles were recorded and water samples were collected. Concentrations of nutrients (nitrit-nitrate ( $\text{NO}_x$ ), phosphate and ammonia) from water samples were measured. The westernmost stations (A1 and A2) were located in the north east of Baltic Proper and station A12 was located approximately 200 km east from station A1. The distance between the stations varied within a range of 10–30 km.

The wind data were obtained at Tallinnamadal Lighthouse. Wind data showed two time intervals, December 2013 and March 7–27, 2014 when estuarine circulation reversals were observed.

During the first reversal of estuarine circulation (measurements in the beginning of January 2014) water column was mixed down to the depth of 90 m and as a result oxygen conditions improved along the whole transect. Vertical distributions of phosphate and  $\text{NO}_x$  concentrations were practically homogeneous. Ammonia occurred only in hypoxic conditions in the westernmost stations. Second reversal of estuarine circulation took place in March. Measurements made in the beginning of April showed traces of reversal of estuarine circulation in the easternmost stations. Salty water which was poorly oxygenated and rich of phosphate intruded into the bottom layer of the gulf in the westernmost stations. Reversal of estuarine circulation is short-term phenomenon. In the process of reversal oxygen conditions improved and bottom layer phosphate is transported into upper layer. Excess phosphate in the upper layer may favor extensive summer cyanobacteria blooms.

In case of estuarine circulation salinity, oxygen and phosphate conditions in bottom layer of the Gulf of Finland are influenced by water that spreading from the NE Baltic Proper. At a depth of 60—80 m developed strong halocline. The inflow of fresh water from the rivers caused lower salinity of the surface layer. Oxygen conditions above the halocline were good, but in halocline hypoxic conditions occurred. During the estuarine circulation phosphate and ammonia concentrations in the deep layer were large in the hypoxic conditions.

Linear regression analysis showed high negative correlation between salinity and oxygen concentration and high positive correlation between salinity and phosphate concentration. Between oxygen and phosphate concentrations was high negative correlation. Thus, bottom layer water of the Gulf of Finland depended on alternation of flow regime and in the case of estuarine circulations was strongly influenced by saline, hypoxic and phosphate rich water originating from the NE Baltic Proper.

Water exchange with the NE Baltic Proper is not the only factor that determines phosphate content in the bottom layer of the Gulf of Finland. An important part of it holds phosphate that is released in hypoxic conditions from the bottom layer. Binding form of the phosphate determines whether the phosphate is released from sediment to the water column or is buried and removed from the nutrient circulation.

Results of this dissertation showed that in case of estuarine circulation strong stratification, hypoxic, phosphate and ammonia rich, but poor  $\text{NO}_x$  conditions prevailed in the bottom layer of the western and central part of the Gulf of Finland. Reversal of the estuarine circulation resulted in the mixing of water column, bottom layer oxygen conditions improved for short term and phosphate was transported from bottom layer into the upper layer.



### 13 KASUTATUD KIRJANDUS

Alenius, P., Myberg, K., Nekrasov, A. (1998) The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review. *Boreal Environment Research*, 3, 97–125.

Ammermann, J. (2001) QuikChem<sup>®</sup> Method 31-115-01-1-I – Determination of orthophosphate by flow injection analysis. Lachat Instrument.

Bergström S. and Carlsson B.: River runoff to the Baltic Sea: 1950-1990. *Ambio*, 23, 280–287, 1994.

Conley, D. J., Humborg, C., Rahm, L., Savchuk, O. P., Wulff, F. (2002) Hypoxia in the Baltic Sea and basin-scale changes in phosphorus biochemistry. *Environmental Science of Technology*, 36, 5315–5320.

Egan, L. (2000) QuikChem<sup>®</sup> Method 31-107-04-1-D – Determination of nitrate and/or nitrite in brackish waters by flow injection analysis. Lachat Instrument.

Elken, J., Raudsepp, U., and Lips, U. (2003) On the estuarine transport reversal in deep layers of the Gulf of Finland. *Journal of Sea Research*, 49, 267–274.

Elken, J., Raudsepp, U., Lips, U. (2002) On the estuarine transport reversal in deep layers of the Gulf of Finland. *Journal of Sea Research*, 49, 267–274.

Haapala J. (1994) Upwelling and its influence on nutrient concentration in the coastal area of Hanko peninsula, entrance to the Gulf of Finland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38 (5), 507–521.

HELCOM (2003) The Baltic Marine Environment 1999-2002. *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 87. Erweko Painotuote Oy, Helsinki, p 47.

HELCOM (2009) Eutrofication in the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings*, 115B.

HELCOM (2010) Maritime activities in the Baltic Sea – an integrated thematic assessment on maritime activities and response to pollution at sea in the Baltic Sea Region. *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 123, 68 pp.

Jalkanen, J. P., Johansson, L., Kukkonen, J. (2013) A comprehensive inventory of the ship traffic exhaust emissions in the Baltic Sea from 2006 to 2009. *AMBIO*, 14 pp., <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-013-0389-3>.

