

Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut

The background of the slide is a photograph of a lake with a dense forest in the distance and a field of tall, golden-brown reeds in the foreground. A semi-transparent white box is overlaid on the center of the image, containing the title text in red.

Uuringud Vööla mere ökoloogilise potentsiaali parandamise jätkutööde teostamiseks

Projekti vastutav täitja: Prof. I. Ott

Tartu, 2013

Sisukord

1	Sissejuhatus	3
2	Materjal ja metoodika.....	4
2.1	Hüdroloogiline režiim ja füüsikalis-keemilised mõõtmised.....	4
2.2	Vööla mere sete	6
2.2.1	Laboratoorsed analüüsid	7
3	Tulemused	9
3.1	Vööla hüdroloogiline režiim.....	9
3.2	Sette kirjeldus	23
3.3	Sette keemiline koostis	25
3.4	Fraktsioonid	29
3.5	Inkubatsioonikatse	33
4	Ettepanekud	34
5	Kasutatud kirjandus	36
6	Lisad	38

1 Sissejuhatus

Vööla merd on EMÜ PKI Limnoloogiakeskus külastanud oma vaatluste käigus 1974. a. alates. Viimased kümmekond aastat on toimunud tihedamad vaatlused ja alati olnud olukord kehv, mille on tinginud madal vesi, väike veemaht, ulatuslik roostik, vaesunud elustik. Paradoksaalsel kombel lokkab selles järves kaitsealune õrn taim – vahelmine näkirohi. Vööla mere kohta on kompleksne ülevaade esitatud vastavas rannajärvedele pühendatud raamatus (Rannikulõukad..., 2012). EL Veepoliitika Raamdirektiiv nõuab >50 ha suuruste, kesises ja kehvemas seisundis olevate järvede, tervendamist. Kuna veekogu paikneb Silma looduskaitsealal, siis seda enam on tarvilik olukorda parandada. Veekogude meetmekava väljatöötamine nõuab mitmeid eeluuringuid. Need peavad andma vastused küsimustele:

Kui suurt koormust talub?

Kas ja kust tuleb reostus?

Milline on veerežiim, kas seda saaks veekogule soodsamaks muuta?

Kui palju on setteid, mis kvaliteediga, kus täpselt paiknevad?

Kas esineb nn sekundaarreostus – settest vette imbuivate ainete mõju?

Antud töös oli lähteülesandeks hüdroloogilise režiimi selgitamine, mere ja sissevoolude vee omaduste selgitamine, koormustaluvuse uuringud ja prognoosi tegemine. Uuriti setete fosfori fraktsioonide koostise ja setete kvaliteeti, sekundaarreostuse ohtu ja võimalikku mõju pärast sette eemaldamist. Tehakse ettepanekud tervendamise esimeseks etapiks ja seire kavandamiseks.

Töös osalesid: prof. Ingmar Ott (tööde juhtimine, välitööd, aruande koostamine), PhD. Anu Kisand (sette keemiline analüüs), MSc. Katrin Saar (vee ja setete omaduste analüüs, välitööd, aruande koostamine, videofilmi koostamine), MSc. Katrin Ott (vee omaduste analüüs). MSc. Margot Sepp (välitööd, vee omaduste analüüs), MSc. Kairi Maileht (välitööd), MSc. Aimar Rakko (välitööd), Jüri Zirk (välitööd), Andi Eist (välitööd).

2 Materjal ja metoodika

2.1 Hüdroloogiline režiim ja füüsikalis-keemilised mõõtmised

Vaatlusi tehti järgmistel kuupäevadel: 7.05.2013; 21.05.2013; 17.07.2013; 15.08.2013; 19.09.2013; 23.10.2013. Uuriti nii sissevoolu Kudani lahest kui ka merest (voolu suund, veetaset, voolu kiirus, vooluhulgad). Leiti ka teisi kraave, kuid vesi oli neis voolav vaid kevadel ja väikese hulgaga või siis oli seisev ning seega jäeti need vaatlusest välja.

Vooluhulkade mõõtmisel arvestati A. Maastiku (2006) koostatud vooluhulkade hindamise meetoditega ja kasutati ujukmeetodit pistelise sagedusega. Paralleelselt kasutati vooluhulga mõõtmiseks vastavat sensoriga varustatud vooluhulga mõõtjat SonTek/YSI, Incorporated (*FlowTracker Handheld ADV with 2D side-looking ADV probe*) (fotod 1-2).



Foto 1. Vee vooluhulga mõõtmine seadmega FlowTracker Handheld ADV Vööla merel 19. september 2013 (foto A. Rakko).



Foto 2. Voolukiiruse mõõtja FlowTracker Handheld ADV.

7. mail 17. juuli ja 15. augustil mõõdeti vaid ujukmeetodil. Mai alguses veel seda mõõtmisseadet ei olnud, teistel aegadel oli väga kõrge veetase. Ülejäänud kordadel kasutati mõõtmiste keskmist tulemust. Vaatluste ajal selgus, et ainus maismaalt sissevoolav suurem kraav, Kudani oja, kuivab samuti, nagu teised, väiksemad kraavid. Seepärast veebilansi koostamise plaan, eeldades, et maismaa sissevooludest voolab vesi Vööla merre ja sealt edasi merre, osutus ekslikuks. Veetaseme suur kõikumine on tingitud merevee tasemest ja on praktiliselt samaväärne Lehtma sadama (Hiiumaa põhjaosas) merevee dünaamikaga. Seepärast on võimalik ülevaadet saada teise koha andmete abil. Kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi andmeid (<http://on-line.msi.ttu.ee/?jaam=lehtma>). Uuriti ka vee omadusi (toitesoolad, üldaluselisus, hapnikusisaldus, pH, elektrijuhtivus, redokspotentsiaal, mineraalsus, temperatuur). Välitöödel kasutati mõõtmiseks multisensorit, YSI 6600, mille abil mõõdeti enamus näitajate väärtustest (hapnikusisaldus, hapnikuküllastus, pH, elektrijuhtivus, redokspotentsiaal, mineraalsus, temperatuur).

Üldfosfor määrati kolorimeetriliselt askorbiinhappe ja molübdaatreaktiiviga. Eeskiri põhineb F. Koroleffi meetodil (Reports..., 1977; Grasshoff *et al.*, 1981). Üld-P määramiseks mineraliseeriti proov eelnevalt kaaliumperoksodisulfaadiga. Määramise suhteline viga oli 5%. Üldlämmastiku määramiseks proov eelnevalt mineraliseeriti kaaliumperoksodisulfaadiga ja tekkiv NO_3^- määrati UV spektrofotomeetriliselt. Analüüsi täpsus on 0,03 mg N/l. Üldaluselisus (HCO_3^-) määrati tiitrimisel soolhappega (Unifitsirovannye..., 1977). Määramise absoluutne viga oli 0,03 mg-ekv/l.

2.2 Vööla mere sete

Vööla mere setteuuringute tarbeks koguti setteproovid 26.03.2013 kolmest proovipunktist järve põhjapoolses osas. Setteuuringute proovivõtupunktide asukohad on märgitud allpool toodud joonisel (joonis 1), mille koostamiseks on kasutatud Google Earth kaardirakendust.



Joonis 1. Setteuuringuteks valitud proovipunktid Vööla merel (Google Earth kaardirakendus).

Vööla mere settelasundi horisontaalse ja vertikaalse leviku hindamiseks järve põhjapoolses osas kasutati raudvarrastega vene turbapuuri (kogumiskannu pikkusega 50 cm). Välitööd teostati jääpealt, surudes turbapuuri käsitsi settesse kindlale sügavusele.

Sette iseloomustamiseks hinnati selle veesisaldust, lõimist (muda, savi, liiv, kruus), värvust ning lagunemata karbi- või taimejäänuste esinemist. Settelasundi paksus määrati kuni turbapuuriga läbistamatu liivase, kruusase või kivise setteni.

Setteroovide kogumiseks kasutati Willner-tüüpi settepuuri, mille abil saadi 70 mm läbimõõduga kuni 30 cm paksused vertikaalproovid koos sette pinna kohal oleva veekihiga. Kokku koguti Vööla mere kolmest proovipunktist viis puursüdamikku, mida kasutati sette keemilise koostise määramiseks ja inkubatsioonikatseteks. Gravitatsiooniline settepuur (Willner-tüüpi puur) võimaldab uurida ainult pindmiseid settekihte. Seega sügavamal lasuvate settekihtide fosforisisalduse määramiseks koguti turbapuuriga igast proovipunktist umbes 20 cm paksuse settekihi proovid.

Lisaks koguti igast proovipunktist ka veeproov, et määrata järvevee fosfaatioonide sisaldus.

2.2.1 Laboratoorsed analüüsid

Sette keemilise koostise määramiseks lõigustati puursüdamikud 2-5 cm paksusteks kihtideks. Sete säilitati kuni analüüside läbiviimiseni 4 °C juures pimedas (külmikus), et hoida ära muutusi sette keemilises koostises. Setteproovid homogeniseeriti enne analüüside teostamist.

Settefosfori fraktsioneerimiseks ja keemilise koostise määramiseks kasutati igast proovipunktist ühte settepuursüdamikku ning fosfori vabanemiskatseteks punktist nr. 1 kogutud kahte settepuursüdamikku.

2.2.1.1 Sette keemilised parameetrid

Laboratoorsete analüüside käigus määrati kõigist settekihtidest kuivaine, orgaanilise aine, karbonaatide ja terrigeense aine sisaldus.

Kuivainesisalduse määramiseks kuumutati setet 105 °C juures 24 h jooksul. Kuivaine sisaldus arvutati kuivatamiseelse- ja järgse kaalutise vahena. Orgaanilise aine sisaldus määrati pärast õhkuiva sette põletamist 550 °C juures 4 tunni jooksul. CaCO₃ sisalduse määramiseks kuumutati setet edasi 950 °C juures 2 tunni jooksul. Põletamisel tekkinud kaalukadu omistati

karbonaatidest eraldunud süsihappegaasi kaalule, mille kaudu arvutati karbonaatide sisaldus — kokkuleppeliselt väljendades seda kaltsiumkarbonaadina (Heiri *et al.*, 2001). Terrigeense aine sisalduse leidmiseks lahutati õhkkuiva sette kaalust orgaanilise aine ja kaltsiumkarbonaatide kaal.

2.2.1.2 Settefosfori fraktsioneerimine

Järvesetetes esineb fosfor erinevates keemilistes vormides ehk nn. fraktsioonides.

Fosforifraktsioonide levinuimaks määramise meetodiks on keemiline ekstraheerimine, mille käigus lisatakse settele erinevaid lahuseid ja eemaldatakse erinevad fosforivormid (tabel 1).

Fraktsioone määrati pindmisest kuni 30 cm sügavustest settekihtides, kasutades Psenner *et al.* (1984) fraktsioneerimisskeemi modifitseeringut (Hupfer *et al.*, 1995).

Tabel 1. Fosfori fraktsioonid vastavalt Psenner *et al.* (1984) skeemile (modifitseeritud Hupfer *et al.*, 1995 poolt).

