

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

**Tallinna lahe meresetete fosfori ning selle vormide sisalduste ruumiline varieeruvus**

**Anne Greete Gribulis**

Juhendajad: Markus Ausmeel,  
Martin Liira

Tartu 2026

## **Tallinna lahe meresetete fosfori ning selle vormide sisalduste ruumiline varieeruvus**

Inimtegevuse tagajärjel merekeskkonda kantud toitainete põhjustatud eutrofeerumine on suurim keskkonnaprobleem Läänemeres. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli Tallinna lahe kui potentsiaalselt suurima maismaalt lähtuva reostusega Eesti rannikuveekogumi meresetete mobiilse fosfori hulga hindamine. Töös uuriti üldfosfori ja mobiilse fosfori sisaldusi Tallinna lahe meresetetes. Töö tulemusena leiti, et Tallinna lahe keskkonnaseisund on üldfosfori sisalduse osas hea ja mobiilse fosfori osakaal ning potentsiaalselt vabaneva fosfori sisaldused Tallinna lahe setetes olid oodatust madalamad.

Märksõnad: Tallinna laht, meresetted, fosfor

CERCS kood: P420 petroloogia, mineraloogia, geokeemia

## **Spatial variation in the content of phosphorus and its forms in marine sediments of Tallinn Bay**

Eutrophication caused by nutrient loading as a result of human activity is the biggest environmental problem in the Baltic Sea. The aim of this bachelor's thesis was to assess the amount of mobile phosphorus in marine sediments of Tallinn Bay, as the Estonian coastal water body with potentially the highest level of land-based pollution. The thesis examined contents of total phosphorus and mobile phosphorus in marine sediments of Tallinn Bay. The results of the thesis show that the environmental status of Tallinn Bay is good in terms of total phosphorus content. The percentage of mobile phosphorus and the content of potentially mobile phosphorus in the sediments of Tallinn Bay were lower than expected.

Keywords: Tallinn Bay, marine sediments, phosphorus

CERCS code: P420 petrology, mineralogy, geochemistry

## Sisukord

1. Sissejuhatus.....	5
2. Teoreetiline taust .....	6
2.1. Läänemere üldine kirjeldus .....	6
2.2. Soome laht .....	6
2.3. Tallinna laht.....	7
2.4. Eutrofeerumine .....	8
2.4.1. Fosfor .....	8
3. Materjalid ja meetodid .....	10
3.1. Fosfori fraktsioneerimine .....	12
3.2. Andmeanalüüs .....	14
4. Tulemused .....	15
4.1. Setete üldine koostis .....	15
4.2. Fosfor .....	21
4.2.1. Fosfori fraktsioonid.....	23
5. Arutelu.....	28
5.1. Tallinna lahe settekeskkond .....	28
5.2. Fosfor Tallinna lahes .....	29
5.2.1. Mobiilne fosfor .....	30
5.2.2. Potentsiaalselt vabanev fosfor.....	32
6. Kokkuvõte.....	34
Summary .....	36
Tänuavaldused .....	37
Kasutatud materjalid .....	38
Lisad.....	42
Lisa 1.....	42
Lisa 2.....	43

Lisa 3.....	44
Lisa 4.....	45

## 1. Sissejuhatus

Läänemeri on poolsuletud riimveeline sisemeri, kus viimase 150 aasta jooksul on inimtegevuse tõttu mitmekordselt suurenenud toitainete, peamiselt fosfori- ja lämmastikuühendite, sissekanne (Gustafsson *et al.*, 2012). Suurenenud toitainete sisaldus merekeskkonnas põhjustab fütoplanktoni leviku tõusu ja eutrofeeruvate alade laienemist ja intensiivistumist (HELCOM, 2023). Settesse akumulunud fosfor võib sealt soodsatel tingimustel tagasi veesambasse vabaneda ja tagada eutrofeerumise jätkumise ka peale toitainete sissekande lõppemist või olulist vähenemist (Ahlgren *et al.*, 2005). Eutrofeerumise tulemusel väheneb Läänemeres kättesaadava hapniku hulk ja liigirikkus maailma kontekstis haruldases ökosüsteemis (HELCOM, 2023).

Fosfor esineb meresetetes erinevates vormides, millest osad võivad settest vabanedes põhjustada veekogu eutrofeerumist. Käesolevas töös loetakse mobiilseteks fosfori vormideks labiilset fosforit, raua- ja mangaaniühenditega seotud fosforit ning  $\frac{1}{4}$  ulatuses biogeenset orgaanilist fosforit.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on Tallinna lahe kui potentsiaalselt suurima maismaalt lähtuva reostusega Eesti rannikuveekogumi meresetete mobiilse fosfori hulga hindamine. Mobiilse fosfori sisalduste põhjal hinnatakse potentsiaalselt settest vabaneva fosfori hulka. Varasemalt pole uuritud fosfori ja selle vormide sisalduste ruumilist varieeruvust Tallinna lahe meresetetes, kuid suurel rahvastikutihedusel Tallinna lahe ümbruses ja valgalal võib olla oluline roll toitainete sissekandel ja eutrofeerumise levikul. Eesti rannikuveekogumite halva keskkonnaseisundi üheks peamiseks põhjuseks on liigne fosfori sisaldus vees (Keskkonnaministerium, 2022). Seejuures pole aga piisaval määral uuritud mobiilse fosfori hulka Eesti mereala setetes.

## 2. Teoreetiline taust

### 2.1. Läänemere üldine kirjeldus

Läänemeri on riimveeline poolsuletud sisemeri, mille ainsad ühendused maailmamerega on kitsad Taani väinad (Uscinowicz, 2011). Kitsas ühendus maailmamerega tähendab, et veevahetus Läänemeres on aeglane, keskmiselt kuni 30 aastase perioodiga (Elken *et al.*, 2018). Helsingi komisjon jagab Läänemere Botnia laheks, Botnia mereks, Saaristomereks, Soome laheks, Liivi laheks, Läänemere avaosaks, Belti mereks, Sundiks ja Kattegatiks (Uscinowicz, 2011). Läänemere pindala koos Taani väinadega on umbes 418 500 km<sup>2</sup> ja sügavaim punkt on Gotlandi lähedal asuv Landsorti süvik, mis ulatub 459 m sügavusele (Uscinowicz, 2011). Läänemere keskmine sügavus on 53 m (Tuuling *et al.*, 2011). Läänemeri on üks suurimaid riimveelisi veekogusid maailmas (Tuuling *et al.*, 2011). Valgalal, mis on mere pindalast neli korda suurem ning jõgederohke, elab üle 85 miljoni inimese (Uscinowicz, 2011). Mere soolsus väheneb Taani väinadest eemaldudes ja on Läänemere põhja- ja idaosas kuni 0,1% (Tuuling *et al.*, 2011). Järsk halokliin ehk soolsushüppekiht 50–70 m sügavusel eraldab selgelt magedama ja soolasema vee ning halokliinist sügavamal ulatub mere soolsus 1,5–2%-ni (Tuuling *et al.*, 2011). Erineva soolsusega veekihid segunevad omavahel vähe ning seetõttu on piiratud ka hapniku jõudmine Läänemere sügavamatesse kihtidesse (Elken *et al.*, 2018).

### 2.2. Soome laht

Soome laht on poolsuletud veekogu pindalaga 29 600 km<sup>2</sup>, millest Eesti majandusvööndisse kuulub 8400 km<sup>2</sup>, ning lahe valgala pindalaks on 423 000 km<sup>2</sup> (HELCOM, 2021; Suuroja *et al.*, 2016). Maksimaalne sügavus on 138 m Osmussaare lähedal, kuid keskmine sügavus jääb 37 m juurde (Suuroja *et al.*, 2016). Soome lahel on vaba veevahetus Läänemere avaosaga ja vee viibeajaks on hinnatud 1,8 aastat (Elken *et al.*, 2018). Soome lahe ääres asuvad Eesti, Soome ja Venemaa ning lahe valgale jääb mitmeid suure rahvastikutihedusega piirkondi (HELCOM, 2021).

Soome laht asub põhiliselt Balti kilbi lõunanõlval, kus avanevad Svekofenni orogeneesi aegsed 1,9-1,88 miljardi aasta vanused metasedimendid ja -vulkaniidid (Kirs *et al.*, 2009; Suuroja *et al.*, 2016). Erandiks on intrusiivsed rabakivimassiivid, kus leiduvad 1,67-1,62 miljardi aasta vanused Statheri ajastu porfüürilaadsed kaaliumpäevakivigraniidid (Kirs *et al.*, 2009). Soome

lahe lõunaosas asub Ida-Euroopa platvorm, kus avanevad Ediacara, Kambriumi ja Ordoviitsiumi settekivimid (Suuroja *et al.*, 2016).

Ediacara ladestu on esindatud erinevate terrigeensete setetega, peamiselt esinevad nõrgalt kuni keskmiselt tsementeerunud liivakivid savikamate ja aleuriitsemate vahekihtidega (Suuroja *et al.*, 2016). Kambriumi settekivimid lasuvad Soome lahe lõunaosas Ediacara kivimitel stratigraafilise lüngaga (Suuroja *et al.*, 2016). Kambriumis leidub sinisavi, glaukoniitliivakivi, nõrgalt tsementeerunud kvartslivakivi, aleuroliiti ning fosforiiti (Suuroja *et al.*, 2016). Kambriumi ja Ordoviitsiumi üleminek on pidev fosforiidi lasundis ning Ordoviitsiumi kivimid esinevad Soome lahe edelaosas (Suuroja *et al.*, 2016). Fosforiidil lasub graptoliitargilliit, sellel glaukoniitliivakivi ja karbonaatkivimid, põhiliselt on tegu lubjakividega, kuid leidub ka mergleid ja dolomiite (Suuroja *et al.*, 2016). Soome lahe aluspõhja kivimitel lasuvad erinevad Kvaternaari setted, levivad nii Pleistotseeni kui Holotseeni setted (Suuroja *et al.*, 2016).

### **2.3. Tallinna laht**

Eestis on merealad jaotatud mõttelisteks rannikuveekogumiteks ning Tallinna laht on osa laiemast Muuga-Tallinna-Kakumäe lahe rannikuveekogumist (Keskkonnaministeerium, 2022). Suur rahvaarv ja -tihedus Tallinna lahe vahetus läheduses ja valgatal laiemalt toob endaga kaasa arvestatava inimõju majandustegevuse, tööstuste ning tiheda meretranspordi näol (Suuroja *et al.*, 2016). Martin & Herkül (2018) andmetel on laiem Tallinna lahe piirkond üks suurima antropogeense surve all olevaid rannikuveekogumeid Eestis. Lisaks on Heinsalu *et al.* (2024) sõnul Tallinna laht üks tõenäoliselt suurima sisekoormusega ehk potentsiaalselt vabaneva fosfori hulgaga veekogumeid Eestis. Suuroja *et al.* (2016) ja Heinsalu *et al.* (2024) on varasemalt leidnud, et Tallinna lahes esineb nii sette akumulatsioonialasid kui ka erosiooni- ja transpordialasid.

Tallinna lahes levivad kristalse aluskorra kivimitest Tallinna vööndi amfiboliitsed kivimid ja Naissaare plutooni rabakivi (Kirs *et al.*, 2009). Settekivimitest leidub Tallinna lahe alal Ediacara ladestu peene- ja keskmiseteraline liivakivi, aleuriit ja savi ning Kambriumi ladestu savid, peeneteralised ja aleuriitsed liivakivid (Suuroja *et al.*, 2016). Kvaternaari ajastu setetest levivad kõige laiemal alal savi ja viirsavi, lisaks leidub liiva ja kruusa, merelist muda, peenliiva, aleuriiti, moreeni ning Kopli ja Kakumäe poolsaarte ümbruses asuvad aluspõhja avamused (Suuroja *et al.*, 2016).

## 2.4. Eutrofeerumine

Inimtekkeline eutrofeerumine on üks peamiseid merekeskkonna probleeme ja ohte elurikkusele Läänemeres (Elken *et al.*, 2018). Eutrofeerumist merekeskkonnas põhjustab toitainete koormus, mis soodustab fütoplanktoni levikut ja kasvu ning orgaanilise aine akumulatsiooni (HELCOM, 2023). Põhilisteks eutrofeerumist põhjustavateks toitaineteks peetakse fosforit ja lämmastikku (HELCOM, 2023). Fosfori võime settest tagasi veesambasse vabaneda ka aastakümneid peale keskkonda sattumist muudab selle eutrofeerumise probleemi vaatest tähtsaimaks toitaineks veekeskkonnas (Ahlgren *et al.*, 2005). Madal hapnikusisaldus mere põhjalähedastes kihtides toob endaga kaasa fosfaatide vabanemise settest, mille käigus satub fosfor tagasi veesambasse, intensiivistades eutrofeerumist (HELCOM, 2023; Ausmeel *et al.*, 2024).

Toitained jõuavad Läänemerre peamiselt jõgede kaudu või otse tööstustest ja reoveejaamadest (HELCOM, 2023). Suur osa jõgedest lähtuvast hajuskoormusest on põhjustatud põllumajanduses kasutatavatest lämmastik- ja fosforväetistest, mille lõpuni tarbimata jäägid kantakse pinnaveega merre (HELCOM, 2023). Põllumajandusest lähtuv toitainete hajuskoormus pärineb valgalal suurelt territooriumilt (Elken *et al.*, 2018). Punktkoormuseks loetakse lokaliseeritud asukohaga reostust ja sinna alla kuuluvad Tallinna lahe kontekstis heitvee merre suunamine ning meretransport (Elken *et al.*, 2018). Punktkoormuse osakaal tänapäeval on tänu reovee puhastamistehnoloogiate arengule oluliselt vähenenud (Elken *et al.*, 2018).

Aastatel 1850–1980 suurenes fosfori sissekanne Läänemerre pea kuuekordselt ja lämmastiku sissekanne kolmekordistus (Gustafsson *et al.*, 2012). Alates 1980. aastast on toitainete sissekanne vähenenud, kuid varasemalt settesse ladestunud fosfori vabanemine ei ole lasknud koormusel langeda ning eutrofeerumine intensiivistub jätkuvalt (Gustafsson *et al.*, 2012; Stigebrandt & Andersson, 2020). Looduslike tingimuste ehk tööstusrevolutsiooni eelse taseme taastumine võib võtta veel 70–100 aastat (HELCOM, 2023).

