Saadjärve seisundi, eutrofeerumise kujunemise ja looduslähedaste foonitingimuste väljaselgitamine põhjasetete paleolimnoloogiliste uuringute abil

Atko Heinsalu ja Tiiu Alliksaar

Tallinn 2007

SISUKORD

1. Sissejuhatus 3

2. Materjal ja metoodika 4

2.1. Järvesetete puurimismeetodid 4

2.2. Setete kronoloogilised meetodid 6

2.3. Setete füüsikalis-keemilise koostise määramismeetodid 8

2.4. Setete ränivetikate koostis 8

2.5. Keskkonnatingimuste modelleerimine 9

3. Tulemused 10

3.1. Saadjärve setete kirjeldus 10

3.2. Kronoloogia ja settimiskiirus 13

3.3. Setete füüsikalis-keemilised omadused 17

3.4. Setete ränivetikad ja järve areng 19

4. Kokkuvõte 23

5. Kasutatud kirjandus 24

1. SISSEJUHATUS

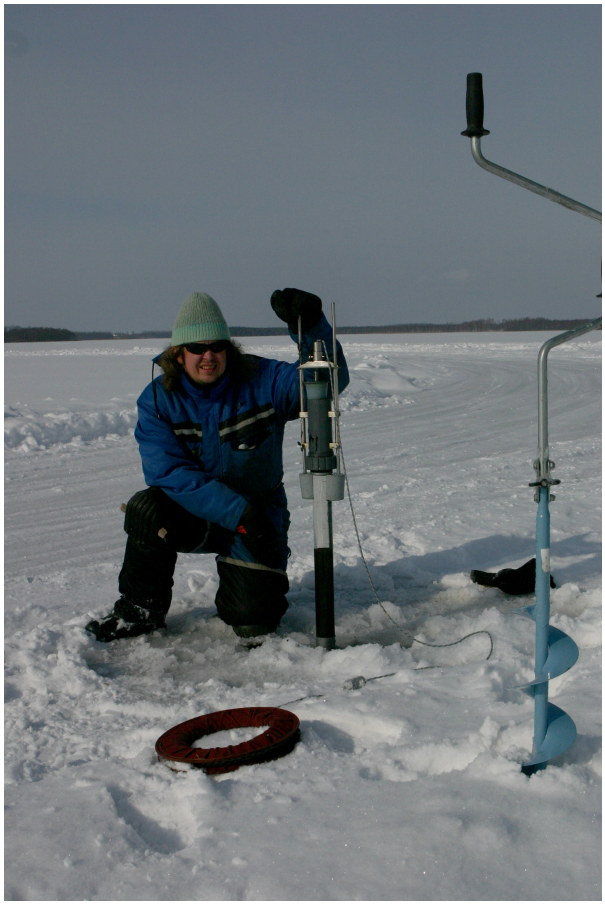
TTÜ Geoloogia Instituudi vanemteadurite Atko Heinsalu ja Tiiu Alliksaare poolt koostatud aruanne kajastab EMÜ Limnoloogiakeskuse poolt tellitud uuringu tulemusi. Projekti lähteülesandeks oli setteuuringute põhjal välja selgitada Saadjärve looduslähedased foonitingimused ning taastuletada lähiminevikus asetleidnud võimalikud veekvaliteedi muutused selles veekogus.

Järve "hea seisundi" määratlemiseks on vaja teada veekogu foonitingimusi, st looduslähedast intensiivsest inimmõjust veel puutumatu seisundit. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu veepoliitika raamdirektiiv (VRD) sätestab liikmesriikidele eesmärgi saavutada veekogude "hea seisund" hiljemalt aastaks 2015 ning VRD nõuete kohaselt on järvede seisundi määratlemise aluseks eri tüüpi veekogude nüüdisolukorra võrdlemine foonitingimustega, st looduslähedase intensiivsest inimmõjust veel puutumatu seisundiga (Directive…, 2000). Et Eesti järvede kohta olemasolevad instrumentaalsed andmeread nii kaugele minevikku, kui veekogud olid veel looduslähedases seisundis, ei ulatu, tuleb VRD kohaselt järvede foonitingimuste väljaselgitamiseks kasutada paleolimnoloogilistele setteuuringutele põhinevaid mudeluuringuid ja rekonstruktsioone (Heinsalu & Alliksaar, 2005). Paleolimnoloogia on teadusharu, mis uurib järvesetteid. Tänu setetes säiluvatele mikroskoopilistele organismidele või nende jäänustele ning sette keemilisele koostisele on järvesetted looduslikuks arhiiviks, kuhu on talletunud informatsioon nii limnoloogiliste, klimaatiliste ja inimtekkeliste protsesside kohta nii järves kui ka selle ümbruses. Paljudes Euroopa Liidu liikmesriikides, näiteks Suurbritannias (Bennion jt, 2004), Saksamaal (Schönfelder jt, 2002), Taanis (Bradshaw jt, 2002), Rootsis (Bradshaw & Anderson, 2001), Soomes (Miettinen jt, 2005; Räsänen jt, 2005) ja Eestis (Heinsalu jt, 2003) on järvede foonitingimuste väljaselgitamisel keskendutud just setete ränivetikate kooslustel põhinevatele rekonstruktsioonidele. Paleolimnoloogiliste uuringute tulemused on aluseks veekogu majandamise või tervendamise projekti edukaks koostamiseks.

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. JÄRVESETETE PUURIMISMEETODID

Saadjärve settematerjali kogumine toimus 2006**.** a kevadel jääkattelt kasutades erinevaid rahvusvaheliselt aktsepteeritud setteproovide võtmise seadmeid (Glew jt, 2001).



Joonis 1. Willneri proovivõtuseadmega Saadjärve pindmisi setteid puurimas.