Lühend	Fraktsioon	Kirjeldus
Labiilne-P	NH ₄ Cl-SRP	labiilne ja nõrgalt seotud fraktsioon, kergesti vabanev fosfor
Fe-P	BD-SRP	rauaühenditega seotud fosfor
Al-P	NaOH-SRP	alumiiniumühenditega seotud fosfor
Org-P	NaOH-NRP	orgaanilise ainega seotud fosfor
Ca-P	HCl-TP	peamiselt kaltsiumühenditega seotud fosfor
Jääk-P	Residual-P	orgaaniline ja rasketilahustuv fosforifraktsioon

Fosforikontsentratsioonid igas lahuses määrati spektrofotomeetriliselt Murphy ja Riley (1962) molübdeensinise värvusreaktsiooni meetodil.

Üldfosfori sisaldus sügavamate kihtide settes määrati pärast õhkkuiva sette persulfaatset oksüdeerimist 121 °C juures samuti vastavalt modifitseeritud Psenner *et al.* (1984) meetodile (Hupfer *et al.*, 1995).

2.2.1.3 Inkubatsioonikatse

Settefosfori eksperimentaalsete inkubatsioonikatsete jaoks kasutati kahte proovipunktist nr. 1 kogutud settepuursüdamikku. Settest vette lekkiva fosfori koguse määramiseks inkubeeriti kahte settetoru 45 päeva pimedas 4 °C juures (külmikus). Selleks, et hinnata kui palju fosforit vabaneb inkubatsiooni jooksul, määrati enne ja pärast katseperioodi sette kohal olevas vees lahustunud fosfaatioonide sisaldus spektrofotomeetriliselt molübdeensinise meetodil (Murphy & Riley, 1962). Fosfori dünaamika hindamiseks inkubatsiooniperioodi jooksul teostati ka vahemõõtmine 8. päeval samal meetodil.

Hindamaks algseisu järves, määrati fosfaatioonide sisaldus kogutud veeproovides. Enne fosfaatioonide sisalduse spektrofotomeetrilist määramist (Murphy & Riley, 1962) filtreeriti vesi läbi 0,45 µm poorisuurusega filtri.

3 Tulemused

3.1 Vööla hüdroloogiline režiim

Hüdroloogiliste mõõtmiste tulemused on esitatud tabelis 2. Voolusuunad ja –hulgad on väga labiilsed. Mõnikord muutus kanalis voolusuund isegi meie mõõtmiste ajal.

Tabel 2. Vööla merega ühendatud vooluveekogude vooluhulgad 2013. a.

Koht	Kpv	1000 m ³ /ööp	Märkused
Kanal	7.05.2013	71,6	Vool mere poole
Kraav Kudanist Vöölasse	7.05.2013	7,9	
Kanal	21.05.2013	46,0	Vool mere poolt
Kraav Kudanist Vöölasse	21.05.2013	8,4	
Kanal	17.07.2013	197,3	Vool mere poolt
Kraav Kudanist Vöölasse	17.07.2013		seisev vesi
Kanal	15.08.2013	86,0	Vool mere poolt ja siis

			vahetas suunda
Kraav Kudanist Vöölasse	15.08.2013		seisev vesi
Kanal	19.09.2013	1,8	Vool mere poole, aga ebastabiilne
Kraav Kudanist Vöölasse	19.09.2013		seisev vesi
Kanal	23.10.2013	0,8	Vool mere poole. Suur torm
Kraav Kudanist Vöölasse	23.10.2013	0,1	

Kogu Vööla mere veetase on väga kõikuv. Kui veel veebruaris oli Vööla merel ühendus merega (foto 3), siis hilisemate vaatluste ajal, 26. märtsil, see puudus, sest veekogu oli põhjani külmunud. Jääkate oli kanali läheduses vajunud nõgusaks järgides veekogu põhja reljeefi (foto 4).



Foto 3. Vööla meri 13. veebruaril 2013. a. Ühendus merega on veel olemas (foto I. Ott).



Foto 4. Vööla meri 26. märtsil 2013. a. Vaba vett on vaid üksikutes kohtades paarkümmend sentimeetrit (foto I. Ott).

Veetaseme dünaamikast annavad tunnistust ka fotod (5-10).



Foto 5. Veetase Vööla mere silla all 7. mai 2013. a.



Foto 6. Veetase Vööla mere silla all 21. mail 2013. a.



Foto 7. Veetase Vööla mere silla all 17. juulil 2013. a.



Foto 8. Veetase Vööla mere silla all 15. augustil 2013. a.

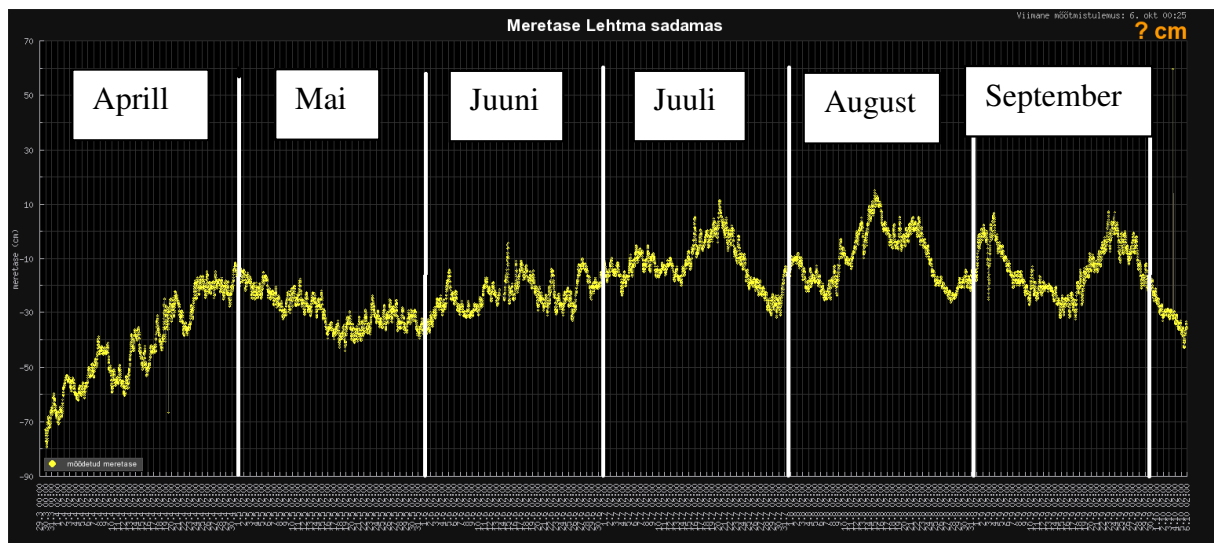


Foto 9. Veetase Vööla mere silla all 19. septembril 2013. a.



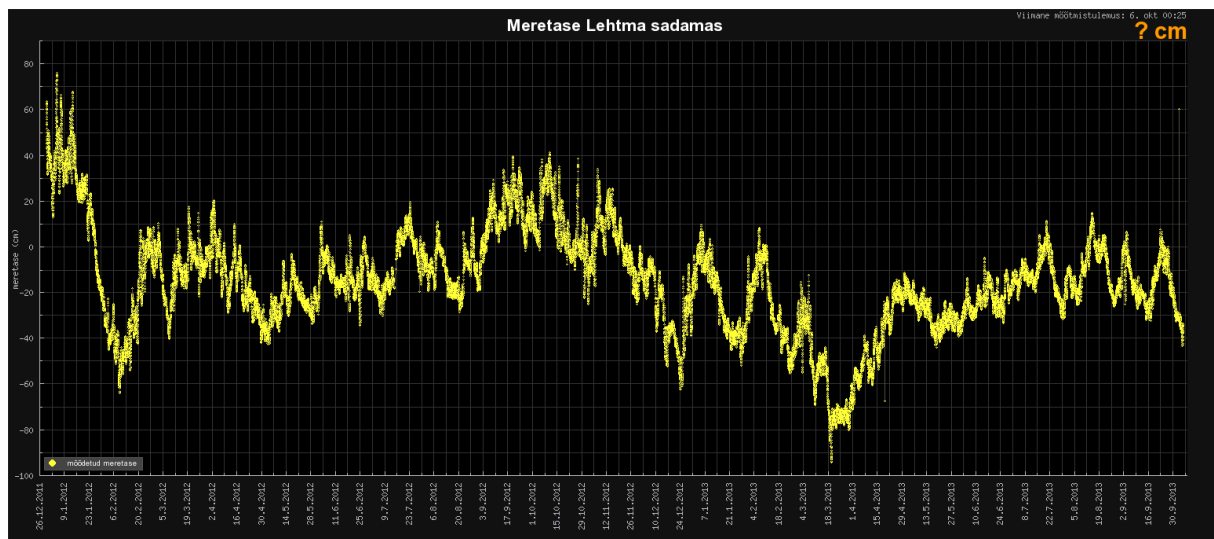
Foto 10. Veetase Vööla mere silla all 23. oktoobril 2013. a.

Uurides nii veetaset, voolusuunda, selle dünaamikat kui ka vee omadusi, selgus, et merevesi liigub Vöölasse sisse-välja väga suure kõikuvusega. Leidsime hea seose meie vaatluste ja Hiiumaa Lehtma sadama veetaseme dünaamika vahel. Seepärast annab hea ülevaate TTÜ Meresüsteemide Instituudi vaatlusrida enamvähem samal ajavahemikul (**joonis 2**).



Joonis 2. Hiiumaa Lehtma sadama veetase ajavahemikul 30.03-6.10.2013 (TTÜ Meresüsteemide Instituut).

Samasugune rahutu dünaamika on valitsenud ka eelmisel aastal ja ilmselt on iseloomulik kogu sellele alale, kus avameri on põhja suunas (**joonis 3**).



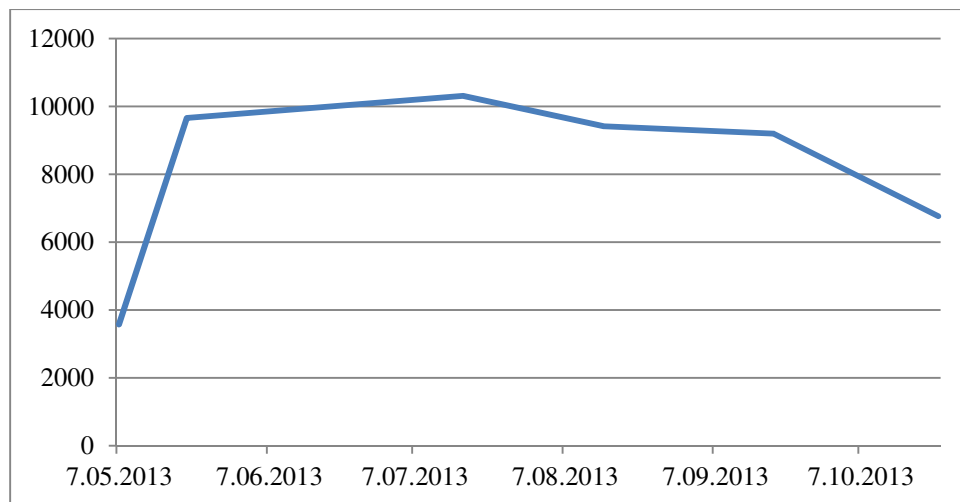
Joonis 3. Hiiumaa Lehtma sadama veetase ajavahemikul 26.11.2012-30.09.2013 (TTÜ Meresüsteemide Instituut).