Kalli, J., Saikku, R., Repka, S., Tapaninen, U. (2012) Maritime traffic externalities in the Gulf of Finland until 2030. *Transport*, 27 (1), 92–101, <http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2012.668497>.

Karlsson, K., Rosenberg, R., Bonsdorff, E. (2002) Temporal and spatial large-scale effects of eutrophication and oxygen deficiency on benthic fauna in Scandinavian and Baltic waters - review. *Oceanography Marine Biology Annual Review*, 40, 427–789.

Laanemets, J., Väli, G., Zhurbas, V., Elken, J., Lips, I., Lips, U. (2011). Simulation of mesoscale structures and nutrient transport during summer upwelling events in the Gulf of Finland in 2006. *Boreal Environment Research*, 16A, 15 - 26.

Laanemets, J., Kononen, K., Pavelson, J., Poutanen, E.-L. (2004) Vertical location of seasonal nutriclines in the western Gulf of Finland. *Journal of Marine Systems*, 52 (1–4), 1–13, doi: 10.1016/j.jmsys.2004.03.0030.

Laanemets, J., Zhurbas, V., Elken, J., Vahtera, E. (2009) Dependence of upwelling mediated nutrient transport on wind forcing, bottom topography and stratification in the Gulf of Finland: model experiments. *Boreal Environment Research*, 14 (1), 213–225.

Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009) *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. UK: Praxis Publishing Ltd.

Liblik, T., Laanemets, J., Raudsepp, U., Elken, J., Suhhova, I. (2013). Estuarine circulation reversals and related rapid changes in winter near-bottom oxygen conditions in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Science*, 9, 917–930, doi:10.5194/os-9-917-2013.

- Liblik, T., Lips, U. (2011) Characteristics and variability of the vertical termohaline structure in the Gulf of Finland in summer. *Boreal Environment Research*, 16, 73–83.
- Lips, U., Lips, I., Liblik, T., Elken, J. (2008) Estuarine transport versus vertical movement and mixing of water masses in the Gulf of Finland (Baltic Sea). In: IEEE Conference Proceedings, US/EU-Baltic Symposium *Ocean Observations, Ecosystem Based Management & Forecasting*, Tallinn, 27–29 May, 2008, IEEE, 2008, (IEEE Conference Proceedings), 1–8.
- Lukkari, K., Leivuori, M., Kotilainen, A. (2009) The chemical character and behavior of phosphorus in poorly oxygenated sediments from open sea to organic-rich inner bay in the Baltic Sea. *Biogeochemistry*, 96, 25–48.
- Mort, P.H., Slomp, P.C., Gustafsson, G.B., Andersen, J.T. (2009) Phosphorus recycling and burial in Baltic Sea sediments with contrasting redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 1350–1362.
- Myrberg K., Andrejev O., (2003) Main upwelling regions in the Baltic Sea – a statistical analysis based on three-dimensional modeling. *Boreal Environment Research*, 8 (2), 97–112.
- Nehring, D. (1994) Quality assurance of nutrient data with special respect to the HELCOM Baltic Monitoring Programme. *Baltic Sea Environment Proceedings*, 58, 23–47.
- Palmén E (1930) Untersuchung über die Strömungen in den Finnland umgebenden Meeren. *Soc Sci Fenn, Comm Phys-Math* 5: 1–94.
- Pitkänen, H., Lehtoranta, J., Peltonen, H. (2008) The Gulf of Finland. In: Schiewer, U. (Ed.), *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies*, 197, 285–304. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pitkäinen, H., Lehtoranta, J., Peltonen, H., Laine, A., Kotta, J., Kotta, I., Moskalenko, P., Mäkinen, A., Kangas, P., Perttilä, M., Kiirikki, M. (2003) Benthic release of phosphorus and its relation to environmental conditions in the estuarial Gulf of Finland, Baltic Sea, in the early 2000s. *Estonian Journal of Ecology*, 52, 3, 173–192.

- Raudsepp, U., Laanemets, J., Maljutenko, I., Hongisto, M., Jalkanen, J.-P. (2013) Impact of ship-borne nitrogen deposition on the Gulf of Finland ecosystem: an evaluation. *Oceanologia*, 55 (4), 837–857.
- Redfield, A.C. (1963) The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46, 205–221.
- Savchuk, O., Wulff, F., Hille, S., Humborg, C., Pollehne, F. (2008) The Baltic Sea a century ago - a reconstruction from model simulations, verified by observations. *Journal of Marine Systems*, 74, 485–494.
- Seifert, T., Tauber, F., and Kayser, B. (2001) A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea – 2nd edition, *Baltic Sea Science Congress*, november 25–29, poster 147.
- Soomere, T., Keevallik, S. (2003) Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 9, 73–90.
- Vahtera E., Laanemets J., Pavelson J., Huttonen M., Kononen K. (2005) Effect of upwelling on the pelagic environment and bloom-forming cyanobacteria in the Western Gulf of Finland, Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 58 (1–2), 67–82.