Järvesetete pindmised kihid on üldjuhul püdelad ja väga suure veesisaldusega. Struktuurilt homogeense pindmise (kuni 50 cm paksuse) setteläbilõike võtmiseks kasutati nn Willneri proovivõtuseadet (joonis 1). Sette struktuuri ja kihilisuse paremaks selgitamiseks kasutati pindmise setteläbilõike saamiseks sügavkülmutuspuurimist (joonis 2). Selleks siirdati hermeetiline roostevabast terasest tahke süsinikdioksiidiga (temperatuur –79 °C) täidetud puurseade ettevaatlikult settesse ja seejärel lisati surverõhu

abil kuivjääle etanool. Järgneva poole tunni möödudes külmus puuri ümbritsev püdel järvemuda muutumata kujul koos rikkumata settestruktuuriga proovivõtuseadme välispinnale. Pindmiste setete all olevast enam konsolideerunud settest võeti setteläbilõiked turbapuuriga (joonis 3). Willneri proovivõtuseadmega kogutud setteläbilõiked tükeldati järvel 1 cm paksusteks settekihtideks ja pakiti kilekottidesse. Ülejäänud puursüdamikud, pakituna kilesse, toimetati puutumatult laborisse, kus nad enne proovide võtmist ja analüüsimist puhastati hoolikalt. Sügavkülmutatud puursüdamike sulamise vältimiseks transporditi nad laborisse kuivas jääs ja seejärel hoiti neid sügavkülmikus.

Joonis 2. Sügavkülmutuspuurimisel saadud setteläbilõige Saadjärvest.

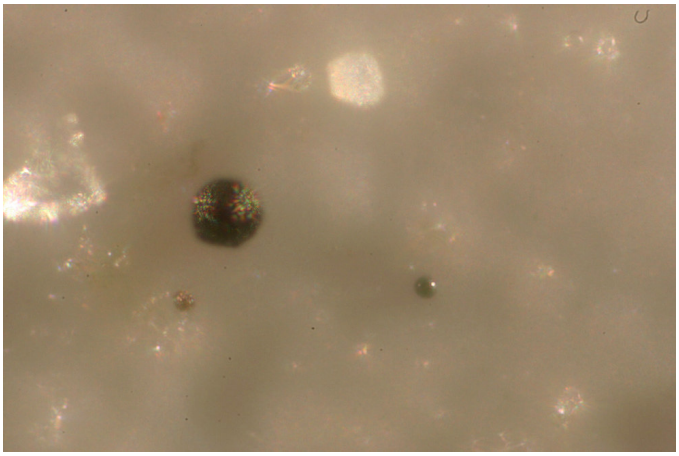
Joonis 3. Saadjärve sete turbapuuris.

2.2. SETETE KRONOLOOGILISED MEETODID

Setete vanuse täpne määramine on paleolimnoloogiliste uuringute väga oluline osa. Ilma setete täpse vanuseta me ei tea, millisel ajal uuritavad setted moodustusid, millisel ajalõigul settekihtides täheldatavad sündmused aset leidsid ning samuti pole võimalik võrrelda setteanalüüside tulemusi järvede instrumentaalsete veekvaliteedi mõõtmistulemustega. Enamlevinumad setete dateerimismeetodeid on ^{210}Pb analüüs, ^{137}Cs ning ^{241}Am markerkihtide analüüs, varvokronoloogia, radiosüsiniku dateeringud ja kaudse dateerimismeetodina lendtuhaosakeste jaotus setteläbilõigetes. Täpsema tulemuse saavutamiseks kasutatakse võimaluse korral samaaegselt mitmeid eri meetodeid.

Käesolevas uuringus pidime väikese eelarve tõttu leppima vaid lendtuhaosakeste jaotuskõvera kasutamisega setteläbilõike dateerimisel. See meetod on alles viimastel aastakümnetel leidnud kasutamist nüüdissetete korreleerimisel ja dateerimisel (Alliksaar, 2000). Lendtuhaosakesed (joonis 4) tekivad fossiilsete kütuste (kütteõli, kivisüsi, põlevkivi jne) põletamisel kõrgel temperatuuril (>1000 ºC), kas materjali sulamisel või mittetäielikul põlemisel. Need osakesed paisatakse suitsugaasidega atmosfääri ning tänu

oma mikroskoopilisele suurusele (1–100 μm) kanduvad küllaltki kaugele oma tekkekohast, lõpuks sadenevad maapinnale, sh ka järvedesse ning akumuleeruvad setetesse (Renberg & Wik, 1985).



Joonis 4. Lendtuhaosakesed mikroskoobi all.

On täheldatud, et lendtuhaosakeste jaotuskõveratel järvesetetes on iseloomulikud tunnused, mis on regiooniti või isegi globaalselt muutumatud. Tuhaosakeste jaotusprofiili võrdlemisel antud regiooni kütuste kasutamise ajalooga või atmosfääri emiteeritavate saasteainete statistikaga ilmnevad sarnased ajalised muutused – iseloomulikud tunnused tuhaosakeste kontsentratsiooniprofiilis kattuvad suurte muutustega kütuste tarbimises, mis võimaldab osakeste jaotust kasutada kaudse kronoloogilise meetodina (Alliksaar, 2000).

Lendtuhaosakeste analüüsiks töödeldi kuivatatud setteproove keemiliselt kasutades modifitseeritud Rose (1990) meetodit. Orgaanilise aine lagundamiseks kuumutati setteproove 8 tundi 32% H_2O_2 lahuses, karbonaatide lahustamiseks kasutati 3M HCl lahust ja biogeensete silikaatide lagundamiseks lisati proovidele 0,3M NaOH. Destilleeritud veega loputatud settejäägile lisati seejärel *Lycopodiumi* marker-spoore lendtuhaosakeste kontsentratsiooni arvutamiseks. Tuhaosakesed ja spoorid loendati valgusmikroskoobi all (Carl Zeiss Jenaval, 250-kordne suurendus). Lendtuhaosakeste sisaldus proovides on väljendatud osakeste arvuna kuiva sette grammi kohta.

2.3. SETETE FÜÜSIKALIS-KEEMILISE KOOSTISE MÄÄRAMIS-MEETODID

Saadjärve setteproovidest määrati sette veesisaldus, orgaanilise aine, karbonaatide ($CaCO_3$) ja mineraalaine sisaldus. Kõiki neid näitajaid kasutatakse paleolimnoloogias põhjasetete kvaliteedi hindamisel ning setete vanuse ja järvevee mineviku keskkonnaseisundi modelleerimisel. Nende näitajate määramiseks kasutati üldtunnustatud metoodikat (Bengtsson & Enell, 1986). Sette veesisalduse määramiseks kuivatati märjad setteproovid 105 ºC juures konstantse kaaluni. Orgaanilise aine sisalduse leidmiseks põletati kuivatatud setteproove muhvelahjus 550 °C juures 4 tundi ja karbonaatide leidmiseks 950 °C juures 2 tundi. Vastava kaalukao alusel arvutati nii orgaanilise kui ka karbonaatse aine protsentuaalne sisaldus sette kuivaines. Järve valglalt järve kantud mineraalaine (terrigeense aine) hulka proovides markeerib muhvelahjus põlemata jäänud aine kogus. Kuivatamata sette üldtihedus ja kuivaine tihedus arvutati vastavalt Håkanson & Jansson (1983) valemitele sette veesisalduse ja orgaanilise aine järgi.