Analüüsidest veetasest, vooluhulki, voolu suunda, selle dünaamikat ning vee omadusi (joonised 2-3) saime järeldada, et Vööla meri funktsioneerib tavapärasest erinevalt. Vee- ja ainebilansi koostamine teaduslike tavavahenditega ei ole võimalik väga ebastabiilsete tingimuste tõttu. Nii hüdroloogilise režiimi, vee omaduste kui ka setete pinnakihi protsesse mõjutab enam merevee taseme dünaamika. Elektrijuhtivuse jooniselt silla all (joonis 4) ja Kudani kraavist (joonis 5) näeme, kasvuperioodi alguses on vees mageveelised omadused, siis mereveelised ja lõpus suureneb pisut taas mageda vee osakaal. Kõrgema veetaseme juures ulatub merevesi isegi kaugematesse osadesse (Kudani kraavi). Olulise toite-elementi, fosfori, sisalduse dünaamika vees silla all (Joonis 6) ja Kudani kraavis (Joonis 7) tundub esialgu raskesti seletatav. Miks näiteks on suvel Kudani kraavis äkki väga kõrged fosfori väärtused. Samamoodi on küsimuseks, miks on suured väärtused vees silla all oktoobris. Olukord on seletatav veetaseme dünaamika ja selle mõjuga järve sette/vee biogeokeemilistele protsessidele. Väga madalas ja väikse veemahuga Vööla meres loksutab vesi tõustes/ langedes/ lainetades põhjaseteid (joonis 8). Sealt difundeeruvad biogeenid veesambasse ja suurendavad ainete kontsentratsioone. Kui veetase tõuseb mingi aja jooksul, siis kantakse toitesoolade küllased veed ka kaugematesse osadesse, nagu juhtus Kudani kraaviga augustis (joonis 9). Silla juures olevas vees oktoobrikuine väga suur P väärtus on seletatav tormiga, mis toimus sel päeval.

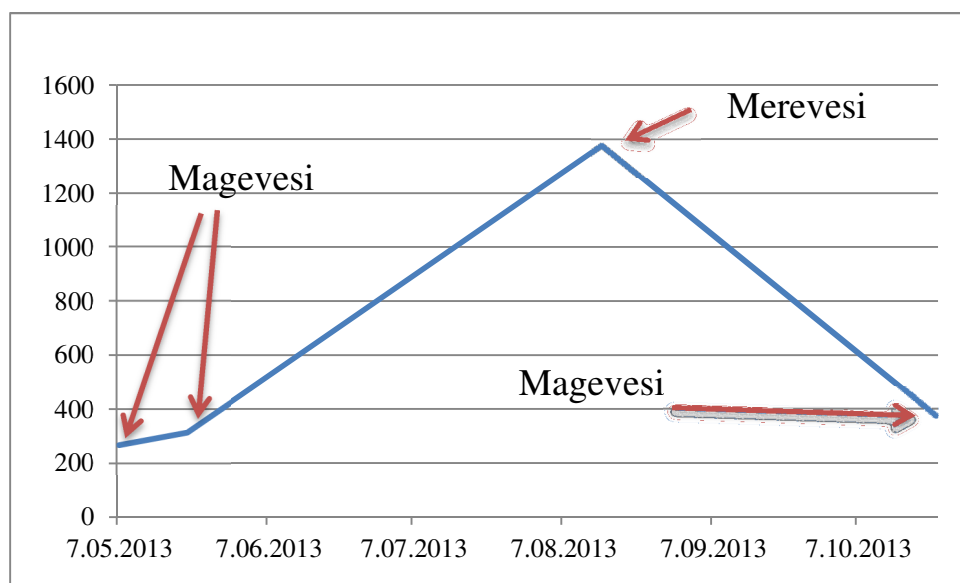
Niimoodi saame üldise seletuse veemahu ja omaduste dünaamikale, millest sõltub kogu ökosüsteemi funktsioneerimine. Veemaht sõltub kõige rohkem merevee tasemest. Maismaa poolt sissevoolavatel veekogudel on väike tähtsus. Merevee taseme intensiivse kõikumuse tagajärjel loksutatakse kogu veemassi ja sette pinnakihte omavahel läbi. Settest eralduvad toitesoolad vette, suurendades kontsentratsioone. Kui valdab merevee tõus, siis uhutakse need ained kaugematesse osadesse, kui valdab taseme langus, siis osaliselt need settivad koha peal, osaliselt kantakse väljavoolu. Seepärast on ilmselt tekkinud ka silla ette setitusala, kus analüüside järgi on ainete kogused suuremad. Osalt kantakse toitesooli ja lahustunud orgaanilist ainet Hara lahte. Selle protsessi intensiivsust on väga raske hinnata voolusuuna suure kõikumuse tõttu.

Tabelis 3. on esitatud määratud vooluveekogude näitajate väärtused, kus võib saada veelkordset kinnitust Vööla mere funktsioneerimise eripärade kohta. Andmetest on aru saada, kus on tegemist peamiselt mere-, kus aga mageveega, kus on elustik omaduste väärtuste kujundaja (nt. suuremad hapnikuküllastuse ja pH väärtused vees silla all, kus merevee

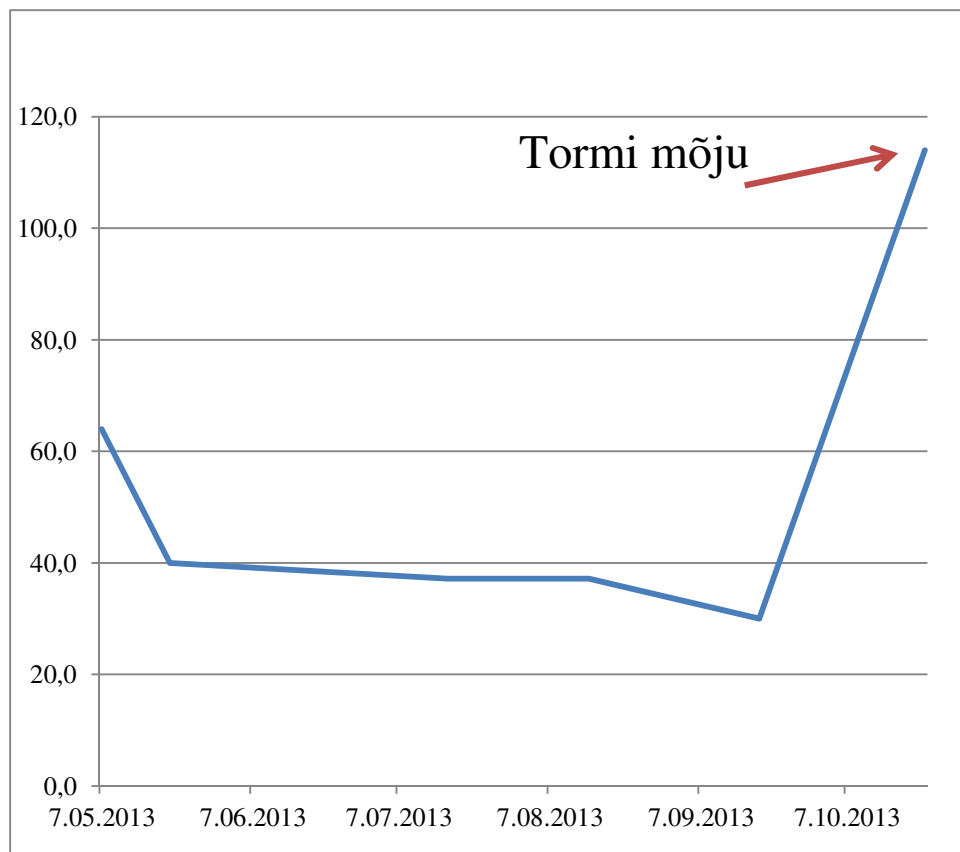
plankton). Lämmastiku väärtused on arusaadavalt suuremad kevadel Kudani kraavis. Kõrge merevee taseme juures N kontsentratsioonid vähenevad.



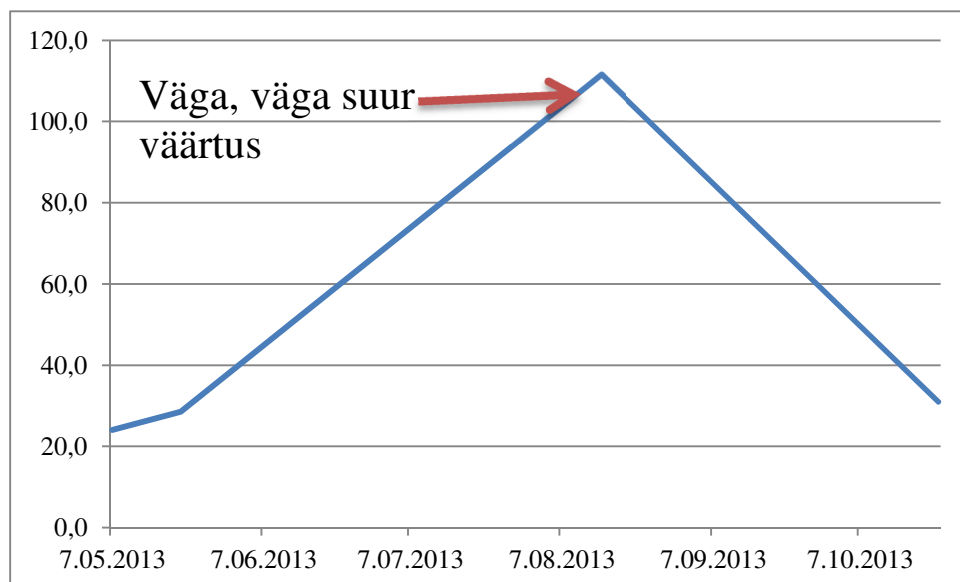
Joonis 4. Vee elektrijuhtivuse väärtused ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Vööla mere silla all 2013. a.



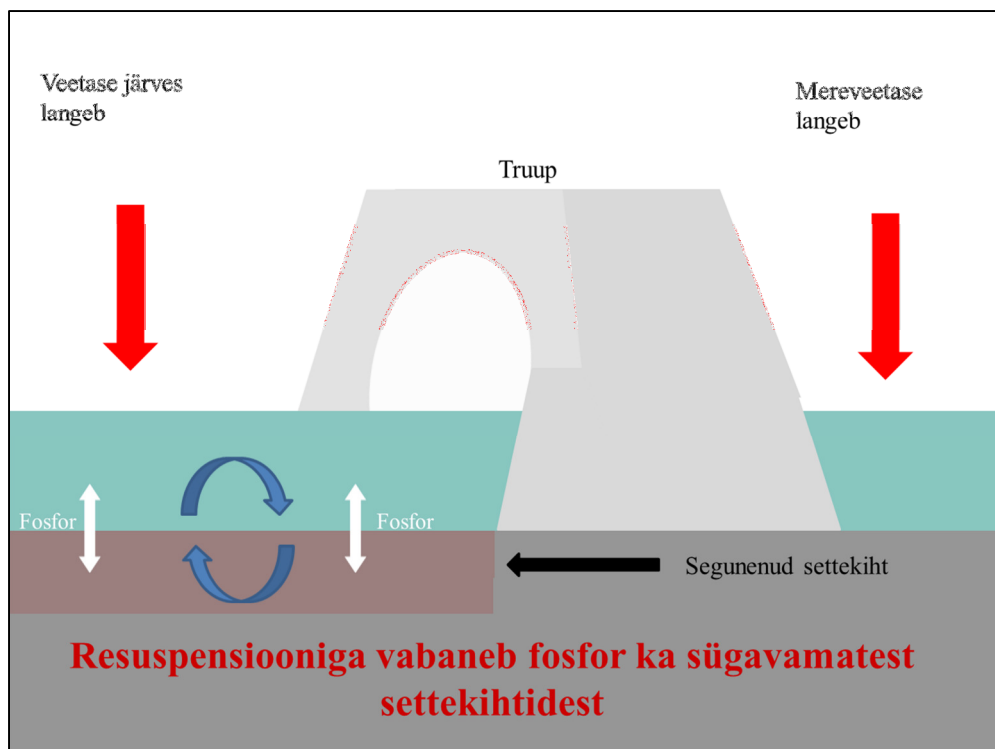
Joonis 5. Vee elektrijuhtivuse väärtused ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Kudani kraavis (sissevool Vööla merre) 2013. a.



