

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

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Klinge seadus Eesti järvede näitel

Tii-Linda Purge

Juhendajad: PhD Raivo Aunap
PhD Taavi Pae

Tartu 2021

Annotatsioon

Klinge seadus Eesti järvede näitel

Järved on ajutised pinnavormid ja nende loomuliku elutsükli lõppfaasiks võime pidada kinnikasvamist. Florist-süstemaatik Johannes Christoph Klinge avaldas 19. sajandi lõpul teose, kus väitis, et järvede kinnikasvamine saab alguse nende tuulealusest küljest. Käesoleva töö eesmärk oli kontrollida Klinge seaduse paikapidavust Eesti järvede näitel ja leida teisi järvede hääbumisele iseloomulikke ruumilisi mustreid ning mõjureid. Töös viidi läbi mullakaardi visuaalne kontentanalüüs, milles tuvastati soo- ja rannikumuldade paiknemismustreid veepeegli suhtes, ja järvenõgude modelleerimine DEM kõrgusmudeli abil. Uurimuse tulemusel selgus, et järvede kinnikasvamisel ja valitsevate tuulte suunal märkimisväärset seost ei esine, küll aga võivad suundumuse kujundamisel märgilised olla nii nõo kuju kui järve morfomeetria.

Märksõnad: Klinge seadus, järved, terrestrialiseerumine, valitsevad tuuled

CERS kood: P510 - Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Annotation

Klinge's Law on the Example of Estonian Lakes

Lakes are temporary landforms and we can consider overgrowth to be the final stage of their natural life cycle. At the end of the 19th century, the florist-systematist Johannes Christoph Klinge published a work in which he claimed that the overgrowth of lakes began from their downwind side. The aim of this work was to check the validity of the Klinge's law on the example of Estonian lakes and to find other spatial patterns and factors of lake extinction. In this work, a visual content analysis of the soil map was performed, in which the patterns of bog and coastal soils in relation to the water mirror and the lake depression using the DEM elevation model were identified. The result of the study revealed that there was no significant relationship between the overgrowth of the lakes and the direction of the prevailing winds, but both the shape of the basin and the morphometry of the lake may be significant in shaping the trend.

Keywords: Klinge's law, lakes, terrestrialization, prevailing winds

CERS code: P510 - Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Ülevaade Eesti seisuveekogudest ja neis toimuvatest protsessidest	6
1.1. Järvede kujunemine ja paiknemine Eesti aladel	6
1.2. Eesti järvede tüpoloogia	7
1.2.1. Vähetoitelised ehk oligotroofsed järved	8
1.2.2. Poolhuumustoitelised ehk semidüstroofsed järved.....	9
1.2.3. Huumustoitelised ehk düstroofsed järved.....	9
1.2.4. Segatoitelised ehk düseutroofsed järved.....	9
1.2.5. Rohketoitelised ehk eutroofsed järved	9
1.2.6. Lubjatoitelised ehk alkalitroofsed järved	10
1.2.7. Soolatoitelised ehk halotroofsed järved.....	10
1.2.8. Rauatoitelised ehk siderotroofsed järved.....	10
1.2.9. Makrofüüdi ja liigtoitelised ehk hüpertroofsed järved	10
1.3. Seisuveekogu kadumine maastikust	11
1.3.1. Järve kinnikasvamise põhjused	11
1.3.2. Soo genees	12
1.3.2.1. Maismaaline ehk telmaatiline soostumine	12
1.3.2.2. Järveline ehk limniline soostumine.....	13
1.4. Klinge seadus	14
1.4.1. Kirikumäe järv	14
1.4.2. Klinge seaduse kehtivuse eeldused Eestis	15
2. Maakatte muutuste ja reljeefi kaugseire	17
2.1. Veekogude kaugseire	17
2.2. Reljeefi modelleerimine	18
3. Metoodika ja andmed	20

3.1. Järvede paiknemise tuvastamine nõos ja metoodika valik	20
3.2. Mullakaardi visuaalne analüüs	20
3.3. Järve nõo modelleerimine	21
3.4. Kasutatud andmed	22
4. Tulemused.....	23
4.1. Valimisse sattunud järvede paiknemine	23
4.2. Mullakaardi visuaalne analüüs	24
4.3. Järve nõos paiknemise ja mullakaardi analüüsi võrdlus	26
5. Arutelu	29
Kokkuvõte.....	32
Summary.....	33
Tänuavaldused	35
Kirjanduse loetelu	36
Lisad	41
Lisa 1. Mullakaardi kontentanalüüsi MS Exceli tabel	41
Lisa 2. Nõos paiknemise MS Exceli tabel	44
Lisa 3. Eesti väikejärvede batümeetriline seire 2019 tulemused	46

Sissejuhatus

Viimase mandrijää taandumine ja selle kulutus-kuhjeline tegevus kujundas oluliselt Eesti pinnamoodi ja lõi head eeldused peamiselt väikejärvede tekkeks. Ligikaudu 1200 siinset järve on geograafiliselt ebahühtlaselt jaotunud, üldiselt väikesed ja madalad. (Järvekülg 1994; Raukas 1995; Mäemets 1989)

Olemuselt on järved ajutised pinnavormid, mis looduslike ja inimese poolt kiirendatud protsesside tulemusel täituvad setenditega, madalduvad ning kaovad maastikust senisel kujul. Peamiseks inimõjust tulenevaks ohuteguriks on toitelisuse tõus ehk eutrofeerumine, mil puhul taimekasvuks vajalike toitesoolade kontsentratsiooni kasv viib suurema primaarproduksiooni ja hapnikuvaeguseni, millega omakorda kaasneb tugev häiring veekogu tavapärasel talituses. Järvede hääbumisele järgneb mitmeastmeline soostumisprotsess.

Eesti järvede olukorda on seisuveekogude keskkonnaseire käigus palju uuritud ja seda peamiselt vajalike kaitsemeetmete väljatöötamiseks. Eeskätt jälgitakse hüdroloogiat ning vee hüdrokeemilisi ja bioloogilisi näitajaid. Aastal 2019 teostati ka Eesti väikejärvede batümeetriline seire, mille käigus mõõdistati kümne väikejärve nõo morfomeetrilised parameetrid, mille võrdlemisel ajaloolistega saaksime tuvastada toimunud muutuseid ja edasisi arengusuundumusi (Vandel jt. 2019). Järvede kinnikasvamist Eestis on üldiselt uuritud vähe, keskendudes seejuures vaid üksikutele näidetele.

Florist-süstemaatik Johannes Christoph Klinge (1851–1902) avaldas 1894. aastal saksakeelse teose „Revision der Orchis cordigera Fries und orchis angustifolia Rchb“. Teoses täheldas teadlane seost valitsevate tuulte suuna ja järvede kinnikasvamise vahel. Edasises kirjanduses on tähelepanekut esitletud Klinge seadusena, mille kohaselt hakkavad järved kinni kasvama tuulealusest küljest. (Masing 1975)

Bakalaureusetöö eesmärk on kontrollida Klinge seaduse paikapidavust 100 Eesti suurima loodusliku järve näitel, kasutades geoinformaatika võimalusi ja kartograafilist analüüsi. Lisaks soovitakse leida ka teisi järvede kinnikasvamisele iseloomulikke mustreid ja mõjureid, nende ruumilist paiknemist ja varieeruvust.

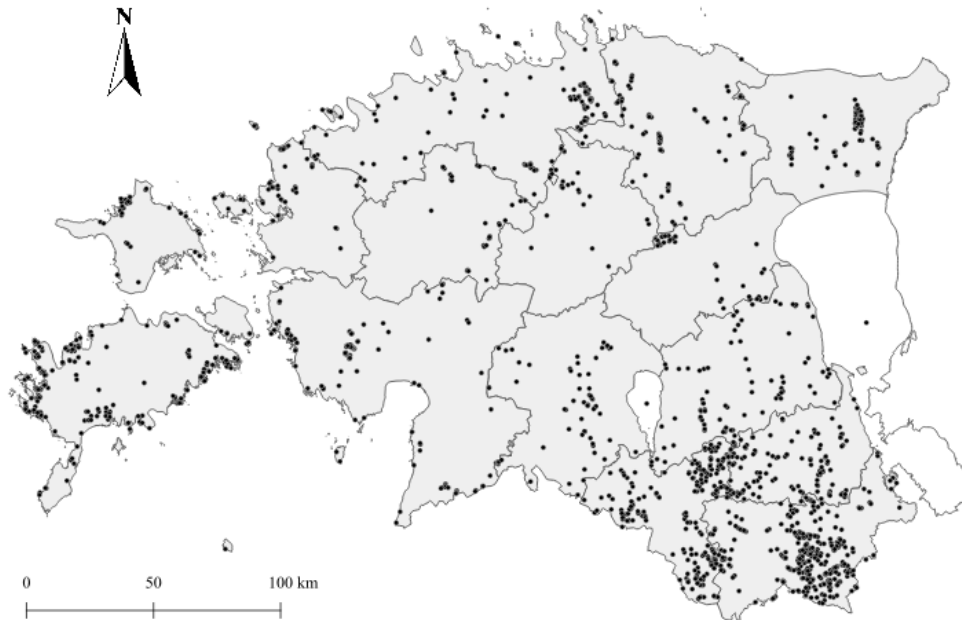
Töö jaguneb viieks suureks peatükiks: kaks esimest peatükki käsitlevad teoreetilisi lähtekohti, Eesti järvede iseloomu ja arengut ning kaugseire praktilisi võimalusi. Metoodika ja andmete peatükis kirjeldatakse töö uurimuslikku osa, tulemuste peatükis esitatakse leitud seosed ja arutelu diskuteeritakse saadud tulemuste üle ning esitatakse uusi seisukohti.

1. Ülevaade Eesti seisuveekogudest ja neis toimuvatest protsessidest

1.1. Järvede kujunemine ja paiknemine Eesti aladel

Jääaegade ja -vaheaegade vaheldumine ning liustike kulutus-kuhjeline tegevus on olulisel määral kujundanud põhjapoolkera reljeefi. Mandrijää taandumine on jätnud maha glatsiaalsed pinnavormid, mis omakorda on tekitanud ja ümber kujundanud voolu- ning seisuvee süsteeme. Keskmise temperatuuri tõus ning liustike sulamine ja taganemine põhja poole tõi kaasa vee kogunemise reljeefi madalamatesse punktidesse ja esimeste järvede tekke. Külmemate perioodide vaheldumisel soojematega on täheldatud, et keskmiselt kõrgema õhutemperatuuriga perioodidel seisuveekogude produktsioon kasvas, toimus ökoloogiline suksessioon ehk taimekoosluste vahetumine, mille tulemusena kadusid paljud järved soostumise tagajärjel. Kliima jähnenemisel taandusid soodsad tingimused aktiivseks taimekasvuks, langes produktsioon ja stabiliseerus järvede ökoloogiline olukord. (Kołaczek *et al.* 2016) Edasises arengus on järvede asend, morfomeetria ja vee omadused tunduvalt muutunud.

Põhjapoolkera suhteliselt kõrge laiuskraadilise asukoha tõttu on mandrijää vorminud ka Eesti pinnamoodi. Siinsed järved on peaaesjalikult mandrijäätekkelised, pindalalt väikesed ja madalad. Püsiveekogusid moodustab kuhjeliste ja hästi liigestatud moreenküngaste vahele, orgudesse, nõgudesse ja teistesse negatiivsetesse pinnavormidesse, mis on ehituselt võimelised vett kinni hoidma. Mandriliustiku alt vabanenud maapind on surve taandumisel hakanud kerkima ja moodustanud relikt- ehk jäänukjärvi saartele ja rannikualadele. Kõige intensiivsem maakerge toimub Loode-Eesti rannikul, kus maapind tõuseb ligikaudu kolm millimeetrit aastas, moodustades kerkinud rannavallide taha uusi püsiveekogusid (Kivistik 2012). Kokku katavad ligi 1200 siinset järve viis protsenti Eesti territooriumist. (Järvekülg 1994; Raukas 1995; Mäemets 1989) Seisuveekogude jaotumine riigisiselt on ebaühtlane (vt. joonis 1) - kõige enam leidub järvi Kagu-Eestis, kus kuppelmaastiku mitmekülgne reljeef on loonud head eeldused väikejärvede tekkeks. Sealsed järved on moodustunud termokarstiliste protsesside tulemusena. Uue veekogu aluseks on mattunud jääpanga sulamisest põhjustatud lokaalne maapinna vajumine ja selle täitumine jää sulavee ja mujalt valgalalt imbuva pinna-, põhja- ning sademeveega. Pindalalt suuremad järved, näiteks Peipsi-Pihkva ja Võrtsjärv, paiknevad pinnamoelt stabiilsematel ja tasasematel aladel. (Mäemets 1977)

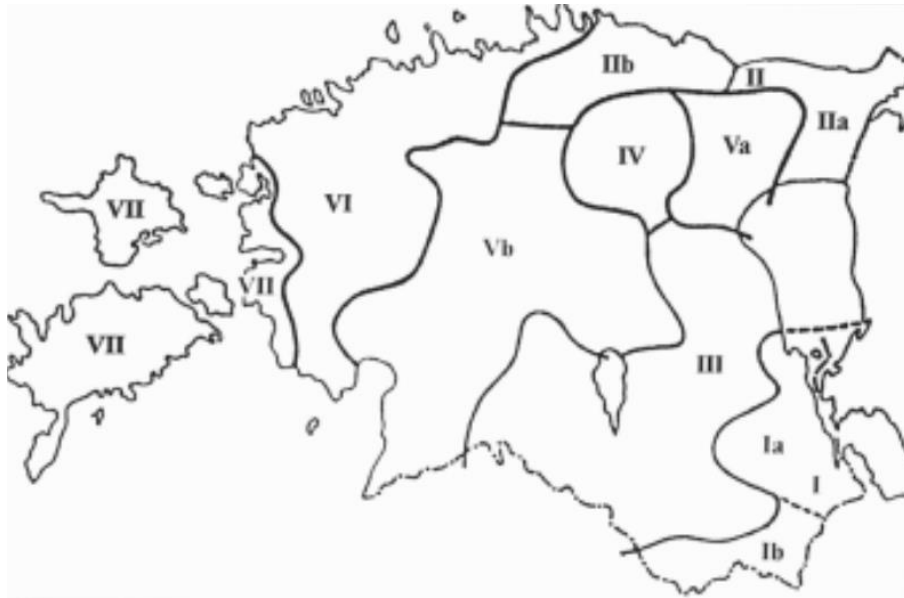


Joonis 1. Järvede paiknemine Eesti aladel. Kaardil kasutatud andmed pärinevad Eesti topograafia andmekogust.