### 2.4.1. Fosfor

Fosfor on oluline nii taimedele, mis omastavad seda orgaanilise aine tootmisel, kui loomadele, kelle fosfori allikaks on taimed või taimtoidulised loomad (Elken *et al.*, 2018). Fosforil on tähtis roll mitmetes molekulides ja raku arengus ning peale organismi surma vabaneb seotud fosfor keskkonda (Elken *et al.*, 2018). Fosfori kättesaadavus merekeskkonnas mõjutab

primaarproduktiooni hulka, liikide jaotust, ökosüsteemi struktuuri, mere süsinikuringet ja CO<sub>2</sub> vähendamist atmosfäärist (Elken *et al.*, 2018). Fosfori sisaldused meresetetes väljendavad nii praegust toitainete sissekannet kui kaudseid eutrofeerumise mõjusid, mis võivad kesta aastakümneid (HELCOM, 2023).

Fosfor esineb meresetetes erinevates vormides ehk fraktsioonides ja jagatakse suuresti kaheks – mobiilseks ning mitte-mobiilseks fosforiks. Fosfori erinevate vormide sisalduse kaudu on võimalik täpsemalt hinnata veekogu fosfori küllastusastet ja potentsiaalset sisekoormust (Barik *et al.*, 2019). Põhjasettesse akumulunud mobiilne fosfor võib sealt vabaneda veesambasse ja põhjustada lisaks valgalalt sissekantavale fosforile primaarproduktiooni tõusu ning eutrofeerumise intensiivistumist (Uściniowicz, 2011; Heinsalu *et al.*, 2021). Mobiilse fosfori sisaldus väheneb tavaliselt läbilõikes sügavuse suunas, sest sügavamalt on osa mobiilsest fosforist juba veesambasse tagasi vabanenud või seotud teistesse mittemobiilsetesse vormidesse (Uściniowicz, 2011).

Mobiilse fosfori hulka kuuluvad labiilne fosfor, mis on seotud nõrgalt värskel orgaanilise materjaliga või sette pooriveses ning raua- ja mangaaniühenditega seotud fosfor (Uściniowicz, 2011). Varasemalt on leitud, et Soome ja Rootsi ranniku oksilistest rannalähedastest setetest võib orgaaniline fosfor vabaneda keskmiselt umbes 25% ulatuses (Puttonen *et al.*, 2014).

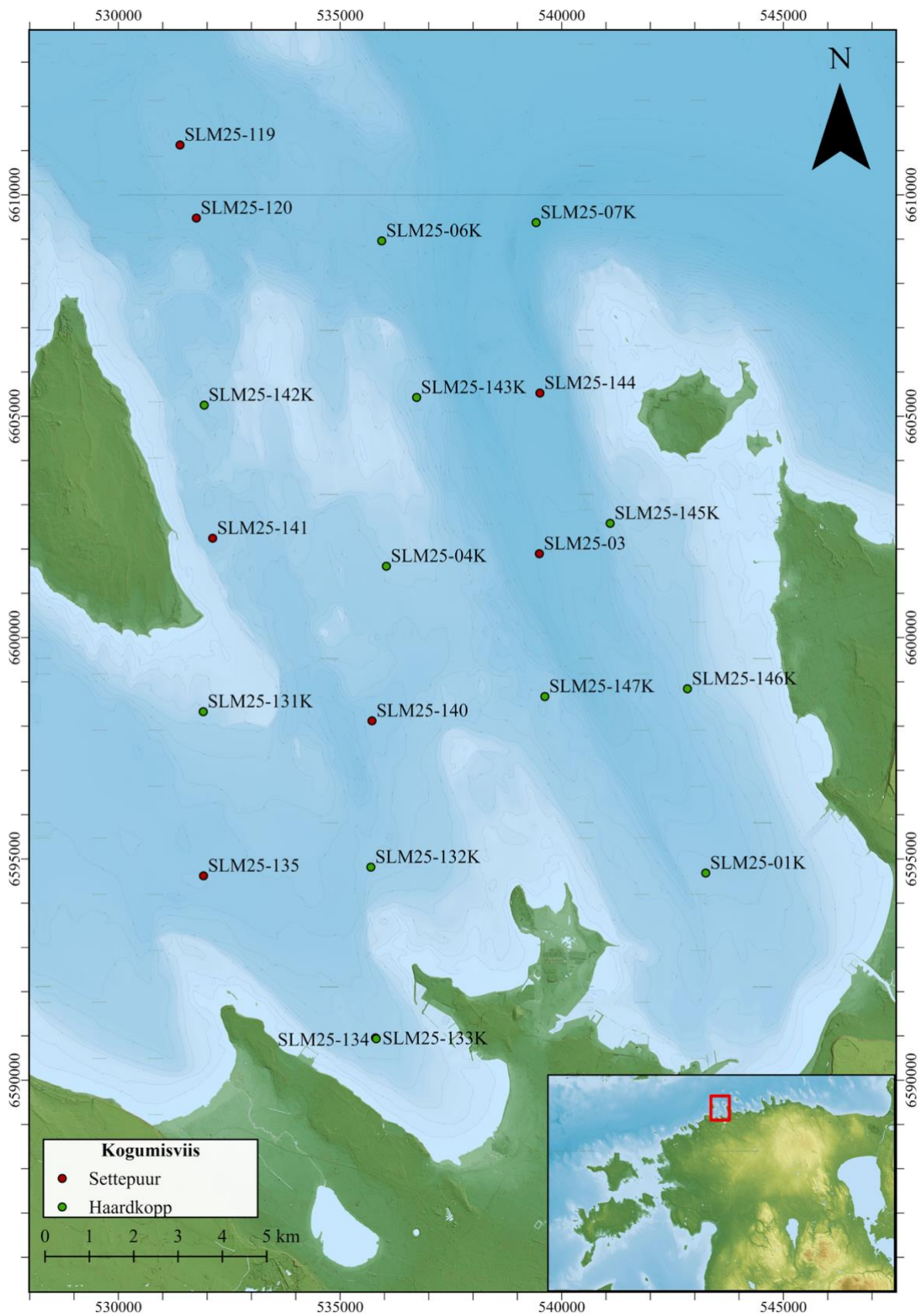
Mitte-mobiilne fosfor on seotud fosfori orgaaniliste vormidega, apatiidi või alumiiniumi faasidega (Uściniowicz, 2011). See on settesse tugevamalt seotud ja ei lähe enam kergesti veesambasse tagasi ning seega ei põhjusta mitte-mobiilne fosfor lisanduvat eutrofeerumist (Uściniowicz, 2011).

### 3. Materjalid ja meetodid

Käesolevas töös uuritud proovid koguti 8.–10. juulil 2025. aastal uurimislaeval Salme toimunud Eesti Geoloogiateenistuse ekspeditsioonil Tallinna lahes ja selle ümbruses (Tabel 1, Joonis 1). Proovide kogumiseks kasutati Gemax-tüüpi pehmete põhjasetete settepuuri või Van-Veen tüüpi haardkoppa. Gemaxi läbilõiked võimaldavad iseloomustada setteläbilõike vertikaalset muutlikkust, haardkopaga on võimalik koguda setteid paljudest erinevatest settetüüpidest. Kokku koguti proove 20 jaamast, millest 8 koguti Gemax-iga ja 12 haardkopaga. Gemax-tüüpi puuriga kogutud settesüdamikud viilutati koheselt peale proovi kogumist uurimislaeval sügavustel 0–10 cm 1 cm kaupa alamproovideks, edasi võeti 1 cm paksune alamproov iga 5 cm tagant. Haardkopaga kogutud proovid (0–10 cm) keskmistati ning neid ei jagatud alamproovideks. Proovid sügavkülmutati koheselt peale kogumist uurimislaeva pardal. Setteproove hoiustati Tartu Ülikooli geoloogia osakonna sügavkülmikutes -20°C juures.

**Tabel 1.** Proovivõtujaamade koordinaadid (L-EST97), veesügavus ja kogumisviis.

Jaam	X-koordinaat	Y-koordinaat	Veesügavus (m)	Kogumisviis
SLM25-01K	6594681	543248	32,2	Haardkopp
SLM25-03	6601894	539497	69,3	Settepuur
SLM25-04K	6601613	536045	21,5	Haardkopp
SLM25-06K	6608962	535939	63,9	Haardkopp
SLM25-07K	6609375	539423	98,9	Haardkopp
SLM25-119	6611129	531390	57,0	Settepuur
SLM25-120	6609476	531757	62,6	Settepuur
SLM25-131K	6598327	531915	15,0	Haardkopp
SLM25-132K	6594814	535694	29,0	Haardkopp
SLM25-133K	6590937	535815	21,0	Haardkopp
SLM25-134	6590956	535801	21,0	Settepuur
SLM25-135	6594617	531921	33,0	Settepuur
SLM25-140	6598119	535722	37,1	Settepuur
SLM25-141	6602244	532127	29,2	Settepuur
SLM25-142K	6605252	531936	29,8	Haardkopp
SLM25-143K	6605424	536727	34,2	Haardkopp
SLM25-144	6605522	539508	71,0	Settepuur
SLM25-145K	6602581	541093	38,8	Haardkopp
SLM25-146K	6598842	542835	29,6	Haardkopp
SLM25-147K	6598669	539618	34,6	Haardkopp



Joonis 1. Proovivõtijaamade asukohad (1:100 000, aluskaart Maa- ja Ruumiamet, 2026).

Edasisteks analüüsideks valiti Gemax-iga kogutud alamproovid sügavustelt 0–1 cm, 1–2 cm, 2–3 cm ja 19–20 cm. Varasemad uuringud on näidanud, et 20 cm sügavusel on Läänemeres saavutatud loodusliku fooni tase (Rydin *et al.*, 2011; Ausmeel *et al.*, 2024; Heinsalu *et al.*, 2024). Juhul, kui settesüdamik ei ulatunud 20 cm sügavusele, võeti edasisteks analüüsideks kasutusele kõige sügavam alamproov. HELCOMi juhiste kohaselt tuleb setete keemilise koostise ja keskkonnaseisundi hindamiseks proov võtta setete pealmisest kihist. Tavaliselt analüüsitakse kõige ülemist kihti (nt 0–1 cm), kuid sõltuvalt setete ladestumiskiirusest võib proovivõtu sügavus ulatuda ligikaudu 1–5 cm-ni (HELCOM, 2019).

Veesisalduse määramiseks ja edasiste analüüside teostamiseks külmuivatati proove lüofilisaatoris Tartu Ülikooli keemia instituudi orgaanilise keemia õppetooli laboris. Kõikide uuritavate proovide lõimiseline koostis mõõdeti laserdifraktsiooni meetodil Tartu Ülikooli geoloogia osakonnas Mastersizer 3000-ga, kasutades märgdispersioniseadet Hydro EV ja pidevat ultraheli keskkonda peenosiste desintegreerimiseks. Orgaanilise aine sisalduse määramiseks kuumutuskao meetodil (LOI 550) hoiti külmuivatatud proove ahjus 550°C juures 3 tundi, mille järel määrati massikadu algkaalu ning lõppkaalu vahel.

Proovide üldkeemiline koostis määrati Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laboris induktiivplasma optilise emissioonspektromeetria (ICP-OES) Agilent 7700-ga. Kahe proovi (SLM25-03 0–1 ja SLM25-119 19–20) üldkeemiline koostis määrati Tartu Ülikooli geoloogia osakonnas induktiivsidestatud plasma massispektromeetria (ICP-MS) meetodil. Põhielementide analüüsiks lahustati 0,2 g proovi 8 ml Aqua Regia (3:1 HCl:HNO<sub>3</sub>) lahuses kasutades Anton Par Multiwave Pro mikrolainemineralisaatorit 24HVT80 rootoriga. Lahustamise kvaliteedikontrollina kasutati NIST 2711a (Montana II Soil) standardit. Peale mikrolainetöötlust lahjendati proove 100-kordselt, kasutades 2% HNO<sub>3</sub> lahust. Proove analüüsiti Agilent 8800x ICP-massispektromeetriga, kasutades NoGas, He, H<sub>2</sub> ja O<sub>2</sub> reaktsioonirežiime. Sisestandardina kasutati <sup>115</sup>In ja kvaliteedikontrolliks NIST 1643f lahust.

### **3.1. Fosfori fraktsioneerimine**

Erinevate fosfori fraktsioonide sisalduste määramiseks viidi läbi fosfori fraktsioneerimine kasutades Psenner *et al.* (1988) välja pakutud ja hiljem modifitseeritud (Hupfer *et al.*, 1995; Ausmeel *et al.*, 2024) fosfori järk-järgulise ekstraheerimise meetodit. Meetod põhineb setete etapiviisilisel ekstraheerimisel viie järjest tugevama lahusega (Psenner *et al.*, 1988; Hupfer *et al.*, 1995). Antud töös määrati nelja esimese fraktsiooni (Lab-P, Fe-P, Al-P ja Org-P) fosfori

sisaldused Halo RB-10 UV-VIS spektrofotomeetriga molübdeensinise meetodil (Murphy & Riley, 1962). Viies (Ca-P) fraktsioon määrati Agilent MP-AS 1100 mikrolaine-plasma aatomadsorptsiooni instrumendiga. Fraktsioneerimine teostati kõigist Gemax-iga kogutud läbilõigetest valitud proovidele.

Fraktsioneerimiseks võeti 100–170 mg kuiva homogeniseeritud proovi 12 ml katsutitesse. Esimeses etapis leiti labiilne fosfor (Lab-P). Setteproovidele lisati 10 ml 1M NH<sub>4</sub>Cl ja pandi 2 tunniks loksutisse. Peale loksutamist proovid tsentrifugeeriti (10 min, 3000 p/min). Lahused valati ümber 30 ml topsidesse, protsessi korrati ja saadud lahus lisati eelnevale. Spektrofotomeetriga mõõtmiseks võeti topsist 3 ml lahust küvetti ning ülejäänud lahus hoiustati.

Teises etapis leiti raua- ja mangaaniühenditega seotud fosfor (Fe-P). Settejäägile lisati 10 ml 0,11M bikarbonaat-ditioniidi (NaHCO<sub>3</sub>–Na<sub>2</sub>O<sub>4</sub>S<sub>2</sub>) lahust ja hoiti 30 minutit 40°C juures veevannis. Proovid tsentrifugeeriti (10 min, 3000 p/min) ja lahused valati ümber 30 ml topsidesse. Katsutisse jäänud settejäägile lisati 5 ml bikarbonaat-ditioniidi lahust, tsentrifugeeriti uuesti ning saadud ekstrakt lisati 30 ml topsi. Enne mõõtmist proovid aereeriti.

Kolmandas etapis leiti alumiiniumiühenditega seotud fosfor (Al-P). Settejäägile lisati 10 ml 0,1M NaOH, pandi 16 tunniks loksutisse ja seejärel tsentrifugeeriti (10 min, 3000 p/min). 5 ml saadud lahusest filtreeriti 0,45 µm filtriga teise katsutisse. Fosfori mõõtmiseks võeti küvetti 3 ml filtreeritud lahust ning ülejääk hoiustati.