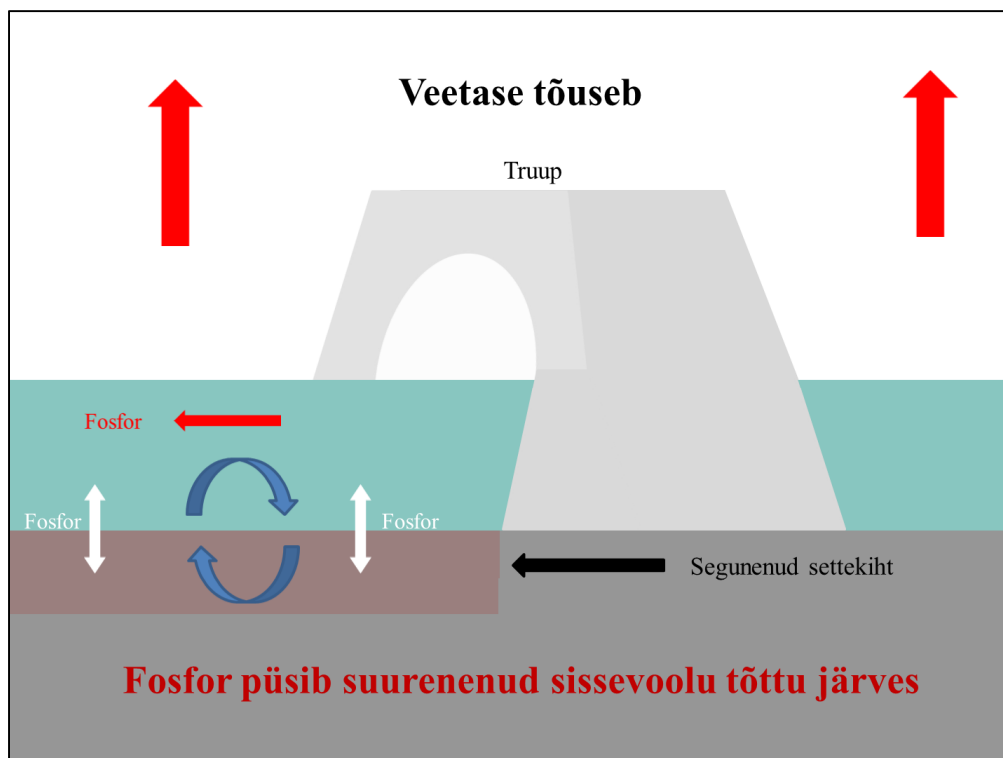
Joonis 6. Üldfosfori sisaldus (mg/m³) Vööla mere vee silla all 2013. a.



Joonis 7. Üldfosfori sisaldus (mg/m³) Kudani kraavis (sissevool Vööla merre) 2013. a.



Joonis 8. Fosfori vabanemine Vööla merest madala veetasemega.



Joonis 9. Fosforisisaldused Vööla mere vees püsivad kõrged, kuna suurenenud veevool merest ei lase toiteainete rikkal järveveel ära voolata.

Tabel 3. Vee omadused Vööla mere vooluveekogudes 2013. a.

Proovivõtu koht	Kuupäev	Püld µg/l	Nüld mg/m ³	Aluselisus, HCO ₃ mg-ekv/l	Temp. °C	O ₂ %	Elektrijuhtivus, mikrom/cm	Mineraalsus, mg/l	pH	Soolsus, PSU	Redokspotentsia al mV
Kudani oja	7.05.2013	24,1	26 00	1	12, 6	55	212	212	7,4		52,7
Sild	7.05.2013	64,0	27 00	1	15, 9	110, 7	3577	2795	8,0 4	2,3	150
Kudani oja	21.05.2013	28,6	11 50	3	19, 7	130, 6	9660	7000	7,4 7		125, 4
Sild	21.05.2013	40,0	61 9	2,1	19, 7	46,7	313,9	267	8,9 2		21,2
Sild	17.07.2013	37,2	78 0	2,85	21, 1	110, 5	1030 4	72410	9,0 4	6,3 5	180, 3
Kudani oja	15.08.2013	111, 4	16 70	2,75	17, 1	38,2	1378	1053	7,9 4		178, 9
Sild	15.08.2013	37,2	10 00	2,1	19	92,4	9416	6909, 5	7,9 9	6,0 4	257
Sild	19.09.2013	30,0	10 00	2,2							
Kudani oja	23.10.2013	31,0	14 70	2,8	6	55	375	382	8,2		154
Sild	23.10.2013	114, 0	14 76	2,7	8	107	6765	6519	8,2 2	5,6 6	152

3.2 Sette kirjeldus

Settelasundi kirjeldus teostati järve põhjaosas kolmes proovivõtupunktis. Vööla mere settelasundi paksus ja sette koostis olid paiguti erinevad. Põhjapool mõjutab settekoostist ühendus Hara lahega. Järve läänekaldas on Hara lahe mõju nõrgem ning see võimaldab akumul eeruda mudasettel, mis põhjapool puudub.

Settelasund oli kõige paksem järve läänekalda proovipunktis (2 m; tabel 4). Antud proovipunktis eraldus settest ka väävelvesiniku lõhna. Pindmisele mudakihi järgnes järjest tihenev aleuriitne muda ning seejärel aleuriitne savi.

Põhjapoolsetes proovipunktides pindmise kihis mudane sete puudus. Hara lahe poolsetes proovipunktides moodustas settelasundi mudane aleuriit, mille all lasus aleuriitne savi. See läks sügavamal üle kas aleuriidiks saviks või liivakaks saviks.

Tabel 4. Vööla mere sette kirjeldus erinevates uuritud proovipunktides.

Proovipunkt	Veesügavus (cm)	Settekiht (cm)	Sette kirjeldus
1	15	0-12	haisev, tume vedel muda
		12-22	aleuriitne muda
		22-108	järjest tihenev aleuriitne muda
		108-150	kihiline aleuriitne savi
		150-170	aleuriitne savi
		170-200	kergelt liivakas savi; settekihi alumises osas kergelt kruusakas
2	3	0-15	lagunenud taimejäänustega mudane aleuriit
		15-145	aleuriitne savi
		145-157	liivakas savi
		157-160	liivane, kruusane savi
3	3	0-13	kergelt liivakas, väikeste kividega ja lagunenud taimejäänustega mudane aleuriit

13-35	lagunenud taimejäänustega aleuriitne savi
35-60	kihiline, järjest tihenev aleuriitne savi
60-64	kergelt liivakas, väikeste kividega aleuriitne savi
64-85	aleuriitne savi
85-88	karbijäänustega aleuriitne savi
88-96	aleuriidikas savi
96-100	väikeste kividega aleuriidikas savi

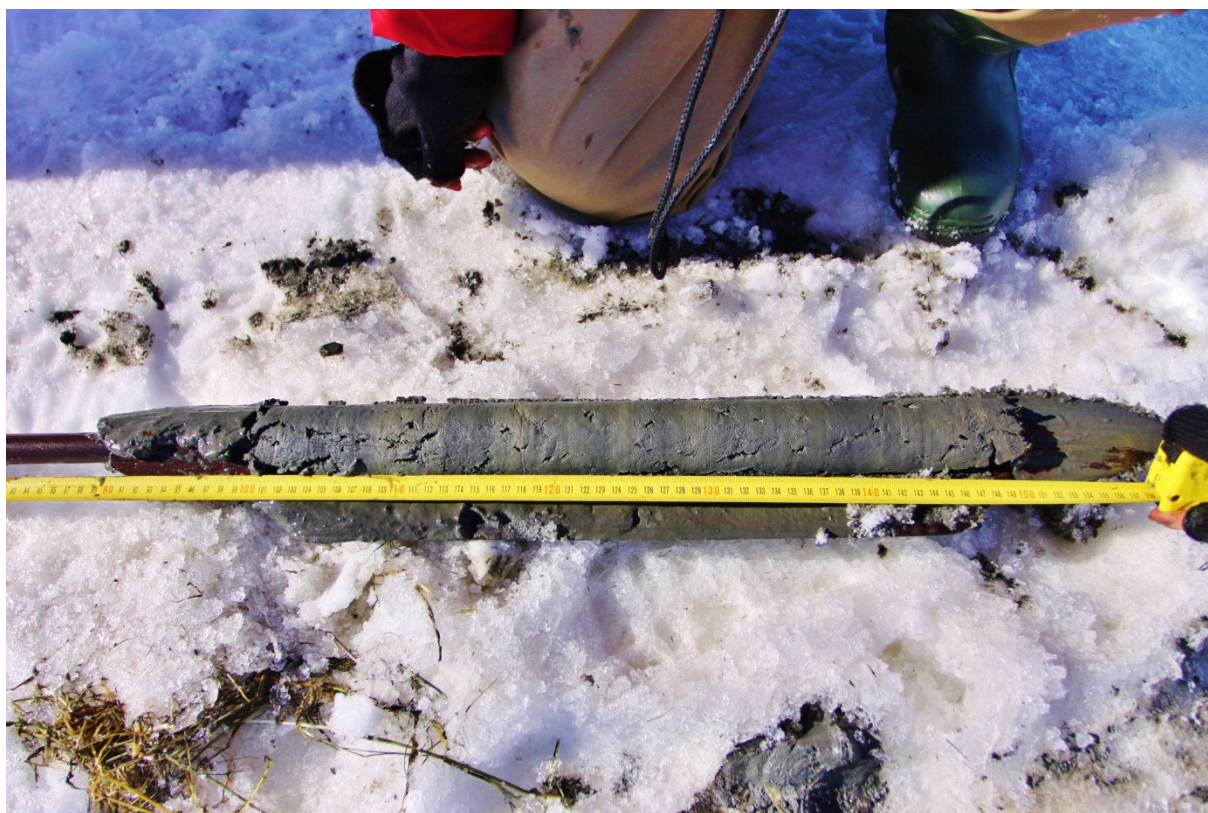


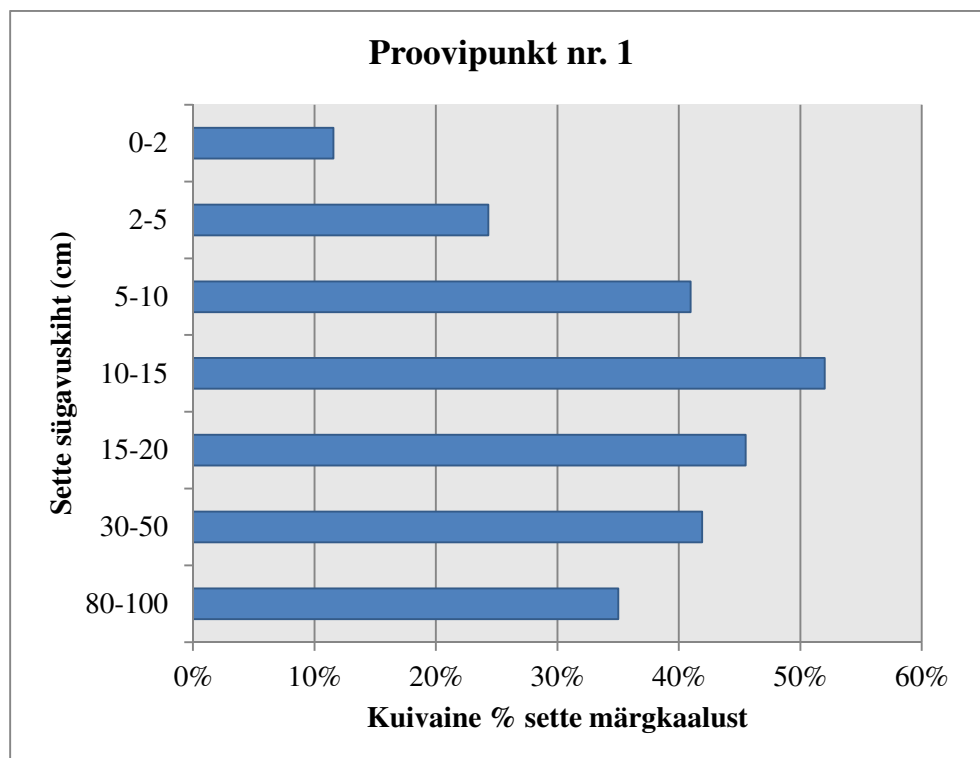
Foto 11. Kihiline sete proovipunktis nr. 1 (Foto I. Ott).