1.2. Eesti järvede tüpoloogia

Järvi võib klassifitseerida erinevate omaduste nagu morfomeetria, valgala suuruse ja iseloomu, troofsuse ehk toitelisuse, vee keemilis-füüsikaliste omaduste ning biota alusel. Eesti järveteaduses on juba pikka aega rakendust leidnud hüdrobioloog Aare Mäemetsa tüpoloogia, mis põhineb looduslikul akumulatsioonitüübil (Raukas 1995; Mäemets 1977; Kõiv, Ott 2011). Tüpoloogiat uuendasid ja lihtsustasid sajandivahetusel limnoloog Ingmar Ott ja hüdrobioloog Toomas Kõiv (Tamre 2006; Laarmaa jt. 2019). Lisaks Mäemetsa tüpoloogiale on paralleelselt kasutusel ka Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiiviga kehtestatud klassifikatsioon, mis on loodud veekogu ökoloogilisest seisundist lähtudes (Tuvikene jt. 2014).

Käesolevas töös keskendume Aare Mäemetsa klassifikatsioonile, mis koosneb kaheksast põhitüübist ja 27 algsest alamtüübist, mida on praktikat lihtsustavatel kaalutlustel vähendatud 12-ni ning mis käesolevas töös lahti seletamist ei leia. Rangelt võetuna ei kuulu eraldi tüpoloogiasse makrofüüdi ja liigtoitelised järved, kuid üha suureneva inimõju ja selliste järvede osakaalu tõusu tõttu on nende järvetüüpide välja toomine oluline. Eesti limnoloogiliste valdkondade määratlemisel (vt. joonis 2) on tüpoloogia autor lähtunud piirkonnas enim levinud järvetüüpidest, mis aga ei välista teiste, samuti rohkearvuliste järvetüüpide esinemist piirkonnas. (Laarmaa jt. 2019)



Joonis 2. Eesti järvede limnoloogilised rajoonid. I - Kagu-Eesti vähe- ja huumustoitelised, II - Kirde-Eesti vähe- ja huumustoitelised, III - Kõrg-Eesti rohketoitelised, IV - Pandivere lubjatoitelised, V - Vahe-Eesti huumustoitelised, VI - Madal-Eesti segatoitelised, VII - Lääne-Eesti soolatoitelised järved. (Laarmaa jt. 2019)

1.2.1. Vähetoitelised ehk oligotroofsed järved

Oligotroofsed järved on kõige vanema järvetüübi esindajad ja Eestis leidub neid vähe. Kõigist uuritud järvedest moodustavad need ligi kaheksa protsenti. Nende edasine säilimine on järvede vastuvõtliku iseloomu ja madala puhverdusvõime tõttu murettekitav. Selliste järvede suurim ohustaja ja ökosüsteemi tasakaalust väljaviija on eutrofeerumine, mille tulemusel muutub järv rohketoiteliseks. (Keskkonnaagentuuri kodulehekülg 2018) Vähetoitelisteks järvedeks võime lugeda näiteks Nohipalu Valgjärve Põlva maakonna kagunurgas, Ahne ja Jaala järve Kurtna mõhnastikus (Ott 2010).

Oligotroofseid järvi on nende ürgse iseloomu, vähese arvukuse ja ainulaadse ökosüsteemi tõttu palju uuritud. Neile on iseloomulik väike või puuduv sissevool ja üldiselt nõrk veevahetus. Vesi on pehme ja hele, sisaldades vähesel määral mineraal-, toit- ja humiinaid. Toitainetevaeses vees on madal ka primaarproduktioon, millest omakorda tuleneb väike liigirikkus. Sellest hoolimata on oligotroofsetele järvedele omased ainulaadsed ja väga haruldased elukooslused, mis on järve ökoloogidele huvi pakkunud aastakümneid. (Ott 2010)

1.2.2. Poolhuumustoitelised ehk semidüstroofsed järved

Semidüstroofsed järved tekivad tavaliselt oligotroofsetest või halo- ehk soolatoitelistest järvedest, mille humiin- ja toitainete sisaldus on vähesel määral kasvanud (Laarmaa jt. 2019). Eestis uuritud järvedest moodustavad sellised ligi kuus protsenti. Üpriski sarnaste vee karakteristikute ja kehva puhverdusvõime tõttu on oligotroofsed ja semidüstroofsed järved Euroopa Liidu raamdirektiivi tüpoloogias ühte klassi arvatud. Poolhuumustoiteliseks järveks võime pidada näiteks Kurtna järvestikku kuuluvat Valgjärve. (Keskkonnaagentuur 2018)

1.2.3. Huumustoitelised ehk düstroofsed järved

Semidüstroofse järve järgmine arenguaste on huumustoiteline ehk düstroofne, kus veekogu humiainete osakaal on tunduvalt kasvanud, mistõttu on järvevesi pruunikas ning vähem läbipaistev. Sellised järved paiknevad peamiselt rabamaastikus, kus neile on iseloomulik toitainetevaene vesi, happeline reaktsioon ja üsna liigivaene elustik. Eestis moodustavad düstroofsed järved üheksa protsenti kõigist uuritustest. (Keskkonnaagentuuri kodulehekülj 2018) Kõige tüüpilisemad esindajad on Loosalu järv Kõrvemaa lääneosas, Tudu järv Lääne-Viru maakonna idaservas ja Kakerdaja järv Järvemaal samanimelise raba keskmes (Mäemets 1977).

1.2.4. Segatoitelised ehk düseutroofsed järved

Segatoitelised järved on kõige arvukamad järvetüübi esindajad Eestis (Ott 2019). Uuritud järvedest moodustavad sellised pea 37%. Neile on iseloomulik suur biogeensete ja orgaaniliste ühendite kontsentratsioon, millest tulenevalt on primaarproduksioon kõrge ja taimestik tihe. Tavaliselt on segatoiteliste järvede näol tegemist soojärvedega, mis on oma arengult hääbuvad järved. (Mäemets 1977; Keskkonnaagentuuri kodulehekülj 2018) Düseutroofseks järveks võib pidada Endla järve Jõgevamaal (Ott 2019).

1.2.5. Rohketoitelised ehk eutroofsed järved

Eutroofsed järved on tekkinud vähetoitelistest järvedest neile märkimisväärsel hulgal toitainete lisandumise teel, mille tulemusel suureneb järvevee keemiline kontsentratsioon ja kasvab produktsioon. Eestis uuritud järvedest moodustavad sellised umbes 36%. Toitainete suure hulga ja kerge kättesaadavuse tõttu on liigiline mitmekesisus suur. (Keskkonnaagentuuri kodulehekülj 2018) Vesinikkarbonaadi (HCO_3) sisalduse alusel jagatakse vesi kaheks - pehme- ja karedaveeliseks eutroofseteks. Pehmeveeliste järvede vesinikkarbonaadi sisaldus

jääb alla 80 mg/l ja karedaveelistel võib see ulatuda kuni 240 mg/l-ni (Laarmaa jt. 2019). Rohketoiteliseks võime pidada Kahira järve Võru maakonna keskmes (Ott 2019).

1.2.6. Lubjatoitelised ehk alkalitroofsed järved

Lubjatoiteliste järvede osakaal on väike ja need moodustavad vähem kui kolm protsenti Eestis uuritud järvedest. Need paiknevad lubjase aluspõhjaga aladel, olles seejuures peamiselt allikatoitelised. Eestis on lubjatoitelised järved levinud eelkõige Pandivere kõrgustikul, mujal on need pigem harv nähtus (Ott, Kõiv 1999). Järvevesi on aluspõhjalise karbonaatkivimi lahustumise tõttu väga kõrge karbonaadi sisaldusega, mille tulemusel on oluline toitaine fosfor inaktiivne ja primaarproduksioon väga madal. Lubjatoitelisi järvi seostatakse väga läbipaistva veega, Eestis on sellised näiteks Äntu järved Lääne-Viru maakonnas. (Laarmaa jt. 2019; Ott 2010)

1.2.7. Soolatoitelised ehk halotroofsed järved

Halotroofsed järved on tekkinud madalast rannikumerest hiljutise maakerke tulemusena. Mõned järved võivad merega veel kitsast ühendust omada. Järvevesi on mereveega sarnaselt halogeeneririkas ja suhteliselt kõrge pH-ga. Halotroofsed järved moodustavad alla kahe protsendi uuritud järvedest ning paiknevad peamiselt Loode- ja Lääne-Eesti rannikul ning saartel. Järved on sageli madalad ja põhjas tüseda mudalasundiga, olles aldis kuivamisele ja kinnikasvamisele. (Laarmaa jt. 2019; Raukas 1995; Keskkonnaagentuuri kodulehekülj 2018)

1.2.8. Rauatoitelised ehk siderotroofsed järved

Siderotroofseid järvi on Eestis väga vähe, täpsemalt alla 0,2% uuritud järvedest. Neile on iseloomulik kõrge rauaühendite kontsentratsioon madalamates kihtides. Allikatoitelistel järvedel koguneb raud järve peamiselt põhjavee sissevoolu kaudu. Rauatoiteline on näiteks Kurtna järvestikku kuuluv Räätsma järv Ida-Viru maakonnas. (Laarmaa jt. 2019)

1.2.9. Makrofüüdi ja liigtoitelised ehk hüpertroofsed järved

Makrofüüdi- ehk suurtaimederikkaid järvi rangelt võttes eraldi tüüpidena ei klassifitseerita, sest siia alla kuuluvad nii sega- kui ka rohketoitelised järved. Ometi on sellistel järvedel välja kujunenud selged hüdrokeemilised ja morfomeetrilised iseloomujooned. (Ott, Kõiv 1999) Hüpertroofsetes järvedes on kõrge toit- ja mineraalainete kontsentratsioon ning primaarproduksioon, mille tulemusel veepeegli makrofüütidega katvus võib ulatuda kuni 75%. Sageli kujunevad sellised järved välja inimtegevuse ja veetaseme kõikumise tagajärjel. (Laarmaa jt. 2019)

Hüpertroofsed järved on tekkinud suurenenud inimõju, peamiselt punktreaostuse tagajärjel. Biogeensed ained võivad järvevette imbuda lähedal asuvatest tiheasustatud piirkondadest, põllumajandusmaadelt, tööstuspiirkondadest ja ka teistest bioloogiliselt kergesti lagunevaid aineid kasutavatest valdkondadest. (Laarmaa jt. 2019).

1.3. Seisuveekogu kadumine maastikust

Järved on olemuselt ajutised pinnavormid, mis tekivad ja hääbuvad ajapikku. Nende eksistents piirdub tavaliselt umbes tuhande aastaga, mille jooksul täituvad need setenditega ja ökoloogilise suksessiooni tulemusel kas kaovad maastikust, jooksevad tühjaks või kuivavad. (Kõiv, Ott 2011) Seisuveekogu põhjasetendite kogunemine on loomulik protsess ja osa järve tavapärasest toimimisest, kuid inimtegevuse üha suurenev mõju looduskeskkonnale on muutnud järvede troofsust, intensiivistanud setete ladestumiskiirust ning seeläbi kiirendanud järve maastikust kadumise protsessi.

1.3.1. Järve kinnikasvamise põhjused

Üheks oluliseks järvevee kvaliteedi halvenemise põhjuseks on toitelisuse tõus ehk eutrofeerumine, mis on oluline keskkonnaprobleem kogu maailmas. Toitained satuvad veekogudesse looduslikult, ümbritsevast keskkonnast läbi põhja-, pinna- ja sademevee. Intensiivistunud inimtegevuse tagajärjel on toitainete vood märgatavalt kasvanud ja veekogude ökosüsteemi olukord halvenenud. Olulisteks kvaliteeti ohustavateks faktoriteks Eestis on üleliigne väetiste kasutamine põllumajanduses ja ebapiisavad puhversüsteemid, kust lämmastiku- ja fosforiühendid imuvad nii põhja- kui ka pinnavette. Levinud on ka lokaalsed reaostused, mis pärinevad asulate reoveest, tööstusest, farmidest ja Kirde-Eestis ka puhastamata kaevandusvee jõudmisest veeringesse. (Laarmaa jt. 2019) Eutrofikatsiooni ja selle mõju teemal veekeskkonnale on läbi viidud palju uuringuid ning leitud positiivseid korrelatsioone inimtegevuse ja järvede troofsuse muutuste vahel. Madalate ja mageveeliste seisuveekogude puhul, nagu Balatoni järv Ungaris, on leitud, et järve toitelisus sõltub oluliselt hüdro-morfoloogilistest tingimustest, vee sisse- ja väljavoolust, koormuse vähendamiseks rakendatud seadustest ja meetetest, milleks on näiteks mineraalväetiste vähendamine ja reovee kontrollitum puhastamine. Lisaks on tähtsad ka piirkondlikud meteoroloogilised tingimused: temperatuur ja sademed. (Hatvani *et al.* 2020) Eutrofeerumine ohustab kõige enam Eestile omaseid väikeseid ja madalaid veekogusid, kus makrofüütide hulk on olulisel määral seotud järve keskmise sügavuse, veetaseme muutuste ja põhjasetete akumulatsiooniga. Äärmiselt

olulised on ka happesuse ja temperatuuri muutused (Lawniczak-Malińska *et al.* 2018; Skowron, Jaworski 2017).