2.4. SETETE RÄNIVETIKATE KOOSTIS

Saadjärve setete bioloogilise koostise määramiseks kasutati sette diatomeeanalüüsi. Ränivetikad ehk diatomeed (Bacillariophyceae) on mikroskoopilised liigirikkad vetikad, mille erinevate liikide koosluse määravad vastava veekogu keemilised ja füüsikalised tingimused. Ränivetikad paljunevad kiiresti ja reageerivad kiirelt vee koostise muutustele, reostusele, aga ka veekogu saastekoormusest toibumisele, mistõttu nende koosluste muutumist iseloomustab väga lühike viibeperiood.

Diatomeed on tundlikud indikaatorid veekogu toitainete sisalduse, pH ja temperatuuri muutuste suhtes, näitavad basseini veetasemete kõikumisi, ja kuna ränivetikate kest koosneb ränidioksiidist, siis säiluvad nad hästi põhjasetetes, võimaldades seetõttu rekonstrueerida veekogus toimunud keskkonna muutusi (Stoermer & Smol, 1999). Seetõttu on setete ränivetikaid järjest enam hakatud kasutama keskkonnauuringutes.

Ränivetikate analüüsil kasutati rahvusvahelistes teadusuuringutes väljakujunenud metoodikat (Battarbee jt, 2001). Orgaanilise aine eemaldamiseks töödeldi setteproove vesinikülihapendiga ning karbonaadid lagundati 10% HCl lahusega. Puhastatud proovilahusest tilgutati väike kogus mikroskoobi katteklaasile ja kuivatati. Mikroskoobi preparaadid kinnitati Naphrax vaiguga, misjärel igast proovist määrati ränivetikate liigiline koosseis ja loendati vähemalt 500 diatomeed (Carl Zeiss Axiolab mikroskoop, 1000-kordne suurendus, õli-immersioon, faasikontrast, apertuur – 1.30).

2.5. KESKKONNATINGIMUSTE MODELLEERIMINE

Diatomeede ja vee keemilise koostise vahelised modelleeritud seosed (seosfunktsioonid) on viimastel kümnenditel küllalt laialdast kasutamist leidnud keskkonnatingimuste rekonstrueerimisel, seda eriti vee kvaliteediprobleemide väljaselgitamisel (Hall & Smol, 1999). Nimetatud funktsioonid on arvutatud regionaalse kalibreerimisandmebaasi põhjal (Euroopa Diatomeeandmebaas – EDDI), mis koosneb sadade erinevate keskkonnatingimustega Euroopa järvede pinnasetete diatomeeandmestikust ning vastavate järvede veekeskkonna parameetrite andmetest (Battarbee jt, 2000). Andmebaasi põhjal on leitud matemaatilised funktsioonid tänapäevaste diatomeetaksonite esinemise ja jaotumise ning limnoloogiliste näitajate vahel. Neid matemaatilisi funktsioone kasutati ka käesolevas paleolimnoloogilises uuringus järve veekvaliteedi rekonstrueerimiseks ehk setteläbilõikes olevate ränivetikakoosluste alusel modelleeriti järve pinnavee üldfosfori sisalduse muutused minevikus, selgitati välja järve looduslähedased foonitingimused ning hinnati ka veekogu tänapäevast ökoloogilist seisundit. Setete ränivetikatest tuletatud järvevee üldfosfori sisalduse modelleerimisel rakendati Locally-Weighted Weighted Averaging (LWWA) regressiooni. Modelleerimisel kasutati tarkvara programmi ERNIE ja Euroopa Diatomee Andmebaasi andmeid.

Selgitamaks välja kui palju erinevad looduslähedastes foonitingimustes kujunenud ränivetikate kooslused inimtegevusest mõjutatud järve ränivetikate kooslustest võtsime kasutusele Bray-Curtise indeksi (Michelutti jt, 2001):

$$\delta_{jk} = 100 - (100 \times (1 - \sum_{i=1}^{p} |y_{ij} - y_{ik}| / (\sum_{i=1}^{p} (y_{ij} + y_{ik})$$

δ_{jk} = koosluse erinevus proovide *j* ja *k* vahel
y_{ij} = taksoni *i* ohtrus (%) proovis *j*
y_{ik} = taksoni *i* ohtrus (%) proovis *k*

Bray-Curtise indeksi väärtused kõiguvad vahemikus 0–100, kusjuures väärtus 0 näitab, et võrreldavad kooslused on täielikult identsed ja väärtus 100 näitab, et võrreldavad kooslused on täiesti erinevad. Bray-Curtise indeksi väärtused seoti järve kvaliteedi klassidega, kusjuures väärtused vahemikus 0–20 vastavad väga hea järve seisundile, 20–40 heale, 40–60 keskmisele, 60–80 halvale ja 80–100 väga halvale veekogu seisundile.