3.3 Sette keemiline koostis

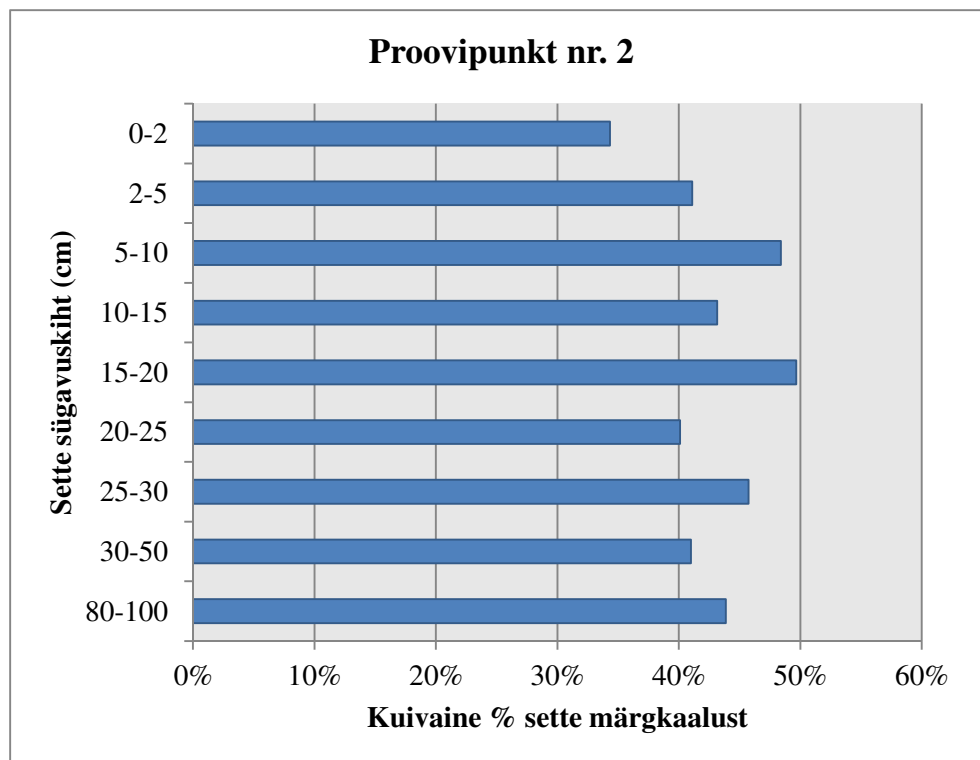
Kuivainesisaldus Vööla mere settes varieerus 11,6 kuni 51,9 % märgkaalust (joonis 10-12).

Üldjoontes olid kuivainesisaldus settes kõrge ja jäi madalaks üksnes proovipunkti nr. 1 pindmistes settekihtides.

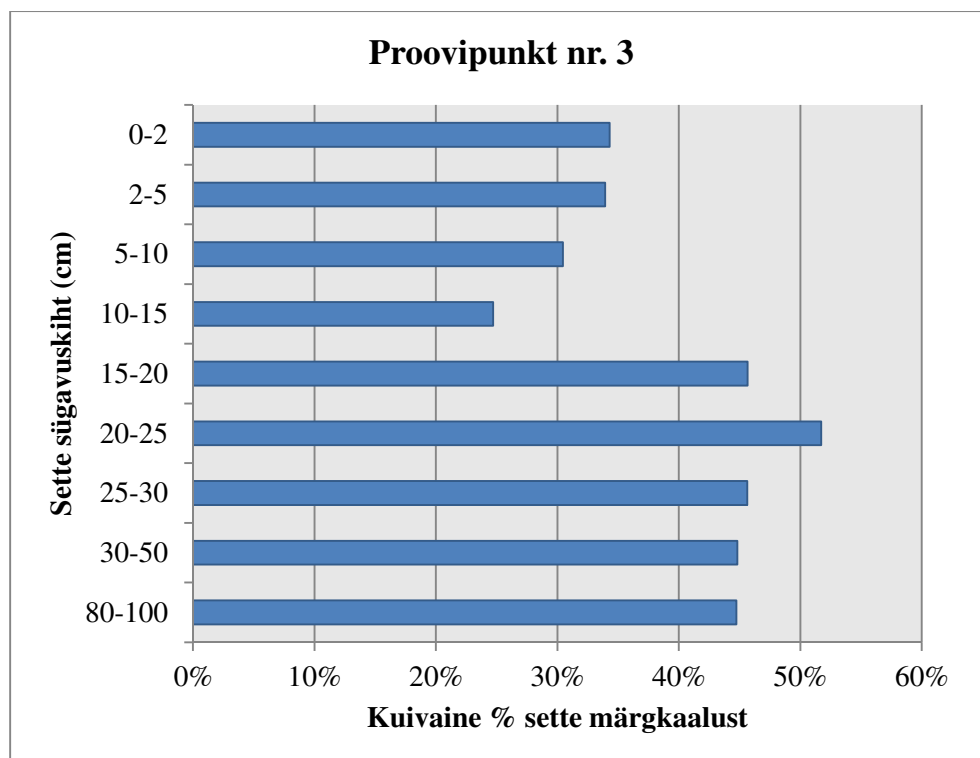
Sette kuivaine jaotatakse veel omakorda orgaaniliseks, karbonaatseks ja terrigeenseks osaks.



Joonis 10. Vööla mere proovipunkti nr. 1 sette kuivainesisaldus.

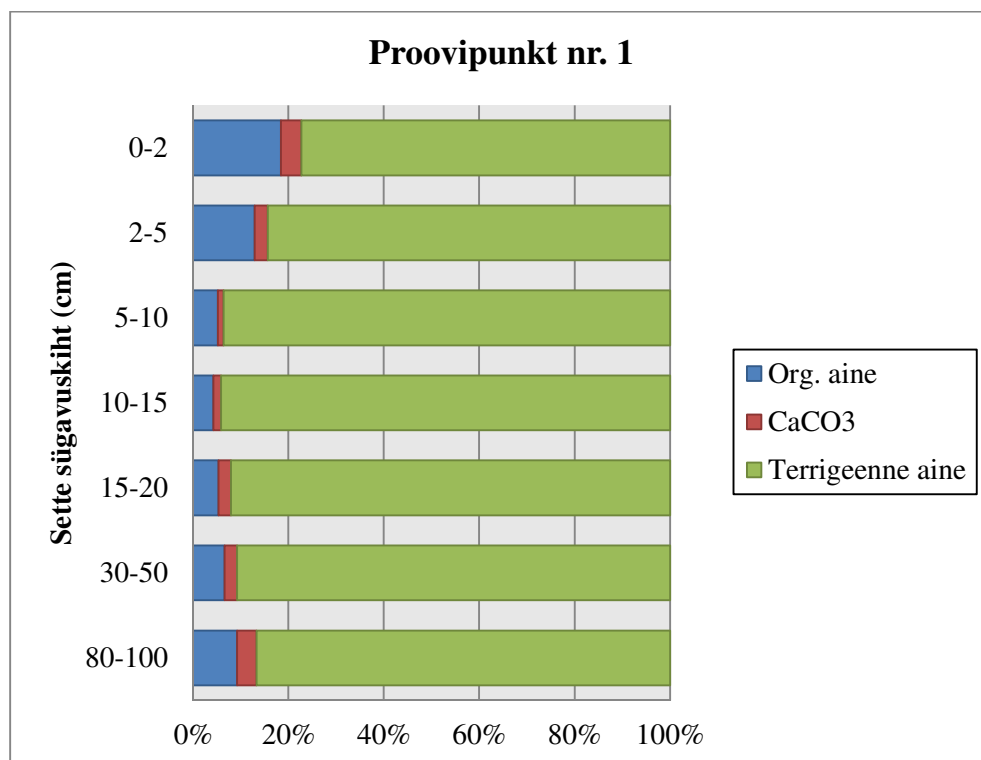


Joonis 11. Võõla mere proovipunkti nr. 2 sette kuivainesisaldus.

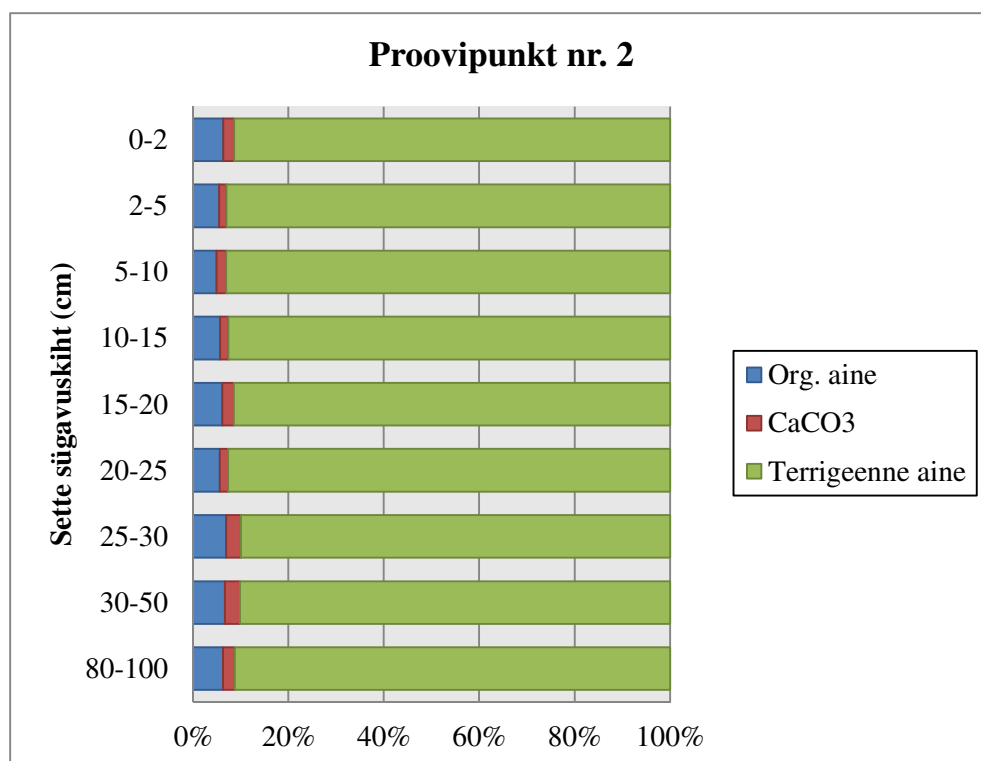


Joonis 12. Võõla mere proovipunkti nr. 3 sette kuivainesisaldus.