1.3.2. Soo genees

Soo on terviklik ökosüsteem, kus sobivates kliimaatilistes, hüdrogeoloogilistes ja pinnamoelistes tingimustes toimub pidev turba akumulatsioon. Domineeriv mullatekkeprotsess on soostumine, mis võib alguse saada nii veekogu kinnikasvamisest kui ka mineraalmaa soostumisest (Hang, Kalm 2014). Orgaanilise materjali, milleks on peamiselt taimne biomass, lagunemine on pidevalt liigniisketes ja hapnikuvaestes tingimustes pärsitud ning lagundamata jäänud taimemass ladestub. Kujumise tulemusel tekib turbalasund, mida saame iseloomustada selle koostise ja lagunemisastme järgi. (Paal, Leibak 2013) Eesti territooriumil asuvad soomullad sisaldavad suurel määral samblaid, tarnasid, villpeasid ja pilliroogu (Valk 2005). Soomuldade arengus on piiravaks faktoriks veetaseme kõikumine ja madalseis, mis pidurdab orgaanilise ainese kogunemist ning turbahorisoni kasvu (Bauer 2004; Wheeler, Proctor 2000). Soomaastikke võib klassifitseerida erinevate kriteeriumite alusel, kuid levinuim on liigitamine arengustaadiumi järgi. Eristatakse madalsood, siirdesood ja kõrgsood ehk raba. Rühmitamise alustalaks on soode toitelisus, mis sõltub olulisel määral turbalasundi tüsedusest. Madalsood on minerotroofsed ehk saavad oma vee põhja- ja sademeteveest. Taimede juured ulatuvad mineraalmulda, mistõttu on madalsoo liigirikkus mitmekesine. Siirdesood on miksotroofsed ehk lisaks minerotroofsetele kooslustele esineb ka taimerühmi, mille juured ei ulatu mineraalmulda ja mille peamine toiteallikas on sademevesi. Soode kõrgeim arengustaadium on raba, mis toitub ainult sademeveest ehk on toiterežiimilt ombotroofne. (Paal, Leibak 2013) Kolme faasi võrdluses suureneb turbalasundi tüsedus ja väheneb taimekoosluste liigirikkus raba suunas.

Eesti territooriumist ligikaudu neljandiku moodustavad soostunud alad, mille tekke eelduseks on suhteliselt väikeste kõrgusvahedega pinnamood. Esimesed soomaastikud tekkisid peale viimast jääaega umbes 10 000 aastat tagasi, kuid soostike kiirem ja laiahaardelisem areng algas umbes 8500–8000 aastat tagasi. Valdav osa siinseid soomuldasiid on tekkinud arumaalise soostumise tulemusena. (Hang, Kalm 2014)

1.3.2.1. Maismaaline ehk telmaatiline soostumine

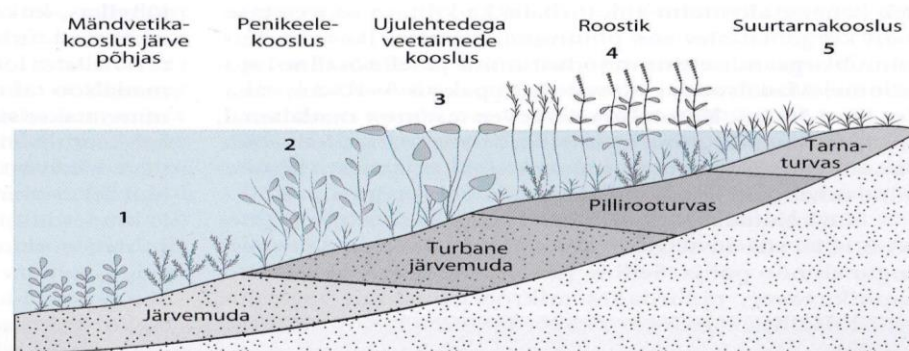
Mineraalmaa soostumise eelduseks on kindlad ja püsivad keskkonnatingimused. Protsess nõuab pinnase vettpidavat iseloomu või kõrget pinnasevee ehk ülemise põhjaveekihi taset. Alaline ehk pidev liigniiskus saab üldjuhul tekkida vee halva läbilaskvusega pinnasele.

(Raukas 1995; Hang, Kalm 2014) Halvasti filtreerivad vett raske lõimisega savirikkad mullad, mille osakestevaheline side on tugev ja poorsus väike (Astover jt. 2012). Telmaatilisest soo areng võib alguse saada ka reljeefi negatiivsetest punktidest, näiteks lohkudest, orgudest ja nõgudest, kus põhjavesi võib ulatuda maapinnale üsna lähedale. Sealsed taimekooslused võivad püsiva liigniiskuse korral hävineda ning kasvukeskkond muutuda sobilikuks madalsoo koosluse. Viimasel juhul võib soostumine toimuda ka koreselisel ja vett hästi läbilaskvatel pinnastel. (Raukas 1995; Hang, Kalm 2014)

Telmaatiline soostumine on Eesti aladel laiemalt levinud kui limniline ehk veekogu kinnikasvamisest tingitud soostumine. Arvatavasti on ligikaudu 2/3 Eesti soodest tekkinud just maismaalistes tingimustes. (Raukas 1995; Hang, Kalm 2014)

1.3.2.2. Järveline ehk limniline soostumine

Teine oluline soostumise viis on veekogu kinnikasvamine ehk mültumine. Hääbumine võib alguse saada veekogu põhja ladestunud orgaanilistest setetest, mis akumulatsioonides tihenevad ning moodustavad sapropeeli ehk järvemuda. Järve vabavee madaldudes on moodustunud mudalasund sobivaks kasvukohaks mitmetele taimekooslustele (vt. joonis 3). Täheldatud on järvede kinnikasvamise hoogustumist perioodidel, mil temperatuur on kõrge, aurumine suur ning veetase langustrendis. Tugevate tuulte eest varjatud kallastega järvedel saab kinnikasvamine toimuda ka kalda piirilt alguse saava õõtskamariga kaanetumisel. Sagedane on seisuveekogu mültumine üheaegselt põhjast taimeestiku vohamise ja kaldalt kaanetumise teel. (Raukas 1995; Hang, Kalm 2014)



Joonis 3. Suktsessioonirida järve kinnikasvamisel. (Hang, Kalm 2014)

Suktsessioonireala lõppfaasile ning järve kadumisele maastikust järgneb minerotroofne ehk rohketoitelise soo arenguetapp, mida iseloomustavad erinevad madalsoo kooslused. Kaltsiumivaeste järvede soostumisel võib esineda ka limnotelmaatilist kontakt ehk soosetete

vahetut ladestumist järvesetetele. Eestis esineb sellist nähtust näiteks Ugandi ja Kesk-Eesti lavamaal ning Pärnu madalikul. (Raukas 1995)

Eestis algas kiirem ja intensiivsem järvede kinnikasvamine umbes 6500 aastat tagasi ning kolmandik Eesti soodest on limnogeenset päritolu (Hang, Kalm 2014). Sagedaseim on limniline soostumine olnud Lääne-Eesti madalikul ja läänesaartel, mis on maakerke tulemusena peale viimast jääaega Läänemere vete alt vabanenud. Lisaks leiab sellist soostumist ka Põhja- ja Kirde-Eestist ning Otepää, Haanja ja Karula kõrgustike aladelt. (Raukas 1995)

1.4. Klinge seadus

Telmatoloogia on teadusharu, mis keskendub soo geneesile, arengule ja kõigile muudele selle eksistentsiga seotud eripäradele. Teadusharu kompleksse tervikuna kujunes välja suhteliselt hiljuti, olles eelnevalt tugevalt seotud geoloogia, bioloogia ja füüsilise geograafiaga. Tänapäevase telmatoloogia arengusse ja baasteadmistesse on palju panustanud ka mitmed Tartu Ülikooli teadlased, näiteks geograaf ja looduskompleksi mõiste rajaja Eduard Markus (Kull jt. 2019), geoloog ja palünoloog Paul William Thompson ja botaanik Johannes Christoph Klinge. (Masing 1975)

Johannes Christoph Klinge (1851–1902) oli botaanik ja florist-süstemaatik. Ta sündis Tartus ning alustas 21-aastaselt õpinguid Tartu Ülikooli füüsika-matemaatika teaduskonnas, hiljem omandas ta sealsamas loodusteaduste doktorikraadi. Õpingutega paralleelselt töötas Klinge taimeteaduse alal, olles esmalt direktori abiline Tartu ja mõne aasta pärast osakonnajuhataja Peterburi botaanikaaias. Venemaal hakkas ta lugema ka telmatoloogiaalast loengukursust, mille järel sai telmatoloogia sooteaduste kontekstis rahvusvaheliseks mõisteks (Valk 1988). Aastal 1894 ilmus Klingelt saksakeelne teos „Revision der Orchis cordigera Fries und orchis angustifolia Rchb“, milles käsitleti veekogude kinnikasvamist ja sellele järgnevat soomaastiku arengut. Kahe Eesti järve, Saadjärve ja Kirikumäe järve näitel väitis autor, et järvede kinnikasvamine on seotud valitsevate tuulte suunaga. Kirjanduses sai Klinge hüpotees tuntuks Klinge seadusena. (Masing 1975)

1.4.1. Kirikumäe järv

Kirikumäe järv asub Võru maakonna kaguosas, Kirikumäe maastikukaitsealal, jäädes Haanja kõrgustiku keskossa (vt. joonis 4). Tüpoloogialt on järv semidüstroofne, mistõttu on vesi suure humiinainete sisalduse tõttu pruunikas ja vähese läbipaistvusega. Järve veepeegli pindala on 62 hektarit, absoluutne kõrgus ligikaudu 183 meetrit ja keskmine sügavus 2,8 meetrit. Järve

kaldajoone keerukus ja liigestatus on madal. (Laarmaa jt. 2019) Kirikumäe järv, ühes edelas asuva Pedejä järvega, on alles jäänud kunagisest suurema ulatusega jääpaisjärvest. Teise ilmasõja eel kaevati kanal Pedetsi jõkke ja alandati seeläbi järve veetaset. Veekogu kaldad on lausjad, põhi tasane ja suures osas mudane. (Eesti NSV Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituut 1968)

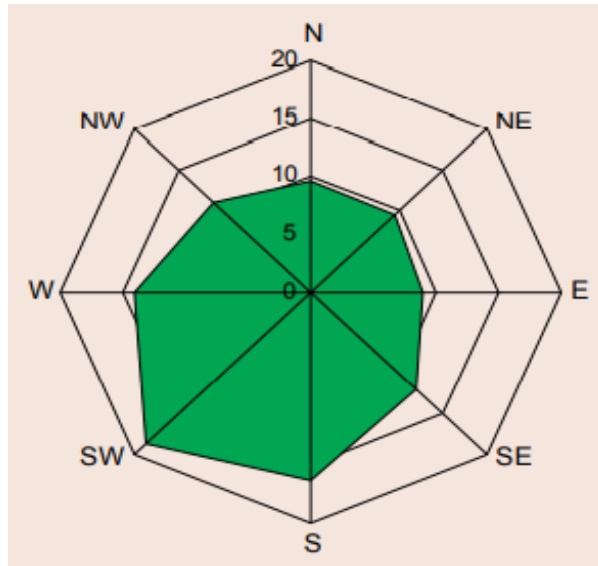


Joonis 4. Kirikumäe järv Eesti põhikaardil. (Maa-ameti geoportaali kaardirakendus 2021)

Kirikumäe järve üldseisundit on hinnatud mitmetel aastatel väikejärvede seisundi ja hüdrobioloogia seirete raames. Aastal 2019 ilmus Keskkonnaametilt uuring Kirikumäe järve valgala reostuskoormuse kohta, mis käsitles põhjalikult kõiki järve veekvaliteeti mõjutavaid tegureid. Eelnevatel perioodidel oli veekogu seisund hinnatud kesiseks, kuid 2017. aastaks oli olukord paranenud ning seisund hinnati „heaks“. Järve suurtaimestikku on jälgitud alates 1952. aastast, seejuures tuvastasid viimased seireandmed järves 30 liiki, millest kaldavees elavad moodustasid ligi 75% kõigist täheldatutest. Makrofüütide arvukuse osas on tähelepanuväärsed erinevused soisema lääne ja lõuna ning teisele poole jääva mineraalsema maapinna vahel. (Vreimann, Kupits 2019)