3. TULEMUSED

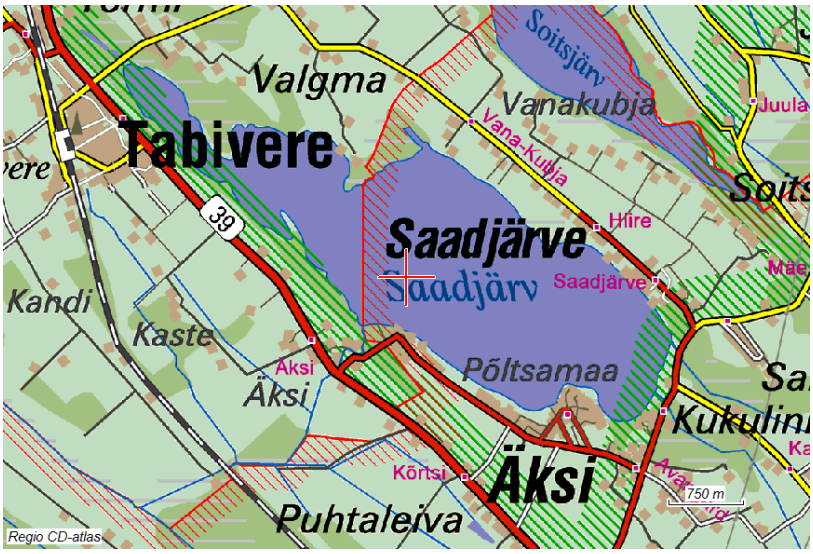
3.1. SAADJÄRVE SETETE KIRJELDUS

Esimesed tähelepanekud Saadjärve setete kohta pärinevad juba eelmise sajandi algusest, M. zur Mühlen (1911) kirjeldas Saadjärve morfomeetria ja limnoloogia kõrval ka põhjasetteid. Tema tähelepanekute kohaselt levivad Saadjärve põhjas veesügavuseni 5–6 m peamiselt liivad ja kruusad, sellest sügavamal lasub järve põhjas kogu järve ulatuses muda. Mudalasundi paksust kontrollis ta 9 punktis ning tema hinnangul ulatub mudapaksus vähemalt 5 m-ni. Järve kaguosas katab kaldalähedal veekogu põhja järvelubi. Ajavahemikul 1959–1962 läbiviidud geoloogilise kaardistamise käigus leidsid Kajak ja kaastöötajad (1963), et Saadjärvega piirnevas soos on 50 ha suurusel alal 1–3 m paksuse turbakihi all järvelupja kuni 1,8 m paksuselt ning järvelubjalasundi maht on hinnanguliselt 500 000 m^3. Saadjärve setete kaardistamise käigus hindas K. Veber (1964), et järvemuda katab järvepõhja 530 ha alal, mudalasundi keskmine paksus on 4 m, maksimaalne paksus 5–6 m ja hinnanguliselt on järves kuni 21 miljonit m^3 muda.

Tegelikult on Saadjärve setete paksus tunduvalt suurem. 1986. a välitöödel puurisid M.-A. Rõuk koos kaastöötajatega 21,5 m veesügavuse juures 8,5 m lubjarikast järvemuda, selle lamamiks 0,5 m aleuriite ja 5 m viirsavi (Rõuk, 1992).

Käesoleva uurimistöö raames puurisime Saadjärve setteid mudapaksuse hindamise eesmärgil järvepunktis koordinaatidega (58°32`07``N ja 26°38`53``E; veesügavus 22,0 m). Ühtekokku õnnestus läbipuurida 9,75 m paksune lubjarikka järvemuda kiht, kuid lasundi põhja ei õnnestunudki kätte saada. Setteproovid paleolimnoloogilisteks uuringuteks võeti 2006. a talvel järve jäält (joonis 5) Saadjärve sügavaimast osast, proovivõtukoha koordinaadid olid 58°32,234'N ja 26°38,997'E (joonis 6). Veesügavus puurimiskohal oli 24,25 meetrit. Willneri proovivõtuseadmega saadi puursüdamik paksusega 30 cm, sügavkülmpuurimisel saadud läbilõige oli 90 cm paksune. Läbilõikes allapoole võeti setteproovid turbapuuriga kuni 2,2–2,3 m sügavuseni settepinnalt.

Joonis 5. Saadjärvel setteid puurimas.



Joonis 6. Setete puurimiskoht Saadjärvel.

Järvesetete kirjeldus (pindmine 60 cm on kirjeldatud külmutuspuurimisega saadud setteläbilõikest (joonis 7) ja sügavamal lasuvad kihid on kirjeldatud turbapuuriga võetud settelasundist):

24,25–24,27 cm veepinnalt **(settepinnalt: 0–2 cm)** – järvemuda, pruun;

24,27–24,43 cm (2–18 cm) – järvemuda, lubjakas, mustjas tumepruun, selgelt eristuvad bioturbatsiooni poolt tekitatud settelasundi rikked;

24,43–24,51 cm (18–26 cm) – järvemuda, lubjakas, helepruun/mustjas tumepruun, selge kihiline tekstuur, eristuvad helepruunid ja mustjas tumepruunid kihid, kihipaari (varv) puhul võib olla tegu aastakihtidega, kihipaari paksus 3–6 mm, vahemikus 20–23 cm kihilisus rikutud;

24,51–24,64 cm (26–39 cm) – järvemuda, lubjakas, mustjas tumepruun, selgelt eristuvad bioturbatsiooni poolt tekitatud settelasundi rikked;

24,64–24,66 cm (39–41 cm) – järvemuda, lubjakas, helepruun/mustjas tumepruun, selge kihiline tekstuur, kihipaari paksus 4–6 mm;

24,66–24,85 cm (41–60 cm) – järvemuda, lubjakas, mustjas tumepruun, selgelt eristuvad bioturbatsiooni poolt tekitatud settelasundi rikked (pruunid laigud);

24,85–25,15 cm (60–90 cm) – järvemuda, lubjane, tumepruun;

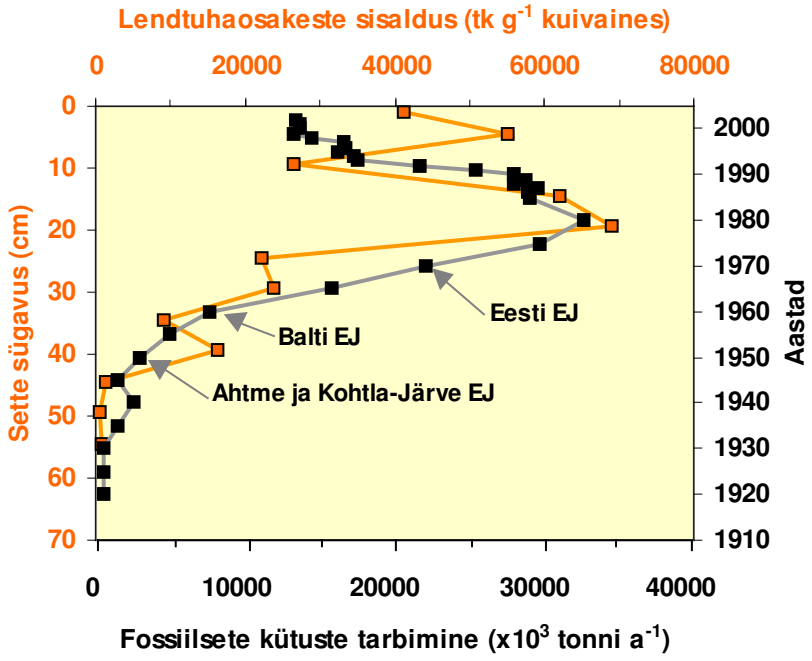
25,15–26,50 cm (90–225 cm) – järvelubi/järvemuda, lubjane, tumebeež/tumepruun (õhu käes seismisel muutub värvus heledamaks beežiks/tumebeežiks); vahelduvad lubjarikkamad (heledamad) ja orgaanikarikkamad (tumedamad) kihid, kihtide paksus 1–8 cm.