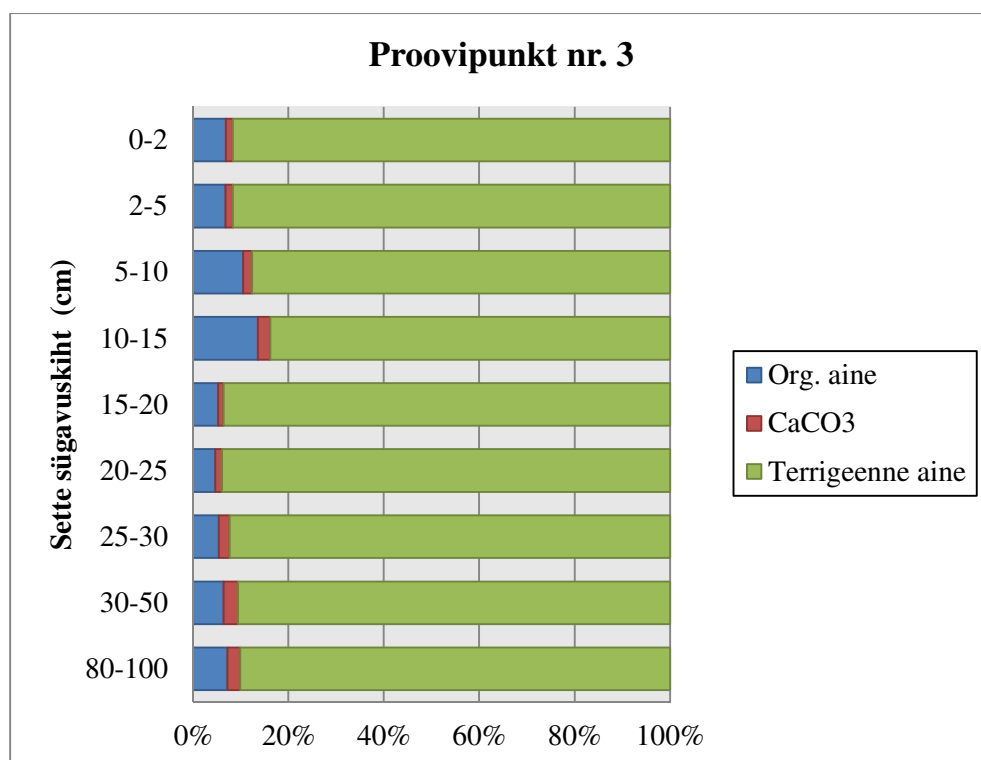
Vööla merele on iseloomulik suur terrigeense aine sisaldus (varieerus 77,3-94,1 %). Kõige väiksema osa kuivainesisaldusest moodustas kaltsiumkarbonaatide hulk, mis oli kõigis proovipunktides sügavuti ühtlane (1,2-4,3 %). Orgaanilise aine sisaldus jäi vahemikku 4,3-18,4 %.



Joonis 13. Vööla mere sette kuivaine koostis proovipunktis nr. 1.



Joonis 14. Vööla mere sette kuivaine koostis proovipunktis nr. 2.



Joonis 15. Vööla mere sette kuivaine koostis proovipunktis nr. 3.

3.4 Fraktsioonid

Fosfor esineb setetes erinevates keemilistes vormides ehk fraktsioonides, millest mõned on inertsed ning ei osale järve fosforiringes, kuid osad on kergesti vabanevad erinevate protsesside läbi. Seega teades fosforivormide jaotust settes, on võimalik paremini mõista järve fosforiringe eripära.

Läänekaldas asuvas proovipunktis (nr. 1) vähenes kõikide fraktsioonide sisalduses sügavuse suurenedes. Samas proovipunktides nr. 2 ja 3 varieerusid fosfori fraktsioonide sisaldused sette vertikaalses läbilõikes, mis on ilmselt tingitud Hara lahe sissevoolu mõjust settekoostisele.

Vööla mere fraktsioonide summa oli kõige kõrgem proovipunktis nr. 1 (929 µg P/g KA) ja jäi madalamaks proovipunktides nr. 2 ja 3. (vastavalt 214 ja 257 µg P/g KA; **joonis 16-18**).

Võrreldes teiste rannajärvedega on Vööla mere pindmise settekihi fosforisisaldus proovipunktis nr. 2 ja 3. sarnane Oessaare (300 µg P/g KA) ja Käomadri lahele (335 µg P/g KA). Samas näiteks Linnulahes ulatus fosforivormide summa 2500 µg P/g KA (Rannalõukad Eestis..., 2012).

Vööla mere pindmises kihis (0-2 cm) olevast sette fosforisisaldusest vähemalt poole (46-59 %) moodustasid labiilsed või potentsiaalselt vabanevad fosforifraktsioonid.

Pindmises, järveveega kokkupuutes olevas settekihis moodustas orgaanilise ainega seotud fosforifraktsioon 30-40 % fraktsioonide summast. Orgaanilise ainega seotud fosfor on potentsiaalselt vabanev fosforivorm, mis võib lekkida settest veesambasse mikroorganismide poolt läbiviidava lagundamise tagajärjel.

Proovipunktis nr 3. Esinesid kõrged orgaanilise ainega seotud P sisaldused ka 5-10 cm ja 10-15 cm kihtides, mis seotud suurema orgaanilise aine hulgaga sette kuivaines.

Suuruselt teise fraktsiooni pindmises settekihis moodustas proovipunktis nr. 1 ja 2. kaltsiumühenditega seotud fosfor (Ca-P; vastavalt 28 ja 29 % fraktsioonide summast) ja truubi lähedal olevas proovipunktis (nr. 3) jääk-P (25 %). Suure Ca-P sisalduse settes võib tingida kõrge vee pH (näiteks 2011. a oli Vööla mere vee pH 10,04), mis soodustab fosfori sorptsiooni kaltsiumühenditega (Boström *et al.*, 1982; Rannikulõukad Eestis..., 2012).

Proovipunktis nr. 3 oli pindmises settekihis kaltsiumühenditega seotud fosfori sisaldus madalam võrreldes teiste proovipunktidega, moodustades 19 % fraktsioonide summast.

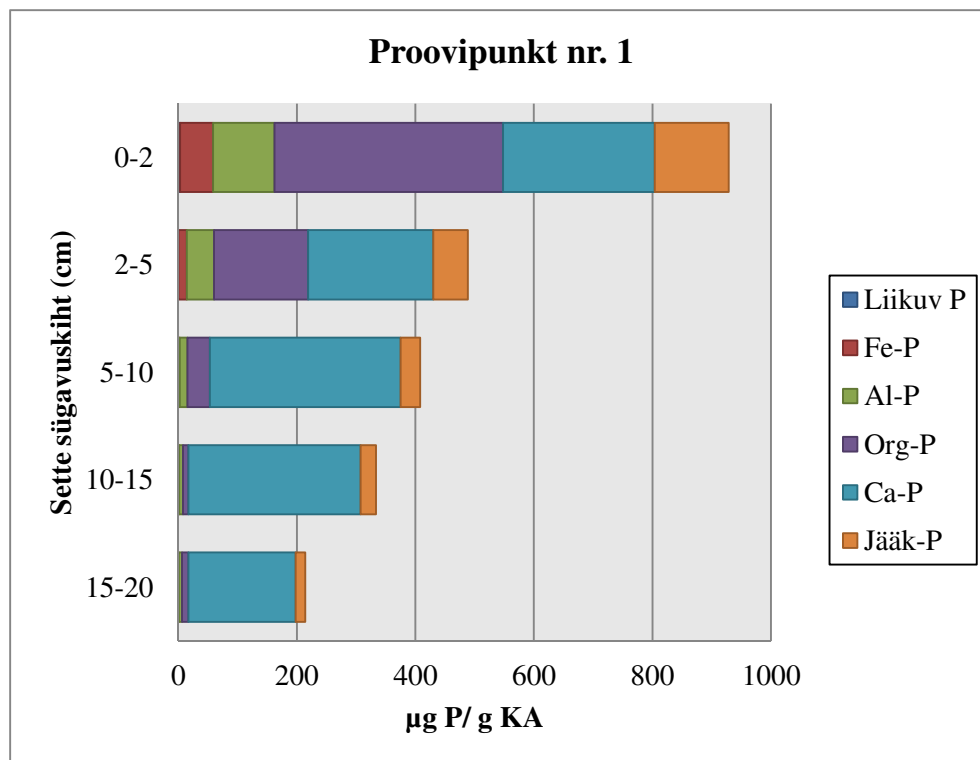
Proovipunktides nr. 1 ja 2. moodustas pindmises settekihis suuruselt kolmanda fraktsiooni

jääk-P. Ca-P ja jääk-P fraktsioone peetakse võrdlemisi inertseks ja arvatakse, et need ei osale järve fosforiringes.

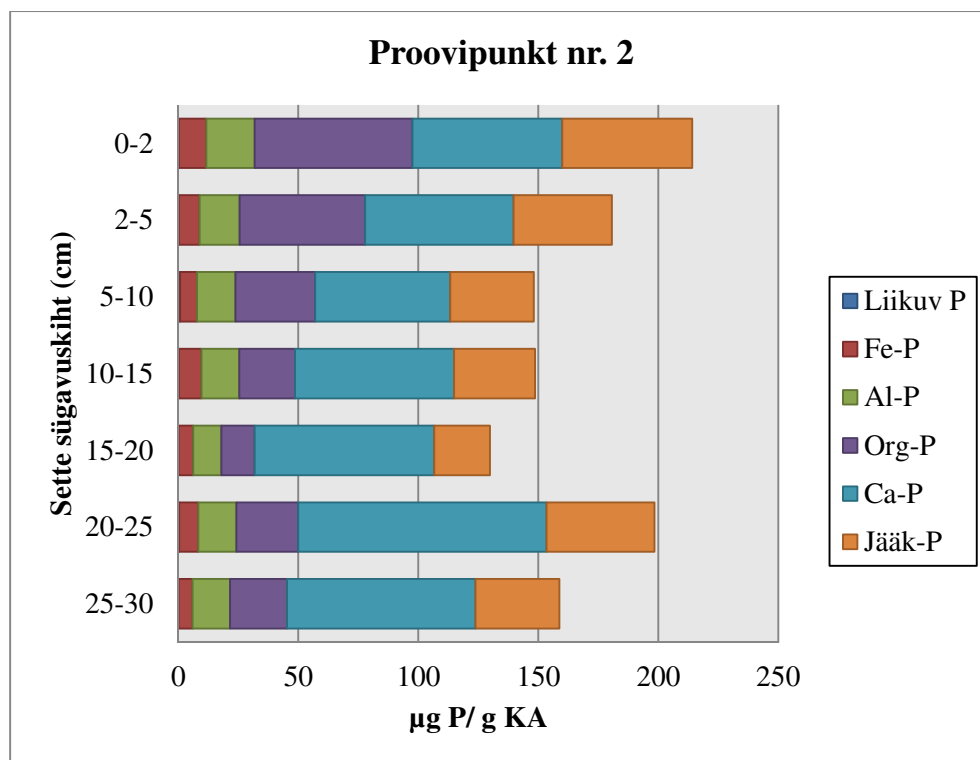
Labiilne fosforivorm (liikuv P) oli kõige väiksem fraktsioon kõigis setteproovides, moodustades ainult 0,04-0,5 % settefraktsioonide summast. Antud fosforifraktsioon sisaldab poorivees lahustunud või nõrgalt osakestele seotud fosforit. Labiilse fraktsiooni sisaldust järvesettes on väga oluline teada, kuna tegemist on kergesti settest vette vabaneva fraktsiooniga, mis on suurtaimedele ja fütoplanktonile kättesaadav. Selle vabanemist mõjutavad erinevad tegurid, kuid madalates järvedes nagu Vööla meri on suurim mõju resuspensioonil, mille tõttu võib suurened lahustunud ühendite kandumine settest veesambasse.