1.4.2. Klinge seaduse kehtivuse eeldused Eestis

Klinge seadusele tuginedes algab järvede kinnikasvamine nende tuulealusest küljest ning on otseselt seotud piirkonnas domineerivate tuultega. Territooriumil valdavad tuuled on tihedalt seotud gradientjõust ja maa pöörlemisest tulenevast Coriolisi jõust mõjutatud õhu liikumissuundadega atmosfääris. Kolme- ja kuuekümnendate laiuskraadide vahel, kus asub ka Eesti, domineerivad lääne-, edela- ja lõunakaaretuuled. (Vt. joonis 5) (Jaagus, Frey 2014; Tarand jt. 2013)



Joonis 5. Neljateistkümne jaama andmetel arvatud Eesti keskmine aastane tuuleroos. Vaatlusandmed pärinevad perioodist 1966–2010. (Tarand jt. 2013)

2. Maakatte muutuste ja reljeefi kaugseire

Keskonna kaugseire on valdkond, mille abil on võimalik tuvastada ja jälgida maapinnal toimuvaid protsesse ja muutuseid. Kaugseire rakenduse laienemine ja kvaliteedi tõus on toimunud koos kosmosetehnoloogia teadusvaldkondade ning tehniliste lahenduste kiire arenguga. (Eesti kaugseire koduleheküljel külastatud 29.04.2021) Kaugseire põhilisteks objektideks on maismaa- ja veepind ning atmosfäär, kus vaatenurk on ülevalt alla ning informatsiooni maapinna ja sellel asuvate objektide kohta hangitakse vahetu kontaktita aluspinnalt peegeldunud või selle poolt kiiratud elektromagnetkiirguse abil. Passiivse kaugseire korral on elektromagnetkiirguse allikaks naturaalne kiirgus, pärinedes peamiselt Päikeselt ja aluspinnalt endalt. Aktiivses kaugseires genereerib mõõteriist kiirgusenergia tehislikult. Maakatte tuvastamisel on olulised multispektraalsed skannerid, mis on võimelised samaaegselt pildistama erinevates filtriga eraldatud lainepikkuse vahemikes. Erinevate materjalidega seotud ainulaadsed peegeldusspektrid aitavad tuvastada ja peegeldunud lainepikkuse abil klassifitseerida erinevaid maakattetüüpe. Multispektraalne analüüs ning automatiseeritud tulemuste võrdlus võimaldab saada kiire, kuid täpse ülevaate toimunud muutustest. Piltide lai katvus, suur korduspildistamise sagedus ning kättesaadavus loob head eeldused maakattes toimunud muutuste, ruumilise jaotuse ja pikaajaliste trendide jälgimiseks. (Peterson 2020)

2.1. Veekogude kaugseire

Kaugseire üheks objektiks võivad olla veekogud - järved, jõed ja ookean ning nende veekvaliteedi ja morfoomeetriliste muutuste seiramine. Veekogude kaugseires leiab rakendust peamiselt elektromagnetilise kiirgusspektri nähtav piirkond, mis jääb lainepikkuste vahemikku 0,4–0,7 mikromeetrit (Eesti kaugseire koduleheküljel külastatud 29.04.2021; Tartu observatooriumi koduleheküljel 2021), kuid veekvaliteedi ja -taimede seireks rakendatakse ka punast ja lähis-infrapunast piirkonda. Bioloogiliste ja füüsiliste parameetrite leidmisel on oluline arvestada ka atmosfääri mõjudega (Peterson 2020). Mitmed järvede arengule ja suksessioonile keskendunud uuringud on leidnud seoseid järve veetaseme ja -kvaliteedi, põhjasetete, makrofüütide osakaalu, nende lagunemise ning terrestrialiseerumise vahel (Kirschner *et al.* 2001; Karpińska-Kołodziejczyk *et al.* 2016). Kaugseire alla võime liigitada ka lennukitelt ja teistelt õhusõidukitelt registreeritud hetkeolukorra aerofotode näol. Hilisema järeltöötamise ja moonutuste eemaldamise väljundiks on ortofotod, mille mosaiikimisel on võimalik saada suure katvusega fotovälju ja -kaarte.

Hiina järvederohke Jangtse tasandiku veekogude vee kvaliteedi ja hõljumi tuvastamiseks on kasutatud skannerite MERIS ehk *Medium Resolution Imaging Spectrometer* ja OLCI ehk *Ocean and Land Color Instrument* satelliitpilte. Tulemuse paremaks kvaliteediks kasutati ka piirkonna meteoroloogilisi andmeid ja üksikuid *in-situ* mõõtmisi. Vetikate õitsengu tuvastamiseks kasutati klorofüllilise spektraalindeksit, mis põhines lähis-infrapunasel ja punasel kanalil ning klorofüllilise sisalduse kahe kanali kombineerimisel. (Guan *et al.* 2020) Mitmete Hiina madalaveeliste järvede seiramil on avaldunud tendents järve terrestrialiseerumisele juhul, kui makrofüütide osakaal järves on suur ning lagunemisprotsess aeglane (Zhang *et al.* 2016). Leidub ka väga globaalseid uuringuid, mis on fokuseeritud sisevete dünaamikale pikema perioodi jooksul, kuid nende nõrgaks kohaks on satelliitpiltide väike ruumiline lahutus ja muutuste esinemine segupikslites (Pickens *et al.* 2020).

Ka Eesti teadlased on juba 2016. aastast teinud esimesi katseid kaugseire meetodil veekvaliteedi tuvastamiseks (Toming jt. 2016). Kaugseiret on rakendatud Koiva vesikonda kuuluvate väikejärvede kohtseire planeerimisel (Sipelgas jt. 2018), Ülemiste järve klorofüllilise sisalduse kirjeldamiseks (Kangro jt. 2018) ja ka teistes veeteemalistes uuringutes, mida kajastab Eesti kaugseire artiklikogumik. Märkimisväärseks võib pidada Võrtsjärve makrofüütide leviku dünaamika seiramist NDVI ehk *normalized difference vegetation index* abil, kus on täheldatud rannarostike pindala suurenemist ning seda peamiselt järve loodeosas (Peterson, Liira 2018; Liira jt. 2010).

2.2. Reljeefi modelleerimine

Digitaalne kõrgusmudel ehk DEM kujutab endast kolmedimensioonilist mudelit, kus lisaks pikkus- ja laiuskraadile on lisatud ka vertikaalne telg ehk kõrgus. Reljeefi kõrguspunkte on võimalik leida nii aerolaserskaneerimise kui ka satelliitmõõdistatud punktivilvede teel. Maa-ameti kõrgusmudelite koostamisel on rakendatud ALS ehk aerolaserskaneerimise meetodit alates 2008. aastast. Maapinna ebatasasuste tuvastamiseks mõõdetakse aega, mis kulub mõõtmisriista poolt genereeritud laserkiirel reljeefipunktilt tagasi põrkumiseks. Oluline on mõõdistamise ajahetkel teada instrumendi täpset koordinaatidega määratud asukohta, asendit, laserkiirete nähtenurka ja valitsevat atmosfääri seisundit. Kõrgusandmete täpsust võivad mõõdistamisel moonutada diskreetsed vead, mis on põhjustatud taimkatte ja maapinna ühtesulamisest, ja klassifitseerimise vead, mis tekivad sisendalgoritmi suutmatusest reageerida järskudele ekstreemsustele reljeefis. Absoluutsed kõrguslikud vead ja plaaniline täpsus on mõjutatud mõõdistuslennu kõrgusest, lennumasina asukoha määrangu täpsusest ning

kõrguspunktide paiknemisest mõõteriista suhtes. Kõige parem kõrguslik täpsus saavutatakse stabiilsetes atmosfääri tingimustes ja pildistamisel nadiir sihis. (Maa-ameti geoportaal 2021) Kõrge lahutusvõimega kõrgusmudelid on oluliseks sisendiks üldisele maastikuanalüüsile ja hüdroloogilistele modelleerimistele.

Kõrgusandmed on üheks oluliseks sisendiks ka üleujutusohklikute piirkonnadade kaardistamiseks ja riskide ennetamiseks, kus digitaalne maapinna kõrgusmudel aitab piiritleda vesikondi ja valgalasid. Olulisteks komponentideks on piirkonna topograafiline liigestus, reljeefi kaldenurk ja suund, muldade infiltratsiooni tegur ja geoloogiline ehitus, mis mõjutab otseselt pinnavee voolu ja põhjavett. (Bouzahar *et al.* 2018) Ka Eestis üleujutusvalade kaardirakendus on üldandmetena kasutanud LiDAR ehk *Light Detection And Ranging* admestikku (Maa-ameti geoportaal 2020).

3. Metoodika ja andmed

3.1. Järvede paiknemise tuvastamine nõos ja metoodika valik

Uurides kirjandust ja varasemaid järvenõgude tuvastamise katseid selgus, et rohkete detailide, keeruliste nüansside ja suure töömahu tõttu ei ole nende rakendamine käesolevas uurimistöös otstarbekas. Nõo tuvastamiseks tuli autoril vastavad indikaatorid, nende rakendamise perspektiivikad võimalused ja metoodika ise välja töötada. Vajadusi rahuldava lähenemisviisi leidmine osutus katsetuslikuks ning lõplik valik tugines tulemuste ja reaalsuse loogiliste seoste hindamisel ja kontrollil.

Veekogu nõo kindlaks tegemisel on otstarbekas analüüsida ümbritseva reljeefi iseloomu, selle muutlikkuse kiirust ja suunda, eeldades, et süvis on ümbritsevast maastikust suhteliselt madalama kõrguse ja väiksema nõlvakaldega negatiivne vorm. Lisaks on varasemad uuringud näidanud, et veekogu vabavee madaldumise ja intensiivse settimise tulemusena kujunevad kõrge orgaanika sisaldusega setendid – soomullad, mille kontaktne esinemine tänapäevase veepeegli on indikaatoriks limnilisele soostumisele. Laiapõhisem setendite määramine ilma mahukate välitöödeta on võimalik vaid mullastiku kaardi kameraalsel analüüsil. Autor üritas arendada ka automatiseeritud lahendusi ulatuslikema setendite osakaalude leidmiseks, näiteks rannajoone sektoritesse jagamist, kuid metoodika töökindlus näis tagatud olevat vaid väga madala rannajoone keerukusega järvedel. Hästi liigendatud veekogude puhul võis kujuneda olukord, kus hinnang välja- ja/või sissesopistusele võis kallutada hinnangut üldisele pildile. Kaaluti ka ajalooliste fotoplaanide ja -kaartide võrdlust nüüdisaegse olukorraga, tuvastamaks toimunud muutuseid vee ja maismaa piiril, kuid plaanide ebahühtlane ja kohati vähene ajaline katvus, piiratud andmed kõigi järvede kohta ning kvaliteet ei võimaldanud täiendavat analüüsi. Eelnevalt esitatud lahendustest osutus kõige sobivamaks visuaalne ja kartograafiline analüüs mullastiku kaardi näol. Valitud metoodika on küll suuresti manuaalne ja põhineb autori subjektiivsel hinnangul, kuid osutus kõige ratsionaalsemaks ja tulemuslikumaks. Tulemuste toetamiseks ja uute vaadete leidmiseks kasutati ka poolautomatiseeritud reljeefi analüüsi maapinna kõrgusmudelilt järvenõgude tuvastamise teel.

3.2. Mullakaardi visuaalne analüüs

Visuaalse analüüsi teostamiseks sorteeriti mullastiku kaardilt šifri alusel välja soosetted, milleks on madalsoo-, siirdesoo- ja rabamullad. Hilistekkeliste rannikujärvedede ümbruse

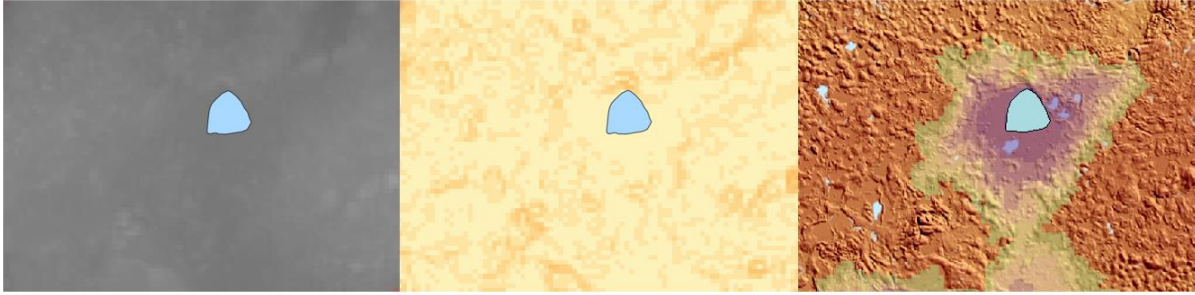
iseloomustamiseks lisati ranniku turvastunud mullad ja gleimullad, mis paiknevad peamiselt kinnikasvanud lahesoppides. Tervikliku pildi saamiseks kasutati kahte abikihti: täielik mullastiku kaart aitab tuvastada teisi järve ümbrusele iseloomulikke muldi, määramata väljad sisaldasid peaausjalikult asustust ja veealasi. Andmete töötlemiseks ja hilisemaks eritluseks kasutati vabavaralist QGIS tarkvara.

Seejärel viidi läbi soosetete ja rannikumuldade visuaalne kontentanalüüs järve tänapäevase veepeegli suhtes. Soostumise suuna määramisel tehti esmalt kindlaks vastavate muldade esinemine ja seejärel kaldad, millel on visuaalselt eristatav suurem muldade osakaal. Lihtsamaks klassifitseerimiseks moodustati eelnevalt võimalikud situatsioonid muldade paiknemise osas ja iga uue võimaluse tuvastamisel lisati ka see. Lõpuks kujunes välja üksteist võimalikku varianti - põhi- ja vaheilmakaared, veepeegli paiknemine vastavate muldade keskel, piklik ehk orulaadne paiknemine ja setete üldine puudumine või mittemärkimisväärne osakaal. Iga järve ja sealset situatsiooni vaadeldi eraldi ning autori subjektiivne hinnang märgiti MS Exceli tabelisse, mille põhjal tehti hilisemad järeldused. Vigade minimeerimiseks teostati analüüs kolmel erineval üksteisest sõltumatu korral ja lõpptulemuse moodustab kõigi tabelite ühtne süntees (vt. lisa 1).