Neljandas etapis leiti biogeenne orgaaniline fosfor (Org-P). Selleks võeti klaaspudelisse 1 ml kolmandas etapis üle jäänud filtreerimata lahust, millele lisati 0,2 ml 0,5M HCl, 3,8 ml MilliQ vett ja 1 ml 5% K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> lahust. Valminud lahused suleti õhukindlalt ja pandi üheks tunniks ahju 120°C juurde. Jahtunud lahustest võeti küvetti 3 ml ja mõõdeti. Orgaanilise fosfori sisaldus arvutati neljandas ja kolmandas etapis mõõdetud tulemuste vahest.

Viiendas etapis leiti apatiitse fosfori (Ca-P) sisaldus. Settejäägile lisati 10 ml 0,5M HCl, pandi 24 tunniks loksutisse ja seejärel tsentrifugeeriti (10 min 5000 p/min). Fosfori mõõtmiseks MP-AS instrumendiga hapestati 5 ml lahust 0,150 ml kontsentreeritud lämmastikhappega.

### **3.2. Andmeanalüüs**

Lõimiseandmete interpreteerimiseks kasutati osakeste suuruse analüüsi tarkvara GRADISTAT 8.0 (Blott & Pye, 2001). Andmete analüüsimiseks, visualiseerimiseks ja kaartide koostamiseks kasutati tarkvara ArcGIS Pro versiooni 3.2.0. Käesolevas töös ei ole kasutatud tehisintellekti rakendusi andmete analüüsil, allikate leidmisel, töö kirjutamisel või mõnel muul eesmärgil.

## 4. Tulemused

### 4.1. Setete üldine koostis

Värvuselt olid Tallinna lahest Van-Veen tüüpi kopaga kogutud proovid hallid kuni pruunikashallid. Keskmine savi fraktsiooni sisaldus joonisel 2 esitatud proovides oli 0,92%, aleuriidi fraktsiooni sisaldus 48,66% ja liiva fraktsiooni sisaldus 50,42%. Jaama SLM25-131K setteproov koosnes 100% ulatuses liiva fraktsioonist. Kõige madalama liiva fraktsiooni sisaldusega oli jaama SLM25-133K setteproov, kus liiva sisalduseks mõõdeti 9,73%. Kõrgeim savi sisaldus, milleks saadi 2,47%, oli jaamast SLM25-04K kogutud setteproovis ning madalaim (v.a. SLM25-131K) jaama SLM25-143K setteproovis, kus savi osakaaluks mõõdeti 0,38%. Kõige madalam aleuriidi sisaldus (v.a. SLM25-131K), milleks oli 27,24%, määrati jaama SLM25-143K setteproovist ning kõige kõrgem aleuriidi sisaldus, milleks oli 88,84%, määrati jaama SLM25-133K setteproovist. (Joonis 2, Lisa 1)

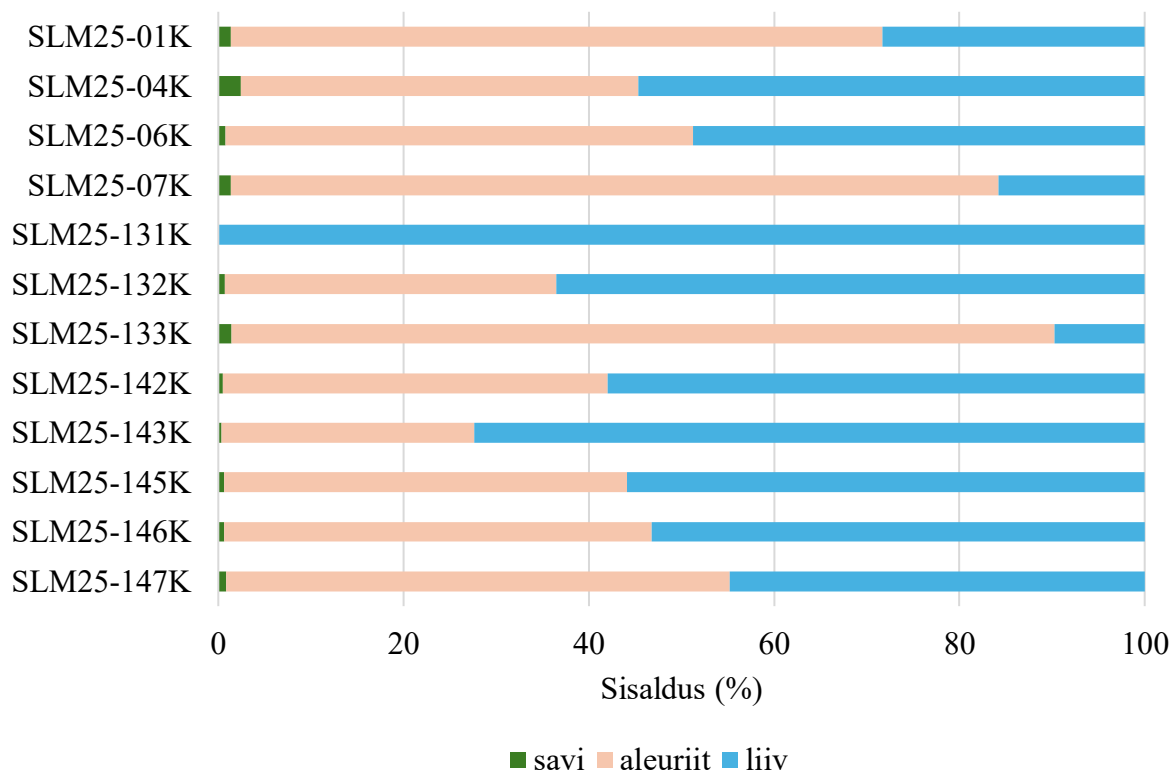
Setteläbilõigete värvused varieerusid hallist mustani, esines ka pruunikas- ja rohekashalli värvust. Tallinna lahe setteläbilõigete keskmised lõimiselised koostised koosnesid 1,87–5,35% ulatuses savi fraktsioonist, 44,49–89,41% ulatuses aleuriidi fraktsioonist ja 8,73–47,14% ulatuses liiva fraktsioonist (Joonis 3, Joonis 4).

Läbilõigetes SLM25-03, SLM25-120 ja SLM25-141 olid savi fraktsiooni sisaldused stabiilsed vahemikus 0–3 cm ning tõusid sügavaimas intervallis, järsk tõus toimus jaama SLM25-141 läbilõikes. Jaamas SLM25-134 oli savi sisaldus stabiilne kogu läbilõike ulatuses. SLM25-119, SLM25-135 ja SLM25-140 läbilõigetes olid savi fraktsiooni sisaldused stabiilsed sügavusel 0–2 cm ning tõusid seejärel sügavuse suunas. Läbilõike SLM25-144 savi sisalduse oli stabiilne sügavustel 0–2 cm, sisaldus tõusis sügavusel 2–3 cm ning stabiliseerus taas sügavuse suunas. Suurim savi fraktsiooni sisaldus Tallinna lahe setteläbilõigetes oli 19,86% jaama SLM25-141 alumises intervallis ning madalaim sisaldus oli 0,37% samas jaamas sügavusel 1–2 cm.

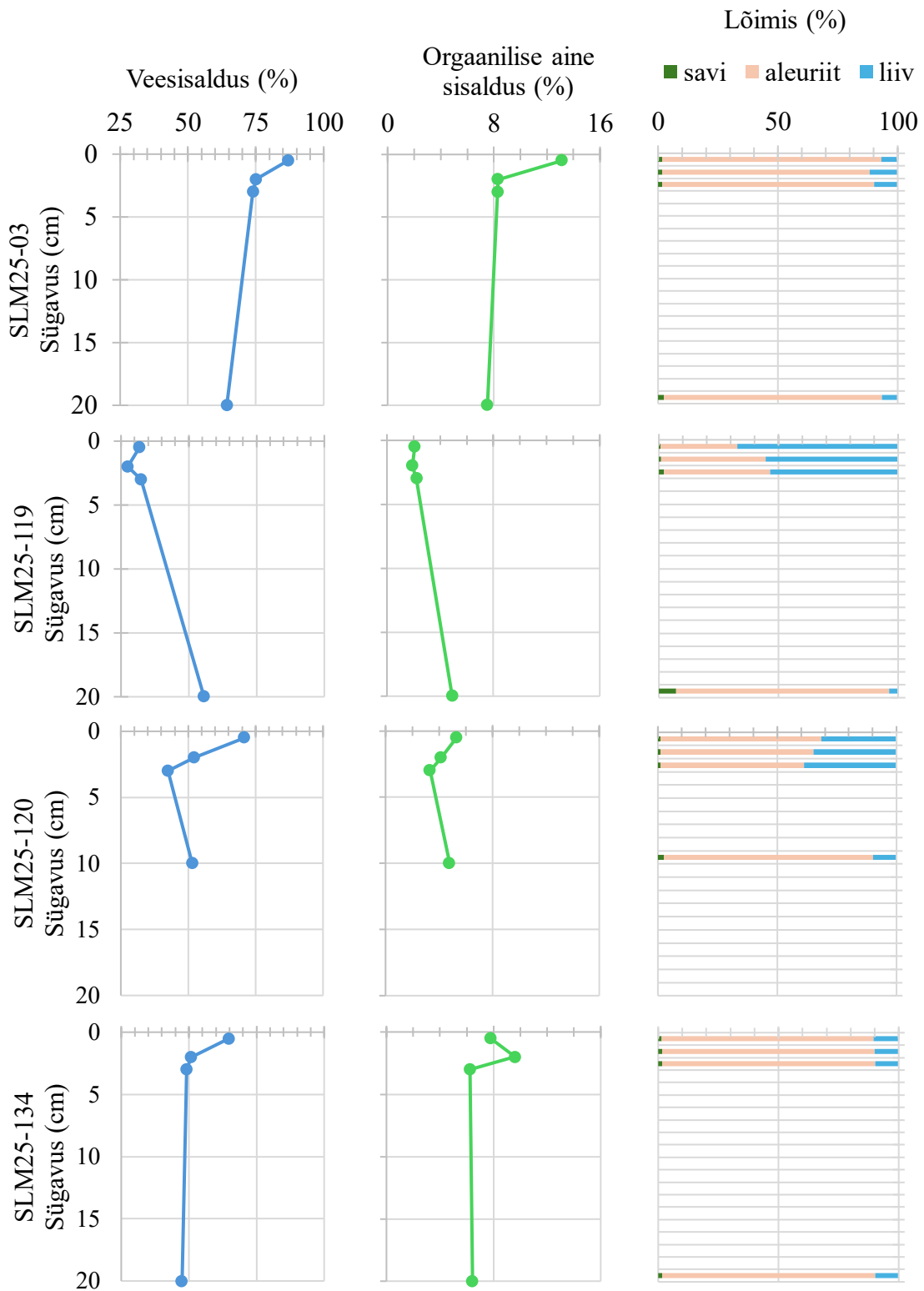
Jaamade SLM25-03, SLM25-120 ja SLM25-141 läbilõigetes langesid aleuriidi fraktsiooni sisaldused sügavusel 0–3 cm ning tõusid läbilõigete kõige sügavamates intervallides. SLM25-119 läbilõikes tõusis aleuriidi sisaldus kogu läbilõike ulatuses. Jaamas SLM25-134 oli aleuriidi sisaldus stabiilne kogu läbilõike ulatuses (Joonis 3). Läbilõikes SLM25-135 oli aleuriidi sisaldus stabiilne sügavusel 0–2 cm, tõustes vahemikus 2–3 cm ja langes sügavusel 19–20 cm. SLM25-140 läbilõikes oli aleuriidi sisaldus stabiilne vahemikus 0–2 cm, seejärel sügavuse suunas tõustes. Jaamas SLM25-144 oli aleuriidi sisaldus stabiilne vahemikus 0–2 cm, seejärel

sisaldus tõusis ja stabiliseerus taas sügavuse suunas (Joonis 4). Kõrgeim aleuriidi sisaldus oli 91,99% jaama SLM25-144 läbilõikes sügavusel 2–3 cm ning väikseim sisaldus oli 32,26% jaama SLM25-119 läbilõikes sügavusel 0–1 cm.