Joonis 7. Saadjärve setete läbilõige sügavkülmutuspuuris.

3.2. KRONOLOOGIA JA SETTIMISKIIRUS

Saadjärve setteläbilõike dateerimiseks rakendati lendtuhaosakeste jaotuskõveral baseeruvat metoodikat.

Lendtuhaosakeste kontsentratsioon Saadjärve setetes on 45 cm sügavusest allpool väga madal, vähem kui 1000 osakest g^{-1} kuivas settes (joonis 8). Järsk osakeste sisalduse tõus algab 40–45 cm sügavusest. Tõusutrend jätkub kuni settevahemikuni 15–20 cm, kus osakeste kontsentratsioon ulatub 60000–70000 tk g^{-1}. Pindmises 10–15 cm paksuses kihis lendtuhaosakeste kontsentratsioon väheneb. Selline osakeste jaotuskõver on iseloomulik suurele piirkonnale põhjapoolkeral, tal on oma spetsiifiline trend ja reeperkihid (järsk osakeste sisalduse tõus, järgnev kontsentratiooni maksimum ja pinnakihtide sisalduse langus), mida on võimalik kasutada setteläbilõike kaudseks dateerimiseks.



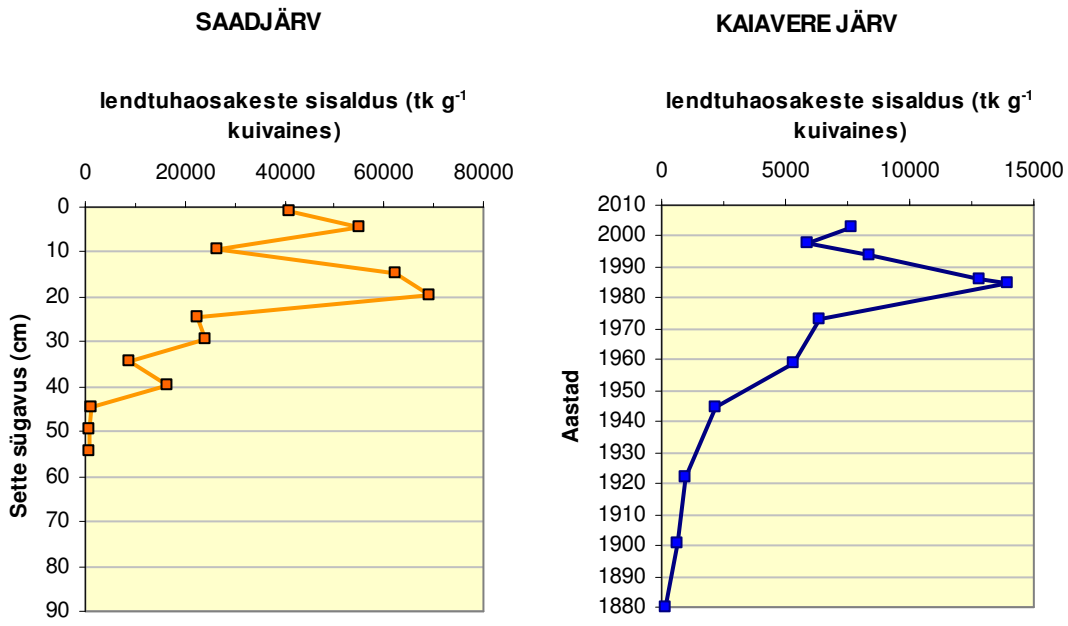
Joonis 8. Lendtuhaosakeste jaotus Saadjärve setteprofiilis (osakest g^{-1}, oranž joon) kõrvutatuna fossiilkütuste tarbimise arenguga Eestis (x 10^3 tonni a^{-1}, hall joon). Joonisel on näidatud suuremate Kirde-Eesti elektrijaamade (EJ) rajamise aeg.

Kütuste põletamisprotsessil tekkivate lendtuhaosakeste jaotustrendi Saadjärve setetes kõrvutati küllalt detailselt dokumenteeritud kütuste kasutamise ajalooga Eestis (joonis 8), mis on tugevalt mõjutatud Saadjärvest mitte just kaugel paikneva

põlevkivitööstuspiirkonna elektrijaamade toimimisest. Kütuste kasutamine Eestis intensiivistus pärast Teist maailmasõda, kui hakati rajama suuremaid põlevkivil töötavaid elektrijaamu (EJ) – Kohtla-Järve EJ 1949. a ja Ahtme EJ 1951. a. Eriti järsk hüpe põlevkivi põletamises toimus 1960. aastal, kui rajati Narva külje all esialgu Balti EJ ja seejärel 1970. a Eesti EJ. Kõige intensiivsem fossiilsete kütuste tarbimine Eestis oli 1980.-ndate alguses, misjärel see natuke vähenes ja samal ajal paigaldati elektrijaamadele ka esimesed toimivad tuhaärastusseadmed. Eesti Vabariigi taaskehtestamisel langes kütuste tarbimine mõne aastaga pea poole võrra ja on nüüd viimasel kümnendil stabiliseerunud.

