

Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut

## Otoliidi mikrokeemia meetodite kasutamine kalade täiendi tekkimise uurimisel

(Deliverable 2.5.1 Methodological approach to analyse the contribution of different spawning grounds to the stock recruitment of different coastal fish)

Teostatud projekti "Eesti mereala keskkonna ja loodusväärtuste hindamise ja seire  
innovaatilised lahendused" raames

Versioon 1, 08.07.2021

Leping: RITA1/02-60-07  
Vastutav täitja: Georg Martin  
Aruande koostajad: Mehis Rohtla, Roland Svirgdsen,  
Markus Vetemaa

Tartu/Storebø 2021

## Sisukord

Sisukord .....	2
Executive Summary .....	3
1.1 Sissejuhatus .....	5
1.2 Töö eesmärk ja uurimisrühm.....	6
1.3 Haugi kude- ja turgutusalade iseloomustus.....	6
2 Materjal ja metoodika .....	8
2.1 Uuringualad .....	8
2.2 Proovide kogumine .....	19
2.3 Mikrokeemilised analüüsid .....	25
2.4 Statistilised analüüsid.....	26
3 Tulemused .....	27
3.1 Otoliiidi mikrokeemia sõrmejälgede baasväärtused pilootaladel.....	27
3.2 Päritolu määramine (klassifitseerimine).....	32
3.3 Maternaalse elukäigu määramine.....	41
4 Metodoloogilised soovitused.....	42
4.1 Proovide kogumine .....	42
4.2 Mikrokeemilised analüüsid .....	43
4.3 Statistilised analüüsid.....	44
5 Kokkuvõte ja järeldused .....	45
Kasutatud allikad .....	48

## Executive Summary

The aim of the study was to explore the potential of otolith microchemistry in determining the contribution of multiple pre-selected spawning and nursery grounds (hereafter collectively referred to as fish reproduction areas) to recruitment, using pike (*Esox lucius*) as a model species. Multi-elemental signatures of pike otoliths were used as natural tags for identifying the biome (fresh or brackish water) in which a specific individual hatched, but also natal origin. Otolith Sr:Ca ratios were used to determine the maternal origin (i.e. resident or anadromous) of the sampled young-of-the-year and adult pike. Field studies were carried out at eight study areas in Western and Southern Saaremaa Island, Estonia, in June and July 2019-2020. Methodological guidelines are provided for designing otolith microchemistry studies, including sample sizes, laboratory analyses, statistical techniques, and inferential limitations. Finally, suggestions for management applications where these techniques may be particularly useful are also provided.

Depending on the habitat characteristics (i.e. salinity, vegetation, bottom cover) juvenile pike were sampled using electrofishing and/or a beach seine. Adult pike samples were obtained from local commercial fishers or from the archives of Estonian Marine Institute. The samples collected from commercial fishers were frozen and later thawed in the laboratory for otolith removal. Otoliths were manually ground with different size sandpapers until the core area was fully exposed. Juvenile and adult pike otoliths were analysed with different laser ablation inductively coupled plasma mass-spectrometry techniques to finally obtain the mmol/mol concentrations of Sr:Ca, Ba:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca and  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  ratios.

For abundance/density estimation it is easier to sample larvae shortly after hatching using the white disc method. For otolith microchemistry studies it is recommended that young-of-the-year fish should be sampled at least ca 2-4 weeks after hatching, therefore necessitating other sampling methods such as electrofishing, beach seine or small underwater detonations. Later sampling allows the ambient natal chemical signature to incorporate to the otolith, and it is also easier to handle larger otoliths. To allow for better statistical power, sample sizes should be as large as possible in terms of conservation and budget constraints. Different locations within one reproduction area should be sampled to address the potential variability of otolith natal fingerprints. If possible,  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  should be used in addition to trace-element markers (e.g. Sr:Ca, Ba:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca) to increase the rate of correct classifications and decrease the rate of incorrect classifications. If potential reproduction areas are numerous and cannot be sampled all, measures such as Bayesian statistics or manual inspection of the discriminant analysis classification results should be applied to identify individuals with unknown origin.

The final quadratic discriminant function analysis model (including  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ , Sr:Ca, Ba:Ca) had a successful reclassification rate of 87% for the juvenile pike sampled from pilot areas included to the present study. Based on these classification functions, adult pike sampled

from different locations in the coastal sea were assigned to the pilot areas considered in the present study. Results stemming from the model only and after manual inspection are presented separately. According to the latter, most adult pike originated from Mullutu-Suurlaht (33%) and Oessaare Bay (18%), whereas other reproduction areas were less important comprising in total 9%. In total 28% of sampled adult pike were of unknown origin. Ten percent of adult pike were spawned to brackish water. Among the juvenile pike sampled from the reproduction areas, 43% were the progeny of anadromous pike, 30% were the progeny of freshwater resident pike, and 27% were classified as progeny of semi-residents.

**This study was financially supported by the European Regional Development Fund within National Programme for Addressing Socio Economic Challenges through R&D (RITA).**

## 1.1 Sissejuhatus

Kaladele olulised rannikumere elupaigad hõlmavad kude-, turgutus- ja toitumisalasid ning nendevahelisi rändeteid. Sõltuvalt kalaliigist võivad need olulised piirkonnad paikneda nii mage- kui ka riimvees, kuid näiteks paljude meres elavate mageveekalade puhul asuvad kudealad üldjuhul magevees ning turgutus- ja/või riimvees. Toitumisalad asuvad aga enamike mageveeliste siirde- ja poolsiirdekalade puhul meres. Täiskasvanud kalade toitumisalad, kuid ka rändeteed, on aga olulised kalapüügi- ja kalakasvatamisalad. Vaatamata sellele, et teadlaste seas valitseb üksmeel kude- ja turgutus- ja/või riimvee tähtsuse üle asurkonna/liigi arvukuse kujunemisel, pole nende täpset rolli kalavarude jätkusuutlikkuse tagamisel väga palju uuritud (Kraufvelin et al. 2018). Kalade koelmu- ja/või sünnipäritolu uurimine mõistmaks täiendi moodustumise protsesse ja asurkonna päritolulist struktuuri on ihtüoloogia üks kõige suuremaid ja atraktiivsemaid eemärke. Selline informatsioon on äärmiselt vajalik mõistmaks kalade asurkondade moodustumise mehhanisme.

Kalade luuliste- ja lubjastruktuuride keemilise koostise määramine võimaldab tagasiulatuvalt uurida kala poolt kasutatud keskkonna ajalugu ja ka päritolu. Ühed sellised struktuurid on kalade kuulmekivid ehk otoliidid. Otoliidid on kaltsiumkarbonaadist ( $\text{CaCO}_3$ ) struktuurid kalade sisekõrvas, mida kalad kasutavad helide ja gravitatsiooni tajumiseks ning veesambas tasakaalu hoidmiseks. Pärisluukaladel on kolm paari erinevas suuruses otoliite, kuid teadustöökasutatakse tavaliselt kõige suuremat paari. Otoliidid kasvavad ajas pidevalt ja ladestavad analoogselt puudega ka kasvuringe, mis võimaldavad määrata kala vanust ja kasvukiirust. Lisaks otoliitide põhilistele „ehituskihtidele“ (Ca, C, O) ladestatakse koos nendega otoliiti ka erinevaid mikro- ja jälgelemente (Campana 1999). Osad neist (nt Sr, Ba, Mg, Mn) pole kala ioon- ja osmoregulatsiooni kontrolli all ja ladestatakse otoliiti proportsionaalselt vees leiduvaga. Täpsed elementide otoliiti ladestumise teed ja mehhanismid on keerulised ning lõplikult välja selgitamata. Kuna otoliidi kristallmaatriksisse ladestunud kihid püsivad ajas muutumatuna, on seda kronoloogilist keemilist järjestust tagasiulatuvalt võimalik kvantifitseerida. Kui kala asustab oma elu jooksul veekogusid, millede keemiline koostis on teatud elementide poolest erinev, siis on need erinevused üldiselt näha ka kala otoliitides. Nii saab otoliitide keemilist „sõrmejälge“ kasutada loodusliku märgisena, et tuvastada kalade sünni- ja koelmupäritolu ning lõppkokkuvõttes kvantifitseerida erinevate koelmute suhteline osatähtsus täiendi moodustumisel. Samas pole otoliitide mikrokeemia meetodi kasutatavust kalavarude majandamise kontekstis põhjalikult hinnatud ning otoliidi teaduse ja selle kalamajanduslike rakendamise võimaluste vahel puudub enamasti ühendus (Pracheil jt. 2014, Carlson jt. 2017).

Võrreldes teiste meetoditega (biotelemeetria, geneetika), mis võimaldavad uurida kalade päritolu ja rändeid, on otoliidi mikrokeemia meetodil mitu eelist. Võrreldes erinevate biotelemeetria meetoditega on otoliidi mikrokeemia eelisteks: 1) kalade märgistamise vajalikkuse puudumine, sest kõik kalad on juba looduslikult „keemiliselt märgistatud“; 2) sünnipäritolu uurimise võimalikkus (biotelemeetriat saab kasutada ainult teatud suuruse

saavutanud isendite uurimiseks, kuid märgistamise ajaks võivad nad olla oma koelmult juba lahkunud); 3) uuritava isendi ema elukäigu (anadroomne või magevee elukäik) väljaselgitamise võimalikkus teatud liikidel (nt haug, forell); 4) esindusliku valimi võimalikkus, näiteks kalurite saakidest proovide kogumise kaudu (biotelemeetria uuringutes on valimisuurused reeglina väikesed, v.a. PIT telemeetria puhul); 5) terve elu andmete kohene kättesaadavus ilma, et uurija peaks ootama tulemuste saabumist mitu aastat. Võrreldes geneetiliste meetoditega on otoliidi mikrokeemia eelisteks parem sünnipäritolu lahutusvõime lähestikku asuvates asurkondades, kuna otoliidi mikrokeemia erinevused sõltuvad keskkonnast (lähestikku asuvad asurkonnad suurema tõenäosusega keemiliselt erinevad, kui kudumine toimub erinevates veekogudes), geneetika erinevused aga geenisiirdest ja -triivist (lähestikku asuvad asurkonnad väiksema tõenäosusega geneetiliselt erinevad). Otoliidi mikrokeemia puudusteks on: 1) kala surmamise vajadus (saab leevendada kalurite saakidest valimi kogumisega); 2) ebapiisav ruumiline resolutsioon detailsete liikumismustrite tuvastamiseks. Üldiselt siiski erinevad meetodid täiendavad üksteist ja ei ole ühte universaalselt head meetodit kalade päritolu ja rännete uurimiseks.

## 1.2 Töö eesmärk ja uurimisrühm

Käesoleva töö eesmärgiks oli luua metodoloogiline raamistik erinevate otoliidi mikrokeemia uurimuste läbiviimiseks ning testida meetodi potentsiaali Lõuna- ja Lääne-Saaremaa magedaveelistes rannikuveekogudes kudevate kalade näitel. Mudelligiks valiti tööde käigus haug (*Esox lucius*), sest tegemist on rannikumeres laialt levinud ja suhteliselt hõlpsasti tabatava liigiga.

Töö teostasid Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi töötajad Mehis Rohtla, Roland Svirgsden, Markus Vetemaa, Mari-Liis Põlme. Välitöödel osalesid täiendavalt Lagle Matetski, Jürgen Karvak, Alfonso Díaz Suarez.

**Uuringu tellis ja uuringut rahastab Eesti Teadusagentuur Euroopa Regionaalarengu Fondist toetatava programmi „Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamine“ (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ kaudu. Uuring valmis Keskkonnaministeeriumi eesmärkide elluviimiseks.**

## 1.3 Haugi kude- ja turgutusalade iseloomustus

Läänemeri on madala soolsusega sisemeri, mistõttu on selle kalastikus esindatud ka paljud mageveeliigid. Tüüpilistest mageveekaladest on Läänemere rannikualadel iseloomulikud ahven (*Perca fluviatilis*), haug, koha (*Sander lucioperca*), luts (*Lota lota*), vimba (*Vimba vimba*), särg (*Rutilus rutilus*) ja säinas (*Leuciscus idus*). Kuigi osad neist vajavad kudemiseks eranditult magevett (luts, vimba), siis teised on võimelised kudema suuremal või vähemal määral ka

riimvees (Ojaveer jt. 2003, Rohtla 2015). Rannikumere kaladele olulised merealad, mis toimivad nii kude- kui ka noorjärkude kasvualadena, on üldjuhul mere madalamad ja produktiivsemad piirkonnad nagu varjatud lahed, rannajärved ja neid ümbritsevad märgalad (Kraufvelin jt. 2018). Tihti suubub sellistele aladele ka erinevaid vooluveekogusid (jõed, ojad, kraavid), mille tõttu alaneb vee soolsus magevee sissevoolu mõjualas. Selliste sissevoolude mõju on suurim kevadiste üleujutuste ajal, mille tulemusel magevee mõjuala laieneb ning ulatuslikud merealad magestuvad ning muutuvad kaladele sobilikeks kudealadeks. Erinevatel liikidel on aga erinevad eelistused kudeala suhtes.

Haug on tüüpiline mageveekala, kes koeb Läänemeres nii riimvees kui ka merega ühenduses olevates rannikuäärsetes mageveekogudes. Osadel merealadel on riimvees ja magevees kudevate haugide vahetõrje ligikaudu võrdne (Engstedt jt. 2010), teistes jällegi domineerivad kas riimvees (Möller jt. 2019) või magevees kudevad haugid (Rohtla 2015). Eesti rannikumeres domineerivad tänapäeval magevees kudevad haugid (Rohtla 2015), kuid mõned aastakümned tagasi oli meres kudeva haugi osakaal tõenäoliselt palju suurem (Erm jt. 1970). Tõenäoliselt sõltub riimvees ja magevees kudevate haugide vahetõrje konkreetsetel merealal järgnevatest tingimustest: 1) kas piirkonnas on kudemiseks ja noorjärkude kasvualaks sobivaid mageveekogusid ja kas need on ka haugidele ligipääsetavad, 2) kas merekudealadel valitsevad abiootilised ja biootilised tegurid võimaldavad edukat sigimist. Arvatakse, et Läänemere eutrofeerumine on vallandanud nõ kaskaad-efekti, mille tulemusel on halvenenud merekudealade kvaliteet ning suurenenud ogaliklaste kisklus haugi marjateradele (Nilsson 2006, Eriksson jt. 2009). Sellele viitavad ka eespool esitatud tulemused – riimvees kudevate haugide osakaal on suurim Läänemere lääneosas, kus eutrofeerumise negatiivsed mõjud ei avaldu rannikumeres nii selgelt kui Läänemere idaosas.

Haugi kude- ja turgutusvalade eelistused riim- ja magevees on mõnevõrra erinevad. Magevees on haugide kude- ja turgutusvalade eelistused suhteliselt hästi teada. Kuna haug on tüüpiline luhalkudeja, siis parimad kudealad on üleujutatud rohumaad/märgalad järvede ja vooluveekogude kaldavööndis või ümbruses (Craig 1996). Kudemine toimub varakevadel üldjuhul madalas vees (0,1-0,7 m) eelmise aasta surnud taimestikule, kusjuures põhjataimestiku tihedus ei tohi olla ülemäära suur (nt 2-4 tarnamätast ühe m<sup>2</sup> kohta) (Casselman & Lewis 1996). Veepinnani ulatuv tihe taimestik on pigem ebasoodne, kuna see võib takistada kalade liikumist ja soodustada hapnikuvaeste tingimuste teket, mis võib omakorda saada saatuslikuks embrüotele ja vastsetele. Taimerühmadest eelistatakse üldjuhul lõikheinalisi ja kõrrelisi, kuid sobivad ka vesisammal, vesikuusk, mändvetikas ja pilliroog (Casselman & Lewis 1996). Turgutusvaladena toimivad kõige paremini tihedad veetaimestiku rikkad alad, kus taimestiku katvus on 40-90% ning mille üldpindala on üle 10 korra suurem võrreldes kasutusel olnud kudealaga (Casselman & Lewis 1996).

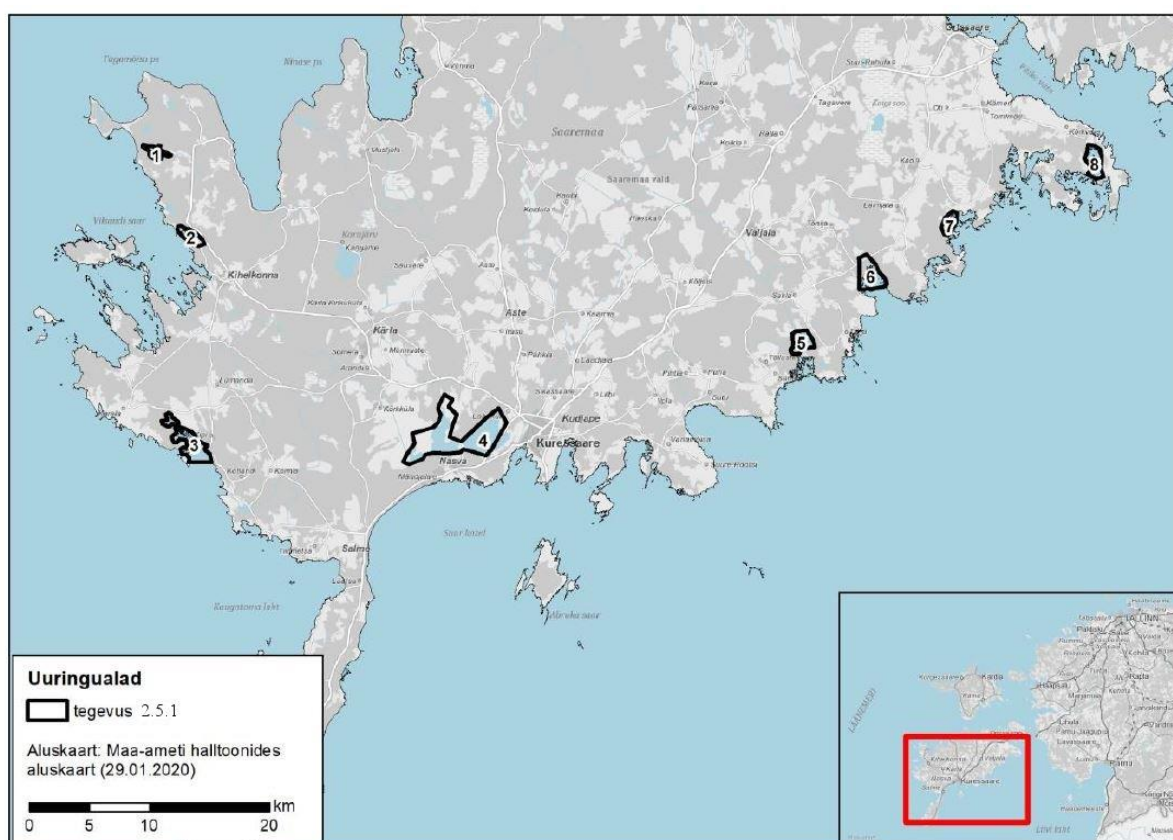
Riimvees kudevate haugide kude- ja turgutusvalade eelistused ei ole väga hästi teada, kuna seda pole jõutud veel nii põhjalikult uurida. Kuid üldjuhul ka riimveekudealad paiknevad taimestikurikkastes piirkondades sügavustel 0,2-1,0 m (Kallasvuo jt. 2011), avavees isegi kuni

mitme meetri sügavusel (Möller jt. 2019). Eelistatud taimerühmadest on kirjanduses väljatoodud pilliroog ja vesisammal (Kallasvuo jt. 2011) ning mändvetikas (Möller jt. 2019).