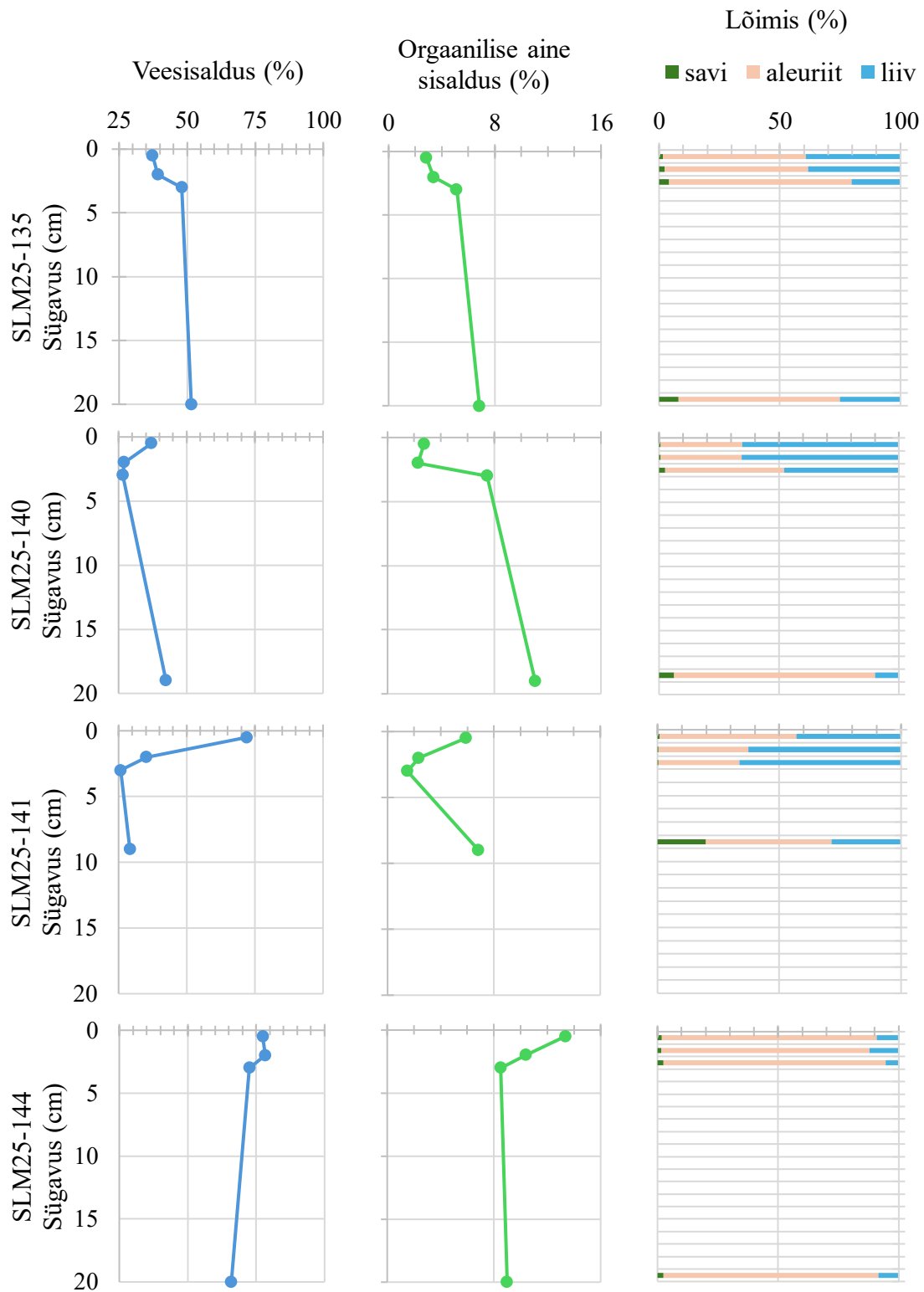
Tallinna lahe setteläbilõikes SLM25-03 tõusis liiva fraktsiooni osakaal vahemikus 0–2 cm, kuid seejärel toimus sisalduse langus. Jaamas SLM25-119 langes liiva sisaldus kogu läbilõike ulatuses (Joonis 3). Liiva sisaldus tõusis läbilõikes SLM25-120 vahemikus 0–3 cm ning seejärel langes läbilõike sügavaimas intervallis. Jaamas SLM25-134 oli liiva sisaldus stabiilne kogu läbilõike ulatuses. Läbilõikes SLM25-135 oli liiva osakaal stabiilne sügavusel 0–2 cm, misjärel toimus järsk langus vahemikus 2–3 cm, kuid läbilõike sügavaimas intervallis sisaldus tõusis (Joonis 4). Liiva fraktsiooni sisaldus oli jaamas SLM25-140 stabiilne vahemikus 0–2 cm ning seejärel langes sügavuse suunas. SLM25-141 läbilõikes tõusis liiva fraktsiooni osakaal sügavusel 0–3 cm ning seejärel sügavaimas intervallis liiva osakaal langes. SLM25-144 oli kõrgeim liiva sisaldus sügavusel 1–2 cm ja madalaim liiva sisaldus sügavusel 2–3 cm. Kõige kõrgem liiva fraktsiooni sisaldus Tallinna lahe setteläbilõigetes oli 67,13% jaama SLM25-119 läbilõikes intervallis 0–1 cm ja madalaim liiva sisaldus oli 3,74% sama läbilõike intervallis 19–20 cm.



**Joonis 2.** Haardkopaga kogutud proovide lõimiseline koostis.

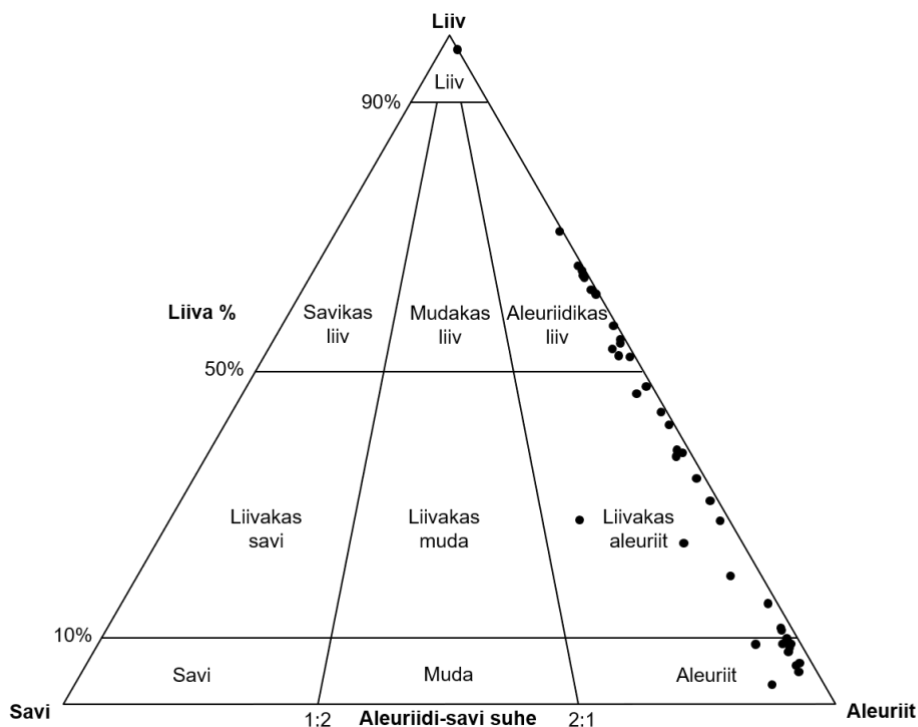


**Joonis 3.** Jaamade SLM25-03, SLM25-119, SLM25-120 ja SLM25-134 veesisalduse, orgaanilise aine sisalduse ja lõimise muutus sügavuse suunas.



**Joonis 4.** Jaamade SLM25-135, SLM25-140, SLM25-141 ja SLM25-144 veesisalduse, orgaanilise aine sisalduse ja lõimise muutus sügavuse suunas.

Tallinna lahe setteproovide puhul oli Folk (1954) klassifikatsiooni alusel valdavalt tegu liivakate aleuriitidega või aleuriidikate liivadega, lisaks leidus ka aleuriite, kus liiva sisaldus oli madal ehk alla 10%. Vaid üks proov kuulus liiva klassi (Joonis 5).



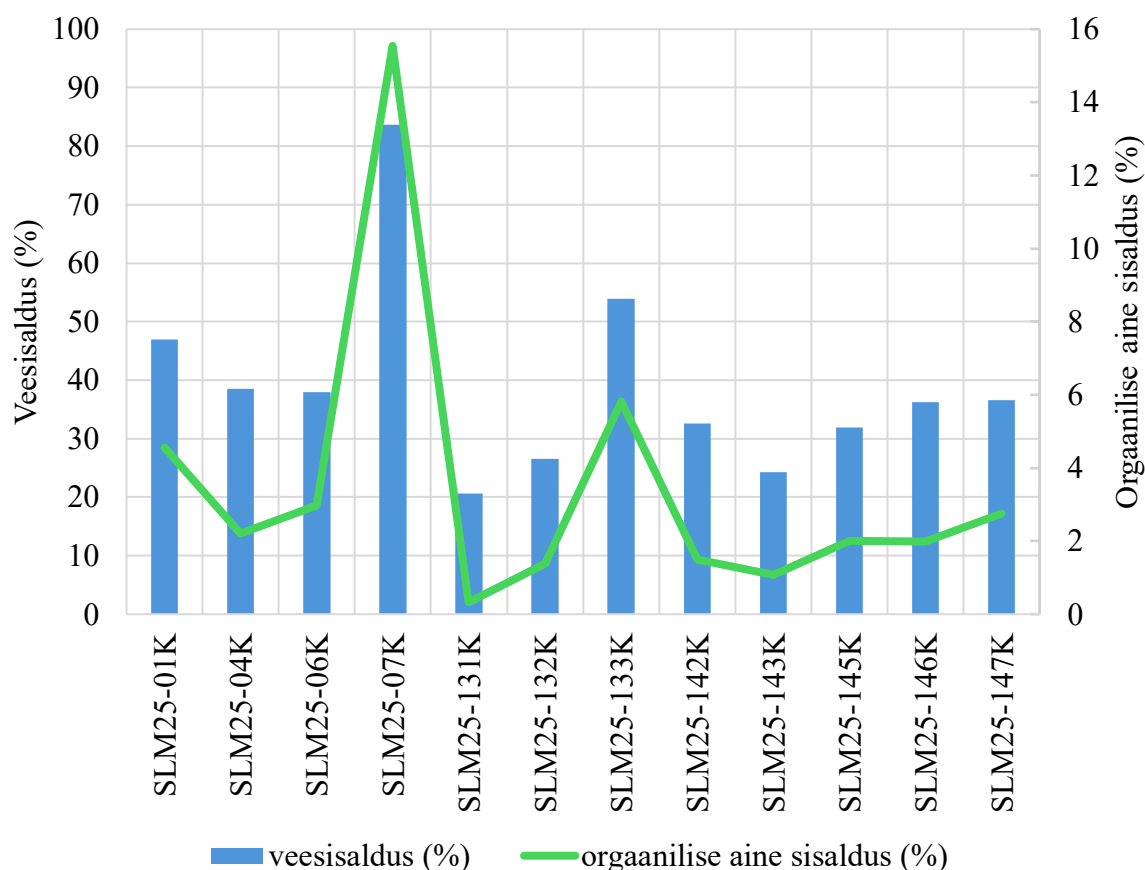
**Joonis 5.** Kõikide Tallinna lahe proovide settetüüp liiv-aleuriit-savi diagrammil, Folk (1954) klassifikatsiooni alusel.

Tallinna lahest Van-Veen tüüpi haardkopaga kogutud setteproovides saadi keskmiseks veesisalduseks 39,14%. Kõige madalam veesisaldus, milleks oli 20,57%, määrati jaamas SLM25-131K ning kõige kõrgem veesisaldus, milleks oli 83,63%, määrati SLM25-07K setteproovist. Keskmiseks orgaanilise aine sisalduseks Van-Veen tüüpi kopaga kogutud setteproovides oli 3,51%. Kõige kõrgem orgaanilise aine sisaldus, milleks oli 15,54%, määrati jaama SLM25-07K setteproovist. Jaamas SLM25-131K oli orgaanilise aine sisaldus 0,32%, mis oli kõige madalam orgaanilise aine sisaldus. (Joonis 6, Lisa 1)

Joonisel 3 esitatud Tallinna lahest kogutud läbilõigete SLM25-03, SLM25-119, SLM25-120 ja SLM25-134 paksused olid vastavalt 40, 35, 20 ning 33 cm. Joonisel 4 esitatud läbilõigete SLM25-135, SLM25-140, SLM25-141 ja SLM25-144 paksused olid vastavalt 23, 19, 10 ning 44 cm. Jaama SLM25-120 puhul saadi kätte 20 cm setet, kuid viimane alamproov on sügavuselt 9–10 cm.

SLM25-03, SLM25-134 ja SLM25-135 puhul oli kõrgeim veesisaldus sügavusel 0–1 cm ning sügavuse suurenedes veesisaldus vähenes. Jaamas SLM25-119 oli madalaim veesisaldus sügavusel 1–2 cm ning kõrgeim sügavusel 19–20 cm (Joonis 3, Lisa 2). SLM25-120, SLM25-140 ja SLM25-141 läbilõigetes langesid veesisaldused vahemikus 0–3 cm, kuid sügavusel 19–20 cm tõusid. Läbilõikes SLM25-144 olid kõrgemad veesisaldused intervallis 0–2 cm, seejärel toimus sügavuse suunas veesisalduse langus (Joonis 4, Lisa 2). Jaamade keskmised veesisaldused jäid vahemikku 33,25–75,06%, olles kõrgeim jaamas SLM25-03 ja madalaim jaamas SLM25-140.

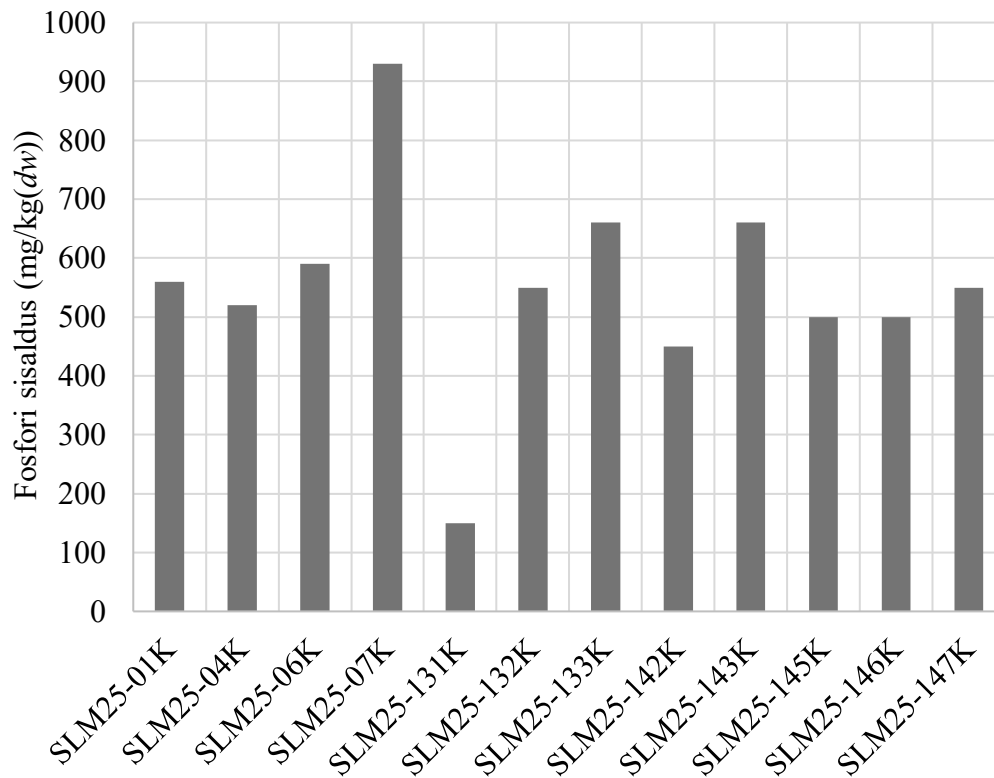
Orgaanilise aine sisaldused vähenesid jaamades SLM25-03 ja SLM25-144 sügavuse suunas, stabiliseerudes sügavusel 2-3 cm. Läbilõigetes SLM25-120 ja SLM25-141 langesid orgaanilise aine sisaldused vahemikus 0–3 cm, kuid tõusid sügavaimas intervallis. Jaama SLM25-134 läbilõikes oli kõrgeim orgaanilise aine sisaldus sügavusel 1–2 cm, seejärel sisaldus langes ja stabiliseerus (Joonis 3). SLM25-119 ja SLM25-135 läbilõigetes tõusid orgaanilise aine sisaldused sügavuse suunas. Jaamas SLM25-140 olid vahemikus 0–2 cm orgaanilise aine sisaldused stabiilsed, kuid seejärel sisaldused tõusid (Joonis 4). Keskmise orgaanilise aine sisaldus Tallinna lahe setteläbilõigetes oli vahemikus 2,78–10,31%, kusjuures madalaim orgaanilise aine sisaldus leiti jaamas SLM25-119 ja kõrgeim jaamas SLM25-144.