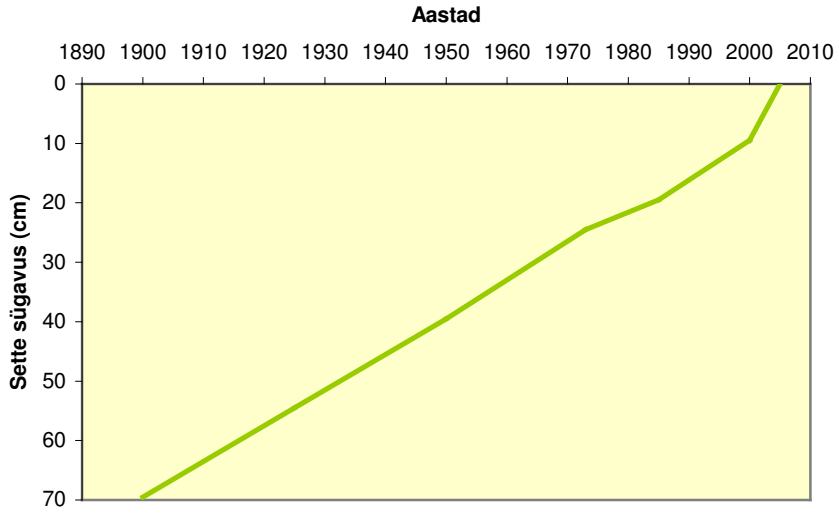
Võrreldes Saadjärve setete lendtuhaosakeste jaotusprofiili ja kütuste tarbimise statistilist andmestikku on näha, et need on küllalt sarnased (joonis 8). Kui lendtuhaosakeste akumulatsioon järvesetetesse algas 19. sajandil, mil alustati fossiilsete kütuste kõrg-temperatuurilist põletamist (Rose jt, 1995), siis nende kontsentratsiooni järsku tõusu Saadjärve setetes alates 45 cm sügavusest võib dateerida 1940-ndate lõpuks. Kuigi sel ajal Eestis kütuste tarbimises veel väga järsku hüpet ei toimunud, polnud siis rajatud elektrijaamadel (Kohtla-Järve, Ahtme) üldse mingeid puhastusseadmeid ja lendtuha emissioon oli sel ajal väga kõrge võrreldes põletatud kütuse hulgaga. Pidev lendtuhaosakeste kontsentratsiooni tõus settevahemikus 20–35 cm vastab hästi uute võimsate elektrijaamade rajamisele ja suurenenud kütuse tarbimisele 1960–1980-ndatel aastatel. Efektiivsemate tuhaärastusseadmete paigaldamine elektrijaamadele ja energiatarbimise vähenemine Eesti iseseisvumisel on vähendanud tuha emissiooni atmosfääri ja seega ka lendtuhaosakeste sissekannet järvesetetesse viimastel aastakümnetel, mistõttu pindmised ~15 cm setted Saadjärves on moodustunud 1990–2000-ndatel.

Saadjärve lähedal paikneva Kaiavere järve setteprofiil on meil dateeritud varem, 2003. aastal. Lendtuhakeste jaotuse võrdlemisel kahes järves selgus, et need on üllatavalt sarnased (joonis 9). Et Kaiavere setteläbilõige on dateeritud lisaks ka ^{210}Pb-meetodil ning saadud ajaskaalat on kontrollitud tuumakatsetustest pärinevate radionukliidide (^{137}Cs ja ^{241}Am) markerkihtidel põhineva kronoloogia abil, siis oli meil hea võimalus neid tulemusi kasutada Saadjärve settedateeringute täpsustamisel.



Joonis 9. Lendtuhaosakeste jaotusprofiil Saadjärve setetes (osakest g^{-1}) võrrelduna Kaiavere järve lendtuhaosakeste jaotusega ^{210}Pb-meetodil dateeritud setteläbilõikes.

Nagu näha jooniselt 9 on Kaiavere järve lendtuhaosakeste jaotustrend ^{210}Pb-meetodil dateeritud setteläbilõikes pea ideaalselt kattuv Saadjärve setete lendtuhaosakeste jaotusega. Osakeste kontsentratsioon hakkab Kaiavere setetes järsult suurenema 1940-ndate keskel või lõpus, intensiivistudes eriti 1970-ndate aastate esimesel poolel. Osakeste sisalduse maksimumväärtused fikseeriti 1980-ndate keskel, mille järel nende hulk setetes langes märgatavalt saavutades väikseimad väärtused 2000. a paiku. Järgnev lendtuhaosakeste tõus sette pinnakihtides viimasel kümnendil võib olla tingitud mõne kohaliku tööstusettevõtte intensiivistunud tegevusest ja tema suurenenud atmosfäärsete heitmete hulgast. Kasutades nimetatud reeperkihte Kaiavere setteläbilõikest koostasime küllalt täpse ajaskaala Saadjärve setetele (joonis 10). Selle põhjal on järves keskmine settimiskiirus olnud 0,6 cm aastas, vaid pindmises kompakteerumata 10-cm settekihis on see suurem, keskmiselt 1,9 cm a^{-1}.



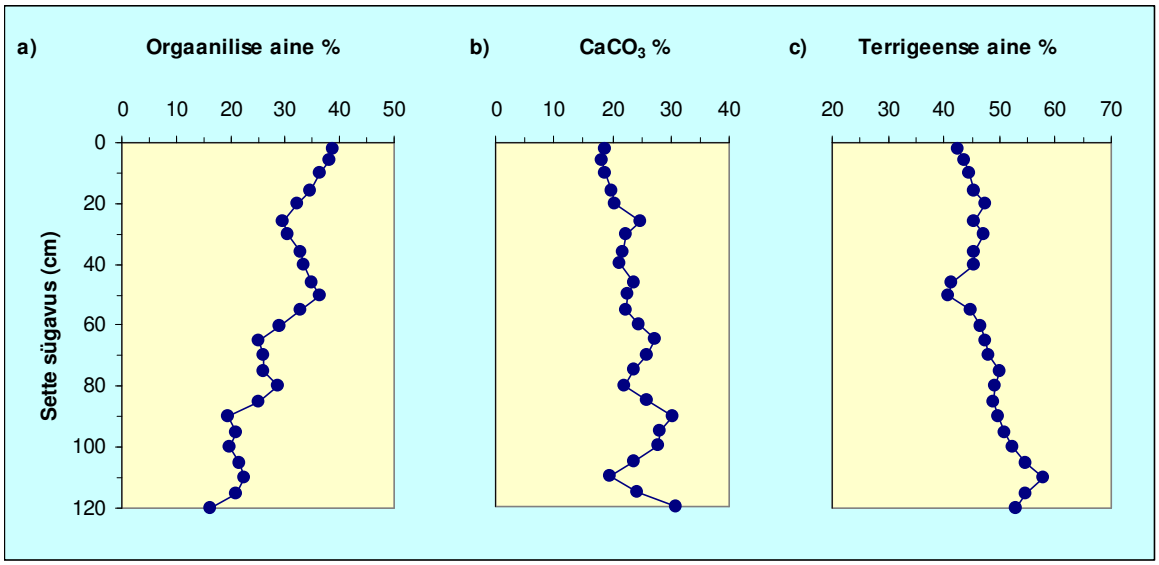
Joonis 10. Saadjärve 70 cm paksuse setteläbilõike ajaskaala.