## 2 Materjal ja meetodika

### 2.1 Uuringualad

Uuringualad paiknesid Saaremaa lääne- ja lõunaosas (**Joonis 1**). Kokku teostati välitöid kaheksal eriilmelisel alal. Konkreetset veekogud (või veekogu osad) olid valitud selliselt, et nad esindaks erineva hüdroloogilise režiimi ja suurusega mageveekaladele potentsiaalselt sobivaid kude- ja turgutusalasid.



**Joonis 1.** Uuringualad. 1 - Killatu järv; 2 – Pautsaare laht; 3 – Pilguse laht; 4 – Mullutu-Suurlaht; 5 – Oessaare laht; 6 – Kõiguste laht; 7 – Saastna laht; 8 – Arjulaht

**Killatu järv** (ka Kiljatu järv). VEE2067900. Järv asub Saaremaa loodenurgas Tagamõisa poolsaarel. Tegemist on lääne-ida suunas pikliku veekoguga, mille pindala on 39 ha (*register.keskkonnainfo.ee*; **Foto 1**). Tegemist soolatoitelise järvega, millel on tugevad lubjatoitelise järve tunnused ning mille sügavus jääb alla meetri (Mäemets 1977). Järve ümbritseb suuremalt osalt mets, kaldad on madalad ning kaetud savika räha ja kividega, põhjas lasub lubimuda. Läbivool on nõrk, sissevoolud lähtuvad Saka (VEE2068100) ja Ooklema



(VEE2068000) järvest, väljavool merre toimub läbi järve lääne otsast lähtuva ning Haagilõukasse suubuva Killatu jõe (VEE1168700). Veevaesel ajal järve pind aheneb märgatavalt. Selle äärmiselt vähese taimestikuga järve heleda värvusega vesi on põhjani läbipaistev, hästi segunev ja ühtlaselt soojenev (Mäemets 1977). Kalastiku kohta varasemad kirjanduse andmed puuduvad.

Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on järve sügavus valdavalt alla 0,5 meetri. Valdavaks põhjasubstraadiks on suhteliselt õhuke kiht kergesti lenduvat muda, mille all on savikas rähk ja kivid. Paiguti leidub ka paksema pehme mudakihiga piirkondi ning ka lausaliselt kiviseid alasid. Leidub ka üksikuid suuremaid kivisid. Kohati leidis veekogu põhjal ja kividel bakteritest ja vetikatest moodustunud geeljaid klompe (**Foto 2**). Taimestikku leidis järves vähe. Põhjal leidis hõredalt kidura kasvuga määndvetikat ja paiguti kasvas vees ka hõredalt pilliroogu, muid veesiseid taimi ei täheldatud. Kaldal, vastu vabavee piiri, kasvas tarna ja kohati pilliroogu (**Foto 2**). Välitööde ajal puudus järvel silmaga nähtav väljavool, vesi imbus Killatu jõkke läbi pinnase (tegemist oli veevaese perioodiga), kuid oli näha, et kõrgema veeseisu korral on toimunud väljavool üle kaldapinnase (voolusängid olid näha). Välitööde käigus registreeriti veetemperatuuriks 24,3<sup>o</sup> C, hapniku sisaldus vees oli 15,5 mg/l ja küllastuvus 186 % (mõõdetud 18.06.19).



**Foto 1.** Killatu järv vaatega itta. Paremäl on näha Saka järv ning üleval väikene Ooklema järv. Killatu jõe lähe (järve väljavool) paikneb foto paremas alumises nurgas.



**Foto 2.** Vasakpoolsel fotol on näha Killatu järve põhjal leiduvad geelja sisuga pallikesed. Ühtlasi on näha, et põhjas olevad kivid on kaetud õhukese lubjarikka muda kihiga. Parempoolsel fotol on sügisene vaade järvele, kus on näha sellele järvele tüüpiline kaldaimestik, mis koosneb enamasti tarnadest ja pilliroost.

**Pautsaare laht** (VEE2070410). Vaatamata nimele on tegemist magedaveelise järvega, mis asub Loode-Saaremaa Tagamõisa poolsaare lääne küljes. Selle väheliigendatud loode-kagu suunalise järve pindala on 10,9 ha (*register.keskkonnainfo.ee*; **Foto 3**). Järve maksimaalne sügavus on 0,8 m, kuid valdavalt jääb sügavus alla 0,5 m. Pautsaare laht on tugeva läbivooluga. Järvest voolab läbi Oju jõgi (VEE2070410), mille sissevool paikneb järve kagunurgas ja väljavool loodeotsas. Peale järve läbimist suubub Oju jõgi Allika lahte, mis on osa suuremast Kihelkonna lahest. Pautsaare lahe ja mere vahelise Oju jõelõigu pikkus on vaid ligikaudu 400 m. Järve suubub ka läänes paiknevast Laibu lahest (VEE2070420) algav lühike suvel kuivav Kiissa oja. Järve kalastiku kohta varasemad kirjanduse andmed puuduvad, kuid Oju jões on teada haugi, forelli (*Salmo trutta*) ja lutsu esinemine, lisaks leidub jões ka jõevähki (*Astacus astacus*) (Järvekülg 2001).

Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on järve sügavus valdavalt alla 0,5. Järve heledaveeline vesi oli põhjani läbipaistev. Põhja katab kohati väga paks pehme mudakiht, seda eriti lahe keskosas. Kalda ääres oli mudakiht õhem ja kohati lenduv, mille all savikas rähk ja kivid. Leidub ka üksikuid suuremaid veest väljaulatuvaid kive. Järve keskosa ja Oju jõe sissevoolu piirkonna põhi oli kaetud paksu ja tiheda mändvetika vaibaga. Kaldavees leidis paiguti hõredalt pilliroogu ja kiduralt kasvavat mändvetikat. Kaldal, vastu veepiiri, kasvas valdavalt tihedalt tarna ja kohati ka pilliroogu. Järve kaguotsas, Oju jõe sissevoolu piirkonnas, kasvas ka tihedalt kaislat. Vältööde ajal oli Oju jõe sisse- ja väljavool kergesti leitavad ning suure tõenäosusega toimub järvest väljavool aastaringelt. 15.07.19 keskpäeval registreeriti järve veetemperatuuriks 23,3° C, hapniku sisaldus vees oli 12,6 mg/l ja küllastuvus 149 %. 16.06.20 pealelõunal registreeriti järve veetemperatuuriks 25,8° C, hapniku sisaldus vees oli 10,0 mg/l ja küllastuvus 126 %.



**Foto 3.** Vaade Pautsaare lahele suunaga loodesse. Foto all osas on näha Oju jõe sissevool, väljavool paikneb järve vastas otsas. Taamal on näha rannikumeri (Kihelkonna laht).

**Pilguse laht** (VEE3261010). Pilguse laht paikneb Edela-Saaremaal ja keskkonnaregistri andmetel on selle pindala 2,95 km<sup>2</sup> ([register.keskkonnainfo.ee](http://register.keskkonnainfo.ee)). Lahe lõunakülg piirneb rannikumerega, lahe suudmesse on tormid kandnud veealuse liivavalli, mis tõenäoliselt soodustab lahe edasist kinnikasvamist. Pilguse lahest loodes ja põhjas paiknevad kunagised lahe osad, mis on nüüdseks ajaks suuremal või vähemal määral sellest eraldunud (**Foto 4**). Nendest suuremad on Süllalaht (VEE2086420) ja Nigulaht (VEE2086410). Pilguse lahe süsteemi suubub mitmeid ojasid ja kraave, neist suuremad on Pussa (VEE1167800) ja Laasi-Jaagu jõgi (VEE1167700).

Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on lahe suurim sügavus ligikaudu 2,5 m. Välitööde ajal oli vesi hägune ja suhteliselt vähese läbipaistvusega (1,8 m). Põhjasubstraadiks oli enamasti muda, kohati ka liiva muda segu, kuid leidis ka kiviseid alasid. Lahe suudmes ja lääne küljes oli lausaliselt liivaga kaetud alad. Taimestik domineeris kamm-penikeel (ulatus kohati veepinda), vesikuusk ja mändvetikas. Välitööde käigus registreeriti Pilguse lahe välimises osas veetemperatuuriks 18,6° C, hapniku sisaldus vees oli 8,2 mg/l ja küllastuvus 88 %, soolsus oli 6,8 PSU-d (mõõdetud 16.07.19). Lahe põhja osas (Pussa lahes) mõõdeti temperatuuriks 18,6° C, hapniku sisalduseks 9,9 mg/l, küllastuvuseks 108 % ja soolsuseks 4,1—4,7 PSU-d. Süllalalhes mõõdeti soolsuseks 3,7 PSU-d.



**Foto 4.** Vaade Pilguse lahe süsteemile. All vasakul on näha lahe suudmesse tormide poolt kantud liivavall. Üleval paremal on näha Pilguse lahe põhja sopp (Pussa laht), millest vasakule jääb Süllalaht ja sellest omakorda põhjas paikneb Nigu laht.

**Mullutu-Suurlaht** (VEE2088610 ja VEE2088600). Mullutu-Suurlahe, mis paikneb Lõuna-Saaremaal Kuressaarest läänes, näol on tegemist ühe Eesti suurima loodusliku magevee järvega. Õigemini on tegemist kahe eraldi järvega, Mullutu lahega ja Suurlahega, mis on omavahel ühendatud 0,5 km pikkuse Kurgu järvekaelaga (VEE1165303) (**Foto 5**). Mõlemad järved kuuluvad halotroofsesse ehk soolatoitelisse limnoloogilisse tüüpi. Mullutu lahe pindalaks on tänapäeval 412,9 ha ja Suurlahel 544,5 ha (*register.keskkonnainfo.ee*). Suurveeaegu (mil vesi võib tõusta üle meetri) moodustab Mullutu-Suurlaht kuni 36 km<sup>2</sup> suuruse veekogu (Mäemets 1977). Järvede maksimaalne sügavus on 2,1 m, kuid valdavalt on veesügavus järvedes meeter või alla selle, eriti madal on Mullutu lahe põhjaosa. Järvede kaldad on madalad enamasti kruusased ja kivised, paiguti ka liivased, savised või mudased. Suurlahe põhja katavad viirsavid, millel on kohati peal liivakate, kuid enamasti aga paks ravimudakiht. Sarnaselt Suurlahega on ka Mullutu lahe nõgu kaetud paksu viirsavi kihiga, millel järve lõuna osas lasub paks liivakiht, millel õhuke mudakiht, ainult järve lääneosas on mudakiht түседam (Mäemets 1977). Mullutu lahe läbivool on suhteliselt tugev, järve suubub arvukalt ojasid ja kraave, milledest suurimad on Kärla jõgi (VEE1165400) ja Pühajõgi (VEE1166000), samuti suubub lahte eelpoolmainitud Kurgu järvekael. Suurlahe läbivool on

nõrgem, peamiselt toovad vett järve põhjaossa suubuv Irase jõgi (VEE1166500) ning läänes paiknevast Linnulahest (VEE2088700) algav ning veevaesel ajal kuivav lühike Kalaaugu jõgi (VEE1166501), väljavool toimub läbi Kurgu Mullutu lahte. Kogu süsteemi väljavooluks on 3 km pikkune Nasva jõgi, mis saab alguse Mullutu lahe kagusopist ning suubub Suurde Katlasse. Veevaesel, eriti aga tugeva lõunatuule korral, võib soolane merevesi läbi Nasva jõe tungida järvedesse (Mäemets 1977). Mõlema järve heledapoolne vesi on põhjani läbipaistev ning hästi segunev. Järvede taimestik on väga rohke ning hõlmab suurema osa lahestikust. 1954. aastal leiti järvedest kokku 15 liiki makrofüüte, milledest eriti paistis silma tugevakasvuline pilliroog, huvitaval kombel puudus ujuvlehtedega taimestik täielikult, seevastu veesisest taimestikku, kus domineerisid mändvetikad, oli massiliselt (Mäemets 1977). 2018. aastal leiti Mullutu lahest 20 liiki ja Suurlahes 30 liiki veetaimi, mõlema järve kaldavööndis domineeris jätkuvalt pilliroog, veesisestest taimedest domineerisid erinevad mändvetikad, kuid järvede sügavamates osades esines ka kamm-penikeelt, jätkuvalt puudus ujuvlehtedega taimestik (Ott 2018). Mullutu-Suurlaht on tänu heale ühendusele merega oluline merekalade kudemis- ja turgutusala. Järvedes on teada ahvena, haugi, särje, roosärje (*Scardinius erythrophthalmus*), linaski (*Tinca tinca*), kogre (*Carassius carassius*), kiisa (*Gymnocephalus cernua*), teivi (*Leuciscus leuciscus*), säina, viidika (*Alburnus alburnus*), rüüdi (*Gobio gobio*), lutsu, angerja (*Anguilla anguilla*), nuru (*Blicca bjoerkna*), mudamaimu (*Leucaspis delineatus*) ja hõbekogre (*Carassius gibelio*) esinemine (Mäemets 1977; Ott 2017; Ott 2018).

Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on järvede sügavus valdavalt alla meetri. Enamasti kattis põhja muda, mis paiguti oli väga pehme ja lenduv, kuid leidis ka kõvema (liivase või liiva-mudase) põhjaga alasid. Kaldavees domineeris kõrge pilliroog, veesisene taimestik koosnes peamiselt mändvetikatest, samas sügavamates piirkondades esines ka kamm-penikeelt. Kaldaäärses vees vastu pilliroogu veesisene taimestik enamasti puudus. Vesi oli kõikjal põhjani läbipaistev. Kurgu järvekaelas oli vooluhulk hinnanguliselt 50 l/s, Nasva jões kordades suurem. Välitööde käigus (20.06.19) mõõdeti enne lõunat Mullutu lahes veetemperatuuriks 23,7° C, hapniku sisalduseks 13,7 mg/l ja küllastuvuseks 163 %, Suurlahes mõõdeti pealelõunal veetemperatuuriks 25,6° C, hapniku sisalduseks 13,5 mg/l ja küllastuvuseks 166 %. 18.06.20 keskpäeval registreeriti Mullutu lahes veetemperatuuriks 24,4° C, hapniku sisaldus vees oli 10,0 mg/l ja küllastuvus 112 %, Suurlahes oli sama päeva pealelõunal veetemperatuur 25,3° C, hapniku sisaldus 9,8 mg/l ja küllastuvus 120 %.



**Foto 5.** Vaade Suurlahe lääne osa kohalt Mullutu lahele (vaade läände). Kahte järve ühendav Kurgu järvekaela (oja) kulgemine on jälgitav puuderivi järgi. Mullutu lahe kagusopis on aimatav Nasva jõe lähe, mille kaudu toimub süsteemist väljavool merre.

**Oesaare laht** ( VEE2078700). See soolatoiteline järv paikneb Lõuna-Saaremaal Sakla külast 2,5 km lõunas. Lahe pindala koos saartega on 120,9 ha, suurim sügavus 1,6 m, kuid valdavalt alla meetri (*register.keskkonnainfo.ee*; **Foto 6**). Järve veetaset on 2015. aasta parendustööde käigus tõstetud. Kaldavööde on valdavalt savine või mudane, kohati ka kivine, põhja katab 0,5—2,5 m paksune ravimuda kiht (Mäemets 1977). Järv on suhteliselt tugeva läbivooluga, järve loodenurka suubuvad Silmajõgi (VEE1174400) ja Lövejõgi (VEE1173500) ning edelasoppi (Poka lahte) Poka jõgi (VEE1174500). Väljavool toimub läbi lõuna kaldalt lähtuva Enima silma (VEE1700026) riimveelisse Laidevahe lahte (VEE3415000) ning sealt edasi Liivi lahte. Kõrge merevee taseme korral võib järve tungida soolane vesi (Mäemets 1977). 2015. aasta parendustööde raames rajati mööda järve põhja Silmajõe ja Löve jõe suuet Enima silma lähtega ühendav süvend. Järve heleroheline vesi on põhjani läbipaistev ja segunev. 1956. aastal oli taimestikku rohkesti, kaldavees leidis palju pilliroogu ja hundinui, põhjas mändvetikat (Mäemets 1977). 2018. aastal leiti järvest 24 liiki suurtaimi, neist 18 kaldavee-, 1 uju-, ja 5 veesisest taime (Ott 2018). Kaldaveetaimestikus domineerisid pilliroog järvkaisel ning ahtalehine hundinui, roostikuvööndi ees levis kuuskhein. Ujutaimedest leidis vähesel määral ristlemmelt, veesises taimestikus domineerisid erinevad mändvetika liigid, kuid esines ka tähk-vesikuuske ja kamm-penikeelt. Vaatamata oma madalusele on järve kalastik liigirikas. Järvest on leitud ahvenat, haugi, kokre, hõbekokre, särge, roosärge, linaskit, nurgu,

viidikat, säinast, teibi, angerjat, kiiska, rünti, mudamaimu ja jõesilmu (*Lampetra fluviatilis*) (Mäemets 1977, Ott 2018).

Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on järve sügavus valdavalt alla meetri. Põhja substraadiks peaaegu kõikjal pehme muda. Vesi hele ja põhjani läbipaistev, v.a. eelpool mainitud kaevatud süvendi ümbruses, kus vesi oli hägune ja vähese läbipaistvusega ning seda mõlemal välitööde aastal. Lõve jões ja Enima silmas oli hinnanguliselt vooluhulk 50-100 l/s, Silmajões minimaalne. Kaldavööndis kasvas peamiselt pilliroog, veesisest taimestikust domineerisid mändvetikad (kohati ulatusid veepinnani), mida leidis üle enamuse järve põhja, siiski kaldaäärses vees vastu pilliroogu veesisene taimestik enamasti puudus. Veesisest taimestikust leidis veel kamm-penikeelt ja kuuskheina, mida oli rohkesti eriti 2020. aasta suvel. Jõgede suudmetes leidis lisaks veel valget vesiroosi ja vesikuuske. 19.06.19 hommikul oli järve veetemperatuur 22,7° C, hapniku sisaldus 19,7 mg/l ja küllastuvus 228 %, sama päeva õhtul olid samad näitajad vastavalt 24,2° C, 14,4 mg/l ning 172 %. 17.06.20 pealelõunal registreeriti Lõve jõe suudmes veetemperatuuriks 15,6° C, hapniku sisalduseks 10,4 mg/l ja küllastuvuseks 104,6 %, samal ajal järve väljavoolul oli veetemperatuur 25,3° C, hapniku sisaldus 16,6 mg/l ja küllastuvus 190 %.



**Foto 6.** Vaade Oessaare lahele suunaga põhja. Esiplaanil on näha järvest väljavoolu (Enima silma) lähe. Taamal, järve loode kaldal, on näha puuderiviga markeeritud Lõve jõe suue ning sellest veidi vasakule jääv Silmajõe suue. Droonifotolt on näha ka ulatuslikud mändvetikatega kaetud alad (kohati ulatuvad mändvetikad veepinnani).