**Joonis 6.** Haardkopaga kogutud proovide veesisaldus ja orgaanilise aine sisaldus.

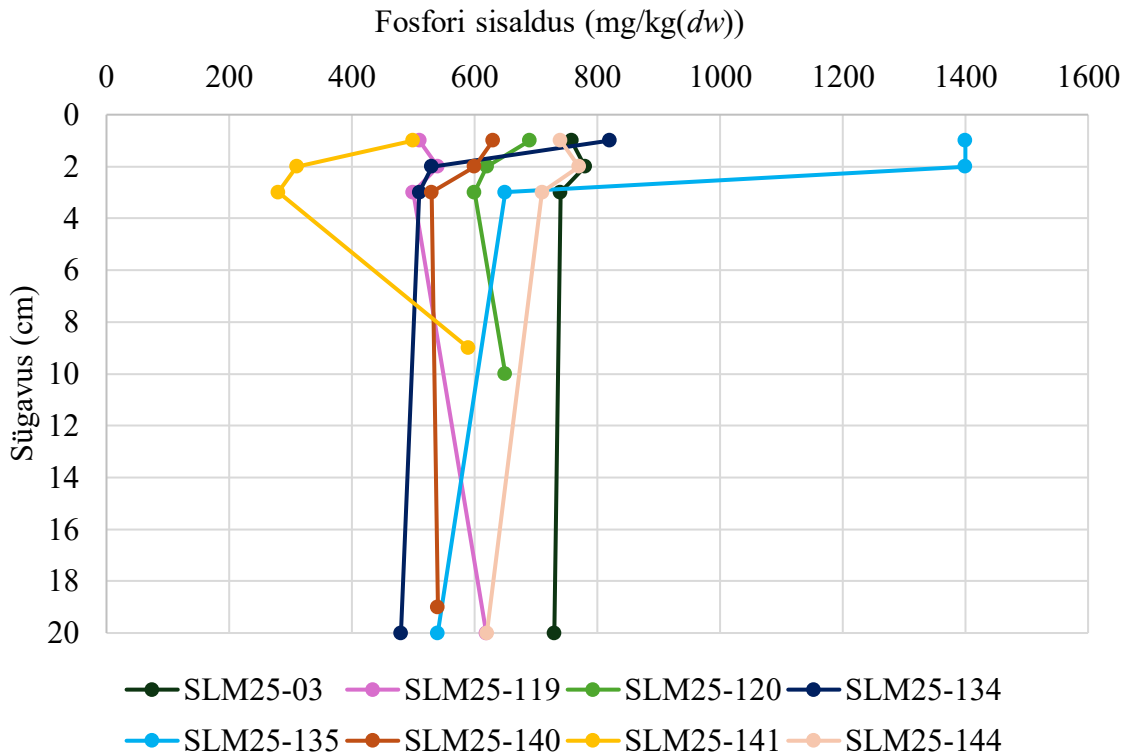
#### 4.2. Fosfor

Tallinna lahest Van-Veen tüüpi kopaga kogutud setteproovide fosfori sisaldused on esitatud joonisel 7 kuivmassi (*dry weight – dw*) kohta. Kõige kõrgem fosfori sisaldus oli 930 mg/kg(*dw*) jaamas SLM25-07K, kus oli kõige suurem veesügavus. Kõige madalam fosfori sisaldus oli 150 mg/kg(*dw*) jaamas SLM25-131K, kus oli kõige väiksem veesügavus. Keskmise fosfori sisaldus oli 552 mg/kg(*dw*). (Joonis 7, Lisa 3)



**Joonis 7.** Kopajaamade üldfosfori sisaldused.

Gemax-iga kogutud setteläbilõigete üldfosfori sisalduste puhul joonistuvad välja jaamad SLM25-135, kus sügavustel 0–1 ja 1–2 cm olid väärtused selgelt kõrgemad, ja SLM25-141, kus sügavustel 1–2 ja 2–3 cm olid väärtused kõige madalamad. Kõige madalam keskmine üldfosfori sisaldus 420 mg/kg(dw) oli jaamas SLM25-141 ja kõige kõrgem keskmine üldfosfori sisaldus 998 mg/kg(dw) jaamas SLM25-135. Ülejäänud läbilõigete keskmised fosfori sisaldused jäid vahemikku 542–752 mg/kg(dw). Üldiselt fosfori sisaldus vähenes sügavuse suunas, välja arvatud jaamades SLM25-119 ja SLM25-141, kus sisaldus langes vahemikus 0–3 cm, kuid tõusis läbilõigete sügavaimas intervallis. (Joonis 8, Lisa 3)



**Joonis 8.** Setteläbilõigete üldfosfori sisaldused sügavuse suunas.

#### 4.2.1. Fosfori fraktsioonid

Labiilse fosfori (Lab-P) sisaldused Gemax-iga kogutud setteläbilõigetes jäid vahemikku 0,24–36,02 mg/kg(dw). Läbilõigete SLM25-119, SLM25-134, SLM25-135 ja SLM25-140 puhul langesid Lab-P sisaldused sügavuse suurenedes. Läbilõigetes SLM25-141 ja SLM25-144 langesid labiilse fosfori sisaldused sügavuseni 2–3 cm, kuid alumises intervallis sisaldused tõusid. SLM25-03 läbilõikes olid sisaldused stabiilsed vahemikus 0–3 cm, misjärel Lab-P sisaldus tõusis. SLM25-120 kogutud proovide labiilse fosfori sisaldused tõusid kogu läbilõike ulatuses. Madalaim keskmine Lab-P sisaldus oli läbilõikes SLM25-135 ja kõrgeim keskmine sisaldus oli läbilõikes SLM25-120, vastavalt 2,1 mg/kg(dw) ja 20,4 mg/kg(dw). (Joonis 9, Lisa 4)

Raua- ja mangaaniühenditega seotud fosfori (Fe-P) sisaldused jäid Tallinna lahe setetes vahemikku 5,4–104,8 mg/kg(dw). Jaamades SLM25-03 ja SLM25-134 langesid Fe-P sisaldused läbilõikes sügavuse suurenedes. SLM25-119, SLM25-120, SLM25-140 ja SLM25-141 läbilõigetes langes Fe-P sisaldus vahemikus 0–3 cm, kuid tõusis alumises intervallis. Jaamades SLM25-140 ja SLM25-141 oli sisalduste langus ning tõus tagasihoidlikum, aga

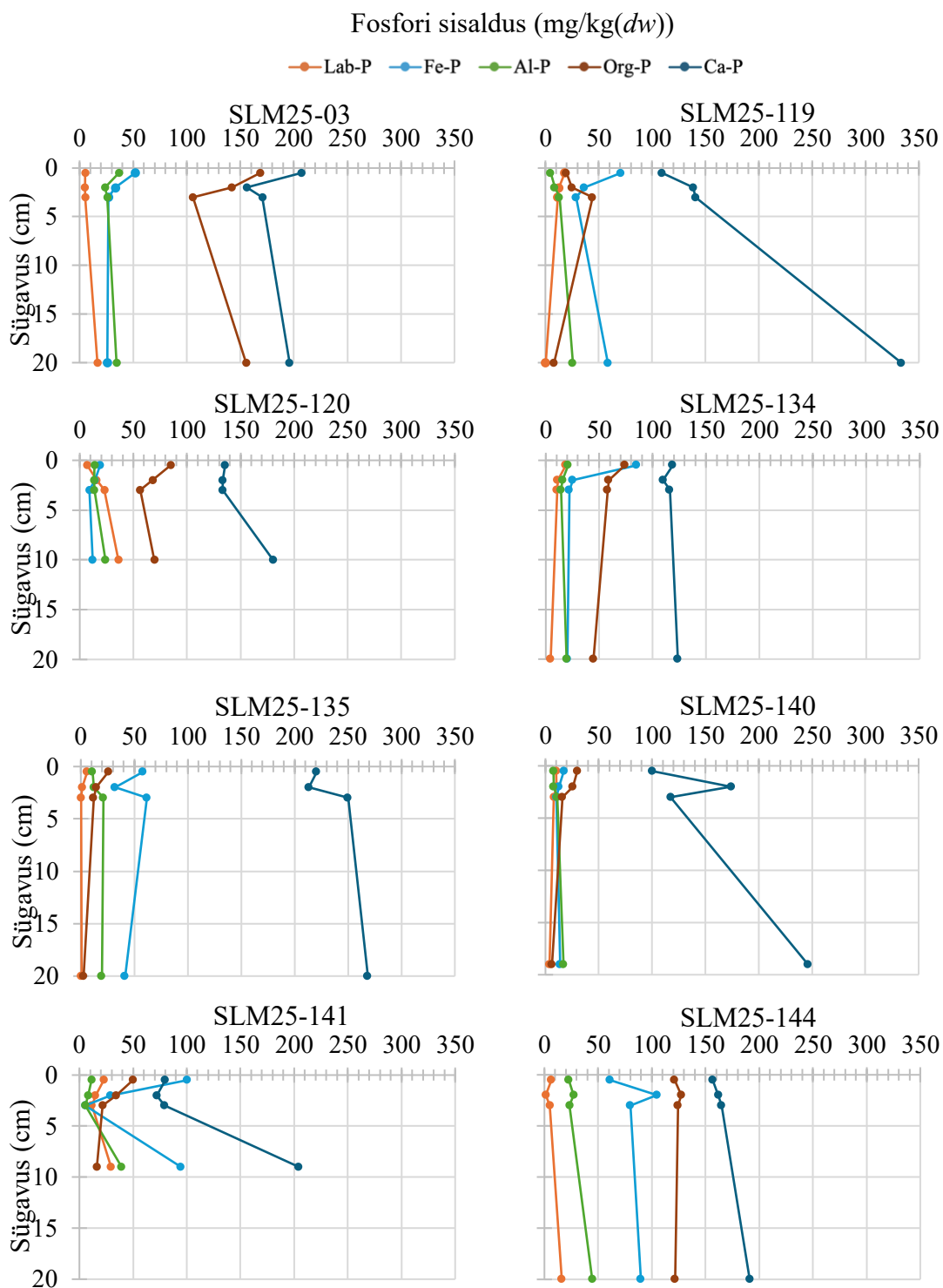
intensiivsemat tõusu on näha jaamade SLM25-119 ja SLM25-141 läbilõigetel. Jaama SLM25-135 läbilõikes olid kõige kõrgemad Fe-P sisaldused sügavustel 0–1 cm ja 2–3 cm, alumises intervallis toimus sisalduse langus. SLM25-144 läbilõikes olid kõige kõrgemad Fe-P sisaldused sügavusel 1–2 cm, misjärel toimus sisalduse langus sügavuse suunas. Kõige kõrgem keskmine Fe-P sisaldus, milleks oli 83,8 mg/kg(dw) jaama SLM25-144 läbilõikes ja kõige madalam sisaldus, milleks oli 13,4 mg/kg(dw), SLM25-140 läbilõikes. (Joonis 9, Lisa 4)

Alumiiniumiühenditega seotud fosfori (Al-P) sisaldused jäid vahemikku 5,0–44,5 mg/kg(dw). Jaamade SLM25-119 ja SLM25-135 läbilõigetel tõusid Al-P sisaldused sügavuse suurenedes. SLM25-120 läbilõikes olid Al-P sisaldused stabiilsed intervallis 0–3 cm ning tõusid seejärel ja SLM25-140 läbilõikes olid sisaldused stabiilsed intervallis 0–2 cm, seejärel sügavuse suurenedes tõustes. Jaamade SLM25-134 ja SLM25-141 läbilõigetel vähenesid Al-P sisaldused intervallis 0–3 cm, kuid sisaldused tõusid alumises intervallis. SLM25-03 jaamas olid suurimad Al-P sisaldused läbilõike ülemises ja alumises intervallis. Läbilõikes SLM25-144 intervallis 0–3 cm kõikusid sisaldused väikestes piirides ning kõige kõrgem sisaldus oli sügavusel 19–20 cm. Kõige madalam keskmine alumiiniumiühenditega seotud fosfori sisaldus oli 10,8 mg/kg(dw) jaamas SLM25-140 ja kõige kõrgem keskmine sisaldus, milleks oli 30,2 mg/kg(dw), jaamas SLM25-03. (Joonis 9, Lisa 4)

Orgaanilise fosfori (Org-P) sisaldused Tallinna lahes jäid vahemikku 2,60–168,69 mg/kg(dw). Jaamade SLM25-134, SLM25-135, SLM25-140 ja SLM25-141 läbilõigete Org-P sisaldused vähenesid sügavuse suunas. SLM25-03 ja SLM25-120 läbilõigetel vähenesid orgaanilise fosfori sisaldused intervallis 0–3 cm, kuid sisaldused tõusid sügavusel 19–20 cm. Jaama SLM25-119 läbilõikes kasvasid Org-P sisaldused vahemikus 0–3 cm ning seejärel sisaldus langes läbilõike sügavaimas intervallis. SLM25-144 olid Org-P sisaldused suhteliselt stabiilsed kogu läbilõike ulatuses, madalamad sisaldused olid läbilõike kõige ülemises ning kõige alumises intervallis. Kõige kõrgem keskmine orgaanilise fosfori väärtus 123,7 mg/kg(dw) oli jaama SLM25-03 läbilõikes ja kõige madalam keskmine sisaldus 13,8 mg/kg(dw) oli jaama SLM25-135 läbilõikes. (Joonis 9, Lisa 4)

Apatiitse fosfori (Ca-P) sisaldused jäid vahemikku 72,0–333,5 mg/kg(dw). Kõikide jaamade läbilõigetel peale SLM25-03 oli kõrgeim apatiitse fosfori sisaldus kõige sügavamas intervallis. Jaamas SLM25-03 oli suurim Ca-P sisaldus 0–1 cm intervallis. SLM25-03, SLM25-135 ja SLM25-140 läbilõigetel oli intervallis 0–3 cm suurem sisalduste kõikumine, läbilõigetel SLM25-120, SLM25-134, SLM25-141 ning SLM25-144 olid sisaldused antud intervallis stabiilsemad. Jaama SLM25-119 läbilõikes toimus Ca-P sisalduste tõus sügavuse suurenedes.