3.3. Järve nõo modelleerimine

Järve nõo tuvastamiseks genereeriti maapinna kõrgusmudelit DEM nõlvakallete raster, mis oli sisendiks maksumusliku kauguse arvutustele (ingl *Cost Distance*). Maksumuslik kaugus leiti järve veepeegli suhtes ja selle tööpõhimõte seisneb kõige väiksema vaevaga läbitava teekonna leidmisel. Praegusel juhul on sisendiks nõlvakallete raster, kus igale pikslile on omistatud vastav väärtus, suuremate nõlvakallete korral aeg piksli läbimiseks suureneb ning kiirus pidurdub. Uurimistöö läbiviimiseks vajalikud tööriistad olid leitavad tarkvarast ArcGIS, mistõttu kasutas autor oma tööprotsessis just seda. (Vt. joonis 6)

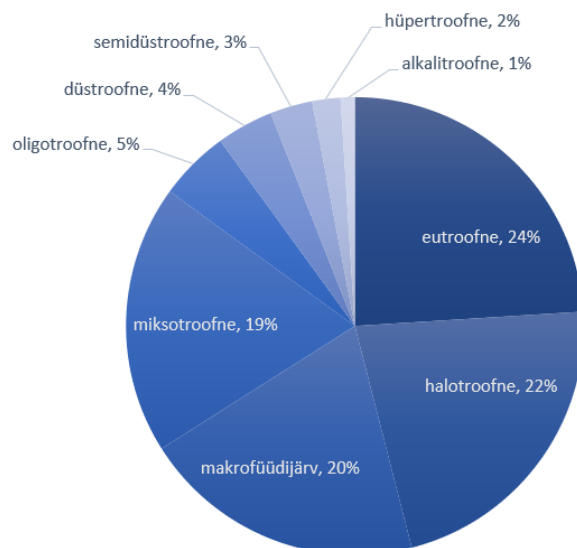
Järve tõenäosusliku nõo kuju ja paiknemise tuvastamiseks kasutati sarnaselt mullakaardi kontentanalüüsile visuaalset hinnangut iga järve kohta eraldi. Tulemused märgiti MS Exceli tabelisse (vt. lisa 2), võrreldi muldade paiknemisega ja tehti vastavad järeldused.



Joonis 6. Järvenõgude modelleerimise sisendid ja väljundid Kirikumäe järve näitel. Paremalt vasakule DEM 100 m, nõlvakallete raster ja maksimumslik kaugus järve veepeeglist.

3.4. Kasutatud andmed

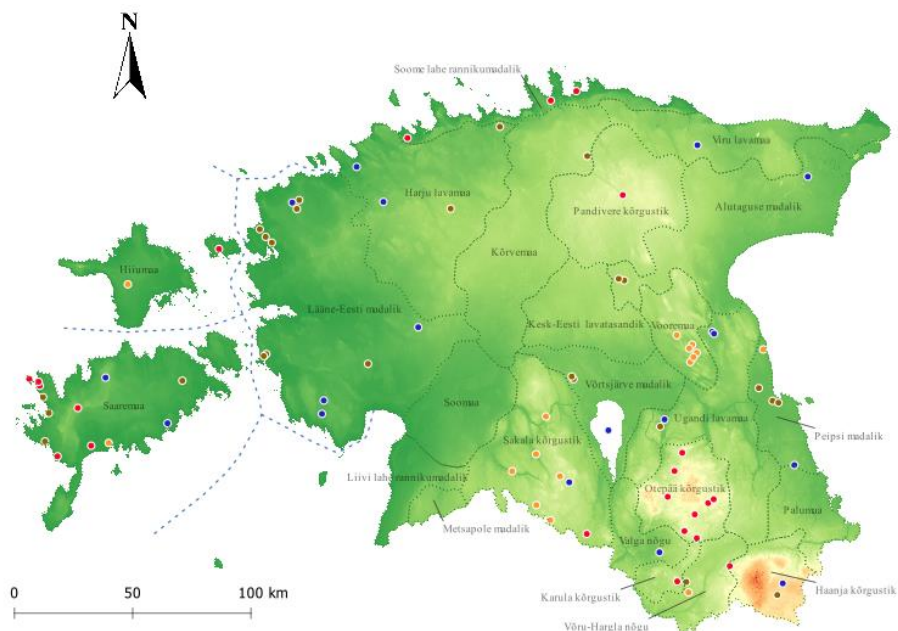
Käesoleva uurimistöö valimi moodustavad sada pindalalt suurimat ja täielikult Eesti territooriumile jäävat looduslikku seisuveekogu. Sajast järvest koosneva valimi koostamine on tingitud autori isiklikust soovist ja tulemuste analüüsiga seotud töömahust. Järvede nimekiri ja pindalaline järjestus moodustati Eesti topograafia andmekogu 1:25 000 üldistatud topoandmete alusel. Eesti ja mõne naaberrigi piirile jäävate suurimate veekogude, näiteks Peipsi-Pihkva järve, Pabra järve ja Murati järve, valimist välja jätmine on tingitud asjakohaste andmete puudumisest piiritaguste alade kohta või nende kättesaamatusest autorile. Enne lõpliku nimekirja moodustamist veenduti, et valim ei sisaldaks järve nime taha peidetud settebasseine, paisjärvi, veehoidlaid, turbatiike ega -auke. Mullakaardi visuaalse analüüsi teostamiseks kasutati Eesti geoportaali ruumiandmete allalaetavat mullastiku kaarti mõõtkavas 1:10 000 ja järvenõgude modelleerimise sisendiks kogu Eesti DEM GeoTIFF-i eraldusvõimega 100 m.



Joonis 8. Järvede jaotus limnoloogiliste tüüpide vahel.

4.2. Mullakaardi visuaalne analüüs

Visuaalse kontentanalüüsi tulemusel selgus, et viiendikul valimisse kuulunud järvedest ei esine soosetteid või pole nende märkimisväärset osakaalu välja kujunenud. Selliste järvede paiknemine ei sõltu maastikurajoonilisest asukohast – neid leidub võrdsel määral nii kõrgustikel kui ka lavamaadel ning madalikel. Kuueteistkümnel protsendil järvedest on muldade paiknemine orulaadne, olles väljavenitatud pikisuunas. Pooled sellistest järvedest asuvad Vooremaal, kus madalloomullad on kujunenud loode-kagu suunaliste vagumuste otstesse. Lisaks tuli väljavenitatud soosetete esinemine välja Sakala kõrgustiku ürgoru järvedes ja teistes piklikes reljeefi süvendites. Seitsmeteistkümnel protsendil järvedest on turvasmullad veepeegli ümber jaotunud ühtlaselt, mõningatel juhtudel esines suurem muldade osakaal erinevates ilmakaartes, kuid selget seaduspära ei ilmnenud. Soosetete keskel asuvad peamiselt rabajärved, mis paiknevad madalikel ja lavamaadel. Lisaks ilmnes, et enam kui 20% valimisse kuulunud järvedest esines tugevam soostunud muldade osakaal lõuna-, lääne- või edelakaldal ning koguni 18 järvel kõigil eelnimetatud kallastel. Siinkohal tuleb märkida, et selliste veekogude puhul esines tugevamat muldade osakaalu ka teistesse ilmakaartesse, peamiselt põhja, loode ja/või kagu suunda, jäävatel kallastel. Klinge seadusele justkui vastavate veekogude territoriaalsel paiknemisel selgelt korrapära ei esine (vt. joonis 9). Kõige vähem soosetteid asus järvede ida- ja kirdekallastel, vastavalt 6% ja 4% uuritud järvedest. (Vt. tabel 1)



Joonis 9. Sinisega on märgitud järved, millel esineb soo- või rannikumuldade lõuna-, lääne- ja idakaldal. Punasega muldade puudumine või vähene osakaal, oranžiga orulaadne ja pruuniga ümbritsev muldade paiknemine.

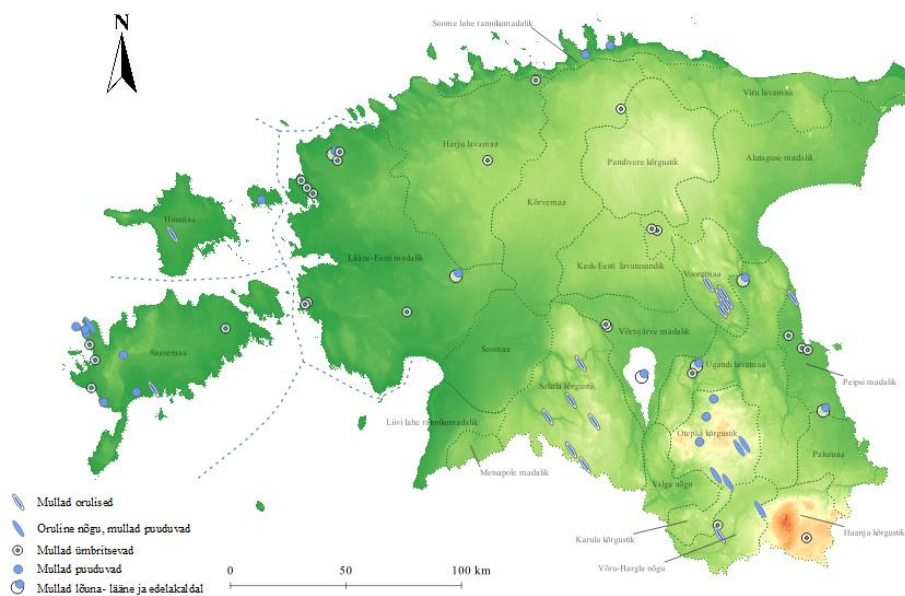
Tabel 1. Soo- ja rannikumuldade paiknemine veepeegli suhtes. Sinine piirkond indikeerib veepeeglit ja valge muldi.

												-
Soo	17	9	6	21	22	21	9	12	4	16	21	
Ranniku	8	2	2	2	1	2	3	4	2	0	1	

Eraldi fenomeni moodustasid rannikualade jäänukjärved Saaremaa rannikualadel, Noarootsi ja Virtsu poolsaarel. Sellistele järvedele ei ole omased mitte soosetted, vaid rannikumullad ja sooldunud rannikumullad. Vastavate muldade esinemise osas ei ole välja kujunenud visuaalselt tajutavaid seaduspärasid. Tihti oli kujunenud olukord, kus järv oli soosetetega ühtlaselt ümbritsetud.

4.3. Järve nõos paiknemise ja mullakaardi analüüsi võrdlus

Järve nõo modelleerimise tulemusel selgus, et üldiselt on täheldatav tendents suuremate ja ulatuslikematele nõgudele madalikel ja lavamaadel ning minimaalsetele kõrgustikel. Väiksemas nõos asuvad järved aga kasutavad ära suure osa nõo potentsiaalset ja mõningal juhul täidavad selle täielikult. Mullakaardi kontentanalüüsi ja veekogu nõos paiknemise võrdlusel selgus, et 54% järvedel kattub setete suurem osatähtsus ja nõo täitumine täielikult. (Vt. tabel 2) Peamiselt on tegemist nõo keskel paiknevate järvedega, mille kaldajoon on enamasti ümbritsetud madal- ja siirdesoo või rannikumuldadega. Ülejäänutel sellise veepeegli ja nõo vahekorraga järvedel on muldade orientatsioon kaootilisem. Setendeid leidub võrdselt pea igas ilmakaares, kuid siiski on paaril suuremal ja tasasema pinnamoega ümbritsetud järvel täheldatav setete jõulisem osakaal lõuna-, lääne- ja/või edelakaldal. Sellise järvede territoriaalses jaotuses selgelt välja kujunenud mustreid ei esine. Lisaks selgus, et nõo keskel asub ka palju väikejärvi, mis on hõivanud olulise osa süvise mõõtmetest ja vastavaid muldi ei ole arenenud. (Vt. joonis 10) Lääne-Saaremaa relikvtjärvedel, mis on tõusvate rannavallidega rannikust eemaldunud, ei esine märkimisväärselt soosetteid ega rannikumuldi.