**Kõiguste laht.** Kõiguste laht paikneb Kagu-Saaremaal Laimjala külast ligikaudu kuus kilomeetrit edelas. Laht koosneb kahest osast, merele avatud avaosast (VEE3417010) ja eelnevast pika poolsaarega eraldatud varjulisemast ning madalamast siseosast ehk Kunnati lahest (VEE3417030)(**Foto 7**). Käesoleva uuringu ala hõlmas ainult Kõiguste lahe siseosa (Kunnati lahte) koos Maadevahe jõega (VEE1173300). Kunnati laht, mille pindala on 2,56 km<sup>2</sup> (*register.keskkonnainfo.ee*), on saarterohke ja liigendatud kaldajoonega. Lisaks Maadevahe jõele, mille suue asub lahe loodesopis, suubub lahte mitmeid kuivenduskraave ja üks suurem peakraav – Võhkse pkr (VEE1173400). Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on Kunnati lahe kõige sügavam piirkond selle keskosa, kus mõõdeti sügavuseks 2,9 m (merevee tase oli mõõtmise hetkel keskmisest kõrgem). Lahe põhjaosas oli sügavus alla meetri. Põhjasubstraat oli varieeruv – leidis kiviseid ja kruusaseid piikondi kui ka pehmete setetega alasid (muda, liiva-muda segu), lahe põhjaosa oli valdavalt mudane. Vee läbipaistvus oli alla meetri. Kaldad olid enamasti palistatud pillirooga ning kaldavees leidis ka paiguti kaislat. Veesisesest taimestikust oli esindatud vesikuusk, mida leidis kohati massiliselt ja paiguti oli see kaetud tihedalt niitjate rohevetikatega. Veesisestest taimedest leidis veel kamm-penikeelt ja mändvetikaid, aga ka särjesilma ning põisadru. Maadevahe jõe suudmealal kasvas tihedalt pilliroogu ning jõe suue ei olnud lahe poolt lähenedes leitav. Lahe kalastikust on teada järgnevate liikide esinemine: ahven, angerjas, emakala (*Zoarces viviparus*), haug, hõbekoger, kammeljas (*Scophthalmus maximus*), kiisk, kilu (*Sprattus sprattus balticus*), koha, latikas (*Abramis brama*), lepamaim (*Phoxinus phoxinus*), lest (*Platichthys sp.*), linask, lõhe (*Salmo salar*), meriforell, merihärg (*Trigloporus quadricornis*), merisiig (*Coregonus sp.*), meritint (*Osmerus eperlanus*), must mudil (*Gobius niger*), nurg, ogalik (*Gasterosteus aculeatus*), roosärg, räim (*Clupea harengus membras*), rünt, säinas, särg, tursk (*Gadus morhua*), tuulehaug (*Belone belone*), viidikas, vimb, ümarmudil (*Neogobius melanostomus*) (Svirgsden jt. 2018; Ecschbaum jt. 2021). Neis mitmed on lahes eksikülalised ja paljud merelised liigid esinevad peamiselt lahe avaosas. Maadevahe jões on teada haugi, särje, lutsu, luukaritsa (*Pungitius pungitius*) ja ogaliku esinemine (Järvekülg 2001). 08.07.19 mõõdeti Kunnati lahe keskosa veetemperatuuriks 14,8° C, hapniku sisalduseks 11,2 mg/l ja küllastuvuseks 111,0 %, samas lahe põhjasopis olid vastavad näitajad 19,6° C, 10,1 mg/l ning 111,0 %. Vee soolsus lahe keskosas oli 6,0–6,1 PSU-d, põhjaosas 4,6–5,5 PSU-d ja vastu Maadevahe jõe suuet 4,1 PSU-d.





**Foto 7.** Vaade Kõiguste lahe laidude rohkele siseosale ehk Kunnati lahele. Esiplaanil paremal on näha tugevalt roostunud Maadevahe jõe suudmeala. Taamal vasakul on pikalt lahte ulatuv kitsas poolsaar (Sääretirp), mis eraldab Kõiguste lahe ava- ja siseosa.

**Saastna laht.** Saastna laht paikneb Kagu-Saaremaal Laimjalast ca 4,5 km idas. Käesoleva uuringu ala hõlmas suuremast Saastna lahest ainult läänepoolset osa, kus paikneb Kuke peakraavi (VEE1173000) suue koos selle ees olevate väikeste, üksteisega kitsaste väinade läbi ühendatud lahtedega (**Foto 8**). Kuke peakraav (ka Kuke jõgi) on püsiva loodusliku toitega ning voolab aastaringiselt (Järvekülg 2001). Välitööde käigus teostatud kohtvaatluste põhjal on Kuke pkr suudme eelsed lahed kõikjal alla meetri sügavad. Põhja substraadiks oli enamasti muda (suudme ees ka savikas muda), kuid leidis ka kivised põndakuid ja suuremaid rahne. Veesisesest taimestikust domineerisid mändvetikad, vähesel määral esines ka kamm-  
penikeelt ja vesisammalt (esines ainult suudme-eelses lahes). Jõe suudme-eelses lahes oli jõevee sissevoolu tõttu vesi hägune ja tume, kaugemal olevates lahtedes progresseeruvalt läbipaistvam. Suudme eelses lahes oli taimestik hõre ja kidura kasvuga. Jõe suudmes kasvas kaislat. Lahtede ja jõe suudme kallastel kasvas pilliroogu ja hundinuia. Jõe suue oli ilma suurema raskuseta leitav. Lahe kalastiku kohta varasemad andmed puuduvad, kuid Kuke peakraavis on eelnevalt tuvastatud haugi, lutsu, ahvena, särje ja ogaliku esinemine, leidub ka jõevähki (Järvekülg 2001). 10.07.19 varieerus lahtede veetemperatuur 16,9–17,4° C, hapniku sisaldus 7,7–12,1 mg/l ning küllastuvus 77–122 %. Suudmest kaugemal olevate lahtede soolsus oli 3,8–4,0 PSU-d, suudme-eelses lahes 1,2–2,7 PSU-d ning jõesuudmes 0,0 PSU-d.



**Foto 8.** Kuke peakraavi suudme ees on väikestest, üksteisega läbi kitsaste väinadega ühendatud, lahtedest koosnev süsteem. Jõe suue ise on näha ülal vasakul. Lahtede vesi on jõevee sissevoolu tõttu tunduvalt tumedam ning ka magedam kui ümbritseva mere vesi.

**Arjulaht** (VEE2072910). Arjulaht (ka Harju laht) paikneb Saaremaa idatipus Kübassaare majakast ca 4 km põhjas. Selle põhja-lõuna suunas pikliku lahe pindalalaks on 183,8 ha (*register.keskkonnainfo.ee*; **Foto 9**). Laht on enamalt lõuna küljest piirnenud merega, kuid on tänaseks tehistammiga ülejäänud Liivi lahest eraldatud. Tammis paikneb kaks lüüsidega truupi, millel oli välitööde ajal metallist varjed ees. Ühtegi märkimisväärset vooluveekogu lahte ei suubu. Käesoleva uuringu käigus teostatud kohtvaatluste järgi (vaatlusi teostati lahe põhja poolses osas) paikneb Arjulahe sügavam piirkond lahe keskel olevas põhja-lõuna suunalises vagumuses, kus mõõdeti veesügavuseks üks meeter. Enamasti on sügavus 0,5 m ümber, väga madal on lahe põhjapoolsem osa. Põhja katab valdavalt muda, mis kohati on väga pehme ja lenduv, kuid leidub ka (pae-) kivisemaid alasid. Veesisestest taimedest domineerisid mändvetikad, kamm-penikeelt leidis minimaalselt. Madalamatel aladel veesisene taimestik enamasti puudus või esines hõredalt, sügavamates lahe osades oli mändvetikaid rohkem. Kaldataimestikulis valitses pilliroog, kuid leidis ka pilliroo vabu kaldapiirkondi. Lahte on asustatud 1998. ja 1999. aastal angerjamaime (kokku 29 tuh tk), muid andmeid lahe kalastiku kohta pole teada. 17.06.19 mõõdeti lahe keskel veetemperatuuriks

23,9° C, hapniku sisalduseks 12,5 mg/l ja küllastuvuseks 149 %. Lahe soolsuseks registreeriti 3,1 PSU-d. 06.07.19 oli lüüside juures mereveetase umbes 30–40 cm kõrgem kui Arjulahes, kuid lüüsis paiknevate metallvarjete servani vesi ei ulatunud (ühes lüüsis toimus veevool mingil määral varje alt). Sel hetkel mõõdeti lüüsidest mere pool soolsuseks 5,8 PSU-d, Arjulahes oli lüüside juures soolsus 5,4 PSU-d, kuid lahe põhjaosas jätkuvalt 3,1 PSU-d. Tõenäoliselt toimub kõrge mereveetaseme korral varjetest vee ülevool Arjulahte, kuid üldiselt on nende lüüside tõttu kalade liikumine lahe ja ülejäänud mereala vahel väga tugevalt takistatud.



**Foto 9.** Vaade Arjulahele suunaga põhja. Vasakul on näha pinnastamm, millega on tänapäeval laht ülejäänud merealast eraldatud. Tammis on lüüsid, kuid veevool on neis metallist varjetega tõkestatud ning seetõttu puudub kaladel vaba läbipääs läbi tammi. Taamal paistab Väike väin.

## 2.2 Proovide kogumine

Uuringualadel teostati välitöid 2019. ja 2020. aasta suvel, täpsed välitööde ajad on esitatud **Tabel 1**-s. Uuringualad jaotusid vee soolsuse järgi kaheks: riimveelisteks (Pilguse, Kõiguste, Saastna ja Arjulaht) ning magedaveelisteks (Killatu, Pautsaare, Mullutu-Suurlaht ja Oessaare). Osades riimveelistes uuringupiirkondades leidis ka mageveelisi alasid nagu Maadevahe jõgi Kõiguste uuringualal ning Kuke peakraav Saastna uuringualal. Vee soolsus määras ära kasutatava püügimeetodika. Riimveelistes veekogudes kasutati püügiks maimunoota (kaldanoot; **Foto 10a**). Magedaveelistes veekogudes sai kasutada põhilise püügivahendina elektripüügiaparaati (**Foto 10b**), kuid ka nendes veekogudes katsetati püügil maimunoota.

Suurematel veekogudel liikumiseks kasutati väikest plastikpaati, väiksematel kummipaati või liiguti jalgsi kahlates.

**Tabel 1.** Välitööde läbiviimise kuupäevad uuringualade kaupa koos kasutatud püügimeetodikaga.

Uuringuala	Välitööd	Püügimeetodika
Killatu järv	18.06.2019; 30.07.2020	Elekter
Pautsaare laht	15.07.2019; 16.06.2020; 29.07.2020	Elekter, noot
Pilguse laht	16.09.2019	Noot
Mullutu-Suurlaht	20.06.2019; 18.06.2020	Elekter, noot
Oessaare laht	19.06.2019; 17.06.2020	Elekter, noot
Kõiguste laht	08-09.07.2019; 08.07.2020	Noot
<i>Maadevahe jõgi</i>	09.07.2020	Elekter
Saastna laht (Kuke pkr suue)	10.07.2019; 17.07.2019	Elekter, noot
Arjulaht	17.06.2019	Noot



**Foto 10.** Veekogude soolsus määras ära kasutatava püügimeetodika. Riimveelistes veekogudes tuli kasutada maimunoota (vasakpoolne foto), magedaveelistes sai kasutada elektripüügiaparaati (parempoolne foto).

Erinevate uuringualade mikrokeemilise koostise (nn elemendilise sõrmejälje) kirjeldamiseks kasutati samasuviste haugide (**Foto 11**) otoliite. Lisaks võeti kõikidelt tabatud samasuvistelt haugidelt ka DNA proov, mida kasutati tegevuse 2.7.1 (*Development of DNA-based approach for estimation of effective spawner abundance*) edasisel teostamisel. Lisaks võeti DNA proov ka kõikidelt uuringualadelt tabatud vanematelt haugidelt (neilt enamasti otoliite ei kogutud ning pärast uimeproovi võtmist kalad vabastati). Kõikide uuringualade peale kokku tabati 243 samasuvist haugi ning lisaks võeti DNA proov 226 vanemalt haugilt (neist osadelt 1+ või 2+ vanustelt kaladelt koguti ka otoliidid). Tabatud isendite jaotus uuringualade lõikes on välja toodud **Tabel 2**-s. Järgnevalt on välja toodud proovide kogumise lühikirjeldused uuringualade kaupa.



**Foto 11.** Erinevate veekogude elemendiliste sõrmejälgede kirjeldamiseks kasutati samasuviste haugide otoliitide mikrokeemilist koostist. Samasuvised haugid on tavaliselt suve alguseks jõudnud kasvada vähemalt 5 cm pikkuseks.

**Tabel 2.** Uuringualadelt tabatud samasuviste ja vanemate haugid arv. Kõikidelt samasuvistelt kaladelt võeti nii otoliidi kui ka geneetika proov. Geneetika proov võeti ka kõikidelt tabatud vanematelt isenditelt, milledest osadelt 1+ ja 2+ vanustelt kaladelt võeti ka otoliidi proov (sulgudes proovide arv).

Uuringuala	Aasta	Samasuvised (otoliite + DNA)	Vanemad (DNA)
Killatu järv	2019	3	2
	2020	40	9
Pautsaare laht	2019	45	12
	2020	19	66 (sh 25 otoliit)
Pilguse laht	2019	0	0
Mullutu-Suurilaht	2019	24	21
	2020	22	37 (sh 2 otoliit)
Oessaare laht	2019	29	21 (sh 4 otoliit)
	2020	39	10 (sh 2 otoliit)
Kõiguste laht	2019	5	13 (sh 1 otoliit)
	2020	0	7
Maadevahe jõgi	2020	17	0
Saastna laht (Kuke pkr suue)	2019	0	28
Arjulaht	2019	0	0

**Killatu järves** teostati 2019. aastal elektripüüke peaaegu kogu järve ulatuses, püügi alast jäi välja ainult järve idaots. 2020. aasta püüti ainult järve läänepoolsest osast. Elektripüügiaparaadi poolt tekitatud elektriväli mõjutas kalu suhteliselt lähedalt ning selletõttu oli kalade tabamine raskendatud. 2019. aastal tabati järvest mõned üksikud haugid, seevastu 2020. aastal oli samasuviseid haugid suhteliselt palju. Kõik haugid tabati vastu

kaldataimestikku (enamasti tarnad) või siis kaldataimestiku seest. Samasuviseid haige tabati alates ca 10 cm sügavusest veest. Veel leidis järves üsna arvukalt linaskit ja ahvenat, tabati ka üksikuid hõbekokresid. 2019. aastal nähti ka mitmeid haruldasi II kaitsekategooriasse kuuluvaid apteegikaane (*Hirudo medicinalis*; Foto 12).



**Foto 12.** Killatu järves ja Pautsaare lahes tuvastati Eestis haruldase II kaitsekategooriasse kuuluva apteegikaani (*Hirudo medicinalis*) esinemine.

**Pautsaare lahes** püüti nii 2019. kui ka 2020. aastal üle terve järve kaldavee. Püügist jäi välja järve keskosa, sest sealne tüse pehme mudakiht ja mändvetika vaip raskendas olulisel määral püügi teostamist. Ka siin oli elektripüügiaparaadi poolt tekitatud elektriväli üsna piiratud ning seetõttu ei tabatud kõiki nähtud kalu. 2019. aastal oli samasuviseid haige suhteliselt palju, 2020. aastal mõne võrra vähem, kuid seevastu oli 1+ vanuseid kalu rohkem, mis oli arvestades eelmise aasta samasuviste rohkust ka oodatav olukord. Paaegu kõik kalad tabati lahe kaldavööndist vastu kaldataimestikku (peamiselt vastu tarnasid) või siis selle seest. 2020. aastal tõmmati järve idakaldal ka noota, kuid pehme muda tõttu osutus see selles veekogus ebapraktiliseks püügivahendiks. Teistest kalaliikidest tabati linaskit, kokre, hõbekokre, särge, ahvenat, ogalikku, luukaritsat ja mudilat (*Pomatoschistus sp.*). Kõige arvukamaks kalaliigiks lahes oli linask. Oju jõe sissevoolu piirkonnas esines ka lutsu ja ojasilmu (*Lampetra planeri*). Järves elutseb ka jõevähk ja looduskaitsealune apteegikaan.

**Pilguse lahes** teostati välitõid 2019. aastal. Vee soolsuse tõttu tuli püügil kasutada maimunoota, ainult Pussa jões püüti elektripüügiaparaadiga. Lahest ega ka Pussa jõest ei tabatud ühtegi haugi isendit. Noodaga püüki raskendas osades lahe piirkondades pehme mudane põhi. Kalaliikidest tabati ogalikku (esines ohtralt), särge, roosärge, säinast, viidikat, hõbekokre, ümarmudilat, lesta, looduskaitsealust hinku (*Cobitis taenia*) ja Pussa jõe suudmes ka mudamaimu. Pussa jões endas esines ogalikku ja ohtralt mudamaimu.

**Mullutu-Suurlahes** teostati püüke nii 2019. kui ka 2020. aastal Mullutu lahe kaguosas (Nasva jõe lähte piirkonnas), Kurgu järvekaelas, Suurlahe lõunaosas ning Kalaaugu jões. Püüti peajaslikult elektripüügiaparaadiga, kuid osades kõvema põhjaga kohtades tõmmati ka noota. Sarnaselt teistele uuringualadele ei olnud elektripüügiaparaadi elektrivälja ulatus suur. Suhteliselt halb elektripüügiaparaadiga püütavus tundub olevat iseloomulik kõikidele järvedele, kus võrrelduna jõgedega (püütavus tavaliselt hea) on vabavee ruumala suur. Samasuviseid hauged tabati mõlemal aastal kõige rohkem Kalaaugu jõest (paadikanalina kasutatavast osast, jões endas veevool puudus), mõningal määral ka Suurlahe lõunakaldalt ja Kurgu järvekaelast. Vanemaid hauged esines suhteliselt arvukalt mõlemal aastal. Enamus hauged tabati kaldataimestikust või vahetult selle eest. Suurlahes saadi mõned samasuviseid haugid ka kaldast eemalt mändvetikate seest. Noodaga püüdmist raskendas mändvetika esinemine ning pehmem põhjasubstraat. Noodaga samasuviseid hauged ei tabatud. Teistest liikidest tabati ahvenat, viidikat, särge, roosärge, kokre, hõbekokre, linaskit, nurgu, hinku, ogalikku, luukaritsat ja lutsu.