Kõige madalam keskmine apatiitse fosfori sisaldus 108,9 mg/kg(dw) oli jaama SLM25-141 läbilõikes ja kõige kõrgem keskmine sisaldus 238,3 mg/kg(dw) oli jaama SLM25-135 läbilõikes. (Joonis 9, Lisa 4)

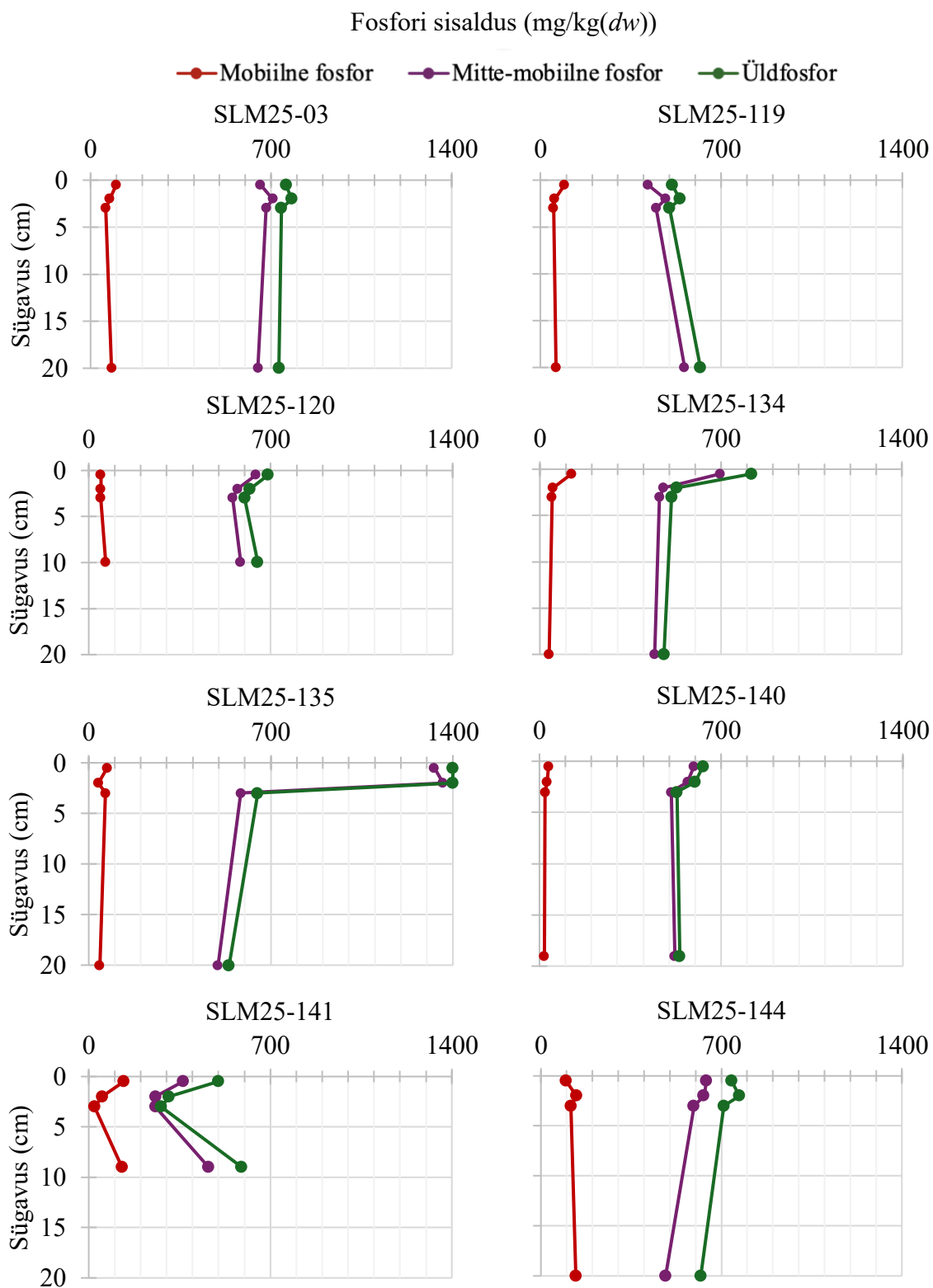


**Joonis 9.** Setteläbilõigete fosfori fraktsioonide sisaldused sügavuse suunas.

Antud töös on mobiilseks fosforiks (MP) loetud Lab-P, Fe-P ja  $\frac{1}{4}$  Org-P fraktsioonide summa ehk see fosfori kogus, mis erinevatel tingimustel kokku settest vette vabaneda saab. Mobiilse fosfori sisaldused Tallinna lahes jäid vahemikku 19,2–137,9 mg/kg(dw). MP osakaal üldfosforist jäi vahemikku 4,5–18,4%. Kõige kõrgem MP osakaal üldfosforist oli jaama SLM25-141 läbilõikes ning kõige madalam jaama SLM25-140 läbilõikes. Kõige kõrgemad MP sisaldused käesoleva töö jaoks kogutud Gemax-i läbilõigetest olid jaamas SLM25-144, kus läbilõike keskmiseks MP sisalduseks oli 121,97 mg/kg(dw). Kõige madalamad MP sisaldused olid jaama SLM25-140 läbilõikes, kus keskmiseks MP sisalduseks oli 26,3 mg/kg(dw). (Joonis 10, Lisa 4)

Jaamade SLM25-134 ja SLM25-140 läbilõigetel vähenes mobiilse fosfori hulk sügavuse suunas, olles kõrgeim ülemises intervallis ning madalaim kõige sügavamal sügavusel. Jaamade SLM25-03, SLM25-119 ja SLM25-141 läbilõigetel vähenesid mobiilse fosfori sisaldused vahemikus 0–3 cm ja tõusid läbilõigete sügavaimates intervallides. Läbilõikes SLM25-120 olid sisaldused stabiilsed vahemikus 0–3 cm, kuid mobiilse fosfori sisaldus oli kõrgem sügavusel 9–10 cm. SLM25-135 läbilõikes olid kõrgemad mobiilse fosfori sügavustel 0–1 cm ja 2–3 cm. SLM25-144 setteläbilõikes olid kõrgeimad mobiilse fosfori sisaldused sügavustel 1–2 cm ja 19–20 cm ning kõige madalam sisaldus sügavusel 0–1 cm. (Joonis 10, Lisa 4)

Mitte-mobiilse fosfori sisalduseks oli üldfosfori ja mobiilse fosfori sisalduse vahe. Mitte-mobiilse fosfori sisaldused varieerusid vahemikus 257,4–1362,7 mg/kg(dw). (Joonis 10)



**Joonis 10.** Setteläbilõigete mobiilse fosfori, mitte-mobiilse fosfori ja üldfosfori sisaldused sügavuse suunas.

## 5. Arutelu

### 5.1. Tallinna lahe settekeskkond

Tallinna lahe setetes on suurim osakaal aleuriitsel fraktsioonil, millele järgneb liiva fraktsioon. Üldiselt on savi sisaldused madalad, jäädes vahemikku 0–8%. Erandiks on läbilõike SLM25-141 proov sügavuselt 8–9 cm, kus savi sisalduseks määrati 19,86%. Peenemad savi ja aleuriidi fraktsioonid on laiemalt levinud settepuuriga kogutud läbilõigetes kui haardkopaga kogutud proovides. Settepuuriga on võimalik koguda ainult pehmeid setteid. Haardkopaga on võimalik proove koguda rohkematest eri settetüüpidest ning seega on ka nende proovide lõimiselised koostised heterogeensemad ja sisaldavad suuremal hulgal jämedamate fraktsioonidega proove, mida pole võimalik settepuuriga koguda.

Tallinna lahe setteproovides on seos veesisalduse ja orgaanilise aine sisalduse vahel ( $R^2 = 0,91$ ). Kopaproovide puhul on selge seos orgaanilise aine ja veesisalduse vahel ( $R^2 = 0,94$ ) - kõrgeima veesisaldusega kaasneb suurim orgaanilise aine sisaldus ja madalaima veesisaldusega kaasneb madalaim orgaanilise aine sisaldus (Joonis 6, Lisa 1). Setteläbilõigete puhul on võimalik näha sarnaseid seoseid orgaanilise aine ja veesisalduse vahel, kuid need ei ole nii tugevad ( $R^2 = 0,85$ ).

Käesoleva töö keskmised veesisaldused ja orgaanilise aine keskmised sisaldused olid läbilõigete ülemistes intervallides 0–1, 1–2 ja 2–3 cm kõrgemad kui Ausmeel *et al.* (2024) Väinamere ning Suure väina erosiooni- ja transpordialadel leitud orgaanilise aine ja veesisaldused. Siiski olid orgaanilise aine keskmised sisaldused üldiselt selgelt madalamad kui akumulatsioonialadel, kus on iseloomulik orgaanilise aine sisaldus üle 10% (Puttonen *et al.*, 2014; Ausmeel *et al.*, 2024). Veesisaldused olid samuti üldiselt madalamad kui Puttonen *et al.* (2014) poolt kasutatud akumulatsioonialade piirväärtus, milleks oli 75%.

Tallinna lahest haardkopaga kogutud proovide orgaanilise aine ja veesisaldused ühtisid varasemalt Väinamere ja Suure väina erosiooni- ja transpordialadel määratud sisaldustega (Ausmeel *et al.*, 2024) suuremal määral kui setteläbilõiked.

Enamus Tallinna lahest kogutud setteproovide ja setteläbilõigete keskmised orgaanilise aine sisaldused jäid samasse vahemikku Heinsalu *et al.* (2024) poolt Eesti merealadel kirjeldatud transpordialadel määratud väärtustega.

Kuigi käesoleva töö tulemuste põhjal on Tallinna lahes peamiselt tegu setete erosiooni- ja transpordialadega, joonistuvad välja jaamad SLM25-03, SLM25-144 ja SLM25-07K, kus nii

orgaanilise aine kui veesisaldused ületavad Puttonen *et al.*, 2014 poolt kasutatud akumulatsioonialade piirväärtuseid. Lisaks oli antud jaamade keskmine terasuurus selgelt väiksem Tallinna lahe üldisest keskmisest. Antud proovid on kogutud Tallinna lahe kõige sügavamast piirkonnast, Aegna saare ja Keskmadala vahele jäävast sügavamast merealast, ning jaamad asuvad üksteise lähedal (Joonis 1, Tabel 1). Seega on antud piirkonnas tegu tõenäoliselt setete akumulatsioonialaga.

## 5.2. Fosfor Tallinna lahes

Käesoleva töö jaoks Tallinna lahest kogutud setteproovide hulgas oli näha kerget trendi, kus fosfori sisaldused langesid keskmise terasuuruse suurenedes, kuid kindlat seost ei esinenud ( $R^2 = 0,78$ ). Kõrgemad fosfori sisaldused esinesid üldiselt aleuriidid ja liivakas aleuriidid ning madalamad sisaldused aleuriidikas liivas ja liivas.

Tallinna lahe läbilõigete pinnakihtide üldfosfori sisaldused jäid samasse vahemikku Puttonen *et al.* (2014) poolt määratud sisaldustega Soome ja Rootsi rannikumere erosiooni- ja transpordialadel, kus sügavusel 0–2 cm oli keskmiseks fosfori sisalduseks 520–1480 mg/kg(dw). Antud töös määrati sügavusel 0–2 cm keskmiseks üldfosfori sisalduseks 405–1400 mg/kg(dw). Sügavamal kui 10 cm oli Tallinna lahes keskmine üldfosfori sisaldus 588 mg/kg(dw), mis on madalam kui Puttonen *et al.* (2014) Soome ja Rootsi rannikumeres leitud 720 mg/kg(dw).

Suuroja *et al.* (2016) poolt määratud üldfosfori sisaldused Tallinna lahest kogutud setteläbilõigetel sügavustel 0–3 cm jäid vahemikku 910–1200 mg/kg(dw). Kusjuures piir hea ja kesise keskkonnaseisundi vahel on fosfori puhul 1050 mg/kg(dw) ning piir kesise ja halva keskkonnaseisundi vahel 1400 mg/kg(dw) (Suuroja *et al.*, 2016). Sellise klassifikatsiooni alusel ületas kesise keskkonnaseisundi piiri jaama SLM25-135 läbilõige, kus määrati 0–3 cm kihi keskmiseks fosfori sisalduseks 1150 mg/kg(dw). Teiste jaamade 0–3 cm kihi üldfosfori sisaldused jäid hea keskkonnaseisundi piiridesse ning olid madalamad kui Suuroja *et al.* (2016) töös, esinedes vahemikus 363–759 mg/kg(dw).