Rauaühenditega (Fe-P) seotud fosfor moodustas 0,4-16 % fraktsioonide summast ja kõrgeimad sisaldused esinesid peamiselt pinnakihi (v.a proovipunktis nr. 3, kus kõrgeimad sisaldused olid settekihtides 5-10 cm ja 10-15 cm). Antud fosforifraktsioon sõltub järves olevatest hapnikuoludest ja redokspotensiaalidest ning võib teatavatel tingimustel settest vabaneda. Madalad järved nagu Vööla meri on tavaliselt hapnikurikkad ning seega on fosfor seotud raud (III) oksiidi osakestega. Samas, kuigi sette pindmine kiht on aeroobne, võib fosfor difundeeruda sügavamatest anaeroobsetest settekihtidest järvevette. Samuti võib vabaneda rauaga seotud fosfor talvel, kui järv on ummuksil.

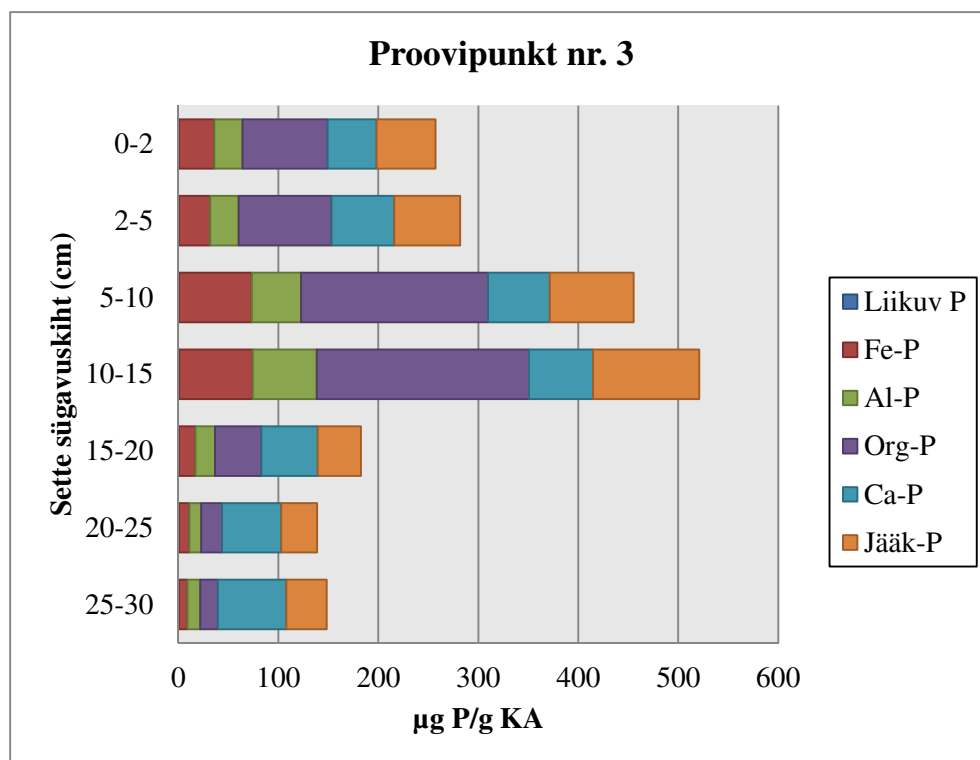
Alumiiniumühenditega seotud fosfor moodustas 1,8-12 % fraktsioonide summast. Läänekaldal olevas proovipunktis vähenesid sisaldus sügavuse suurenedes, kuid proovipunktides nr. 2 ja 3 oli Al-P hulk sügavuti enam vähem ühtlane (8-11 % fraktsioonide summast).



Joonis 16. Fosforifraktsioonide jaotus Vööla mere proovipunkti nr. 1 sette kuivaines (KA).

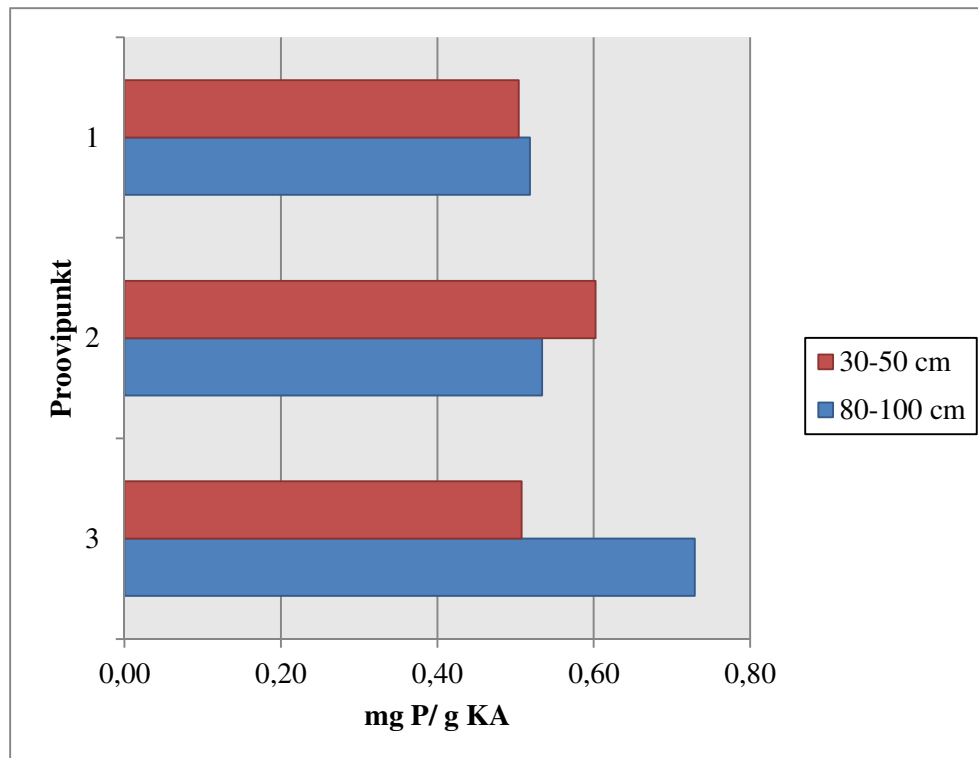


Joonis 17. Fosforifraktsioonide jaotus Vööla mere proovipunkti nr. 2 sette kuivaines (KA).



Joonis 18. Fosforifraktsioonide jaotus Vööla mere proovipunkti nr. 3 sette kuivaines (KA).

Sügavamate kihtide fosforisisalduse hindamiseks määrati sette üldfosfori sisaldus (**joonis 19**). Üldfosfori sisaldused olid sarnased pindmiste kihtide fraktsioonidesummale (fraktsioonide summa annab ligikaudse hinnangu sette üldfosfori sisaldusele).



Joonis 19. Üldfosfori sisaldused Vööla mere sügavamates settekihtides.

3.5 Inkubatsioonikatse

Sette roll järve fosforiringes oleneb sellest, kas fosfor seotakse settesse või vabaneb järvevette. Setteosakeste vahel olevas poorivees lahustunud fosforisisaldus on väike võrreldes sette üldise fosforisisaldusega (enamasti vähem kui 1 %). Samas ületab poorivee fosforisisaldus kordades (isegi 5 kuni 20 kordselt) sette kohal oleva järvevee fosfori kontsentratsiooni. Selline fosfori kontsentratsioonigradient sette ja vee piirpinnal põhjustab lahustunud fosfori difusiooni pooriveest järvevette (Boström *et al.*, 1982). Seega võib lahustunud fosfori juba osalinegi kandumine järvevette oluliselt tõsta selle fosforikontsentratsiooni (Søndergaard *et al.*, 2003).

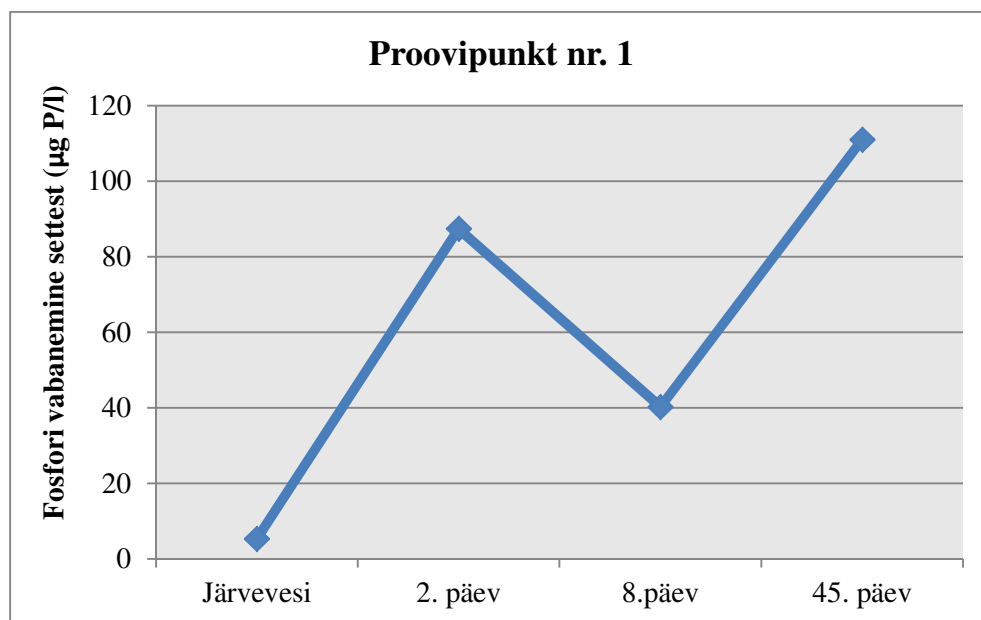
Inkubatsioonikatse käigus vabanes settest $6,13 \text{ mg P m}^{-2}$ ja keskmiselt $0,14 \text{ mg P m}^{-2} \text{ p}^{-1}$ (joonis 20). Inkubatsioonikatse tulemused viitavad, et hapnikuvabas olekus vabaneb settest antud kogus fosforit. Inkubatsioonikatsega sarnased tingimused esinevad järves talvel jääkatte all.