3.3. SETETE FÜÜSIKALIS-KEEMILISED OMADUSED

Saadjärve setted kujutavad endast kolloidse struktuuriga järvemuda, mis sisaldab orgaanilist ainet, karbonaatset ainet ning järve valglalt sissekantud peenpurdset mineraalset materjali. Orgaaniline aine on produtseeritud veekogus planktoni, veetaimede ja põhjaorganismide jäänuste lagunemisel või osaliselt kantakse sisse valglalt maismaaorganismide laguproduktidena. Karbonaatne aines sadestub järve põhja mitmesuguste biokeemiliste protsesside tagajärjel. Mineraalainete kõrgenenud sisaldus vees on iseloomulik kõigile Vooremaa järvedele, nii ka Saadjärvele ja seda põhjustab valgla pinnase lubjarikkus ning põhjaallikate mõju.

Tänu orgaanilise aine kolloidsele struktuurile on järvemuda võimeline endaga siduma suurel hulgal vett, seega mida suurem on orgaanilise aine hulk järvesetetes, seda suurem on selle veesisaldus. Saadjärve setetele on iseloomulikuks tunnuseks väga kõrge veesisaldus ja väga väike kuivaine sisaldus, mille tagajärjel on just eriti pindmised konsolideerumata setted väga püdelad. Saadjärve pindmises mudakihis on kuivaine sisaldus alla 5% suurenedes veidi sette sügavuse suunas.

Orgaanilise aine hulk järvesetetes sõltub paljudest teguritest nagu: järve primaarproduktsioon, veekogu troofsus, valglalt allohtoonse orgaanilist päritolu materjali ja mineraalaine sissekanne veekogusse, autigeensete mineraalide moodustumine järves, orgaanilise aine lagunemine vees ja setetes jmt. Orgaanilise aine hulk Saadjärve setete pindmistes kihtides ulatub 38%-ni, allpool aga väheneb regulaarselt 16%-ni (joonis 11). Kõrgem orgaanilise aine sisaldus setteläbilõike ülemises osas on seletatav järve primaarproduktsiooni kasvuga viimase sajandi teisel poolel ja eriti viimastel aastakümnetel. Orgaanilise aine hulga suurenemine on Saadjärves toimunud teatud hüpetena, tõusuperioodid vahelduvad ühtlase sisaldusega perioodidega.



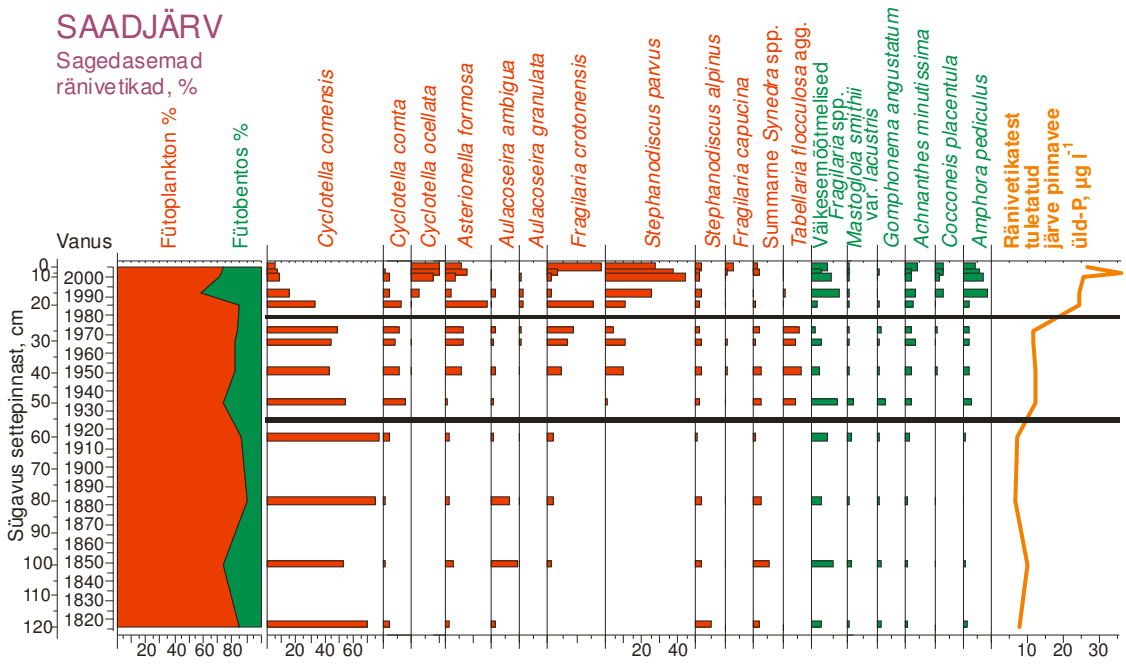
Joonis 11. Saadjärve pindmise setteläbilõike koostis (%-des sette kuivkaalust).

Karbonaatse aine ($CaCO_3$) sisaldus Saadjärve põhjasetetes varieerub 20–30% vahel (joonis 11), enamuse sette koostisest (40–60%) moodustab järve sissekantud mineraalaine, mille sisaldus sette sügavuse suurenedes tõuseb. Kõrge purdmaterjali sisalduse Saadjärve setetes põhjustab nii vooluvete sissekanne, kui ka kaldaerosioon ja mineraalaine ümbersettimine litoraalist ning fokuseerumine Saadjärve süvikusse.