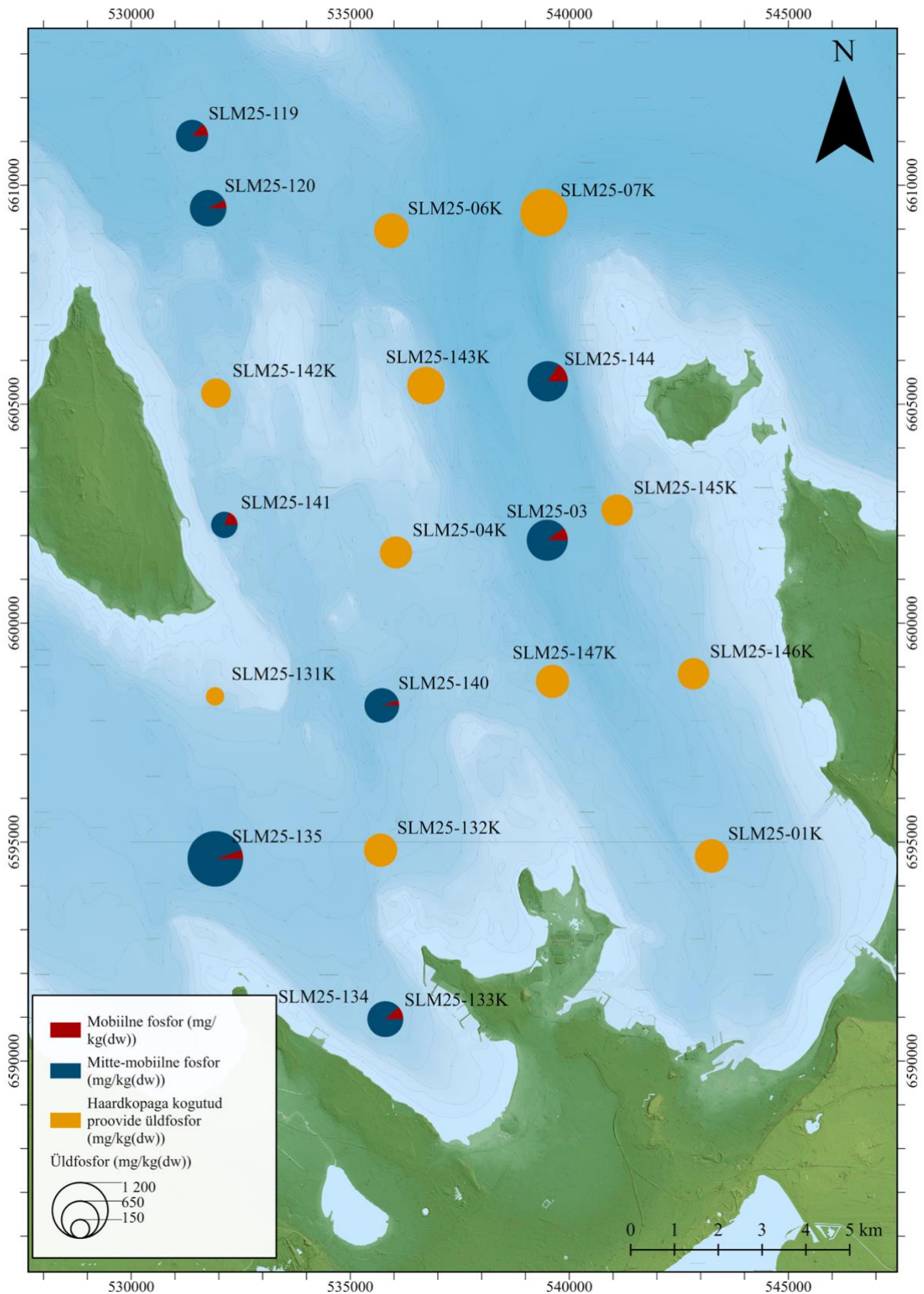
Tallinna lahe kontekstis kõrge üldfosfori sisaldus SLM25-135 läbilõike ülemises osas võib olla seotud laevatranspordiga, sest jaam asub laevatee vahetus läheduses. Raudsepp *et al.* (2019) on leidnud, et laevatranspordist tulenev fosfori sissekanne Läänemeres ei levi ruumiliselt laevateedest kaugemale.

Kopaproovide fosfori sisaldused Tallinna lahes jäid Suuroja *et al.* (2016) andmetel vahemikku 600–910 mg/kg(dw). Käesolevas töös jäid haardkopaga kogutud proovide fosfori sisaldused vahemikku 150–930 mg/kg(dw) ehk samuti hea keskkonnaseisundi piiridesse. Arvestades, et sisaldus üle 600 mg/kg(dw) määrati vaid kolmes haardkopaga kogutud jaamas kaheteistkümnest, võib praeguses töös olevaid fosfori sisaldusi pidada madalamaks.

### 5.2.1. Mobiilne fosfor

Tallinna lahes oli Heinsalu *et al.* (2024) andmete põhjal mobiilse fosfori (MP) osakaal akumulatsiooniala setteläbilõigetes keskmiselt 18,07–19,80%. Eesti mereala transpordialade keskmine MP sisaldus oli 13,06% (Heinsalu *et al.*, 2024), mis on kõrgem kui käesolevas töös Tallinna lahe transpordialadel määratud 10,0%. Käesoleva töö raames analüüsitud Aegna saare ja Keskmadala vahel asuva setete akumulatsiooniala setteläbilõigete SLM25-03 ja SLM25-144 keskmine MP sisaldus oli vastavalt 10,4% ja 17,4% (Joonis 11, Lisa 4). Kusjuures SLM25-144 jaama asukoht on lähemal Heinsalu *et al.* (2024) poolt uuritud setteläbilõigete kogumise asukohtadele, mis asusid käesoleva töö uuringualast veidi põhja pool, ja ühtib nendega paremini. Seega on tõenäoline, et akumulatsiooniala levib käesoleva töö uuringualast edasi põhja suunas.

Puttonen *et al.* (2014) on hinnanud Soome ja Rootsi rannikumere erosiooni- ja transpordialade sette pinnakihi sügavustel 0–2 cm mobiilse fosfori osakaaluks 7,5–19% ning akumulatsioonialadel MP osakaaluks 36%. Tallinna lahes jäid erosiooni- ja transpordialadel sügavustel 0–2 cm MP sisaldused vahemikku 4–23% ja akumulatsioonialal 11–16%. Tuleb märkida, et käesolevas töös käsitletakse sette pinnakihi intervalli 0–3 cm ning nendel sügavustel jäi erosiooni- ja transpordialadel MP osakaal vahemikku 5–19% ja akumulatsioonialal vahemikku 10–16% (Joonis 11). Tallinna lahe Aegna saare ja Keskmadala vahelisel akumulatsioonialal on selgelt madalam MP osakaal kui Puttonen *et al.* (2014) poolt Soome ja Rootsi rannikumere akumulatsioonialadel määratud MP osakaal, kuid erosiooni- ja transpordialadel jäävad MP osakaalud sarnasesse vahemikku.



**Joonis 11.** Settepuuriga kogutud läbilõigete ülemise 3 cm paksuse kihi keskmine mobiilse ja mitte-mobiilse fosfori osakaal üldfosforist ning haardkopaga kogutud proovide üldfosfori sisaldus (1:100 000, aluskaart Maa- ja Ruumiamet, 2026).

### 5.2.2. Potentsiaalselt vabanev fosfor

Potentsiaalselt vabaneva fosfori ehk potentsiaalselt mobiilse fosfori (P-MP) sisalduse määramiseks leiti sette tihedus (Tabel 2) kasutades Håkanson & Jansson (1983) poolt välja pakutud valemit  $\rho = 260/(100 + 1,6(W + LOI^0))$ , kus W tähistab sette veesisaldust (%) ja  $LOI^0$  tähistab kuumutuskadu märja sette kohta (%). Seejärel leiti sette mass ja potentsiaalselt vabaneva fosfori hulk pindalaühiku kohta (Tabel 2), kasutades iga setteläbilõike kõige sügavama intervalli mobiilse fosfori sisaldust kui loodusliku fooni taset eeldades, et sellest sisaldusest madalamale 0–3 cm keskmine MP sisaldus vabanemise käigus ei lange. Kui pinnakihi MP-st lahutatud loodusliku fooni tulemus oli negatiivne eeldati, et fosfori vabanemist antud jaama asukohas ei toimu ja potentsiaalselt vabaneva fosfori sisaldus on 0 mg/m<sup>2</sup>.

Heinsalu *et al.* (2024) on Tallinna lahe Aegna saare ja Keskmadala vahelisel akumulatsioonialal ja selle läheduses leidnud P-MP sisaldusteks 150–590 mg/m<sup>2</sup>, käesolevas töös leiti seevastu, et mõlema akumulatsioonialalt kogutud setteläbilõike P-MP sisaldus on 0 mg/m<sup>2</sup> (Tabel 2) ehk fosfori vabanemist settest ei esine.

Eesti merealade erosiooni- ja transpordialade keskmiseks P-MP sisalduseks on Heinsalu *et al.* (2024) andmetel 1248 mg/m<sup>2</sup>, mis on tunduvalt kõrgem kui käesolevas töös leitud 274 mg/m<sup>2</sup>. Selgelt kõrgemad P-MP sisaldused olid esitatud ka Puttonen *et al.* (2014) töös, kus Soome ja Rootsi rannikumere erosiooni- ja transpordialadel jäid P-MP sisaldused vahemikku 600–1400 mg/m<sup>2</sup> ja Rydin *et al.* (2011) töös, kus Rootsi rannikumeres jäid P-MP sisaldused vahemikku 525–5150 mg/m<sup>2</sup>. Käesolevas töös on potentsiaalselt vabaneva fosfori sisaldused tunduvalt madalamad kui Ausmeel *et al.* (2024) poolt Liivi lahe ülemises 3 cm paksuses settekihis leitud 8881 mg/m<sup>2</sup>.

Tallinna lahes kui valdavalt setete erosiooni- ja transpordialal fosfor olulisel määral ei akumulereeru ja kantakse akumulatsioonialadele Soome lahe sügavamates piirkondades.

**Tabel 2.** Arvutuslikud sette tihedused ja potentsiaalselt vabaneva fosfori hulk setteläbilõigete ülemises 3 cm paksuses osas.

Jaam	Sügavus (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Potentsiaalselt vabanev fosfor (mg/m <sup>2</sup> )
SLM25-03	0–3	1137,07	0
SLM25-119	0–3	1719,85	216
SLM25-120	0–3	1372,31	0
SLM25-134	0–3	1346,08	682
SLM25-135	0–3	1533,13	409
SLM25-140	0–3	1702,00	339
SLM25-141	0–3	1549,63	0
SLM25-144	0–3	1151,82	0

## 6. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli Tallinna lahe kui potentsiaalselt suurima maismaalt lähtuva reostusega Eesti rannikuveekogumi setete mobiilse fosfori hulga hindamine. Meregeoloogilise ekspeditsiooni käigus koguti Tallinna lahes setteproove kokku 20 jaamast, 12 neist haardkopaga ja kaheksa pehmete setete settepuuriga. Üldfosfori sisaldused määrati kõikidel proovidel kasutades ICP-OES või ICP-MS meetodit. Setteläbilõigetele teostati fosfori fraktsioneerimine, milleks kasutati (Psenner *et al.*, 1988; Hupfer *et al.*, 1995; Ausmeel *et al.*, 2024) järk-järgulise järjest tugevama lahusega ekstraheerimise meetodit. Nelja esimese fraktsiooni (Lab-P, Fe-P, Al-P ja Org-P) sisaldused määrati spektrofotomeetriga kasutades Murphy & Riley (1962) molübdeensinise meetodit. Viienda fraktsiooni (Ca-P) sisaldused määrati MP-AS meetodil.

Lisaks iseloomustati Tallinna lahe settekeskkonda läbi orgaanilise aine ja veesisalduse ning lõimiselise koostise. Veesisalduse määramiseks külmuivatati proovid lüofilisaatoris, orgaanilise aine sisaldus määrati kuumutuskao (*LOI 550*) meetodil ja lõimiseline koostis määrati laserdifraktsiooni meetodil.

Tallinna lahe peamisteks settetüüpideks olid liivakas aleuriit ja aleuriidikas liiv. Leiti, et Tallinna lahes on peamiselt tegu setete erosiooni- ja transpordialadega ning selgemalt defineeriti setete akumulatsiooniala, mis asub Aegna saare ja Keskmadala vahel ning levib käesoleva töö uuringualast edasi põhja suunas.

Üldfosfori sisaldused Tallinna lahes olid üldiselt madalad ja näitasid head keskkonnaseisundit. Erandiks oli ainult üks jaam (SLM25-135), kus ülemise 0–3 cm kihi keskkonnaseisund oli kesine, mis võis olla põhjustatud meretranspordist tulenevast toitainete sissekandest.

Mobiilse fosfori (Lab-P, Fe-P, ¼ Org-P) osakaal setteläbilõigete ülemises 3 cm paksuses kihis jäi erosiooni- ja transpordialadel sarnasesse vahemikku eelnevate töödega, kuid akumulatsioonialal oli mobiilse fosfori osakaal selgelt madalam.

Potentsiaalselt vabaneva fosfori sisaldused Tallinna lahe setete pinnakihis olid madalad, aga sobivatel tingimustel võib vähesel määral fosfori vabanemine settest tagasi veesambasse siiski toimuda.

Käesolevas töös olulist maismaalt lähtuvat reostust fosfori osas ei tuvastatud. Tallinna lahes kui valdavalt setete erosiooni- ja transpordialal ei akumulereeru fosfor olulisel määral enne transporti akumulatsioonialadele Soome lahe sügavamates piirkondades. Siiski, silmas pidades

Soome lahe ja Läänemere eutrofeerumise intensiivistumist, on oluline jälgida ja piirata toitainete sissekannet tundlikusse merekeskkonda.

Nii Eesti mereala kui ka laiemalt Soome lahe ja Läänemere keskkonnaseisundi hindamiseks on tarvis jätkata fosfori ja selle vormide hulga uurimist setetes. Teades meresetete fosfori, mobiilse fosfori ja potentsiaalselt vabaneva fosfori hulka on võimalik täpsemalt hinnata eutrofeerumise levikut merekeskkonnas, mis on hetkel suurim keskkonnaprobleem Läänemeres.

# **Spatial variation in the content of phosphorus and its forms in marine sediments of Tallinn Bay**

Anne Greete Gribulis

## **Summary**

The aim of this bachelor's thesis was to assess the amount of mobile phosphorus in marine sediments of Tallinn Bay, as the Estonian coastal water body with potentially the highest level of land-based pollution. Nutrient loading caused by human activity has made eutrophication the biggest environmental problem in the Baltic Sea. High population density in the catchment area and heavy ship traffic in and around Tallinn Bay point at possible high contents of nutrients in the marine sediments of Tallinn Bay.

The samples studied in this thesis were collected onboard R/V Salme in July 2025. Water content was measured by freeze drying the sediment samples, LOI 550 method was used to determine organic matter content and grain size data was collected using laser diffraction method. In addition to assessing the total phosphorus content using ICP-OES or ICP-MS methods, five phosphorus fractions were extracted using a sequential extraction method.

It was found that Tallinn Bay consists of mostly sediment erosion and transportation areas. A single sediment accumulation area was found in the deepest part of Tallinn Bay between Aegna and Keskmadal, extending North of the study area.

Concentrations of total phosphorus varied between 150–1400 mg/kg(dw) and were lower than figures in previous studies suggested. Percentages of mobile phosphorus (Lab-P, Fe-P, ¼ Org-P) in the erosion and transportation areas of sediments (5–19%) were comparable to those found in previous studies, but the share of mobile phosphorus in the sediment accumulation area (10–16%) was much lower. Contents of potentially mobile phosphorus varied between 0–682 mg/m<sup>2</sup>, showing a lower internal loading of phosphorus than expected.

Based on the phosphorus concentrations found, the environmental status of Tallinn Bay was deemed good. Still, it is important to minimize nutrient loading keeping in mind the fragile state of the Baltic Sea and Gulf of Finland as brackish water environments. Especially as internal phosphorus loads from other areas of the Baltic Sea are high enough to sustain and worsen eutrophication for many decades to come without any additional nutrients entering the system.

## **Tänuavaldused**

Töö autor soovib tänada juhendajaid Markus Ausmeelt ja Martin Liirat, Eesti Geoloogiateenistuse meregeoloogia ja geofüüsika osakonda, uurimislaev Salme meeskonda ja kõiki ekspeditsioonil osalenuid. Lisaks soovib töö autor tänada Marian Külaviirt, Peeter Paaverit ja Anton Mastitskit.