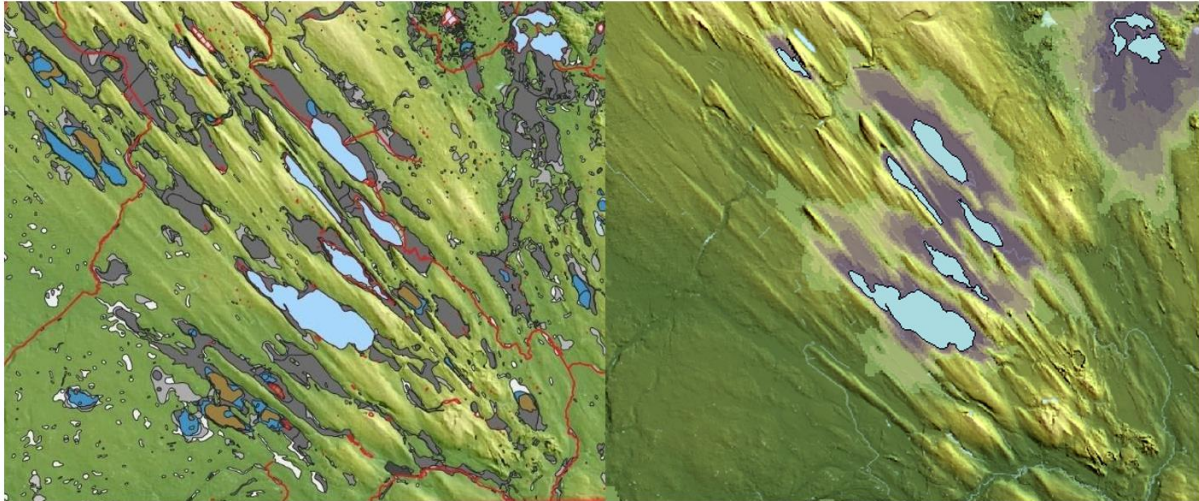


Joonis 10. Oruliste ja nõo keskel olevate järvede jaotus ja muldade paiknemine.

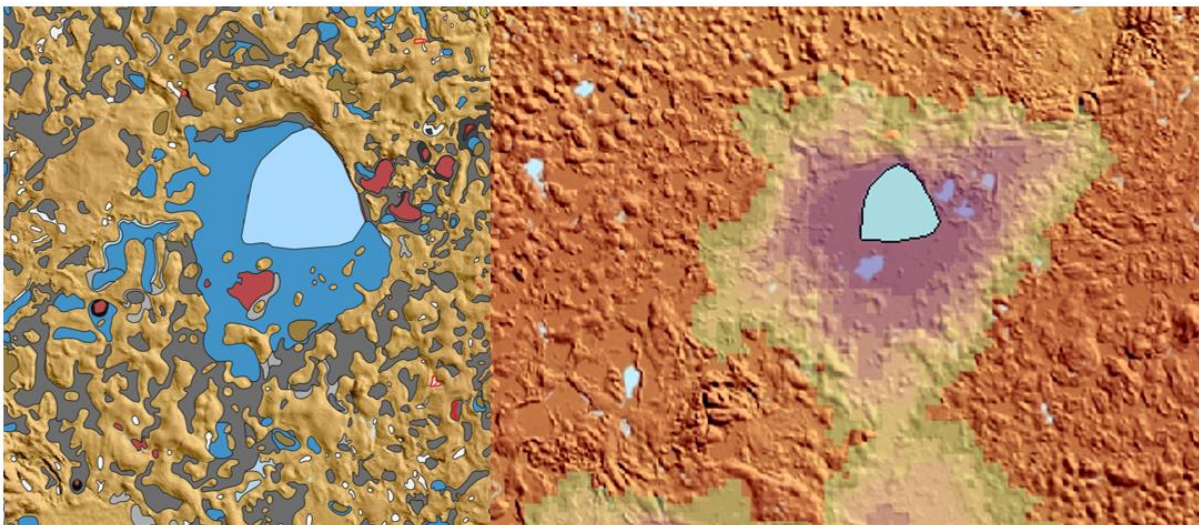
Tabel 2. Nõo asend veepeegli suhtes ja mullastiku kaardi analüüsiga kattuvate järvede arv.

Nõo asend	54	8	6	17	17	16	10	9	2	22	
Kattuvus	25	5	3	14	14	13	7	5	2	16	

Soosetete piklik ja väljavenitatud esinemine indikeerib ürgorge ja teisi reljeefi negatiivseid vagumusi (vt. joonis 11). Mitmed orulised järved seevastu täidavad nõo täielikult ning seetõttu ei ole soomuldasi välja kujunenud. Muldade puudumise tendents ilmnes kõigil veekogudel, mis kasutasid täielikult ära nõo potentsiaali. Üldiselt oli märgatav, et suures jaos matkis muldade osakaal reljeefi. Näiteks veekogudel, mille nõgu asub veepeegli suhtes lõunas, läänes ja edelas, esines suure tõenäosusega ka neis suundades märkimisväärsemat soostumist (vt. joonis 12).



Joonis 11. Soosetete oruline paiknemine ja nõgu Vooremaa järvede näitel. Vasakul mullakaart soosetetega, kus hallides toonides on madalsoo, sinistes siirdesoo ja pruunides rabamullad. Punane viirutus tähistab määramata välju. Paremäl oru modelleerimise väljund.



Joonis 12. Mullastiku kaardi (vasakul) ja reljeefi nõo (paremal) paiknemine Kirikumäe järve näitel. Mullakaardi hallides toonides on madalsoo, sinistes siirdesoo ja pruunides rabamullad. Punane viirutus tähistab määramata välju. Paremäl nõo modelleerimise tulemus.

Rannikuäärsetel jäänukjärvedel oli tähedatav tendents asuda nõo keskel, olla muldadega ühtlaselt ümbritsetud ja omada selget nõo suunitlust merele. Näiteks Noarootsi poolsaare tippu ja mandriosa ühendav negatiivne kagu-loode suunaline madalik, mis on nõoks mitmetele jäänukjärvedele, märgib maakerke tulemusel Noarootsi saare ühinemist mandriga.

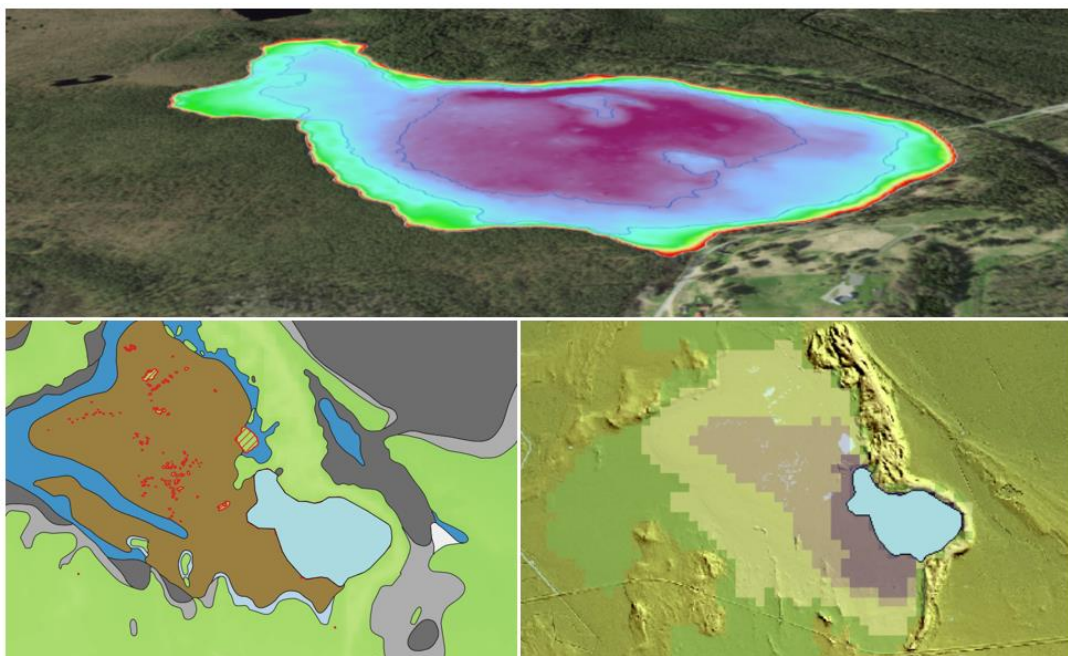
Tuli ette ka olukordi, kus kaks või enamat järve paiknesid ühes nõos. Ennekõike oli tegemist relikvjärvedega või ulatuslikes rabamassiivides paiknevate rabajärvedega. Paaril juhul oli kunagisest suurjärvest sisse- või väljavoolu süvendamise ja veetaseme alandamise tulemusel moodustunud kaks või enam tänaseks eraldiseisvat järve.

5. Arutelu

Mullakaardi visuaalse analüüsi tulemusel selgus, et soosetted ja rannikumullad on omased ligi 80% uuritud järvedest. Rannikumullad ja sooldunud rannikumullad on iseloomulikud saartel ja tõusval rannikualal paiknevatele jäänukjärvedele, orgaanikarikkad soomullad pigem sisemaaliste veekogudele. Kui hilistekkelised reliktjärved on rannikumuldadega ühtlaselt ümbritsetud, siis soosetete jaotumine järve veepeegli suhtes on fragmentaarsem. Reljeefi modelleerimine aitas tuvastada potentsiaalseid nõgusid ning võrdlus mullakaardiga andis ettekujutuse reljeefi iseloomust ja muutlikusest. Terve nõo potentsiaali hõlmavatel veekogudel ei ole tavaliselt vastavad mullad välja kujunenud või ei ole nende osakaal märkimisväärne. Üsna sageli on veekogu kujunenud ka ürgorgu või muusse reljeefi vagumusse. Lisaks on märgatav muldade suurem osatähtsus kas lõuna-, lääne- või edelakaldal, kuid see ei välista nende samaväärset esinemist ka teistel kallastel. Kaheksateistkümmel järvel, mille soosetted paiknesid kõigil kolmel kaldal, esines suurem soostumine veel põhja, loode ja/või kagu suunal. Erinevate meetodite võrdlemisel võime väita, et täielikult Klinge seadusele vastavad ainult Kirikumäe järv, mille baasil on tähelepanek tehtud, Uljaste järv, Korijärv ja Ruila järv. Uljaste järv on semidüstroofne järv Viru lavamaal. Veepeegli pindala on 62 ha ja keskmine sügavus 2,2 m (Laarmaa jt. 2019). Korijärv on Valga nõos asuv loode-kagu suunaline hüpertroofne järv. Selle veepeegli pindala on 36 hektarit ja keskmine sügavus 3,5 meetrit, kaldad on madalad ning põhi liudjas (Eesti NSV Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituut 1968). Ruila on makrofüüdijärv ja asub Harju lavamaal. Järvele on iseloomulik väga tüse sapoleeri lasund põhjas, mis kohati võib küündida kuni kahe meetrini. Järve kiirem soostumine algas 90ndate alguses, mil veetaset alandati 1,5 meetri võrra. (Eesti NSV Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituut 1968) Pelgalt mullakaardianalüüsile tuginedes võime seadusele vastavaks pidada ka nõo keskel paiknevat Veskijärve.

Järvede hääbumise olulisteks mõjutajateks võib pidada veetaseme langust ja morfomeetrilisi omadusi, mis suunavad edasisi protsesse. Saame võrrelda 2019. aasta Eesti väikejärvede batümeetrilise seire tulemusi käesolevasse töösse hõlmatud järvedega. (Vt. lisa 3) Tehtud järeldused ei ole üldistatavad, kuid annavad ülevaate üksikute järvede morfomeetriast ja suundumustest. Ähijärvel ja Pühajärvel on veetase peale ulatuslikuma veekogu taandumist või väljavoolu süvendamist oluliselt langenud, kuid ometi esineb soostumist vähesel määral vaid üksikutes soppides. Madalikel ja tasastel aladel paiknevate järvede puhul, nagu Tõhela järv, Endla järv ja Uljaste järv (vt. joonis 13), on teada varasemate ja ulatuslikemate veekogude

eksisteerimist, mis on jääserva taganedes kadunud. Suur-Endla järv, mis on tänase Endla järve eellaseks, ulatus kaugemale loodesse ja kagusse. Jääajajärgselt kasvas see soostumise tagajärjel kinni ning jäänukina säilis Endla järv, mille veepeegli pindala on omakorda vähenenud veetaseme langetamise ja madalamate alade kuivale jäämise tõttu. Tõhela järve areng on analoogne Ermistuga, kus järvemuda ladestumise tulemusel jagunes laguun kaheks ja moodustas kaks eraldiseisvat järve, hiljem on veetasel alandatud mitmel korral. Järve põhi on kesk-, lääne- ja lõunaosas kaetud tiheda mudalasundiga, idas on domineeriv liiv. Uljaste järve puhul on teada, et peale jääpaisjärve taandumist on järv nihkunud pisut ida poole. Järve põhi on madalam lõuna-, lääne-, edela- ja kagukaldal ning põhi on tugevalt mudastunud. Vallseljaku kohal on kaldad järsud. (Eesti NSV Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituut 1968) Viimase paarituhande aasta jooksul merest eraldunud jäänukjärved, näiteks Suurlaht, on üldiselt väga madalad, alid kuivamisele ja kinnikasvamisele (Laarmaa jt. 2019). Selliste järvede süvise kuju ja muldade paiknemine on üldjoontes seotud kunagise mereühendusega. Eelnevalt esitatud näidete põhjal võime eeldada, et järve morfomeetrilised näitajad nagu pindala, veemaht, sügavus, nõo kuju ja kaldajoone omadused, on olulisteks faktoriteks määramaks veekogus toimuvaid protsesse, sealhulgas settimist, madaldumist ja hääbumist.



Joonis 13. Üleval 2019. aasta Eesti väikejärvede batümeetrilise seire käigus kaardistatud Uljaste järv (Vandel jt. 2019). All vasakul mullakaart, kus hallides toonides on välja toodud madalsoo, sinistes siirdesoo ja pruunides rabamullad. Paremäl järve nõo modelleerimise väljund.