**Oessaare lahte** külastati 2019. ja 2020. aasta suvel. 2019. aastal teostati elektripüüke mitmetes lahe piirkondades, 2020. aastal peamiselt lahe loodeosas ja Silma jões. Mõlemal aastal prooviti järve idakaldal ka noota tõmmata, mis pehme muda ja mändvetikate tõttu ei andunud tulemusi. Ka siin oli järves endas elektripüük raskendatud (elektrivälja ulatus väike). 2019. aastal saadi samasuviseid hauged Silmajõe ja Lõve jõe suudmete juurest, samuti kummagi jõe suudme-eelsetest lõikudest ning Enima silmast (järve väljavool). 2020. aastal saadi valdav enamus samasuviseid hauged Silmajõest (Enima silmast ei püütud), kusjuures võrreldes eelneva aastaga leidis hauged palju pikemal jõelõigul ning ka üldine arvukus oli seal tunduvalt kõrgem. Kummalgi aastal ei saadud ühtegi haugi järve keskelt mändvetikate vahelt. Teistest kaladest tabati särge, roosärge, linaskit, ahvenat, hõbekokre, lutsu, hinku ja luukaritsat.

**Kõiguste lahes** teostati välitõid nii 2019. kui ka 2020. aastal. Vee soolsuse tõttu sai lahes kasutada püügiks vaid maimunoota. 2020. aastal teostati püüke elektripüügiaparaadiga **Maadevahe jões** Masa-Laimjala-Tumala tee truupide ümbruses. Lahes raskendas noodapüüke kohatine tihe taimestik kui ka pehme või siis vastupidiselt väga kivine põhi. Samasuviseid hauged tabati ainult Maadevahe jõe suudme eelses laheosas ning sealgi vähesel määral. Kõiguste siselahe (Kunnati lahe) kalastik on suhteliselt liigirikas (**Foto 13**), noodapüügil tabati peale haugi veel ogalikku (ohtralt), ahvenat, särge, roosärge, viidikat, nurgu, hõbekokre, hinku ja luukaritsat. Maadevahe jões tabati samasuviseid hauged mõlemast harust (maantee truupide juures voolab jõgi kahes harus). Peale haugi esines jões veel ogalikku ja lutsu.



**Foto 13.** Kõiguste lahe siseosast (Kunnati lahest) tabati peale haugi veel mitmeid eelkõige tüüpilisi mageveeliike nagu nurgu, särge ning viidikat.

**Saastna lahes** (Kuke peakraavi suudmes) teostati püüke ainult 2019. aastal. Suudme ees olevates lahtedes kasutati püügivahendina noota, Kuke peakraavis endas elektripüügiaparaati. Noodapüügid olid taaskord raskendatud pehme muda tõttu. Ühtegi samasuvist haugi uuringualalt ei tabatud. Kuke peakraavist tabati suhteliselt palju vanemaid hauged. Teistest liikidest tabati linaskit, hõbekokre, särge, roosärge, ahvenat, ogalikku ja luukaritsat. Peakraavi suudmes tuvastati ka jõevähi esinemine.

**Arjulahte** külastati 2019. aasta suvel. Lahe soolsuse tõttu sai teostada ainult noodapüüki, mida olulisel määral raskendas veekogu põhjas olev pehme mudakiht koos üksikute kividega. Lahest ei tabatud ühtegi samasuvist ega ka vanemat haugi. Teistest kalaliikidest esines ogalikku, ahvenat, viidikat, hinku ja kiiska. Mere ja Arjulahe vahelises tammis olevad varjetega varustatud lüüsid mõjuvad lahe kalastikule tõenäoliselt negatiivselt, sest takistavad kalade liikumist lahe ja ülejäänud mereala vahel.

Olenevalt piirkonnast, koguti meres elavate täiskasvanud haugide valimid, kas kohalike kalurite abiga või siis rannikumere seire käigus tabatud haugide näol. Vilsandi saare ümbruse rannikumere ja Kõiguste lahe puhul kasutati osaliselt ka eelnevalt arhiveeritud otoliite. Analüüsi kaasati ka Nasva jõest kaluri poolt püütud kalad, sest Nasva ümbruse rannikumere ei olnud võimalik vajalikus koguses kalu hankida. Täpsed valimi suurused erinevate merealade lõikes on välja toodud **Tabel 3**-s. Merest püütud täiskasvanud haugide päritolu määramise läbi kvantifitseeriti edasises analüüsis erinevate taastootmisalade (antud kontekstis uuringualade) suhteline osatähtsus täiendi moodustumisel.

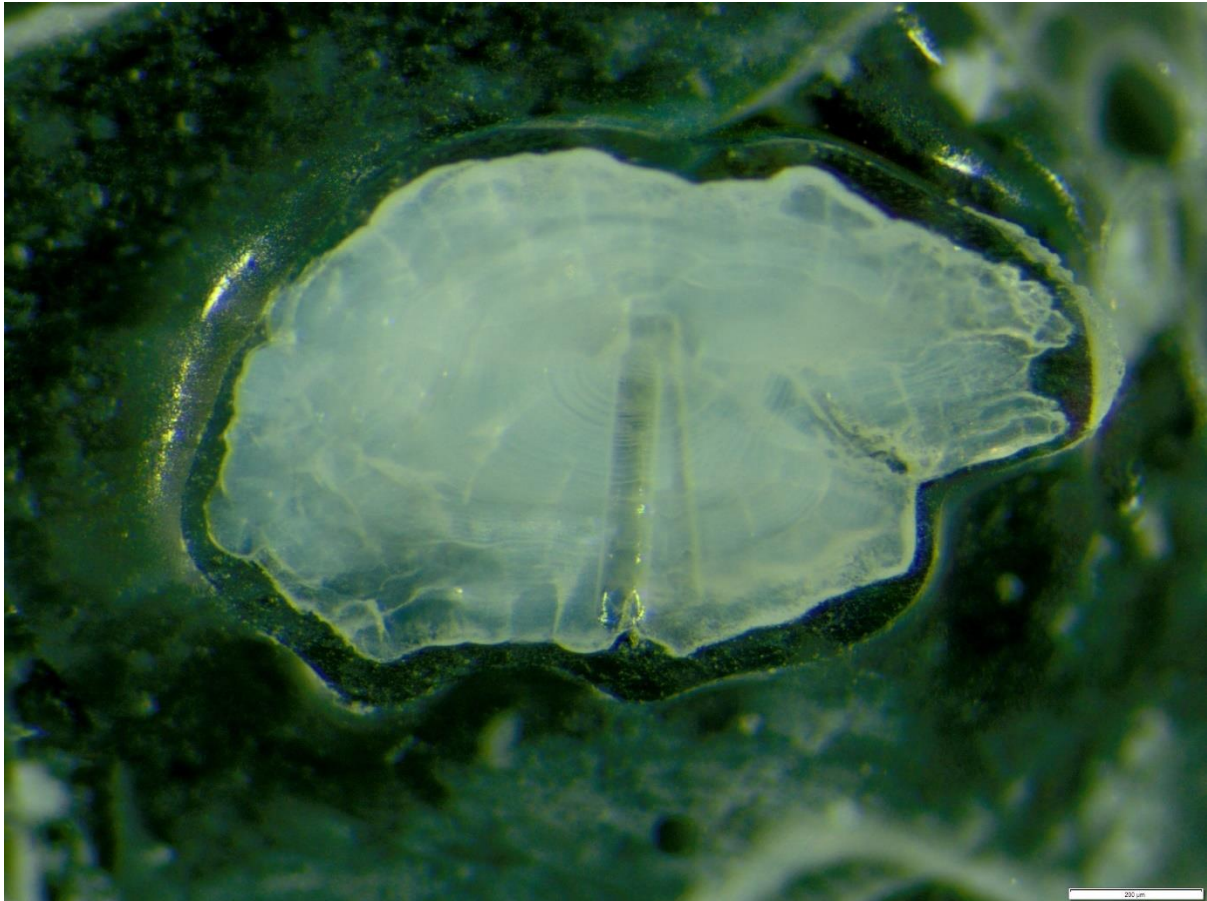


**Tabel 3.** Päritolu määramise analüüsis kasutatud merest ja Nasva jõest püütud täiskasvanud kalade valimid erinevate alade lõikes koos kogumise aastaga. Vilsandi saare ümbruse rannikumere ja Kõiguste lahe puhul kasutati ka eelnevalt arhiveeritud otoliite. Välja on toodud ka valimi kogumise viis: „kalurid“ – kalad pärinevad kalurite saakidest ja „seire“ – kalad pärinevad rannikumere seirest.

Püügiala	Kogumise aasta(d)	Valimi suurus	Kogumise viis
Vilsandi ümbruse rannikumeri	2013-2020	32	Kalurid, seire (k.a. arhiivi otoliidid)
Nasva jõgi	2020	22	Kalurid
Kuressaare laht	2020	24	Kalurid
Sepamaa laht	2019	11	Kalurid
Kasti laht	2019	12	Kalurid
Laidevahe	2019-2020	27	Kalurid
Kõiguste laht	2018-2020	31	Seire (k.a. arhiivi otoliidid)

### 2.3 Mikrokeemilised analüüsid

Kokku prepareeriti ja analüüsiti 165 samasuvisse haugi ja 159 täiskasvanud haugi otoliiti. Otoliidi kasvuajaloo paljastamiseks lihviti need liivapaberiga sagitaalsel tasapinnal tuumani ning seejärel kleebiti alusklaasile (**Foto 14**). Mikrokeemilised analüüsid teostati kahes etapis. Jälgelementide analüüsid viidi läbi Tartu Ülikooli geoloogia osakonnas kasutades laserablatsioon sisestusega integreeritud induktiiv-sidestatud plasma massispektromeetrit (LA-ICPMS). Kasutatud laserkiire diameeter oli 40 µm, laserkiire liikumise kiirus 5 µm/s ja laserimpulsi sagedus 20 Hz. Kvantifitseeriti järgnevate isotoopide suhtelised sisaldused: <sup>24</sup>Mg, <sup>43</sup>Ca, <sup>55</sup>Mn, <sup>88</sup>Sr ja <sup>137</sup>Ba. Toorandmed korrigeeriti proovide vahel mõõdetud rahvusvaheliste standarditega (NIST-612, MACS-3), kõik isotoobid suhestati kaltsiumiga (mida kasutati ka otoliidisese standardina) ning teisendati mmol/mol. Strontsiumi isotoopide (<sup>87</sup>Sr:<sup>86</sup>Sr) analüüsid viidi läbi multi-kollektor LA-ICPMS-ga Rootsi Loodusmuuseumis (Vegacenter). Kasutatud laserkiire diameeter oli 65 µm, laserkiire liikumise kiirus 5 µm/s ja laserimpulsi sagedus 15 Hz. Toorandmed korrigeeriti proovide vahel mõõdetud laborisiseste standarditega. Kõikide kvantifitseeritud otoliidi mikrokeemiliste profiilide puhul kasutati päritolu määramise analüüsiks andmeid vaid sellest profiili osast, mis vastas kala sünniveekogule. Konkreetse haugi ema päritolu määramiseks (siirdehaug või magevee haug) kasutati otoliidi Sr:Ca profiili algust nn emapunkti, kus olev aines pärineb vitellogeneesi käigus rebusse ladestatud materjalist, mis hilisema embrüonaalse arengu käigus otoliiti ladestatakse. Teisese markerina ema päritolu määrangus kasutati Sr isotoopide analüüsi käigus mõõdetud kõikide Sr isotoopide summaarset väärtust otoliidi tuumas (mõõdetud voltides).



**Foto 14.** Samasuvisse haugi otoliidi õhik, mida on lihvitud mööda sagitaalset tasapinda. Fotel on näha LA-ICPMS (parempoolne) ja MC-LA-ICPMS (vasakpoolne) analüüsi tulemusel otoliiti laseri poolt lõhustatud kraatrid.

## 2.4 Statistilised analüüsid

Otoliidi mikrokeemia andmete analüüsiks kasutati ühe- ja mitmemõõtmelisi statistilisi analüüse. Kõigepealt kasutati mitmemõõtmelist dispersioonanalüüsi (MANOVA), et välja selgitada kas uurimisalade vahel on otoliidi mikrokeemia „sõrmejäljes“ erinevusi. Seejärel kasutati ühemõõtmelist ANOVA-t või Kruskal-Wallise testi, et välja selgitada milliste keemiliste markerite keskmised väärtused erinevad uurimisalade vahel. Kuna otoliidi mikrokeemia andmed on harva normaaljaotusega ning võrdse gruppidevahelise hajuvusega, logaritmiti vajadusel sõltumatute muutujate väärtusi. Seejärel viidi läbi mitte-lineaarne diskriminant analüüs (inglk.: *quadratic discriminant function analysis*; QDFA), kuna gruppidevahelise hajuvuse võrdsuse eeldus lineaarse diskriminant analüüsi (LDFA) läbiviimiseks oli rikutud, mida näitas Box M-test. Diskriminant analüüsi üheks eesmärgiks on teadaolevate rühmade (nt uurimisalade) vaheliste erinevuste väljaselgitamine ja kirjeldamine läbi diskriminant funktsioonide. Loodud diskriminant funktsioone kasutatakse hiljem teadmata rühmalise päritoluga üksikvaatluste (nt merest püütud täiskasvanud haugide) päritolu määramiseks. QDFA läbiviimiseks kasutati R-i paketti MASS ning sealt funktsiooni „qda“ koos suurima tõepära meetodiga („mle“) mediaanide ja hajuvuse hindamiseks.

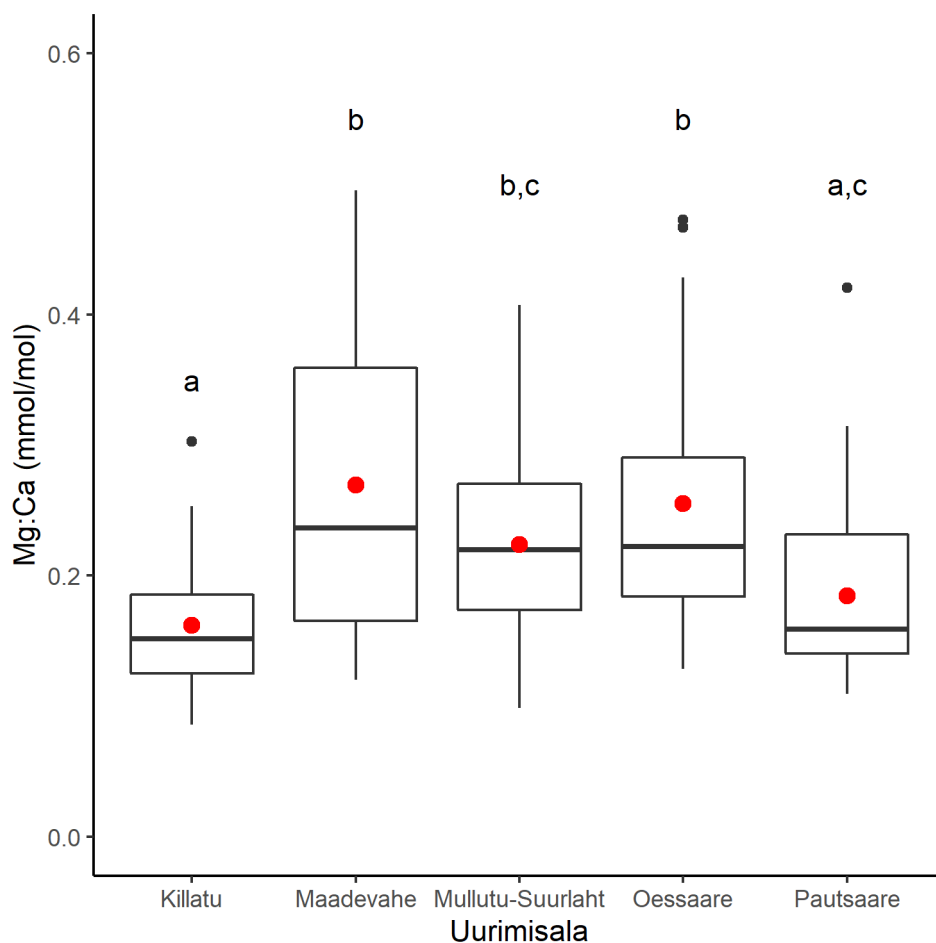
Eeltõenäosus (inglk.: *prior*) üksikvaatluse teadaolevatesse gruppidesse klassifitseerimiseks määrati gruppide vahel võrdseks olevaks (antud juhul 1/5 ehk 0.2; s.o. inglk.: *equal priors*). Klassifitseerimisedukus ja veamäär leiti kasutades „taskunoa“ (inglk.: *jackknife, leave-one-out*) meetodit. Keemiliste markerite osatähtsuste (laadungite) määramiseks klassifitseerimisel kasutati kanoonilise diskriminant analüüsi tulemusel saadud täielikke kanoonilise stukturuuri koefitsiente. Täiskasvanud kalade päritoluks valiti kõige tõenäosem tagasimäärang. Täiskasvanud kalade kriitiliseks klassifitseerimisedukuseks määrati 80% - st alla selle loeti konkreetse kala tagasimäärang ebaõnnestunuks ja sellele anti hinnang „teadmata päritoluga kala“. Kuna käesolevasse töösse ei kaasatud kõiki potentsiaalseid taastootmisalasid Lõuna- ja Lääne-Saaremaal, siis kontrolliti mudeli määrangud hiljem ka eksperhinnangu tasemel üle. Kõik statistilised analüüsid viidi läbi vabavaralises statistikatarkvaras R 4.0.3 (R Core Team 2020).

Kuna otoliitide keemilised analüüsid LA-ICPMS ja MC-LA-ICPMS meetoditega on suhteliselt kallid, siis viidi kõige optimaalsema analüüsi meetodi välja selgitamiseks statistilised analüüsid läbi kasutades ainult jälgelemente ning seejärel jälgelemente ja  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  koos. Juhul kui selguks, et erinevate jälgelementide kasutamine on rahuldavate tulemuste saamiseks piisav, siis tähendaks see olulist ajalist ja rahalist säästu.