## Kasutatud materjalid

- Ahlgren, J., Tranvik, L., Gogoll, A., Waldebäck, M., Markides, K., & Rydin, E. (2005). Sediment Depth Attenuation of Biogenic Phosphorus Compounds Measured by<sup>31</sup> P NMR. *Environmental Science & Technology*, 39(3), 867–872.  
<https://doi.org/10.1021/es049590h>
- Ausmeel, M., Liira, M., Paiste, P., Lepland, A., & Suuroja, S. (2024). Phosphorus fractions and their vertical distribution in seabed sediments of the eastern Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105340>
- Barik, S. K., Bramha, S., Bastia, T. K., Behera, D., Mohanty, P. K., & Rath, P. (2019). Distribution of geochemical fractions of phosphorus and its ecological risk in sediment cores of a largest brackish water lake, South Asia. *International Journal of Sediment Research*, 34(3), 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.11.004>
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Elken, J., Lips, U., Keevallik, S., Lips, I., & Raudsepp, U. (2018). *Füüsikaline okeanograafia. Läänemeri*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
- Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *The Journal of Geology*, 62(4), 344–359.  
<https://doi.org/10.1086/626171>
- Gustafsson, B. G., Schenk, F., Blenckner, T., Eilola, K., Meier, H. E. M., Müller-Karulis, B., Neumann, T., Ruoho-Airola, T., Savchuk, O. P., & Zorita, E. (2012). Reconstructing the Development of Baltic Sea Eutrophication 1850–2006. *AMBIO*, 41(6), 534–548.  
<https://doi.org/10.1007/s13280-012-0318-x>
- Håkanson, L., & Jansson, M. (1983). *Principles of lake sedimentology*. Springer-Verl.

- Heinsalu, A., Alliksaar, T., Liiv, M., Kallaste, T., Urtson, K., Karpin, V., Suuroja, S., Tuuling, I., & Veski, A. (2021). *Merepõhja geoloogia: Geofüüsikalised kaugseire meetodid ja setteuringud* (lk 1–58). Tallinna Tehnikaülikool, Eesti Geoloogiateenistus.
- Heinsalu, A., Alliksaar, T., Liiv, M., Lips, U., Luik, S.-T., & Rünk, N. (2024). *Sekundaarne reostumine mere põhjasetetest ja mere sisekoormuse osakaalu hindamine toitainete kogukoormuses ning rannikuveekogumite maksimaalsete lubatud reostuskoormuste määramine* (lk 1–66). Tallinna Tehnikaülikool.
- HELCOM. (2019). *Guideline for the determination of heavy metals in sediment*. HELCOM. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guideline-for-the-determination-of-heavy-metals-in-sediment.pdf>
- HELCOM. (2021). *Background information on the Baltic Sea catchment area for the Seventh Baltic Sea Pollution load compilation (PLC-7)*. HELCOM.
- HELCOM. (2023). *HELCOM Thematic assessment of Eutrophication 2016-2021. Baltic Sea Environment Proceedings No.192* (lk 1–53). HELCOM.
- Hupfer, M., Gächter, R., & Giovanoli, R. (1995). Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquatic Sciences*, 57(4), 305–324. <https://doi.org/10.1007/BF00878395>
- Keskkonnaministeerium. (2022). *Lääne-Eesti vesikonna veemajanduskava 2022-2027*. Keskkonnaministeerium.
- Kirs, J., Puura, V., Soesoo, A., Klein, V., Konsa, M., Koppelmaa, H., Niin, M., & Urtson, K. (2009). The crystalline basement of Estonia: Rock complexes of the Palaeoproterozoic Orosirian and Statherian and Mesoproterozoic Calymmian periods, and regional correlations; pp. 219–228. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58(4), 219–228. <https://doi.org/10.3176/earth.2009.4.01>

- Maa- ja Ruumiamet. (2026). *WMS, WFS, WCS teenused*. Maa- ja Ruumiamet. Maa- ja Ruumiameti geoportaal. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/teenused/wms-wfs-wcs-teenused-p65.html> (viimati kasutatud 20.05.2026).
- Martin, G., & Herkül, K. (2018). *Rannikuvee hüdro-morfoloogilise seisundi hindamise metoodika ja rannikuveekogumite seisundi hinnang*. Eesti Merebioloogia Ühing.
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36.  
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., & Puckso, R. (1988). Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Advances in Limnology*, 30, 98–103.
- Puttonen, I., Mattila, J., Jonsson, P., Karlsson, O. M., Kohonen, T., Kotilainen, A., Lukkari, K., Malmaeus, J. M., & Rydin, E. (2014). Distribution and estimated release of sediment phosphorus in the northern Baltic Sea archipelagos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 145, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.04.010>
- Raudsepp, U., Maljutenko, I., Kõuts, M., Granhag, L., Wilewska-Bien, M., Hassellöv, I.-M., Eriksson, K. M., Johansson, L., Jalkanen, J.-P., Karl, M., Matthias, V., & Moldanova, J. (2019). Shipborne nutrient dynamics and impact on the eutrophication in the Baltic Sea. *Science of The Total Environment*, 671, 189–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.264>
- Rydin, E., Malmaeus, J. M., Karlsson, O. M., & Jonsson, P. (2011). Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(1), 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.12.020>
- Stigebrandt, A., & Andersson, A. (2020). The Eutrophication of the Baltic Sea has been Boosted and Perpetuated by a Major Internal Phosphorus Source. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.572994>

- Suuroja, S., Heinsalu, A., Alliksaar, T., Tõnisson, H., Lips, U., Lepland, A., Kask, A., Petersell, V., Pajusaar, S., Liiv, M., *et al.* (2016). *Hinnangu andmine merekeskkonna ökosüsteemipõhiseks korraldamiseks Soome lahe merepõhja ja setete näitel (SedGoF)* (lk 1–256). Eesti Geoloogiakeskus.
- Tuuling, I., Bauert, H., Willman, S., & Budd, G. (2011). *The Baltic Sea – geology and geotourism highlights*. NGO GEOGuide Baltoscandia.
- Uścińowicz, S. (Toim). (2011). *Geochemistry of Baltic Sea surface sediments*. Polish Geological Institute-National Research Institute.

## Lisad

**Lisa 1.** Haardkopaga kogutud setteproovide vee-, orgaanilise aine, savi, aleuriidi ja liiva sisaldus.

Proov	Veesisaldus (%)	Orgaanilise aine sisaldus (%/dw)	Savi (%)	Aleuriit (%)	Liiv (%)
SLM25-01K	46,97	4,56	1,34	70,35	28,31
SLM25-04K	38,55	2,20	2,47	42,89	54,63
SLM25-06K	37,95	2,97	0,81	50,43	48,77
SLM25-07K	83,63	15,54	1,35	82,84	15,81
SLM25-131K	20,57	0,32	0,00	0,00	100,00
SLM25-132K	26,60	1,38	0,69	35,79	63,49
SLM25-133K	53,88	5,81	1,42	88,84	9,73
SLM25-142K	32,59	1,50	0,47	41,57	57,96
SLM25-143K	24,27	1,07	0,38	27,24	72,38
SLM25-145K	31,86	2,00	0,63	43,49	55,88
SLM25-146K	36,27	1,98	0,67	46,09	53,25
SLM25-147K	36,58	2,74	0,83	54,37	44,81

**Lisa 2.** Settepuuriga kogutud setteproovide vee-, orgaanilise aine, savi, aleuriidi ja liiva sisaldus.

Proov	Veesisaldus (%)	Orgaanilise aine sisaldus (%/dw)	Savi (%)	Aleuriit (%)	Liiv (%)
SLM25-03 0-1	86,97	13,12	1,78	91,40	6,84
SLM25-03 1-2	75,06	8,32	1,64	86,64	11,72
SLM25-03 2-3	73,93	8,29	1,66	88,54	9,82
SLM25-03 19-20	64,29	7,52	2,42	91,05	6,55
SLM25-119 0-1	31,85	2,07	0,61	32,26	67,13
SLM25-119 1-2	27,49	1,92	0,97	43,69	55,34
SLM25-119 2-3	32,47	2,22	2,15	44,34	53,49
SLM25-119 19-20	55,62	4,90	7,18	89,07	3,74
SLM25-120 0-1	70,82	5,31	1,14	67,41	31,45
SLM25-120 1-2	52,22	4,18	1,22	63,91	34,86
SLM25-120 2-3	42,50	3,34	1,10	60,16	38,73
SLM25-120 9-10	51,57	4,80	2,55	87,62	9,85
SLM25-134 0-1	64,89	7,76	1,54	87,95	10,52
SLM25-134 1-2	50,92	9,60	1,60	88,43	9,98
SLM25-134 2-3	49,28	6,24	1,56	88,62	9,82
SLM25-134 19-20	47,50	6,41	1,68	88,55	9,77
SLM25-135 0-1	37,33	2,85	1,60	59,22	39,17
SLM25-135 1-2	39,28	3,40	2,26	59,51	38,23
SLM25-135 2-3	48,04	5,15	4,24	75,57	20,19
SLM25-135 19-20	51,52	6,84	7,97	66,88	25,16
SLM25-140 0-1	37,02	2,75	0,62	34,05	65,34
SLM25-140 1-2	27,00	2,28	0,72	33,63	65,64
SLM25-140 2-3	26,56	7,46	2,66	49,57	47,77
SLM25-140 18-19	42,39	11,07	6,19	83,99	9,81
SLM25-141 0-1	72,01	5,91	0,76	56,33	42,91
SLM25-141 1-2	35,22	2,34	0,37	36,83	62,79
SLM25-141 2-3	25,78	1,49	0,42	33,23	66,35
SLM25-141 8-9	29,18	6,84	19,86	51,56	28,57
SLM25-144 0-1	77,47	13,35	1,84	88,94	9,22
SLM25-144 1-2	78,34	10,38	1,51	86,42	12,09
SLM25-144 2-3	72,49	8,50	2,53	91,99	5,49
SLM25-144 19-20	65,93	8,99	2,41	89,04	8,55

**Lisa 3.** Kõikide setteproovide üldfosfori sisaldused.

Proov	P (mg/kg(dw))	Proov	P (mg/kg(dw))
SLM25-01K	560	SLM25-135 0-1	1400
SLM25-03 0-1	758	SLM25-135 1-2	1400
SLM25-03 1-2	780	SLM25-135 2-3	650
SLM25 03 2-3	740	SLM25-135 19-20	540
SLM25-03 19-20	730	SLM25-140 0-1	630
SLM25-04K	520	SLM25-140 1-2	600
SLM25-06K	590	SLM25-140 2-3	530
SLM25-07K	930	SLM25-140 18-19	540
SLM25-119 0-1	510	SLM25-141 0-1	500
SLM25-119 1-2	540	SLM25-141 1-2	310
SLM25-119 2-3	500	SLM25-141 2-3	280
SLM25-119 19-20	619	SLM25-141 8-9	590
SLM25-120 0-1	690	SLM25-142K	450
SLM25-120 1-2	620	SLM25-143K	660
SLM25-120 2-3	600	SLM25-144 0-1	740
SLM25-120 9-10	650	SLM25-144 1-2	770
SLM25-131K	150	SLM25-144 2-3	710
SLM25-132K	550	SLM25-144 19-20	620
SLM25-133K	660	SLM25-145K	500
SLM25-134 0-1	820	SLM25-146K	500
SLM25-134 1-2	530	SLM25-147K	550
SLM25-134 2-3	510		
SLM25-134 19-20	480		

**Lisa 4.** Tallinna lahe setteläbilõigete fosfori fraktsioonide sisaldused (mg/kg(dw)).

Proov	Lab-P	Fe-P	Al-P	Org-P	Ca-P	MP
SLM25-03 0-1	5,3	51,9	36,8	168,7	207,2	99,4
SLM25-03 1-2	5,1	33,2	23,8	142,1	156,1	73,9
SLM25-03 2-3	5,3	27,1	25,9	105,9	170,6	58,8
SLM25-03 19-20	16,6	25,9	34,5	155,6	195,8	81,5
SLM25-119 0-1	18,2	70,9	5,0	19,6	109,3	94,0
SLM25-119 1-2	12,5	36,7	8,7	24,8	138,7	55,4
SLM25-119 2-3	11,7	28,8	13,1	44,3	140,7	51,6
SLM25-119 19-20	0,3	58,6	25,8	8,2	333,5	61,0
SLM25-120 0-1	6,9	19,0	13,9	84,8	135,5	47,1
SLM25-120 1-2	15,7	14,2	13,5	68,1	133,4	46,9
SLM25-120 2-3	23,1	9,0	13,5	56,5	133,3	46,2
SLM25-120 9-10	36,0	12,0	23,9	69,6	180,4	65,4
SLM25-134 0-1	18,8	85,2	20,9	74,1	118,9	122,5
SLM25-134 1-2	11,1	25,2	15,7	58,9	109,8	51,1
SLM25-134 2-3	10,5	21,9	14,3	57,8	116,0	46,9
SLM25-134 19-20	4,6	20,2	19,7	44,6	123,6	36,0
SLM25-135 0-1	6,0	58,4	11,0	25,8	220,7	70,8
SLM25-135 1-2	1,5	32,2	12,2	14,6	213,5	37,3
SLM25-135 2-3	0,2	61,9	21,2	12,1	250,2	65,1
SLM25-135 19-20	0,6	41,3	19,6	2,6	268,6	42,6
SLM25-140 0-1	10,1	17,2	7,5	29,9	100,0	34,8
SLM25-140 1-2	10,4	12,5	7,6	25,6	174,1	29,3
SLM25-140 2-3	7,8	10,2	10,9	15,8	117,6	22,0
SLM25-140 18-19	3,8	13,8	17,0	6,2	246,1	19,2
SLM25-141 0-1	22,7	100,4	11,4	49,8	79,9	135,6
SLM25-141 1-2	14,9	28,9	8,1	34,1	72,0	52,3
SLM25-141 2-3	11,7	5,4	5,6	21,7	79,4	22,6
SLM25-141 8-9	29,5	94,6	39,3	16,3	204,4	128,1
SLM25-144 0-1	6,5	60,7	22,7	121,2	156,7	97,4
SLM25-144 1-2	1,3	104,8	27,4	127,5	161,9	137,9
SLM25-144 2-3	5,2	80,0	23,4	124,3	164,8	116,3
SLM25-144 19-20	16,2	89,6	44,5	121,7	191,2	136,3

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Anne Greete Gribulis,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

**Tallinna lahe meresetete fosfori ning selle vormide ruumiline varieeruvus,**

mille juhendajad on Markus Ausmeel ja Martin Liira,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Anne Greete Gribulis*

**25.05.2026**