Soo- või rannikumuldade märkimisväärsem osakaal on enamjaolt kujunenud kallastele, kus veesamba kõrgus on väike ning kallas lauskjas. Voorte vahel ja ürgorgudes paiknevad järved jälgivad üldjuhul reljeefi piklikku profiili ning hakkavad kinni kasvama veekogu otstest, kus veetase on madalam. Nõo keskmes ja tasasemal pinnal paiknevad järved on enam avatud välistele mõjuritele. Näiteks on suuremad järved avatud tuultele, mistõttu tekkiv järvelainetus avaldab survet tuulepealsele kaldavööndile. Intensiivse veesegunemise tulemusel muutuvad sealsed tingimused nii settimiseks kui ka taimekasvuks ebastabiilseteks. Küll aga ei tundu tuulte mõju kinnikasvamise suuna määramisel Eesti suurimate järvede näitel kõige kaalukamana.

Klinge seaduse ainsaks eelduseks on püsivad tuuled, milleks Eestis on lõuna-, lääne- ja idakaare tuuled. Ajalooliselt võivad aga piirkonnale iseloomulikud tuulemuustrid olla ümber kujunenud. Näiteks on ühe Alutaguse kriivade tekke teooria kohaselt tegemist tuuletekkeliste pinnavormidega. Nimelt liikus mandriliustikul tekkinud külm ja raske õhk mööda liustiku serva alla ning kõrbelistes tingimustes tekkinud mandriluited on tõendusmaterjaliks peamiselt loodesuunalistele õhuvooludele. (Pae jt. 2010)

Käesolevas töös rakendatud meetodika oli suures osas manuaalne, subjektiivne ja ajamahukas, kuid ülevaatliku tulemuse ja järelduste jaoks piisav. Mullakaardi analüüsi keerukus ja erapoolik tõlgendamine on tingitud järvede erinevast geograafilisest asukohast, veepeegli kujust ja rannajoone keerukusest. Automatiseeritud meetodika väljatöötamine peaks endas hõlmama vastavate algoritmide loomist, mis suudaksid tuvastada muldade suurema osakaalu sõltumatult järve rannajoone keerukusest, sopistuste iseloomust ja hulgast.

Järvede morfomeetria ja nõgude täiendav uurimine on omaette uurimisteema, mis on oma töömahult suur. Edasises uurimises on võimalik rakendada ka kaugseire pakutavaid võimalusi, tuvastamaks veepeegli ulatuses ja rannajoones toimunud muutuseid. Analüüsi täpsuse tagavad piisavalt pikad ja järjepidavad aegread, sobilik ruumiline lahutus ja hea pildikvaliteet. Asjakohaseks sisendiks edasistesse uuringutesse oleks ka järvede batümeetriline seire.

Kokkuvõte

1984. aastal avaldas florist-süstemaatik Johannes Christoph Klinge saksakeelse teose „Revision der Orchis cordigera Fries und orchis angustifolia Rchb“, milles täheldas, et järvede kinnikasvamine saab alguse nende tuulealusest küljest. Edasises kirjanduses on väidet esitletud Klinge seadusena, mille põhjal peaks Eesti järvede kinnikasvamine alguse saama lõuna-, lääne ja edelakaldalt.

Käesoleva bakalaureusetöö eemärk oli kontrollida Klinge seaduse paikapidavust Eesti järvede näitel ning tuvastada ka teisi järvede kinnikasvamisele iseloomulikke ruumilisi mustreid ja tendentse. Valimi moodustasid sada suurimat loodusliku tekkega seisuveekogu, mis paiknesid täielikult Eesti territooriumil.

Visuaalse mullakaardi kontentanalüüsi tulemusel selgus, et 80% valimisse kuulunud järvedest esinesid soo- või rannikumullad. Ülejäänud järvedel ei olnud vastavaid muldi välja kujunenud või ei olnud nende osakaal märkimisväärne. Orulaadne muldade struktuur tuli välja ürgorgudes ja teistes pinnamoe vagumustes paiknevatel järvedel. Levinud oli ka olukord, kus vastavad mullad olid välja kujunenud järve lõuna-, lääne- või kirdekaldal ning 16 järvel kõigil neil kallastel. Selliste järvede paiknemisel ruumilisi mustreid ei esinenud. Teise vaate andmiseks rakendati nõo modelleerimist, mille tulemusi võrreldi mullakaardi analüüsiga ning milles selgus, et 54% järvedest kattus muldade suurem osakaal ja nõgu täielikult. Üldiselt oli märgatav tendents, et mullad olid orienteeritud nõoga samasse suunda.

Tulemuste põhjal võime järeldada, et täielikult vastavad Klinge seadusele vaid üksikud järved ning nendegi jaotuses ei ole märgata olulisi seoseid. Järvede kinnikasvamise suuna määramisel võivad olulisimad olla järve morfomeetrilised mõõtmed ja nõo kuju. Järve kinnikasvamine saab üldjuhul alguse kõige madalamast ja lauskjamast kaldast.

Klinge's Law on the Example of Estonian Lakes

Tiia-Linda Purge

Summary

This last glacial period and retreat of the continental ice, which covered most of the Northern-Europe, shaped the landscape of Estonia significantly, leaving behind depositional landforms like eskers, kames and erosional landforms, for instance valleys. The resulting unevenness of the terrain created good conditions for the formation of small lakes. About 1,200 local lakes are geographically unevenly distributed, generally small and low.

In essence, lakes are temporary landforms that fill up with sediments, which leads to shallowing and overgrowth. Sediment deposition is a natural process but increased anthropopressure on the environment many processes that take place in lakes have accelerated. The main risk factor due to human influence is eutrophication, where the water body becomes progressively enriched with minerals and nutrients. Small and shallow lakes are the most threatened with degradation. The extinction of the lakes is followed by a multi-stage swamping process.

The florist-systematist Johannes Christoph Klinge (1851–1902) published “Revision der *Orchis cordigera* Fries und *orchis angustifolia* Rchb” in 1894, where he claimed, that the overgrowth of lakes begins from their downwind side. The aim of the Bachelor Thesis was to check the validity of the Klinge’s law on the example of Estonian lakes and to find other spatial patterns and factors of lake extinction.

This paper is based on one hundred largest natural standing water bodies, which areas were calculated and order was set based on generalized Estonian topographic data. After this a visual content analysis of the soil map was performed, in which the patterns of bog and coastal soils in relation to the water mirror were identified and subjective opinion was noted in the MS Excel spreadsheet. The results were evaluated and analyzed. To identify the lake basin, the slope raster was generated based on a 100 m ground elevation model, which was input to cost distance calculations. Eventually both methods were analyzed and compared after which final conclusions were made.

Comparing the different methods, we can state that Lake Kirikumäe, Lake Uljaste, Lake Korijärv and Lake Ruila fully comply with Klinge's law. Based on soil map analysis alone, we can also consider Veskijärv, which is located in the middle of the basin, to be in compliance with the law. The study did not reveal significant relationship between the overgrowth of the

lakes and the direction of the prevailing winds. More important factors seemed to be morphometry, dimensions and shape of the basin.

Tänuavaldused

Huvitava teema soovitus ja asjakohaste kommentaaride eest soovin tänada Taavi Paed. Töö metoodika ülesehituse, igakülgse abi ja pühendatud aja eest tänan Raivo Aunapit.

Kirjanduse loetelu

- Arold, I. (2005). *Eesti maastikud*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Astover, A., Roosalu, H., Reintam, E., Leedu, E., Kõlli, R. (2012). *Mullateadus: õpik kõrgkoolidele*. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Bauer, I. E. (2004). Modelling Effects of Litter Quality and Environment on Peat Accumulation over Different Time-Scales. *Journal of Ecology*, 92(4), 661–674. doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00905.x
- Bouzahar, F. hassainia, Ouerdachi, L., Keblouti, M., Seddiki, A. (2018). The contribution of remote sensing in hydraulics and hydrology, analysis and evaluation of digital terrain model for flood risk mapping. *Journal of Water and Land Development*, 39(1), 17–26. doi: 10.2478/jwld-2018-0055
- Eesti NSV Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituut. (1968). *Eesti järved*. Tallinn: Valgus.
- Guan, Q., Feng, L., Hou, X., Schurgers, G., Zheng, Y., Tang, J. (2020). Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze Plain of China derived from MERIS and OLCI observations. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111890. doi: 10.1016/j.rse.2020.111890
- Hang, T., Kalm, V. (2014). Maapinnamood ja seda kujundavad tegurid. Ü.Mander, Ü. Liiber (toim.), *Üldmaateadus. Õpik kõrgkoolidele* (143-230). Tartu: Eesti Loodusfoto.
- Hatvani, I. G., de Barros, V. D., Tanos, P., Kovács, J., Székely Kovács, I., Clement, A. (2020). Spatiotemporal changes and drivers of trophic status over three decades in the largest shallow lake in Central Europe, Lake Balaton. *Ecological Engineering*, 151, 105861. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105861
- Jaagus, J., Frey, J. (2014). Atmosfäär. Ü. Mander, Ü. Liiber (toim.), *Üldmaateadus. Õpik kõrgkoolidele* (231-308). Tartu: Eesti Loodusfoto.
- Järvekül, A. (1994). *Eesti jõgede ja järvede seisund ning kaitse*. Tallinn: Teaduste Akadeemia.
- Kangro, K., Allikas, K., Panksep, K. (2018). Madala eutroofse järve klorofüllisisalduse määramiseks sobivad algoritmid Sentinel-3/OLCI andmete alusel Ülemiste järve näitel. U. Peterson, T. Lillemets (toim.), *Kaugseire Eestis 2018* (lk 51–58). Tõravere: Tartu Ülikooli Tartu observatoorium.

- Karpińska-Kołaczek, M., Stachowicz-Rybka, R., Obidowicz, A., Woszczyk, M., Kołaczek, P. (2016). A lake-bog succession vs. Climate changes from 13,300 to 5900cal. BP in NE Poland in the light of palaeobotanical and geochemical proxies. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 233, 199–215. doi: 10.1016/j.revpalbo.2016.06.001
- Kirschner, A. K. T., Riegl, B., Velimirov, B. (2001). Degradation of Emergent and Submerged Macrophytes in an Oxbow Lake of an Embanked Backwater System: Implications for the Terrestrialization Process. *International Review of Hydrobiology*, 86(4–5), 555–571. doi: 10.1002/1522-2632(200107)86:4/5<555::AID-IROH555>3.0.CO;2-9
- Kivistik, A. (2012). Rahutu looderannik muudab pidevalt oma ilmet. *Eesti Loodus*, 1, 18–23. <https://www.digar.ee/viewer/et/nlib-digar:341415/298668/page/18>
- Kołaczek, P., Niska, M., Mirosław-Grabowska, J., Gałka, M. (2016). Periodic lake-peatland shifts under the Eemian and Early Weichselian climate changes in Central Europe on the basis of multi-proxy studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 461, 29–43. doi: 10.1016/j.palaeo.2016.08.002
- Kull, K., Laanisto, L., Pärtel, M. (2019). Noppeid biogeograafia ajaloost Eestis. L. Laanistu, I. Hiiesalu, M. Öpik, A. Vanatoa, O. Tinn, K.Kull (toim.), *Schola biotheoretica* (lk 130–131). Taru: Sulemees.
- Kõiv, T., Ott, I. (2011). Sissejuhatus järveteaduste alustesse ja järvede tervendamisesse. Tartu: Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi limnoloogiakeskus.
- Laarmaa, R., Ott, I., Timm, H., Maileht, K., Sepp, M., Mäemets, H., Palm, A., Krause., Saar, K. (2019). *Eesti järved*. Tallinn: Varrak.
- Lawniczak-Malińska, A., Ptak, M., Celewicz, S., Choiński, A. (2018). Impact of Lake Morphology and Shallowing on the Rate of Overgrowth in Hard-Water Eutrophic Lakes. *Water*, 10(12), 1827. doi: 10.3390/w10121827
- Liira, J., Feldmann, T., Mäemets, H., Peterson, U. (2010). Two decades of macrophyte expansion on the shores of a large shallow northern temperate lake—A retrospective series of satellite images. *Aquatic Botany*, 93, 207–215. doi: 10.1016/j.aquabot.2010.08.001
- Masing, V. (1975). Sooteaduste arendajad Tartu Ülikoolis 19. saj. lõpul ja 20.saj. 30-ndail aastail. T. Ilomets, V. Kalinin, Ü. Lumiste, P. Prüller, K. Siilivask, T. Sutt, H.Trass (toim.), *Tartu Ülikooli ajaloo küsimusi II* (lk 164–175). Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus
- Mäemets, A. (1977). *Eesti NSV järved ja nende kaitse*. Tallinn: Valgus.