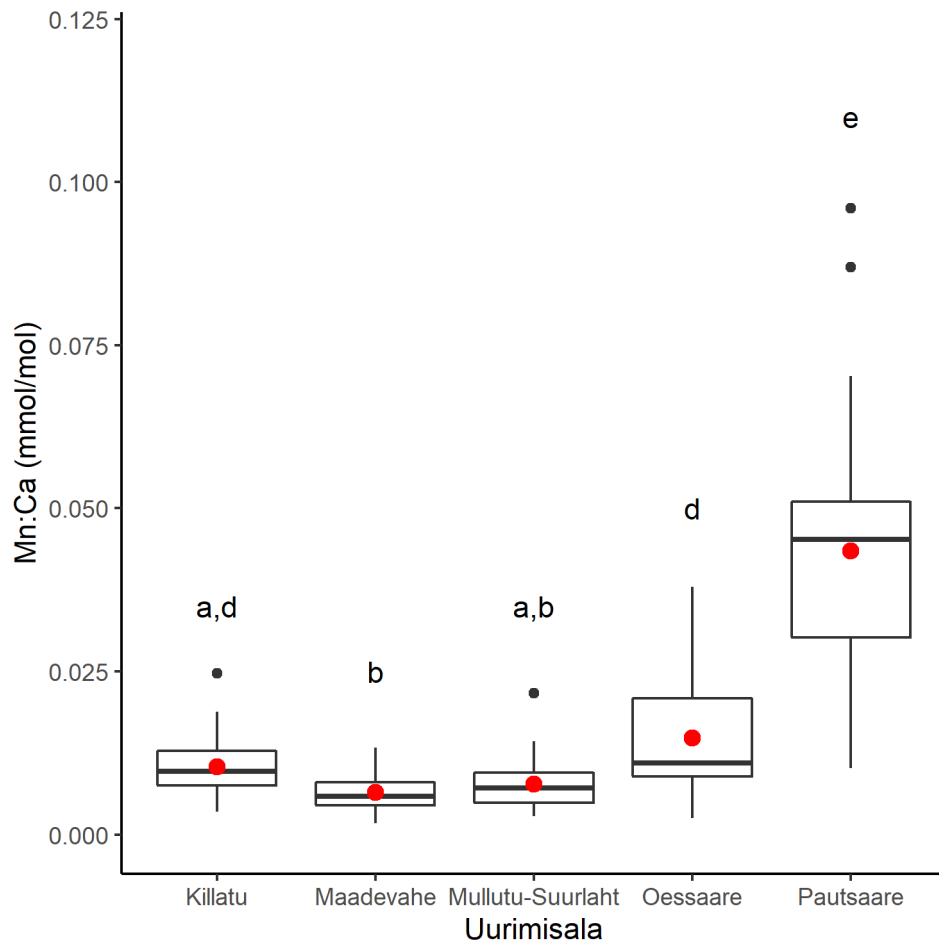
## 3 Tulemused

### 3.1 Otoliiidi mikrokeemia sõrmejälgede baasväärtused pilootaladel

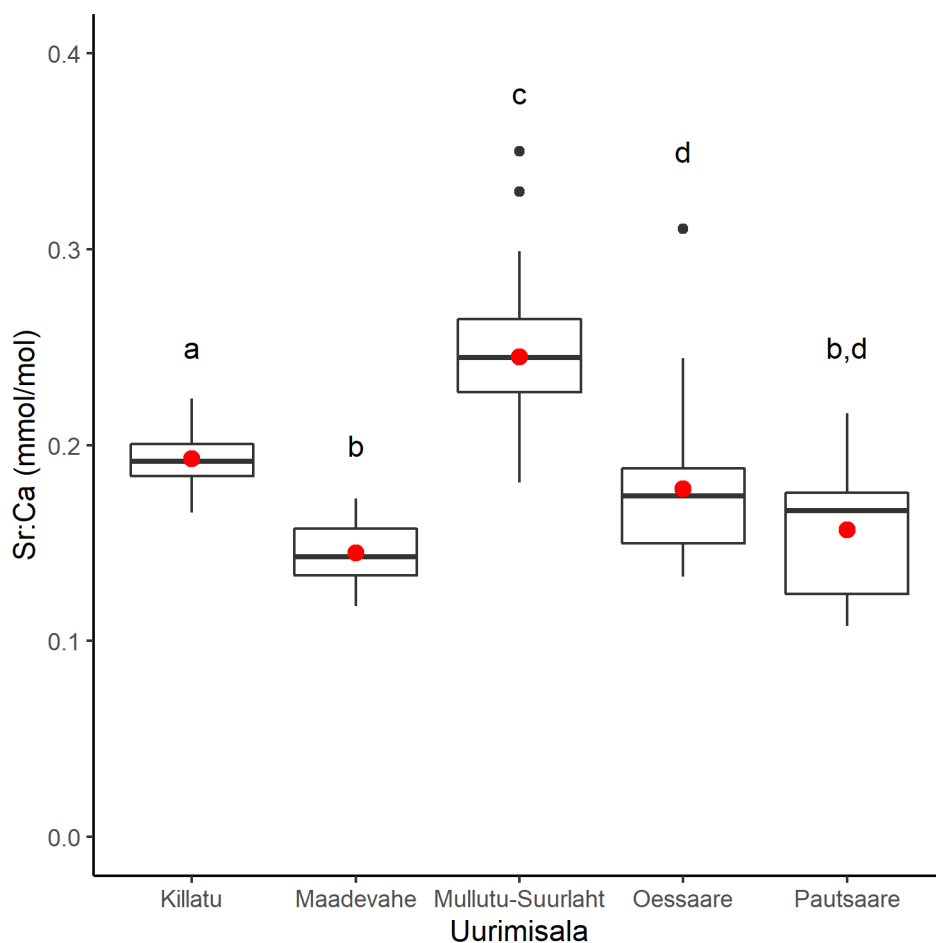
Erinevatelt uurimisaladelt pärit samasuviste haugide otoliitide keemilised sõrmejäljed erinesid üksteist statistiliselt oluliselt kasutades ainult jälgelemente (Pilai trace=1.4;  $F_{16,628}=21.8$ ;  $p<0.0001$ ) ning kasutades jälgelemente ja  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  koos (Pilai trace=1.8;  $F_{20,612}=25.9$ ;  $p<0.0001$ ). Eraldi võetuna tuvastati statistiliselt olulised erinevused uurimisalade vahel otoliidi Mg:Ca ( $F_{4,157}=9.2$ ;  $p<0.0001$ ), Mn:Ca ( $F_{4,157}=61.2$ ;  $p<0.0001$ ), Sr:Ca ( $\chi^2=96$ ;  $p<0.0001$ ), Ba:Ca ( $\chi^2=64.7$ ;  $p<0.0001$ ) ja  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  puhul ( $\chi^2=131.6$ ;  $p<0.0001$ ) (**Joonised 2-6**).



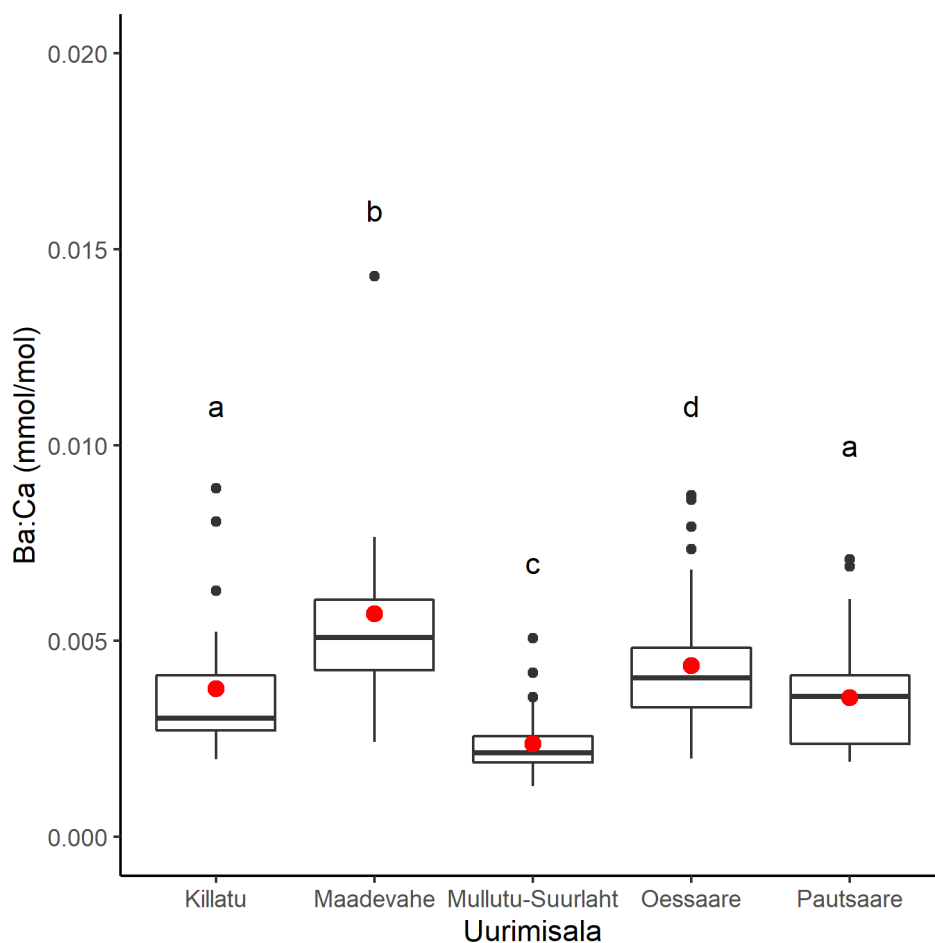
**Joonis 2.** Samasuviste haugide otoliidi Mg:Ca kontsentratsiooni varieeruvus erinevatel uurimisaladel. Kastide tumemust vertikaaljoon tähistab mediaanväärtust ja punane ring keskmist väärtust. Kastide ülemine ja alumine äär tähistavad vastavalt ülemist ja alumist kvartiili. Vurrud tähistavad miinimum ja maksimum väärtust ning mustad punktid tähistavad erindeid. Erinevad tähed tähistavad uurimisalade vahelisi erinevusi (Tukey test).



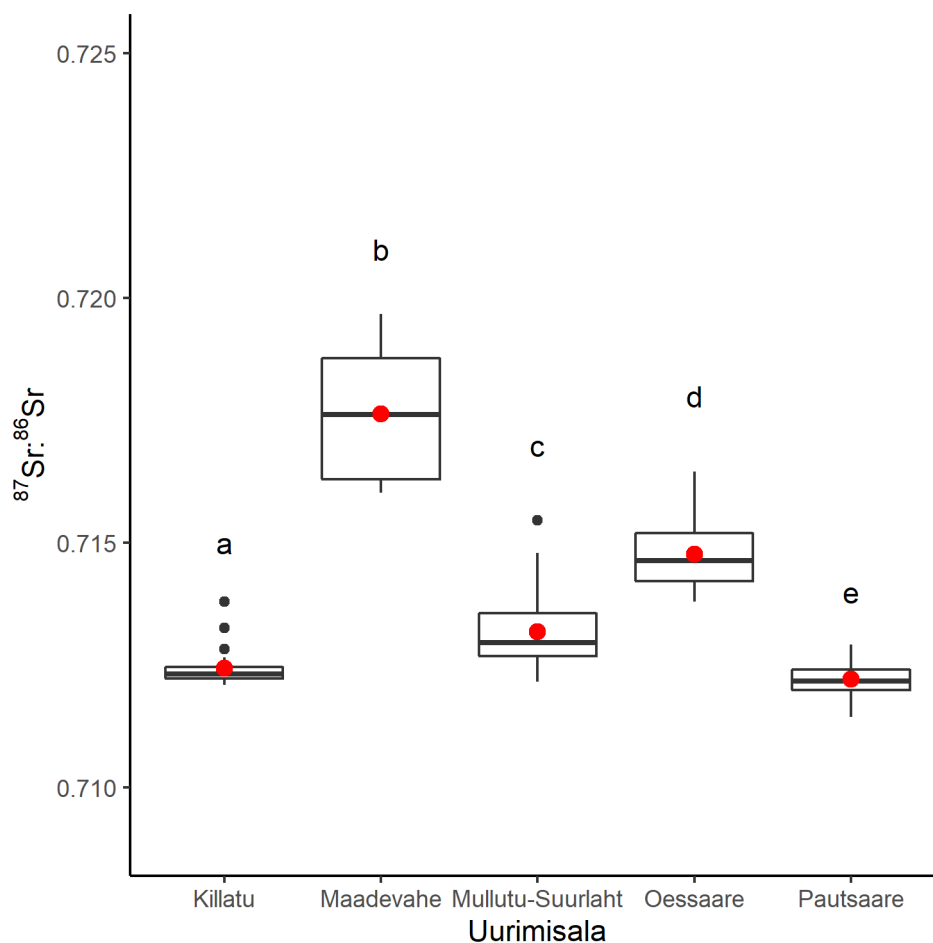
**Joonis 3.** Samasuviste haugide otoliidi Mn:Ca kontsentratsiooni varieeruvus erinevatel uurimisaladel. Kastide tumemust vertikaaljoon tähistab mediaanväärtust ja punane ring keskmist väärtust. Kastide ülemine ja alumine äär tähistavad vastavalt ülemist ja alumist kvartiili. Vurrud tähistavad miinimum ja maksimum väärtust ning mustad punktid tähistavad erindeid. Erinevad tähed tähistavad uurimisalade vahelisi erinevusi (Tukey test).



**Joonis 4.** Samasuviste haugide otoliidi Sr:Ca kontsentratsiooni varieeruvus erinevatel uurimisaladel. Kastide tumemust vertikaaljoon tähistab mediaanväärtust ja punane ring keskmist väärtust. Kastide ülemine ja alumine äär tähistavad vastavalt ülemist ja alumist kvartiili. Vurrud tähistavad miinimum ja maksimum väärtust ning mustad punktid tähistavad erindeid. Erinevad tähed tähistavad uurimisalade vahelisi erinevusi (Wilcoxon'i test).



**Joonis 5.** Samasuviste haugide otoliidi Ba:Ca kontsentratsiooni varieeruvus erinevatel uurimisaladel. Kastide tumemust vertikaaljoon tähistab mediaanväärtust ja punane ring keskmist väärtust. Kastide ülemine ja alumine äär tähistavad vastavalt ülemist ja alumist kvartiili. Vurrud tähistavad miinimum ja maksimum väärtust ning mustad punktid tähistavad erindeid. Erinevad tähed tähistavad uurimisalade vahelisi erinevusi (Wilcoxon'i test).



**Joonis 6.** Samasuviste haugide otoliidi  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  suhte varieeruvus erinevatel uurimisaladel. Kastide tumemust vertikaaljoon tähistab mediaanväärtust ja punane ring keskmist väärtust. Kastide ülemine ja alumine äär tähistavad vastavalt ülemist ja alumist kvartiili. Vurrud tähistavad miinimum ja maksimum väärtust ning mustad punktid tähistavad erindeid. Erinevad tähed tähistavad uurimisalade vahelisi erinevusi (Wilcoxon test).

### 3.2 Päritolu määramine (klassifitseerimine)

QDFA abil leitud samasuviste haugide klassifitseerimisedukus kasutades ainult jälgelemente oli 69% ja veamäär vastavalt 31% (**Tabel 4**). Pilootalade eristamisel oli suurima kaaluga Sr:Ca ja Mn:Ca esimeses kanoonilises tunnuses (CV1) ja Ba:Ca ja Mn:Ca teises kanoonilises tunnuses (CV2) (**Tabel 5**). Kuna nii QDFA kui ka LDFA andsid sarnase tagasimääramise edukuse (69 vs 72%), siis kasutati tulemuste visualiseerimiseks LDFA-st saadud väljundit (**Joonis 6**).

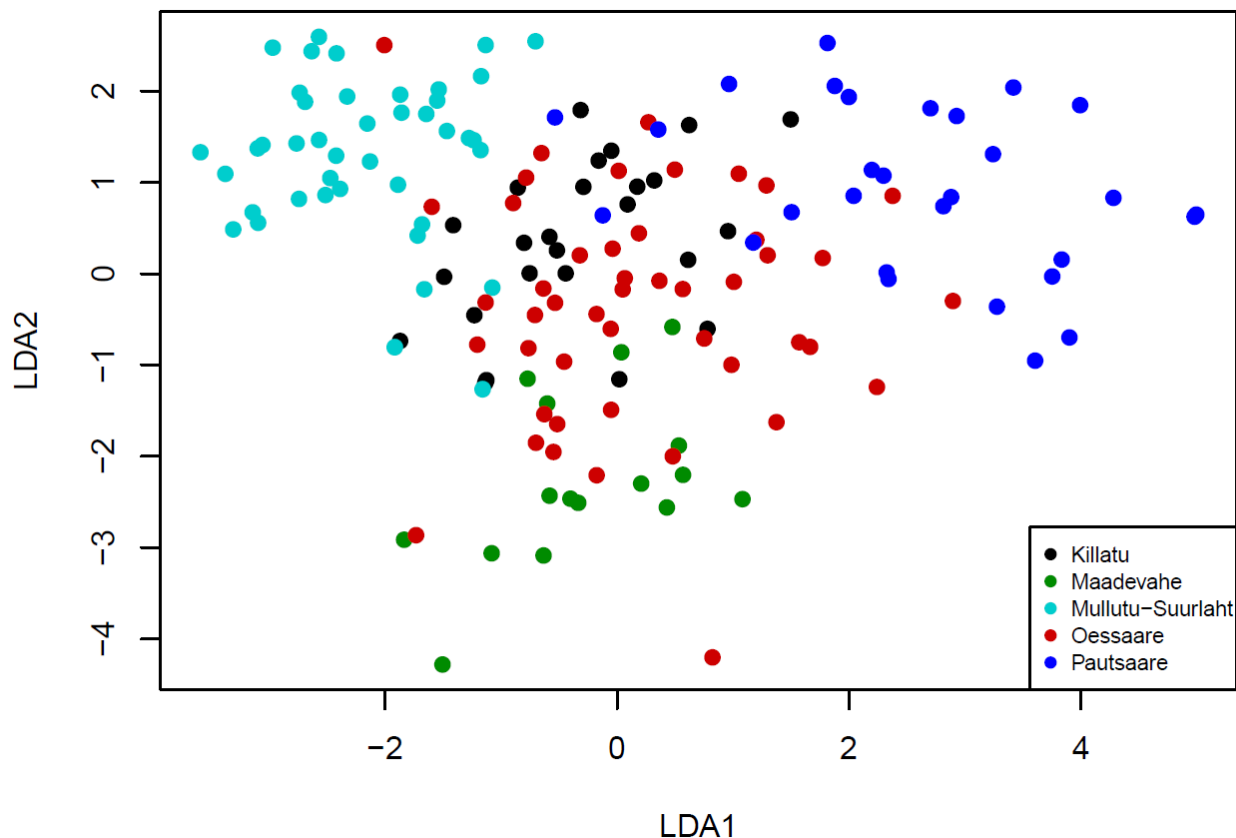


**Tabel 4.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud mitte-lineaarse diskriminant analüüsi (QDFA) klassifitseerimise tulemus samade kalade põhjal. Antud analüüsis kasutati ainult jälgelemente.

Tõeline grupp	Klassifitseering ehk tagasimääratud grupp					
	Killatu järv	Maadevahe jõgi	Mullutu-Suurlaht	Oessaare laht	Pautsaare laht	Kokku
Killatu järv	18	0	2	3	2	25
Maadevahe jõgi	0	11	0	5	0	16
Mullutu-Suurlaht	3	0	37	2	0	42
Oessaare laht	10	10	2	20	5	47
Pautsaare laht	3	0	0	3	23	29
<i>Kokku</i>	34	21	41	33	30	159

**Tabel 5.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud kanoonilise diskriminant analüüsi täielikud kanoonilise struktuuri koefitsiendid. Antud analüüsis kasutati ainult jälgelemente.

Keemine marker	CV1	CV2
Mg:Ca	0.13	0.35
Mn:Ca	-0.76	-0.54
Sr:Ca	0.80	-0.44
Ba:Ca	-0.42	0.64



**Joonis 7.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud lineaarse diskriminant analüüsi (LDFA) visuaalne väljund uurimisalade vaheliste erinevuste kohta. Antud analüüsis kasutati ainult jälgelemente.