Võrreldes järvevee kontsentratsiooni katse alguses mõõdetud sisaldusega, on näha fosforihulga märkimisväärt tõusu. Transportimisel ja ka inkubeerimisel hoiti settetorusid

võimalikult stabiilsena, et hoida ära loksutamise tagajärjel sette segunemist või gaasimullide vabanemist. Vööla mere proovipunkti nr. 1 sette pind oli vedel ja kergesti lenduv ning seetõttu suurenes fosforisisaldus sette kohal olevas vees märkimisväärselt. Sarnane olukord võib esineda ka järves, kui tuule ja lainetuse mõjul sete seguneb ja toimub fosfori vabanemine veesambasse sügavamatest settekihtidest.

Samuti oli katse käigus näha gaasimullide vabanemist, mille tõttu sete segunes ning fosforirikas poorivesi segunes järveveega.

Inkubatsioonikatse lõpus settetoru korki avades eraldus tugevat väävelvesiniku lõhna.



Joonis 20. Fosfori dünaamika 45 päevase inkubatsiooniperioodi jooksul.

4 Ettepanekud

Vastavalt osapoolte vahel toimunud arutelule 07.10.2013 Keskkonnaministeeriumis ja Projektibüroo KODA OÜ aruandele (Vööla mere taastus- ja parandustööde II etapi tehniline ja tehnoloogiline tööprojekt, 2013) on soovitatav eemaldada setet Vööla mere põhjapoolses osas 20 ha suurusel alal Hara lahe sillast kuni läänekaldal asuva paadikanalini.

Vööla mere sette on kergesti lenduv ning väiksemagi häiringu korral suureneb sette resuspensioon ning selle tagajärjel suureneb fosfori vabanemine settest vette. Seega tuleb töödeldav ala piirata, et vältida primaarprodutsentidele kättesaadava fosfori sisalduse suurenemist.

Suurtaimede eemaldamine tuleks läbi viia Vööla mere põhjakaldalt Hara lahe poolsest osast. Lääne- ja idakaldal tuleks jätta roostikud alles, et tagada vahelmise näkirohu sobiv elupaik selles järves. Konkreetsed ettepanekud tööde teostamise ala ulatuse ja mahu kohta on esitatud projektibüroo KODA OÜ aruandes.

Vööla mere optimaalse veetaseme säilitamiseks tuleks rajada silla juurde lävend, mis takistaks veekogus drastilist veetaseme langust. See peaks olema ehitatud vahenditest, mis võimaldaks kalade läbipääsu mere ja järve vahel. Tehnilise lahenduse väljatöötamiseks peab kaasama veeinsenerid. Sõltumata lävendi konstruktsioonist võiks olla optimaalne veetase praeguste teadmiste alusel 0,1 m ümp. See täpsustub järgmise Vööla mere projekti jooksul. Sel juhul on inimestel takistatud paatidega Hara lahele minek silla Vööla poolsest poolest. Olukorra lahendamiseks sobiks randumispaiga rajamine silla Hara lahepoolsesse külge.

Kaitsealuse taimeliigi, vahelmise näkirohu, säilitamiseks peab järgima Keskkonnaameti nõuet – eksemplarid peavad olema ümberistutatud sobivasse elupaika. Selleks sobivad Vööla mere kagupoolse osa roostiku ja avavee piiril olevad alad.

Vööla mere majandamiseks oleks otstarbekas seirata tegevuste mõju. Need seisnevad kompleksse elustiku seires vastavalt keskkonnaministeeriumi määrusele (Pinnaveekogumite..., 2009). Tervendamistööde ajal tuleb analüüsida Vööla mere osades vees lahustunud ainete (toitesoolad, pH, lahustunud orgaaniline aine, vee värvus, elektrijuhtivus, kollane aine) kontsentratsioone. Nii selgitatakse tööde mõju ulatus. Oluline on mõõta ka veetaset ja täpsustada sellega väljavoolule ehitatava lävendi kõrgust merepinnast.

Tervendamistöödel (sette eemaldamine ja taimede niitmine/eemaldamine) võivad olla järgmised mõjud Vööla mere seisundile:

Setete resuspensioon vette. Selle vältimiseks tuleb töötlusala ekraniseerida või muul moel takistada ainete kandumist üle veekogu.

Elustiku mehhaaniline kahjustamine. See on paratamatu. Arvestama peab asjaoluga, et enamus liike on väga laia ökovalentsiga (väga omane rannajärvedele) ning tegevus ei kahjusta

liikide bioloogilist varu. Kaitsealuste liikide puhul (vahelmine näkirohi) tuleb eksemplareid teisaldada uude elupaika samas veekogus.

Veetaseme režiimi muutus. Selles osas kehtib reegel, et mida kõrgem veetase (veekogu looduslikus sängis), seda parem ökoloogiline seisund. Veetaseme langus ei ole ühelgi tingimusel vastuvõetav ja seda peaks vältima. Nii madalas veekogus, nagu seda on Vööla meri, parandab ka veevahetuse parandamine ökosüsteemi seisundit. Sügavamates järvedes ei pruugi see nii olla.

Eemaldatud setete ja taimede ladustamine. Kui jäetakse võimalus valgvete naasmine Vööla merre, siis see võib kahjustada ökoloogilist seisundit. Tehniliselt peab olema tagatud, et järve valguks vaid looduslikul biogeenide kontsentratsiooni tasemel olev vesi.

Vööla mere uuringute kohta on valmistatud videofilm:

<http://www.youtube.com/watch?v=SzJ9VqxJ2fA>

5 Kasutatud kirjandus

Boström, B., Jansson, M. & C. Forsberg. 1982. Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 18. 5-59.

Grasshoff, K., Ehrhardt, M. & Kremling, K., 1981. *Methods of Seawater Analysis*. New York.

Heiri, O., Lotter, A. F. & G. Lemcke. 2001. Loss of ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. 25. 101-110.

Maastik, A. 2006. Hüdrolöogia ja hüdromeetria. Eesti Maaülikool. 2006. 108 lk.

Pinnaveekogumite moodustamise kord ja nende pinnaveekogumite nimestik, mille seisundiklass tuleb määrata, pinnaveekogumite seisundiklassid ja seisundiklassidele vastavad

kvaliteedinäitajate väärtused ning seisundiklasside määramise kord, 2009. Keskkonnaministri 28. juuli 2009. a. määrus nr 44 (RTL, 06.08.2009, 64, 941)

Psenner, R., Puccsko, R. & M. Sager. 1984. Die Fraktionierung organischer und organischer Phosphorverbindungen von Sedimenten: Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 70. 111-155.

Rannikulõukad Eestis ja Läänemere keskosas. 2012. Kose, M. (toim.). Natureship. 143 lk.

Reports of the Baltic Intercalibration Workshop, 1977. Kiel.

Søndergaard, M., Jensen., J. P. & E. Jeppesen. 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia.* 506-509. 135-145.

Interneti allikad

Järvede tervendamise kogumik

www.limnos.eehttp://pk.emu.ee/struktuur/limnoloogiakeskus/teadustoo/publikatsioonid/jarvede-tervendamine-kogumik/

Lehtma sadama veetase: <http://on-line.msi.ttu.ee/?jaam=lehtma>

Vööla mere uuringute kohta on valmistatud videofilm:

<http://www.youtube.com/watch?v=SzJ9VqxJ2fA>

6 Lisad

6.1 Lisa



Foto 12. Setteproovi kogumine Vööla merelt 26.03.2013. Järv oli kohati põhjani külmunud (foto I. Ott).

6.2 Lisa



Foto 13. Setteproovi kogumine turbapuuriga settelasundi kirjeldamiseks (foto I. Ott).

6.3 Lisa



Foto 14. Vööla mere proovipunkti nr. 1 settekiht 50-100 cm (foto I. Ott).

6.4 Lisa

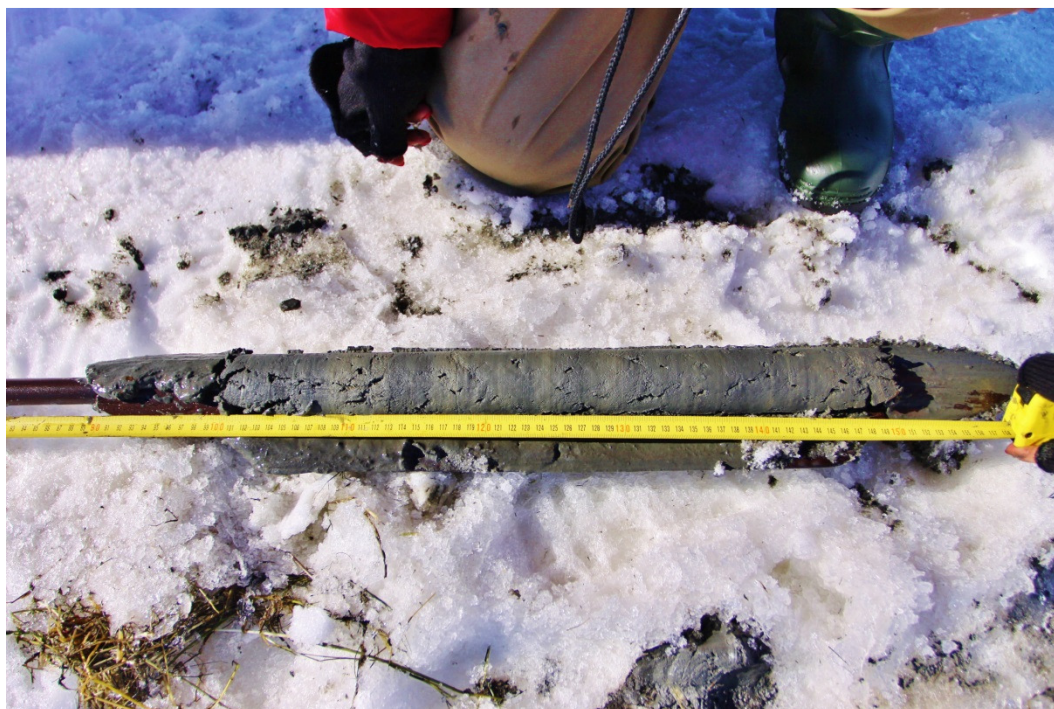


Foto 15. Vööla mere sete proovipunktis nr. 1 settekiht 100-150 cm (foto I. Ott).

6.5 Lisa



Foto 16. Vööla mere proovipunktis nr. 1 settekiht 150-200 cm (foto I. Ott).

6.6 Lisa



Foto 17. Vööla mere proovipunktis nr. 2 settekiht 0-50 cm (foto I. Ott).

6.7 Lisa



Foto 18. Vööla mere proovipunktis nr. 2 settekiht 50-100 cm (foto I. Ott).

6.8 Lisa



Foto 19. Vööla mere proovipunktis nr. 2 settekiht 110-160 cm (foto I. Ott).

6.9 Lisa



Foto 20. Vööla mere proovipunktis nr. 3 settekiht 0-50 cm (foto I. Ott).

6.10 Lisa



Foto 21. Vööla mere proovipunktis nr. 3 settekiht 50-100 cm (foto I. Ott).

6.11 Lisa



Foto 22. Settepuursüdamik Vööla mere proovipunktist nr. 1 (foto K. Saar).

6.12 Lisa



Foto 23. Settepuursüdamikku lõigustamine fosforifraktsioonide ja keemilise analüüsi jaoks (foto K. Saar).