- Mäemets, A. (1989). *Matk Eesti järvedele* (neljas trükk). Tallinn: Eesti Raamat.
- Ott, I. (2010). Pinnavee seisundi hindamine, võrdlusveekogumid ja pinnavee seisundi klassipiirid bioloogiliste kvaliteedielementide järgi. Rannu: Eesti Maaülikool Põllumajandus- ja Keskkonnainstituudi Limnoloogiakeskus.
- Ott, I. (2019). Eesti järvede seisundist ja tervendamisvajadustest. *RMK Looduskaitsekonverents*. Pärnu, 4. november. Tartu: Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi hüdrobioloogia ja kalanduse õppetool.
- Ott, I., Kõiv, T. (1999). *Eesti väikejärvede eripära ja muutused. Estonian small lakes: Special features and changes*. Tallinn: Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus.
- Paal, J., Leibak, E. (2013). *Eesti soode seisund ja kaitstus*. Tartu: Regio AS.
- Pae, T., Roose, A., Aasa, A. (2010). Alutaguse kriivad: kas tuulest tehtud? *Eesti Loodus*, 4, 20-23. <https://www.digar.ee/viewer/et/nlib-digar:341362/298620/page/22>
- Peterson, U. (2020). *Kaugseire*. Loengukonspekt. Külastatud 29.04.2021. <https://owncloud.ut.ee/owncloud/index.php/s/izSfez9HeoTd9Je?path=%2FAegade%20jooksul%20peetud%20loengute%20slaidid%202019#pdfviewer>
- Peterson, U., Liira, J. (2018). Eesti ja Euroopa järvede kaldaveetaimestiku, põhiliselt rannaroostike dünaamika Landsati piltide aegreas. U. Peterson, T. Lillemets (toim.), *Kaugseire Eestis 2018* (lk 121–136). Tõravere: Tartu Ülikooli Tartu observatoorium.
- Pickens, A. H., Hansen, M. C., Hancher, M., Stehman, S. V., Tyukavina, A., Potapov, P., Marroquin, B., ja Sherani, Z. (2020). Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 243, 111792. doi: 10.1016/j.rse.2020.111792
- Raukas, A. (1995). *Eesti Loodus*. Tallinn: Valgus.
- Sipelgas, L., Arikas, A., Auväärt, K., Altoja, K. (2018). Kaugseire kui abivahend väikejärvede kohtseire planeerimisel Koiva vesikonna väikejärvede näitel. U. Peterson, T. Lillemets (toim.), *Kaugseire Eestis 2018* (lk 23–30). Tõravere: Tartu Ülikooli Tartu observatoorium.
- Skowron, R., Jaworski, T. (2017). Changes in lake area as a consequence of plant overgrowth in the South Baltic Lakelands (Northern Poland). *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 12(1), 19–30. doi: 10.1515/bgeo-2017-0002
- Tamre, R. (2006). Eesti järvede nimestik. Looduslikud ja tehisjärved. Tallinn: Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus.

- Tarand, A., Jaagus, J., Kallis, A. (2013). *Eesti kliima minevikus ja tänapäeval*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., Nõges, T. (2016). First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing*, 8(8), 640. doi: 10.3390/rs8080640
- Tuvikene, L., Sammalkorpi, I., Kreitsberg, R., Soo, K., Tuvikene, A. (2014). Järvede haldamine vesikondade veemajanduskavade raames. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Valk, U. (2005). *Eesti rabad. Ökoloogilis-metsanduslik uurimus*. Tartu: Halo Kirjastus.
- Valk, U. (1988). *Eesti sood*. Tallinn: Valgus.
- Vandel, E., Vaasma, T., Vainu, M., Terasmaa, J. (2019). Eesti väikejärvede batümeetiline seire 2019. Tallinn: Tallinna Ülikooli loodus- ja terviseteaduste instituudi ökoloogiakeskus.
- Vreimann, T., Kupits, K. (2019). Kirikumäe järve valgala reostuskoormuse uuring.
- Wheeler, B. D., Proctor, M. C. F. (2000). Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires. *Journal of Ecology*, 88, 187–203. doi: 10.1046/j.1365-2745.2000.00455.x
- Zhang, X., Wan, A., Wang, H., Zhu, L., Yin, J., Liu, Z., & Yu, D. (2016). The overgrowth of *Zizania latifolia* in a subtropical floodplain lake: Changes in its distribution and possible water level control measures. *Ecological Engineering*, 89, 114–120. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.01.069

Internetiallikad

- Eesti kaugseire kodulehekül. (i.a). Kaugseire. Külastatud 29.04.2021, <https://kaugseire.ee/kaugseirest>
- Keskkonnaagentuuri kodulehekül. (2018). Eesti järved, nende elustik ja elukooslused. Külastatud 07.04.2021, <https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesti-riikliku-bioloogilise-mitmekesisuse-teabevorgustiku-koduleht/okosusteenne-lahenemine/siseveed>
- Maa-ameti geoportaal. (2021). Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. Külastatud 01.05.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>

Maa-ameti geoportaal. (2020). Üleujutusohuga alade kaardirakenduse kirjeldus. Külastatud 02.05.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Kaardirakendused/Uleujutusohuga-alad/Uleujutusohuga-alade-kaardirakenduse-kirjeldus-p467.html>

Maa-ameti geoportaali kaardirakendus. (2021). Maainfo. Külastatud 14.04.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Kaardirakendused-p2.html>

Tartu observatooriumi kodulehekülg. (2021). Veekogude seire. Külastatud 30.04.2021, https://www.to.ee/est/teadus/uurimisvaldkonnad/kaugseire/veekogude_kaugseire

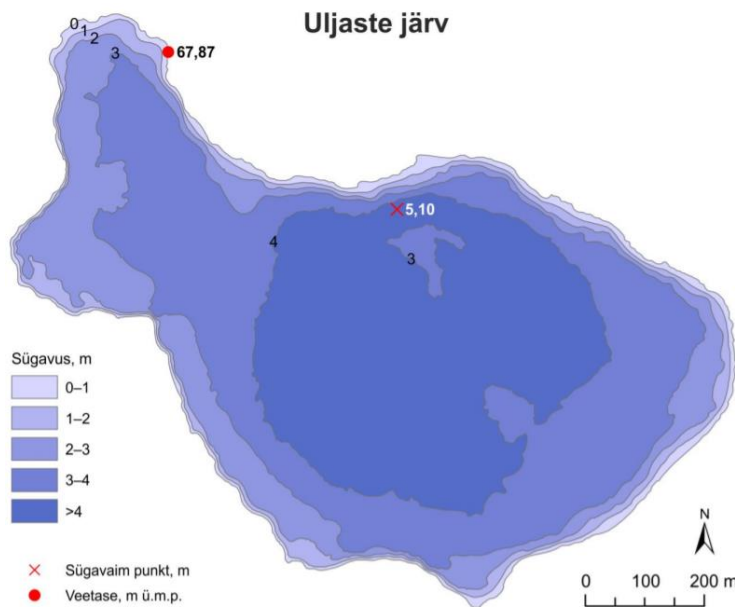
86	Süllaiaht	x						
87	Suur-Apja järv		x		x			x
88	Killatu järv							x
89	Prästvike							x
90	Saaremõisa laht	x						
91	Kahira järv							x
92	Sarapiku järv							x
93	Põdragu järv						x	
94	Porkuni järv							x
95	Vööla meri	x						
96	Ubajärv							x
97	Korijärv		x	x	x			
98	Parika järv	x						
99	Ruila järv		x	x	x		x	
100	Väinjärv		x			x		x

Lisa 2. Nõos paiknemise MS Exceli tabel

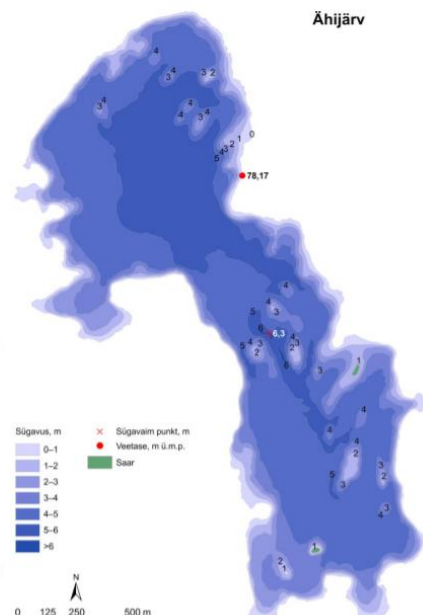
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

50	Ruhi järv									x	JAH	
51	Vägara laht	x										-
52	Karijärv	x									JAH	
53	Nõuni järv	x										-
54	Meelva järv	x										
55	Linnulaht									x	JAH	
56	Mõisalaht	x									JAH	
57	Tüandre järv									x	JAH	
58	Kasse laht	x									JAH	
59	Ohepalu järv	x									JAH	
60	Valgjärv		x		x			x				
61	Laialepa laht	x										-
62	Mäeküla järv					x			x		x	
63	Joksi järv										x	-
64	Pulli järv		x			x			x			
65	Uljaste järv					x	x	x				JAH
66	Kariste järv										x	JAH
67	Parika järv	x										JAH
68	Kirikumäe järv					x	x	x				JAH
69	Pikkjärv										x	JAH
70	Tihu järv										x	JAH
71	Hindaste järv	x										JAH
72	Lüllelaht	x										JAH
73	Lohjajärv	x										-
74	Suur Pehmejärv	x										JAH
75	Käsmu järv	x										-
76	Riksu laht	x										-
77	Järlepa järv	x										JAH
78	Naalelaht	x										JAH
79	Kisõjärv	x										JAH
80	Uhtjärv										x	-
81	Rummu järv	x										JAH
82	Piigandi järv										x	-
83	Valgjärv				x				x			-
84	Sinijärv	x										JAH
85	Suurjärv				x					x		-
86	Süllalaht	x										JAH
87	Suur-Apja järv		x			x			x		x	JAH
88	Killatu järv	x										-
89	Prästvike	x										-
90	Saaremõisa laht	x										JAH
91	Kahira järv										x	-
92	Sarapiku järv	x										-
93	Põdragu järv										x	-
94	Porkuni järv					x			x			-
95	Vööla meri	x										JAH
96	Ubajärv										x	JAH
97	Korijärv					x	x	x				JAH
98	Parika järv	x										JAH
99	Ruila järv					x	x	x				JAH
100	Väinjärv				x	x			x		x	JAH

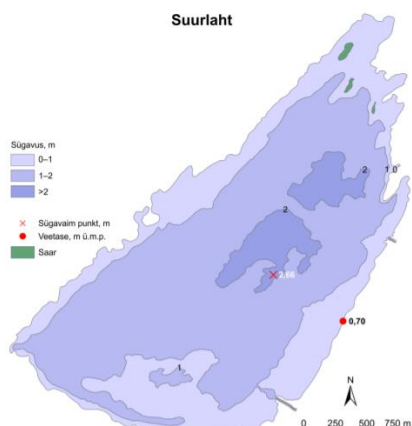
Lisa 3. Eesti väikejärvede batümeetriline seire 2019 tulemused



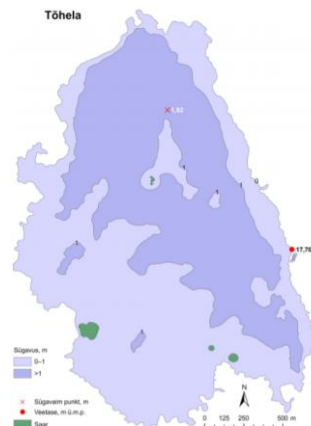
Joonis 3.2.2. Uljaste järve sügavuskaart veetaseme 67,87 m ü.m.p. juures.



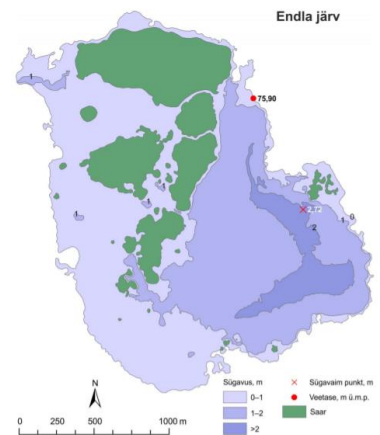
Joonis 3.4.2. Ähijärve sügavuskaart veetaseme 78,17 m ü.m.p. juures.



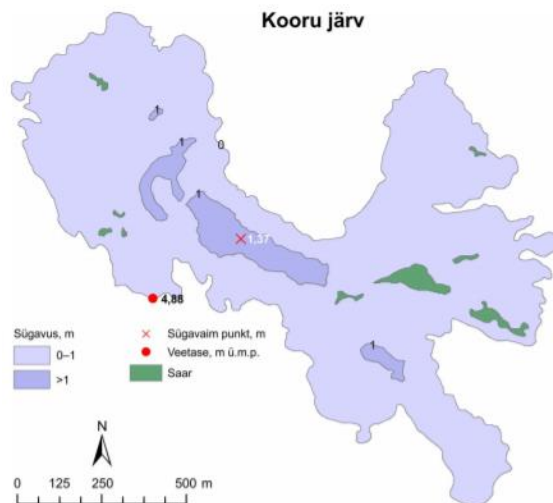
Joonis 3.9.2. Suurlahe sügavuskaart veetaseme 0,70 m ü.m.p. juures.



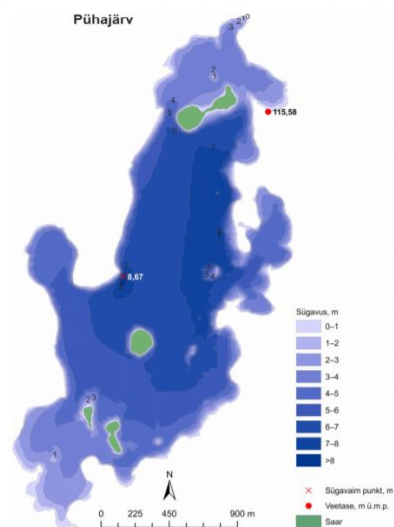
Joonis 3.7.2. Tõhela järve sügavuskaart veetaseme 17,70 m ü.m.p. juures.



Joonis 3.8.2. Endla järve sügavuskaart veetaseme 75,90 m ü.m.p. juures.



Joonis 3.10.2. Kooru järve sügavuskaart veetaseme 4,88 m ü.m.p. juures.



Joonis 3.6.2. Pühajärve sügavuskaart veetaseme 115,58 m ü.m.p. juures.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tiia-Linda Purge,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Klinge seadus Eesti järvede näitel**, mille juhendajadeks on Raivo Aunap ja Taavi Pae, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Tiia-Linda Purge

24.05.2021