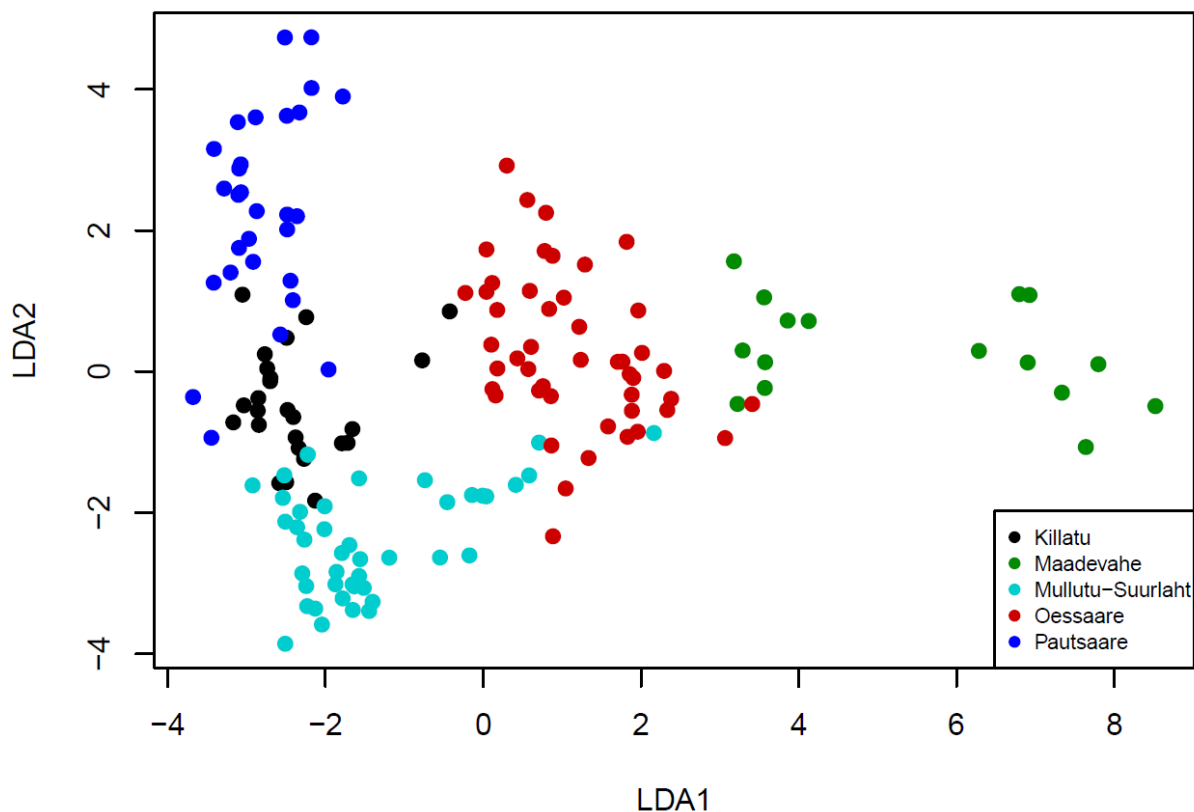
QDFA abil leitud samasuviste haugide klassifitseerimisedukus kasutades jälgelemente ja  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  koos oli 92% ja veamäär vastavalt 8% (**Tabel 6**). Pilootalade eristamisel oli suurima kaaluga  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  ja Ba:Ca esimeses kanoonilises tunnuses (CV1) ja Sr:Ca ja Mn:Ca teises kanoonilises tunnuses (CV2) (**Tabel 7**). Kuna nii QDFA kui ka LDFA andsid sarnase tagasimääramise edukuse (92 vs 90%), siis kasutati tulemuste visualiseerimiseks LDFA-st saadud väljundit (**Joonis 7**).

**Tabel 6.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud mitte-lineaarse diskriminant analüüsi (QDFA) klassifitseerimise tulemused samade kalade põhjal. Antud analüüsis kasutati kõiki töösse kaasatud markereid.

Tõeline grupp	Klassifitseering ehk tagasimääratud grupp					
	Killatu järv	Maadevahe jõgi	Mullutu-Suurlaht	Oessaare laht	Pautsaare laht	Kokku
Killatu järv	22	0	0	1	2	25
Maadevahe jõgi	0	15	0	1	0	16
Mullutu-Suurlaht	1	0	38	3	0	42
Oessaare laht	0	1	0	46	0	47
Pautsaare laht	4	0	0	0	25	29
<i>Kokku</i>	27	16	38	51	27	159

**Tabel 7.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud kanoonilise diskriminant analüüsi täielikud kanoonilise struktuuri koefitsiendid. Antud analüüsis kasutati kõiki töösse kaasatud markereid.

Keemine marker	CV1	CV2
Mg:Ca	-0.37	0.13
Mn:Ca	0.37	-0.77
Sr:Ca	0.33	0.80
Ba:Ca	-0.45	-0.42
<sup>87</sup> Sr: <sup>86</sup> Sr	-0.99	0.04



**Joonis 8.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud lineaarse diskriminant analüüsi (LDFA) visuaalne väljund uurimisalade vaheliste erinevuste kohta. Antud analüüsis kasutati kõiki töösse kaasatud markereid.

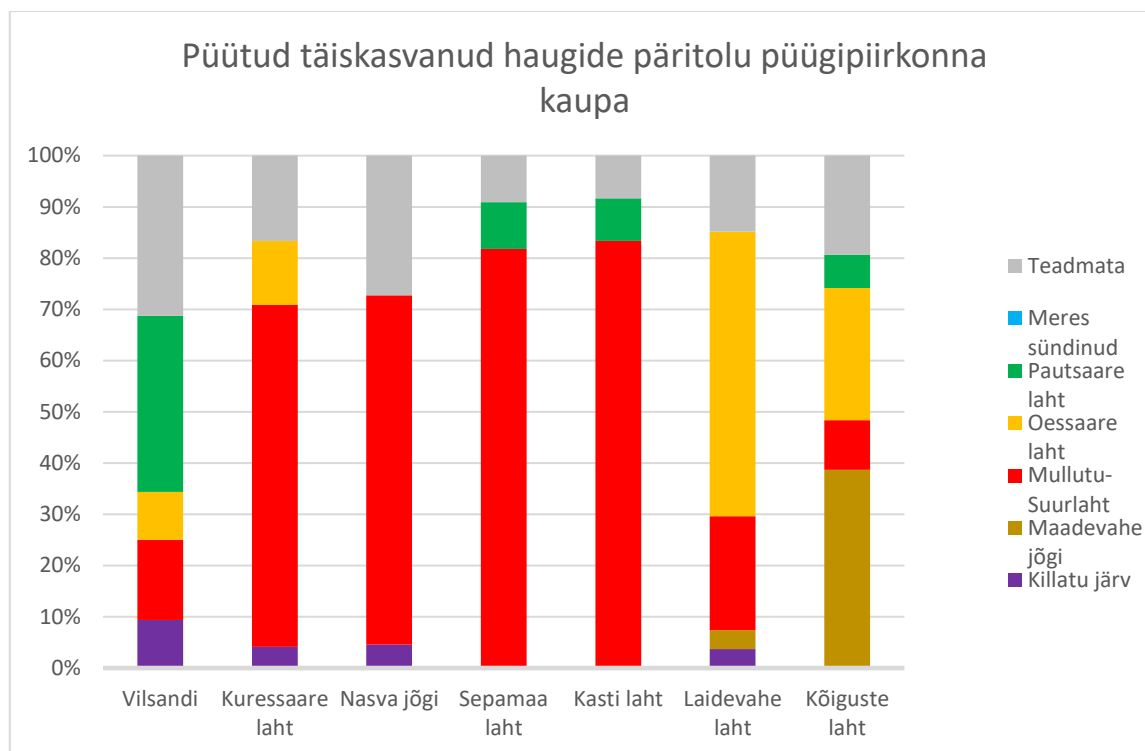
Merest püütud täiskasvanud kalad määrati eelpool tuletatud klassifitseerimisfunktsioonide abil nõ tagasi (või klassifitseeriti) kõige tõenäolisemasse referentsgruppi ehk töösse kaasatud taastootmisalale (**Tabel 8, Joonis 8**). Kuna QDFA mudel on suhteliselt robustne ja määrab iga täiskasvanud kala igal juhul referentsgruppidesse ära (isegi siis, kui tegelikult on tegemist teadmata päritoluga kalaga), siis oli vajalik mudeli hinnangud eksperthinnangu tasemel üle kontrollida ja vajadusel korrigeerida (**Tabel 9, Joonis 9**). Ka meres sündinud kalad määrab mudel teadaolevatesse referentsgruppidesse, kuna meres sündinud samasuviste haugide otoliidi keemilist sõrmejälge polnud mudeli parametrizeerimisse võimalik nende puudumise tõttu kaasata. Eksperthinnangu käigus ilmnas, et mitmed isendid olid selgelt valesti klassifitseeritud Mg:Ca ja Mn:Ca segava mõju tõttu (st nende variatsioon otoliidis ja kohtade vahel ning sees on sageli väga suur). Seetõttu eemaldati need markerid lõplikust QDFA mudelist.

Lõplikud juveniilsete kalade klassifitseerimise tulemused on toodud **Tabel 10-s** ja **11-s** ning lõplikud täiskasvanud kalade klassifitseerimise tulemused on toodud **Tabel 9-s** ja **Joonis 9-s**. QDFA abil leitud samasuviste haugide klassifitseerimised edukas kasutades Sr:Ca, Ba:Ca ja  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  oli 87% ja veamäär vastavalt 13% (**Tabel 10**). Pilootalade eristamisel oli suurima

kaaluga  $^{87}\text{Sr}$ : $^{86}\text{Sr}$  ja Ba:Ca esimeses kanoonilises tunnuses (CV1) ja Sr:Ca ja Ba:Ca teises kanoonilises tunnuses (CV2) (**Tabel 11**). Kuna nii QDFA kui ka LDFA andsid sarnase tagasimääramise edukuse (87% vs 85%), siis kasutati tulemuste visualiseerimiseks LDFA-st saadud väljundit (**Joonis 10**).

**Tabel 8.** Merest püütud täiskasvanud haugide päritolu püügi-alade kaupa. Tulemused põhinevad ainult QDFA mudeli määrangutel.

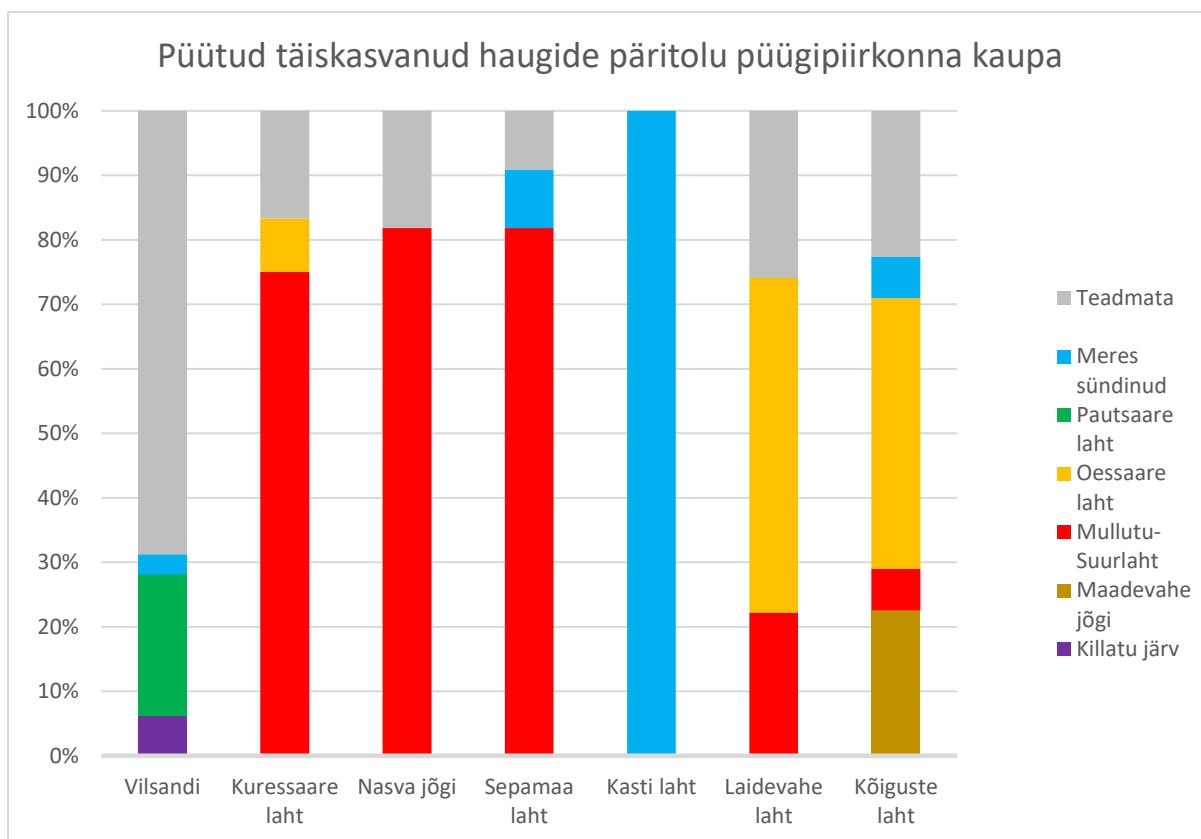
Püügikoht	Päritolu							Kokku
	Killatu järv	Maadevahe jõgi	Mullutu-Suurlaht	Oessaare laht	Pautsaare laht	Meres sündinud	Teadmata	
Vilsandi	3	0	5	3	11	0	10	<b>32</b>
Kuressaare laht	1	0	16	3	0	0	4	<b>24</b>
Nasva jõgi	1	0	15	0	0	0	6	<b>22</b>
Sepamaa laht	0	0	9	0	1	0	1	<b>11</b>
Kasti laht	0	0	10	0	1	0	1	<b>12</b>
Laidevahe laht	1	1	6	15	0	0	4	<b>27</b>
Kõiguste laht	0	12	3	8	2	0	6	<b>31</b>
<b>Kokku</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>64</b>	<b>29</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>159</b>



**Joonis 9.** Merest püütud täiskasvanud haugide päritolu püügialade kaupa. Tulemused põhinevad QDFA mudeli määrangutel (Sr:Ca, Ba:Ca, <sup>87</sup>Sr:<sup>86</sup>Sr).

**Tabel 9.** Merest püütud täiskasvanud haugide päritolu püügialade kaupa. Tulemused põhinevad QDFA mudeli määrangutel (Sr:Ca, Ba:Ca, <sup>87</sup>Sr:<sup>86</sup>Sr), mida on eksperthinnangu käigus vajadusel korrigeeritud.

Püügikoht	Päritolu							Kokku
	Killatu järv	Maadevahe jõgi	Mullutu-Suurlaht	Oessaare laht	Pautsaare laht	Meres sündinud	Teadmata	
Vilsandi	2	0	0	0	7	1	22	<b>32</b>
Kuressaare laht	0	0	18	2	0	0	4	<b>24</b>
Nasva jõgi	0	0	18	0	0	0	4	<b>22</b>
Sepamaa laht	0	0	9	0	0	1	1	<b>11</b>
Kastilaht	0	0	0	0	0	12	0	<b>12</b>
Laidevahe laht	0	0	6	14	0	0	7	<b>27</b>
Kõiguste laht	0	7	2	13	0	2	7	<b>31</b>
<b>Kokku</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>53</b>	<b>29</b>	<b>7</b>	<b>16</b>	<b>45</b>	<b>159</b>



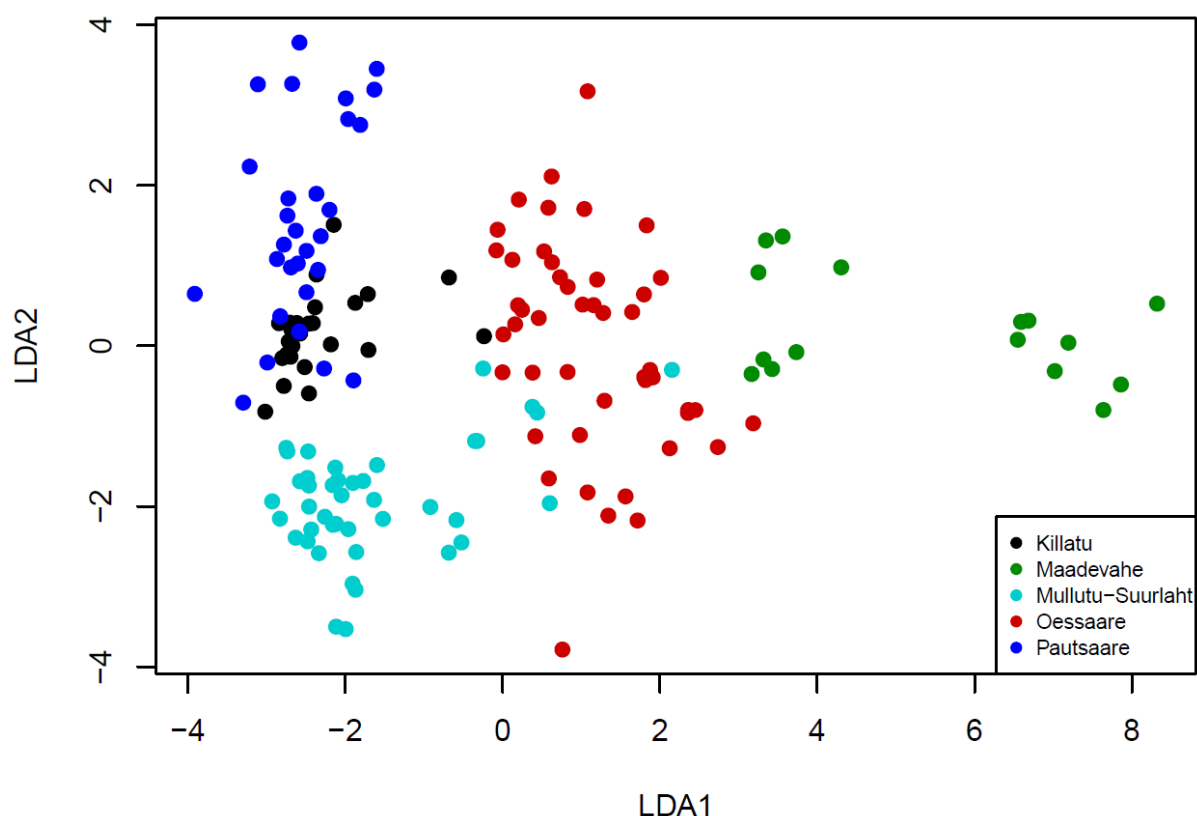
**Joonis 10.** Merest püütud täiskasvanud haugide päritolu püügialade kaupa. Tulemused põhinevad QDFA mudeli määrangutel (Sr:Ca, Ba:Ca, <sup>87</sup>Sr:<sup>86</sup>Sr), mida on eksperthinnangu käigus vajadusel korrigeeritud.

**Tabel 10.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud mitte-lineaarse diskriminant analüüsi (QDFA) klassifitseerimise tulemus samade kalade põhjal. Antud analüüsis kasutati ainult Sr:Ca, Ba:Ca ja <sup>87</sup>Sr:<sup>86</sup>Sr. Õigesti klassifitseeritud haugide osakaal oli 87%. Valesti klassifitseeritud haugide osakaal koguvalemis oli 13% (näiteks klassifitseeriti valesti 8 Pautsaarest püütud juveniilset haugi).

Tõeline grupp	Klassifitseering ehk tagasimääratud grupp					Kokku
	Killatu järv	Maadevahe jõgi	Mullutu-Suurlaht	Oessaare laht	Pautsaare laht	
Killatu järv	21	0	0	1	3	25
Maadevahe jõgi	0	15	0	1	0	16
Mullutu-Suurlaht	0	0	36	5	1	42
Oessaare laht	0	1	0	46	0	47
Pautsaare laht	8	0	0	0	21	29
<i>Kokku</i>	29	16	36	53	25	159

**Tabel 11.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud kanoonilise diskriminant analüüsi täielikud kanoonilise stukturuuri koefitsiendid. Antud analüüsis kasutati ainult Sr:Ca, Ba:Ca,  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ . Kaks esimest kanoonilist tunnust kirjeldasid ära 99.1% variatsioonist.

Keemine marker	CV1	CV2
Sr:Ca	-0.37	0.87
Ba:Ca	0.48	-0.48
$^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$	0.99	0.11



**Joonis 11.** Uurimisaladelt kogutud juveniilsete haugide otoliidi mikrokeemia põhjal läbiviidud lineaarse diskriminant analüüsi (LDFA) visuaalne väljund uurimisalade vaheliste erinevuste kohta. Antud analüüsis kasutati ainult Sr:Ca, Ba:Ca,  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ .



### 3.3 Maternaalse elukäigu määramine

Maternaalse elukäigu määramisel kasutati elementide analüüsil saadud otoliidi tuuma Sr:Ca väärtusi (möödetuna mmol/mol) ja Sr isotoopide analüüsil saadud kõikide Sr isotoopide summaarseid väärtusi tuumas (möödetuna pingena massispektromeetri Faraday silindrites). Maternaalne elukäik määrati ainult uuringualadelt kogutud samasuvistel haugidel. Konkreetne haug määrati paikse mageveehaugi järglaseks sellisel juhul, kui tuuma Sr:Ca väärtus jäi alla 0,35 mmol/mol ja summaarne Sr alla 2,5 voldi. Siirdehaugi järglaseks loeti kala, kui Sr:Ca oli üle 0,8 mmol/mol ja summaarne Sr üle 4 voldi. Vahepealsete väärtustega kalad klassifitseeriti kui semi-residentide järglased. Vahepealsete näitude põhjuseks võib välja pakkuda kaks hüpoteesi/selgitust. Esimene selgitus vahepealsetele näitudele oleks, et emakala liikus kudema kusagilt merest madalama soolsusega alalt (nt jõgede suudmealadelt, ajutise merevee mõjuga mageveekogust või muudest estuaari tüüpi elupaikadest). Teine selgitus oleks see, et maternaalne vanem on oma elukäigult siirdehaug, kuid liikus koelmule varakult (näiteks juba sügisel) ning selle tõttu sattus vitellogeneesi käigus rebusse ka mageveele iseloomulikke elementide kontsentratsioone, mille tulemusena on järglaste otoliidi tuumades vahepealsed n.ö. lahjendatud merenäidud. Antud juhul ei välista üks selgitus teist ja kehtida võivad, kuid ei pruugi, mõlemad. Paiksete ja semi-residentide ning semi-residentide ja siirdehaugide Sr:Ca väärtuste vahed ei ole selgepiirilised, tõenäoliselt on paiksete haugide järglasteks määratud kalade hulgas semi-residente ja vastupidi ning sama kehtib ka semi-residentide ja siirdehaugide järglaste puhul. Määrangutes arvestati ka analüüsi transektide tegelikku paigutust ehk kui laseri kraater oli kulgenud tuuma kõrvalt või servast, siis see võeti tuuma väärtuste analüüsil arvesse. Reeglina oli vähemalt üks (kas siis elementide või isotoopide) laseri transektidest kulgenud üle tuuma.

Maternaalsete elukäikude osakaalud erinesid uuringualade lõikes märkimisväärselt. Näiteks Killatu järves määrati kõik analüüsitud kalad, kas paiksete või „semi-residentide“ järglasteks, kuid Maadevahe jões (koos suudme-eelse lahe osaga) olid kõik eranditult siirdehaugide järglased. Maternaalsete päritolude jagunemine uuringualade sees ja vahel on välja toodud **Tabel 12-s**.

**Tabel 12.** Emapoolse päritolu jagunemine uuringualade sees ja vahel. Sulgudes on antud elukäigu suhteline esinemine konkreetses veekogus.

Uuringuala	Magevee haugide järglaste arv	Semi-residentide järglaste arv	Siirdehaugide järglaste arv
Killatu	19 (76 %)	6 (24%)	0 (0 %)
Pautsaare	10 (33 %)	2 (7 %)	18 (60 %)
Mullutu-Suurlaht <sup>1</sup>	0 (0 %)	30 (71 %)	12 (29%)
Oessaare	20 (43 %)	7 (14 %)	20 (43 %)
Maadevahe (Kõiguste) <sup>2</sup>	0 (0 %)	0 (0 %)	21 (100 %)
Kokku	49 (30 %)	45 (27 %)	71 (43 %)

<sup>1</sup> Tõenäoliselt on paljude Mullutu-Suurlahe semi-residentide järglaste puhul tegemist kohalike magevee haugide järglastega.

<sup>2</sup> Viis kala pärinevad Kõiguste lahest vahetult Maadevahe jõe suudme eest.

## 4 Metodoloogilised soovitused

### 4.1 Proovide kogumine

Käesoleva töö ja eriti tegevuse 2.7.1 kulg sõltus suurel määral samasuviste haugide kogumise edukusest pilootaladel. Kui käesoleva töö (2.5.1) jaoks saadi enamikelt aladelt esinduslik valim kahe aasta peale kokku, siis tegevuse 2.7.1 jaoks kahjuks piisavalt hauged ei tabatud. Enamik pilootaladid olid pehme mudase põhjaga ja taimestikurikkad, mis kohati raskendas olulisel määral püüki. Pilootalade suuruse tõttu ei olnud piiratud ajalise ressursi tõttu võimalik mitmete uuringualade (nt Mullutu-Suurlaht, Pilguse laht) tervet territooriumi püügipunktidega katta. Kõik see mõjutas ka valimite suurust. Lisaks puudus eelteadmine haugi arvukuse kohta valitud pilootaladel. Kuna mitmed pilootalad (nt Arju laht, Pilguse laht) olid ka riimveelised ning on teada, et riimvees kudeva haugi arvukus näiteks Väinameres enam nii kõrge ei ole kui 50 aastat tagasi (Rohtla 2015), siis tõenäoliselt vähendas see haugide tabamise tõenäosust veelgi. Käesoleva töö tulemused kinnitasidki, et Saaremaa lõuna- ja läänerrannikul on meres kudeva haugi osakaal ligikaudu sama, mis Väinameres (s.o. ca 10%).

Käesolevas töös kasutati haugide tabamiseks maimunoota ja kalade teaduspüügiks mõeldud elektripüügiaparaati. Maimunoodaga saab püüda nii mage- kui riimvees, kuid selle kasutamine on raskendatud või võimatu tiheda taimestikuga ning pehme põhjasubstraadiga aladel. Elektriagregaadiga saab püüda ainult magevees, kuid taimestikurikkastel ja sügavatel aladel on sellegi meetodi kasutamine tugevasti limiteeritud. Vastkoorunud kalade tabamiseks tiheda taimestikuga aladel sobiks ka nn valge plaadi meetod (Lappalainen jt. 2008), kuid käesolevas töös ei olnud selle meetodi kasutamine otstarbekas, sest välitööde eesmärgiks oli tabada pisut vanemaid samasuviseid kalu, kelle otoliitide keemiline koostis peegeldab konkreetsele pilootalade iseloomulikkude keemilist „sõrmejälge“ paremini ning ühtlasi on

suuremaid otoliite kergem analüüsida. Üheks võimaluseks on kasutada ka valguspüüniseid (Pierce jt. 2006), mida pole Eestis veel kalaproovide kogumiseks kasutatud. Taimestikurikastel aladel on tõenäoliselt aga parimaks lahenduseks väikeste veealuste detonatsioonide kasutamine ujupõiega kalade kogumiseks (Snickars jt. 2007). Seda meetodit kasutatakse Rootsisis laialdaselt erinevates elupaikades (Sandström jt. 2014; Eklöf jt. 2020), kuid meie teada pole Eestis keegi sellist meetodit varem kasutanud. Tulevikus peaks kindlasti selle meetodi kasutatavust Eesti oludes katsetama.

## 4.2 Mikrokeemilised analüüsid

Võimaluse korral kasutada lisaks jälgelementidele (Sr:Ca, Ba:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca) ka  $^{87}\text{Sr}$ : $^{86}\text{Sr}$ , sest klassifitseerimise edukus paranes 69 protsendilt 90 protsendini kasutades kõiki markereid koos. Osade, eelkõige suuremate, pilootalade puhul oli näha, et elemendilised sõrmejäljed varieerusid suhteliselt suures ulatuses. Seetõttu oleks tulevikus sarnaste tööde juures oluline, et samasuviste valimi suurus oleks piisavalt suur tagamaks kogu (või vähemalt suurema osa) võimaliku varieeruvuse kaasamise sõrmejälje analüüsi. Ühtlasi tuleks suuremad veekogud jagada omakorda osadeks ning kui tuvastatakse nende osade vahel süstemaatiline erinevus, siis tuleks need sõrmejälje analüüsi kaasata eraldi (ala)rühmadena.

Tõenäoliselt mudel ja ka eksperthinnang ülehindas täiskasvanud kalade sünniveekokku tagasimääranguid. See tähendab, et lisaks valitud uuringualadele võib läheduses leiduda veel teisigi sarnase elemendilise koostisega haugile sobilikke magedaid veekogusid. Seda kinnitab kaudseltselt ka suuremate veekogude nt Oessaare ja Mullutu-Suurlahe samasuviste haugide sõrmejälgede märkimisväärne varieerumine ühe ala piires. Näiteks on võimalik, et osad Oessaarde tagasimääratud kalad ei pärinegi Oessaarest vaid kusagilt keemilise koostise poolest lähedasest veekogust. Antud pilootuuringusse kaasatud veekogude ja valimite juures tuleb selliste valemäärangute võimalust võtta kui paratamatust. Kõige otsesem viis valemäärangute vähendamiseks oleks analüüsi kaasata võimalikult palju potentsiaalsete kudealade mikrokeemilisi sõrmejälgi, mis aga omakorda suurendaks märgatavalt välitööde ja analüüside mahte. Alati jääb ka võimalus, et kaks veekogu on omavahel vee keemia poolest eristamatud ning sellisel juhul ei aita ka kaasatavate referentsgruppide arvu ning valimite suurendamine.

Maternaalse elukäigu määramise juures on väga oluline transektide positsioneerimine üle otoliidi tuuma ala või võimalikult tuuma lähedale. Minimaliseerida tuleks nii inimlikest (nt tuuma asukoha ebatäpne positsioneerimine) kui ka tehnilistest (nt laseri nihkumine eelnevalt märgitud transektist) faktoritest tulenevate võimalike vigade esinemise tõenäosust. Katseliselt oleks vaja kindlaks teha semi-residentide/varajaste tõusjate väärtuste tekke põhjus. Seoses sellega tuleks uurida, kui kaua peab siirdehaug viibima magevees, et tema järglastel ei oleks kõrgenenud Sr tase otoliidi tuumas enam analüüsil tuvastatav.

### 4.3 Statistilised analüüsid

Mitmemõõtmelist statistilist analüüsi kasutatakse tihti ökoloogias ja kitsamalt kalade otoliitide mikrokeemia andmete analüüsil (McGarigal jt. 2000; White & Ruttenberg 2007). Kõige kasutatavam meetod on lineaarne diskriminantanalüüs (LDFA), mille abil on otoliidi mikrokeemia uuringutes võimalik tundmatu päritoluga isendite (nt merest püütud täiskasvanute) klassifitseerimine varem määratletud referentsgruppidesse (nt kudejõgedesse), mille keemilised baasväärtused juveniilsete kalade näol on teada (Rooker jt. 2003; Bourret jt. 2014; Mikheev jt. 2021). Mõnevõrra vähem on kasutatud mitte-lineaarset diskriminantanalüüsi (*quadratic discriminant analysis*, QDFA) (nt Walther & Thorrold 2008; Martin jt. 2013a; Rohtla jt. 2017), mis ei eelda dispersioonide homogeensust gruppide vahel ja lubab mõningast hälvimist normaaljaotusest. Üksikutel juhtudel on kasutatud ka keerukamaid masinõppe meetodeid nagu juhumsad (RF; Mercier jt. 2011; Loewen jt. 2015; Jones jt. 2017) ja neuraalvõrgustikud (ANN; Mercier jt. 2011; Jones jt. 2017). Katsetatud on ka erinevate Bayesi statistika meetoditega (White jt. 2008; Munch & Clarke 2008; Pflugeisen & Calder 2012; Neubauer jt. 2013). Nii masinõppe kui Bayesi meetodid laiemat kasutust otoliidi mikrokeemia uuringutes siiski veel leidnud pole.

Käesolevas töös kasutati samasuviste kalade klassifitseerimisedukuse ja veamäära hinnangute saamiseks samu kalu, mida kasutati ka mudeli parametrizeerimiseks. Tuleb aga meeles pidada, et sellised mudeli headuse hinnangud, mis põhinevad esialgsete andmete abil tuletatud klassifitseerimisfunktsioonidel, on enamasti ülemäära kõrged (McGarigal jt. 2000). Õigema klassifitseerimisedukuse ja veamäära hinnangu saab siis, kui klassifitseerimisfunktsioone testitakse täiesti uute andmete peal. Kui aga saada olevad valimid on väga suured, siis on alternatiivina võimalik algandmestik jagada (juhuslikkuse alusel) pooleks – ühe poolega tuletatakse klassifitseerimisfunktsioonid ja teisega testitakse nende toimimist. Käesolevas töös seda teha ei olnud võimalik, sest enamikelt uurimisaladelt kogutud valimid ei olnud selleks piisavalt suured. Samas on esialgsete andmete abil tuletatud klassifitseerimisfunktsioonide ja nende põhjal arvutatud tagasimäärangu täpsuste kasutamine otoliidi mikrokeemia uuringustes tavapärase praktika (Barnett-Johnson jt. 2008, Gahagan jt. 2012, Martin jt. 2013b; Nazir and Khan 2019). Kindlasti on siin olnud üheks põhjuseks ka looduskaitse kaalutlused (nn 3 R-i printsiip, ingl: *replacement, reduction, refinement*), kuid kui asurkonna seisund on hea, siis suurema samasuviste valimi kogumine paremate lõpptulemuste nimel on ikkagi soovitatav. Kui aga looduskaitse kaalutlused seavad valimi suurusele siiski omad piirid, siis on üks võimalus kasutada kingapaela-meetodit (inglk.: *bootstrapping*), et valimi suurust tehiskult tõsta (Mikheev jt. 2020). Iseküsimus on, et kui reaalne valim ühest kohast on väga väike ( $n=5$ , nagu Mikheev jt. 2020 töös), siis kas see on ikkagi piisav esinduslike tulemuste saamiseks.

Diskriminantanalüüsi ja masinõppe suurimaks puuduseks otoliidi mikrokeemia päritolu uuringute kontekstis on see, et kõik potentsiaalsed referentsgrupid (nt kudeveekogud) uuritavas süsteemis peavad olema kaasatud. Seda tingib asjaolu, et iga teadmata päritoluga kala määratakse alati (olemasolevate andmete tingimustes) kõige tõenäosemasse referentsgruppi – isegi olukorras, kus andmete poolest sobivat referentsgruppi tegelikult baasväärtuste andmebaasis pole. Teatud määral aitab selle vastu posteeriorite tõenäosuse kasutamine – määratakse kriitiline tõenäosuse piir, millest alla jäävad posteeriorid loetakse valedeks tagasimääranguteks (nt Mikheev jt. 2021). Bayesi statistika üheks suurimaks eeliseks otoliidi mikrokeemia päritolu uuringute kontekstis on aga see, et meetod võimaldab tuvastada/eristada ka teadmata päritoluga gruppe/isendeid (st neid kelle baasväärtused puuduvad). Kuna otoliidi mikrokeemia päritolu uuringutes pole üldjuhul võimalik kõiki võimalikke referentsgrupe uuringusse kaasata, siis võiks sellistel juhtudel olla lahenduseks Bayesi statistika. Bayesi statistikale omaselt eeldab see aga teatud eelteadmiste kaasamist mudelisse (siinkohal hinnang kõigi võimalike referentspopulatsioonide arvu kohta). Välja on pakutud, et näiteks Markovi ahelate Monte Carlo (MCMC) algoritmide kasutamine Bayesi statistika raamistikus võiks olla sobilikuks nõ skriiningu tööriistaks oludes, kus on alust arvata, et kõikidest referentsgruppidest pole andmeid kogutud (White jt. 2008). MCMC hinnangut tõelise referentsgruppide arvu kohta saab seejärel kasutada juhiseks täiendavate proovikogumiste läbi viimiseks. Kui aga uuritavas süsteemis on kõik potentsiaalsed referentsgrupid juba kaasatud, siis tuleks kasutada traditsioonilise statistilisi meetodeid nagu LDFA, QDFA, ANN või RF, sest need meetodid võimaldavad robustsemat ja usaldusväärsemat klassifikatsiooni ning on lihtsamini teostatavad kui näiteks MCMC (White jt. 2008). Kõigi nende meetodite esimeseks eelduseks on aga referentsgruppide vaheline keskmiste väärtuste erinevus – kui seda ei ole, pole ka mitmemõõtmelise andmeanalüüsi tegemisel mõtet.

Täiskasvanud kalade klassifitseerimise edukust parandab kindlasti ka otoliidi mikrokeemia kombineerimine geneetiliste analüüsidega. Nimelt tuvastati tegevuse 2.6.1 käigus, et Lääne-Saaremaa ja Lõuna-Saaremaa pilootaladelt kogutud haugid erinesid üksteisest geneetiliselt. Seega nii mõnigi käesolevas töös „teadmata päritoluga“ isendiks määratud haug oleks tõenäoliselt saanud geneetiliste andmete lisandudes edukalt määratud vähemalt õigesse piirkonda.

## 5 Kokkuvõte ja järeldused

Käesoleva töö tulemusel loodi metodoloogiline raamistik erinevate otoliidi mikrokeemia uurimuste läbiviimiseks, mida saab kasutada magedaveelistes rannikuveekogudes kudevate kalade uurimiseks. Kirjeldatud meetodite potentsiaali testiti Lääne- ja Lõuna-Saaremaal asuvate pilootalade peal. Mudelliigina kasutati haugi, kuid otoliidi keemilise sõrmejälje

meetodit kala päritolu määramiseks saab rakendada erinevate liikide peal. Uuritava isendi ema elukäigu (nn maternaalse elukäigu) määramist saab teadaolevalt Eestis ja mujalgi rakendada ainult haugi (Rohtla jt. 2012) ja forelliga (Rohtla jt. 2020), kuid tõenäoliselt ka merisiiga, kui esineks paikselts jões elav vorm.

Käesoleva töö tulemusel selgus, et samasuviste kalade tabamine taimestikurikastes veekogudes on kriitilise tähtsusega ning selle jaoks tuleb planeerida piisavalt ajalist ressursi ja vahendeid ning valida kõige optimaalsem tabamise meetod. Seda isegi siis, kui on alust arvata, et konkreetne taastootmisala on hästi toimiv. Sõltuvalt pilootala soolsusest kasutati samasuviste kalade tabamiseks kas elektripüügiaparaati või maimunoota. Samas polnud kumbki neist piisavalt efektiivne tabamaks kalamaime tiheda taimestiku seest. Kalavastsete tabamiseks tiheda taimestiku seest on tõenäoliselt parim lahendus nn valge plaadi meetod, kuid käesoleva töö eesmärgiks oli tabada kalamaime, kes on vähemalt 2-4 nädalat vanad ning valge plaadi meetodi kasutamise jaoks liiga liikuvad. Suuremate ja liikuvamate kalamaimude tabamiseks tiheda taimestiku seest on tõenäoliselt parimaks lahenduseks väikeste veealuste detonatsioonide kasutamine. Nimetatud meetodit kasutatakse laialdaselt näiteks Rootsis, kuid Eestis pole see veel kasutust leidnud. Selleks, et otoliidi keemilise sõrmejälge baasväärtused oleks võimalikult esinduslikud, tuleks kalad võimaluse korral koguda taastootmisala erinevatest osadest. Statistilise andmeanalüüsi võimsuse suurendamiseks tuleks võimaluse korral koguda võimalikult suur hulk samasuviseid kalu. Sõltuvalt uuringuala suuruselt ja rahalistest vahenditest võiks kogutud kalade hulk olla minimaalselt 20 ja maksimaalselt 50.

Otoliitide keemilisel analüüsil tuleks lisaks jälgelementidele (nt Sr:Ca, Ba:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca) määrata ka  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  väärtused, sest nii paraneb klassifitseerimise täpsus märgatavalt. Selle põhjuseks on asjaolu, et tihti on just  $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$  kohasisesed väärtused stabiilsemad võrreldes jälgelementide väärtustega, mis on enamasti rohkem varieeruvad – nii oli ka käesolevas töös. Otoliidi mikrokeemia andmete statistiliseks analüüsiks kasutatakse enamasti diskriminantanalüüsi mudeleid, mis võimaldavad mudelit parametrizeerida kindlate eelteadmiste abil (antud juhul pilootaladelt kogutud samasuviste kalade otoliitide keemiline sõrmejalg) ning seejärel loodud „klassifitseerimise reeglistikku“ kasutades määrata teadmata päritoluga isendite grupiline kuuluvus. Selle meetodi suurimaks puuduseks on aga asjaolu, et teadmata päritoluga isend määratakse alati ühte eelnevalt kirjeldatud gruppi, isegi siis, kui realselt ongi tegemist teadmata päritoluga isendiga antud mudeli kontekstis. Ehk mudel eeldab, et kõik võimalikud baasväärtuste grupid (taastootmisalad) on mudelisse juba kaasatud. Reaalsuses pole aga seda võimalik paljude liikide puhul saavutada – eriti aga selliste liikide puhul, kes koevad paljudes erinevates veekogudes (nagu näiteks haug). Üks võimalus on sellistele juhtudele läheneda piirkonna põhiselt, kui esineb eelteadmisi, et konkreetne liik ei ole meres väga liikuv ja oma koelmust kaugele ei liigu. Haugi puhul ongi Soome näitel teada, et üle 10 km liikumisi meres üldjuhul ei toimu, kuid on ka erandeid (Karås & Lehtonen 1993). Väinamere haugide hulgas on aga >20 km kude- ja toitumisränded tavalised ning tõenäoliselt esineb ka veelgi pikemaid rändeid (EMI 2015; EMI, avaldamata andmed). Teine võimalus on

kasutada Bayesi statistikat, kuid sel juhul on vaja eelteadmisi kõikide võimalike kudealade arvu kohta. Kolmas, käesolevas töös kasutatud lahendus, on diskriminantanalüüsi mudeli hinnangud eksperthinnangu tasemel üle vaadata ja vajadusel korrigeerida. Nii on võimalik tuvastada teadmata päritoluga isendid, kes eelnevalt kirjeldatud gruppidesse oma otoliidi keemilise sõrmejälje väärtuste tõttu ei sobi sobi või nende sobimine on muudel asjaoludel äärmiselt vähetõenäoline.

Otoliidi keemilise sõrmejälje meetodit rakendati valitud pilootaladelt kogutud samasuviste haugide ja rannikumerest kogutud täiskasvanud haugide näitel. Lõplikusse mitte-lineaarse diskriminantanalüüsi mudellisse kaasati markerid  $^{87}\text{Sr}$ : $^{86}\text{Sr}$ , Sr:Ca ja Ba:Ca. Samasuviste haugide klassifitseerimise edukus oli 87% ja veamäär 13%. Kasutades samasuviste haugide põhjal loodud „reeglistikku“ (diskriminantfunktsioone), määras mudel merest püütud täiskasvanud haugide kõige tõenäosema päritolu. Eraldi esitati mudeli ning mudeli ja eksperthinnangu tulemused. Tõepärasemaks loeti käesolevas töös mudeli ja eksperthinnangu tulemused kombineeritult, sest nii oli võimalik tuvastada kõik meres sündinud ja mitmeid teadmata päritoluga haugid. Selle järgi pärines 33% ja 18% merest kogutud haugid vastavalt Mullutu-Suurlahest ja Oessaare lahest (kõik ka püütud Lõuna-Saaremaalt). Kuna tegemist on kõige suuremate haugikoelmutega Lõuna-Saaremaal, siis oli antud tulemus ka ootuspärane ning lisab kindlust, et otoliidi mikrokeemia sõrmejälje meetod on konkreetsetes piirkonnas rakendatav. Meres sündinud haugide osakaal oli 10%, mis on identne tulemus varasemalt Väinameres leitud. Meres sündinud haugide suhteliselt väike osakaal viitab selgelt meres kudeva haugi kehvale olukorrale kogu Eesti rannikumeres, kuid samas rõhutab ka mageveeliste taastootmisealade suurt tähtsust rannikumere haugivaru täiendi moodustumisel. Teadmata päritoluga haugide osakaal merest kogutud täiskasvanud kalade üldvalimist oli 28% (suurim teadmata päritoluga haugide osakaal tuvastati Vilsandi rannikumeres), kuid see on ka igati ootuspärane, sest kõiki võimalikke haugi taastootmise alasid käesolevasse töösse ei kaasatud. Näiteks esines valimis mitmeid täiskasvanuid haugid, kes otoliidi mikrokeemia järgi pärinesid >50 km kaugustelt taastootmisaladelt – nende haugide päritolu määrangutes olime eksperthinnangu tasemel pigem konservatiivsed ja määrasime nad siiski teadmata päritoluga kaladeks just seetõttu, et käesolevasse töösse ei kaasatud kõiki potentsiaalseid taastootmisalasid.

Maternaalse elukäigu määramise meetodit rakendati valitud pilootaladelt kogutud samasuviste haugide näitel. Maternaalsete elukäikude osakaalud erinesid uuringualade lõikes märkimisväärselt. Üldvalimist moodustasid siirdehaugi järglased 43%, kuid üllatavalt kõrge oli ka magevee haugi järglaste osakaal 30% näol. Kaksikümmend seitse protsenti samasuvistest haugidest olid aga „semi-residentide“ järglased, mille võimalikud seletused on, et nende emadeks olid siirdehaugid, kes tõusid varakult (nt juba sügisel) merest koelmule või haugid, kes viibisid vitellogeneesi ajal magevee mõjualas (nt jõgede suudmealade läheduses), kuid mitte täielikult merelises keskkonnas või siis mageveehaugid, kelle elupaika tungis vitellogeneesi toimumise ajal merevesi. Maternaalse elukäikude mitmekesisus pilootaladel viitab erinevate elukäigu strateegiatega haugide esinemisele, mis on äärmiselt vajalik

asurkonna jätkusuutlikkuse tagamiseks. Ka näitab see magevees paikset elavate haugiasurkondade olulisust rannikumere haugiasurkondade täiendi moodustumisel.

## Kasutatud allikad

- Barnett-Johnson, R., Pearson, T. E., Ramos, F. C., Grimes, C. B., MacFarlane, R. B. (2008). Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology. *Limnology and Oceanography* 53: 1633-1642.
- Bourret, S. L., Kennedy, B. P., Caudill, C. C., Chittaro, P. M. (2014). Using otolith chemical and structural analysis to investigate reservoir habitat use by juvenile Chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha*. *Journal of Fish Biology* 85: 1507-1525.
- Campana, S. E. (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms, and applications. *Marine Ecology Progress Series* 188: 263-297.
- Carlson, A. K., Phelps, Q. E., Graeb, B. D. S. (2017). Chemistry to conservation: using otoliths to advance recreational and commercial fisheries management. *Journal of Fish Biology* 90: 505-527.
- Casselman, J. M., Lewis, C. A. (1996). Habitat requirements of northern pike (*Esox lucius*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53: 161-174.
- Craig, J. F. (1996). *Pike: Biology and Exploitation*. London: Chapman & Hall. 298 pp.
- Eklöf, J.S., Sundblad, G., Erlandsson, M., Donadi, S., Hansen, J.P., Eriksson, B.K., Bergström, U. (2020). A spatial regime shift from predator to prey dominance in a large coastal ecosystem. *Communications Biology* 3: 459
- EMI. (2015). *Poolsiirdekaldade kudealad Väinameres ja Liivi lahe põhjaosas: seisund ja kvaliteedi parandamise võimalused. Projekti lõpparuanne*. Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut.
- Engstedt, O., Stenroth, P., Larsson, P., Ljunggren, L., Elfman, M. (2010). Assessment of natal origin of pike (*Esox lucius*) in the Baltic Sea using Sr:Ca in otoliths. *Environmental Biology of Fishes* 89: 547-555.
- Eriksson, B. K., Ljunggren, L., Sandström, A., Johansson, G., Mattila, J., Rubach, A., Råberg, S., Snickars, M. (2009). Declines in predatory fish promote bloom-forming macroalgae. *Ecological Applications* 19: 1975-1988.
- Erm, V., Rannak, L., Sõrmus, I., Štšukina, I. (1970). Väinamere kalastik. In: Kumari, E. (toim.) *Lääne-Eesti rannikualade loodus*. Tallinn: Valgus, pp. 61–80.



- Eschbaum, R., Špilev, H., Jürgens, K., Hommik, K., Arula, T., Hubel, K., Saks, L., Rohtla, M., Verliin, A., Talvik, Ü., jt. (2021). EESTI KALANDUSSEKTORI RIIKLIKU TÖÖKAVA TÄITMINE 2020.-2021. AASTAL (riigihange viitenumber 215079). Töövõtulepingu nr 4-1/20/3 lõpparuanne 2020. a kohta. Osa: Rannikumere kalad. 215 lk.
- Gahagan, B. I., Vokoun, J. C., Whitley, G. W., Schultz, E. T. (2012). Evaluation of otolith microchemistry for identifying natal origin of anadromous river herring in Connecticut. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science* 4: 358-372.
- Jones, C. M., Palmer, M., Schaffler, J. J. (2017). Beyond Zar: the use and abuse of classification statistics for otolith chemistry. *Journal of Fish Biology* 90: 492-504.
- Järvekülg, A. (2001). Eesti jõed. Tartu, Tartu Ülikooli Kirjastus
- Kallasvuo, M., Lappalainen, A., Urho, L. (2011). Coastal reed belts as fish reproduction habitats. *Boreal Environment Research* 16: 1-14.
- Karås, P., Lehtonen, H. (1993). Patterns of movement and migration of pike (*Esox lucius* L.) in the Baltic Sea. *Nordic Journal of Freshwater Research* 68: 72-79.
- Kraufvelin, P., Pekcan-Hekim, Z., Bergström, U., Florin, A.-B., Lehikoinen, A., Mattila, J., Arula, T., Briekmane, L., Brown, E. J., Celmer, Z., Dainys, J., Jokinen, H., Kääriä, P., Kallasvuo, M., Lappalainen, A., Lozys, L., Möller, P., Orio, A., Rohtla, M., Saks, L., Snickars, M., Støttrup, J., Sundblad, G., Taal, I., Ustups, D., Verliin, A., Vetemaa, M., Winkler, H., Wozniczka, A., Olsson, J. (2018). Essential coastal habitats for fish in the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 204: 14-30.
- Lappalainen, A., Härmä, M., Kuningas, S., Urho, L. (2008). Reproduction of pike (*Esox lucius*) in reed belt shores of the SW coast of Finland, Baltic Sea: a new survey approach. *Boreal Environment Research* 13: 370-380.
- Loewen, T. N., Reist, J. D., Yang, P., Koleszar, A., Babaluk, J. A., Mochacz, N., Halden, N. M. (2015). Discrimination of northern form Dolly Varden Char (*Salvelinus malma malma*) stocks of the North Slope, Yukon and Northwest Territories, Canada via otolith trace elements and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr isotopes. *Fisheries Research* 170: 116-124.
- Martin, J., Bareille, G., Berail, S., Pecheyran, C., Daverat, F., Bru, N., Tabouret, H., Donard, O. (2013a). Spatial and temporal variations in otolith chemistry and relationships with water chemistry: a useful tool to distinguish Atlantic salmon *Salmo salar* parr from different natal streams. *Journal of Fish Biology* 82: 1556-1581.
- Martin, J., Bareille, G., Berail, S., Pecheyran, C., Gueraud, F., Lange, F., Daverat, F., Bru, N., Beall, E., Barracou, D., Donard, O. (2013b). Persistence of a southern Atlantic salmon population: diversity of natal origins from otolith elemental and Sr isotopic signatures. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70: 182-197.

- McGarigal K, Cushman S, Stafford S (2000) Multivariate statistics for wildlife and ecology research. Springer-Verlag, New York.
- Mercier, L., Darnaude, A. M., Bruguier, O., Vasconcelos, R. P., Cabral, H. N., Costa, M. J., Lara, M., Jones, D. L., Mouillot, D. (2011). Selecting statistical models and variable combinations for optimal classification using otolith microchemistry. *Ecological Applications* 21: 1352-1364.
- Mikheev, P. B., Jarvis, M. G., Matthaei, C. D., Ingram, T., Reid, M. R., Nikiforov, A. I., Chernienko, I. S., Closs, G. P. (2020). Straying of brown trout in the catchment of a large New Zealand river evaluated by otolith microchemistry. *Ecology of Freshwater Fish* n/a.
- Munch, S. B., Clarke, L. M. (2008). A Bayesian approach to identifying mixtures from otolith chemistry data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65: 2742-2751.
- Möller, S., Winkler, H. M., Klügel, A., Richter, S. (2019). Using otolith microchemical analysis to investigate the importance of brackish bays for pike (*Esox lucius* Linnaeus, 1758) reproduction in the southern Baltic Sea. *Ecology of Freshwater Fish* 28: 602-610.
- Mäemets, A. (1977). Eesti NSV järved ja nende kaitse. Valgus, Tallinn
- Nazir, A., Khan, M. A. (2019). Spatial and temporal variation in otolith chemistry and its relationship with water chemistry: Stock discrimination of *Sperata* aor. *Ecology of Freshwater Fish* 28: 499-511.
- Neubauer, P., Shima, J. S., Swearer, S. E. (2013). Inferring dispersal and migrations from incomplete geochemical baselines: analysis of population structure using Bayesian infinite mixture models. *Methods in Ecology and Evolution* 4: 836-845.
- Nilsson, J. (2006). Predation of northern pike (*Esox lucius* L.) eggs: a possible cause of regionally poor recruitment in the Baltic Sea. *Hydrobiologia* 553: 161-169.
- Ojaveer, E.; Pihu, E.; Saat, T. (Toim.) (2003). Fishes of Estonia. Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Ott, I. (2017). Eesti väikejärvede hüdrobioloogiline seire 2017. a. Tartu
- Ott, I. (2018). Eesti väikejärvede hüdrobioloogiline seire 2018. a. Tartu
- Pflugeisen, B. M., Calder, C. A. (2012). Bayesian hierarchical mixture models for otolith microchemistry analysis. *Environmental and Ecological Statistics*: 1-12.
- Pierce, R. B., Shroyer, S., Pittman, B., Logsdon, D. E., Kolander, T. D. (2006). Catchability of Larval and Juvenile Northern Pike in Quatrefoil Light Traps. *North American Journal of Fisheries Management* 26: 908-915.

- Pracheil, B. M., Hogan, J. D., Lyons, J., McIntyre, P. B. (2014). Using Hard-Part Microchemistry to Advance Conservation and Management of North American Freshwater Fishes. *Fisheries* 39: 451-465.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rohtla, M. (2015). Otolith sclerochronological studies on migrations, spawning habitat preferences and age of freshwater fishes inhabiting the Baltic Sea. Doktoritöö, Tartu Ülikool.
- Rohtla, M., Vetemaa, M., Urtson, K., Soesoo, A. (2012). Early life migration patterns of Baltic Sea pike *Esox lucius*. *Journal of Fish Biology* 80: 886-893.
- Rohtla, M., Svirgsden, R., Verliin, A., Rumvolt, K., Matetski, L., Hommik, K., Saks, L., Vetemaa, M. (2017). Developing novel means for unravelling population structure, provenance and migration patterns of European whitefish *Coregonus lavaretus* s.l. in the Baltic Sea. *Fisheries Research* 187: 47-57.
- Rohtla, M., Matetski, L., Taal, I., Svirgsden, R., Kesler, M., Paiste, P., Vetemaa, M. (2020). Quantifying an overlooked aspect of partial migration using otolith microchemistry. *Journal of Fish Biology* 97: 1582-1585.
- Rooker, J. R., Secor, D.H., Zdanowicz, V. S., De Metrio, G., Relini, L. O. (2003). Identification of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) stocks from putative nurseries using otolith chemistry. *Fisheries Oceanography* 12: 75-84.
- Sandström, A., Bergquist, B., Ragnarsson-Stabo, H., Andersson, M. (2014). A test of sampling methods for fishes in the littoral zone of Lake Vänern, Sweden. *Aquatic Ecosystem Health & Management* 17: 357–364.
- Snickars, M., Sandström, A., Lappalainen, A., Mattila, J. (2007). Evaluation of low impact pressure waves as a quantitative sampling method for small fish in shallow water. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 343: 138-147.
- Svirgsden, R., Rohtla, M., Albert, A., Taal, I., Saks, L., Verliin, A., & Vetemaa, M. (2018). Do Eurasian minnows (*Phoxinus phoxinus* L.) inhabiting brackish water enter fresh water to reproduce: Evidence from a study on otolith microchemistry. *Ecology of Freshwater Fish*, 27, 89– 97.
- Walther, B. D., Thorrold, S. R. (2008). Continental-scale variation in otolith geochemistry of juvenile American shad (*Alosa sapidissima*). *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* 65: 2623-2635.
- White, J. W., Ruttenberg, B. I. (2007). Discriminant function analysis in marine ecology: some oversights and their solutions. *Marine Ecology Progress Series* 329: 301-305.

White, J. W., Standish, J. D., Thorrold, S. R., Warner, R. R. (2008). Markov chain Monte Carlo methods for assigning larvae to natal sites using natural geochemical tags. *Ecological Applications* 18: 1901-1913.