3.4. SETETE RÄNIVETIKAD JA JÄRVE ARENG

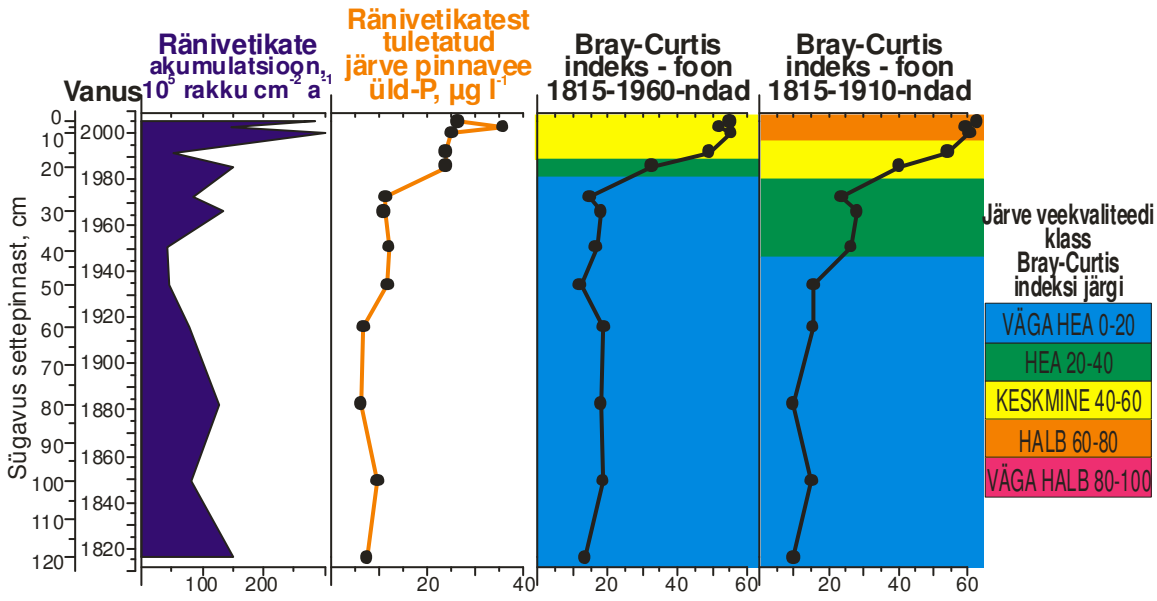
Setteläbilõike sügavusvahemikust 0–120 cm (vastab ajavahemikule u 1820–2005. a) analüüsiti ränivetikaid 13 stratigraafilisel tasemel. Saadjärve setteproovidest leiti ühtekokku 140 erinevat ränivetika taksonit. Saadjärve setteläbilõike ränivetikate diagrammil võib välja eraldada 3 kooslustsooni (joonis 12): 60–120 cm (1800 algus–1910-ndad), 25–50 cm (1930-ndad–1970-ndate algus) ja 0–20 cm (1980-ndad–tänapäev).

Alumises ränivetika kooslustsoonis settevahemikust 60–120 cm, mis ligikaudu vastab 1800–1910-ndadetele aastatele, moodustavad fütoplanktoni (avavees vabalt hõljuvad taimsed mikroorganismid) liigid enamiku (74–90%) kooslusest. Planktilistest diatomeeliikidest domineerib toitainetevaesele veele iseloomulik *Cyclotella comensis*, teised fütoplanktoni liigid nagu *Cyclotella comta*, *Aulacoseira ambigua*, *Stephanodiscus alpinus* ja *Synedra* spp. on vähemarvukad. Fütobentos (veekogu põhjasetetele kinnitunud, põhjamuda pinnal elutsevad või siis veetaimede pealiskasvule kinnituvad ränivetikad) on liigirikkam, aga dominandid puuduvad, arvukamad on perekonna *Fragilaria* mõned väikesemõõtmelised liigid, peamiselt *F. brevistriata* ja *F. construens* var. *venter*. Ränivetikate akumulatsioon st aastas pindalaühiku kohta järve põhja settinud ränivetikate hulk iseloomustab ränivetikate produktsiooni järves. Ränivetikate akumulatsioon on selle kooslustsooni piires madal (80–150 × 10^5 rakku cm^{-2} a^{-1}, joonis 13). Ränivetikate põhjal modelleeritud epilimnioni e järve pindmise veekihi üldfosfori sisaldus on väga väike, 7–10 µg l^{-1}, mis näitab, et üleeelmisel sajandil ja eelmise sajandi alguses oli Saadjärv oma arengus veel looduslähedane vähetoiteline kihistunud kalgiveeline ja inimtegevusest veel oluliselt mõjutamata veekogu ning sellele ajaperioodile vastav ränivetikapõhine järve ökoloogiline seisund sobib iseloomustama Saadjärve foonitingimusi.



Joonis 12. Saadjärve setteläbilõike ränivetikadiagramm.

Keskmises ränivetikate kooslustsoonis settevahemikust 25–50 cm, mis ligikaudu vastab 1930-ndatele–1970-ndate algusaastatele, toimub setete ränivetikakoosluses muutus. *Cyclotella comensis* ohtrus hakkab vähenema, kuigi see väikesemõõtmeline planktiline ränivetikas ja toiteainetevaese järve indikaatorliik püsib vetikakoosluses subdominandina. Samaaegselt hakkab suurenema toiteaineterikkamale veele iseloomulike *Asterionella formosa* ja *Fragilaria crotonensis* arvukus ning kooslusesse ilmub eutroofsete järvede indikaatorliik *Stephanodiscus parvus*. Ränivetikate akumulatsioon on jätkuvalt väike (40–135 × 10^5 rakku cm^{-2} a^{-1}). Ränivetikate põhjal modelleeritud järve pindmise veekihi üldfosfori sisaldus on tõusnud, kuid püsib jätkuvalt väiksena, 11–12 µg l^{-1}. Bray-Curtise indeksi järgi on järve ökoloogiline seisund võrreldes 1800–1910-ndadetele aastatega hea, kuid ränivetikate põhjal modelleeritud järve pindmise veekihi üldfosfori sisalduse järgi võiks ka veel 1930-ndatele–1970-ndate algusaastatele vastavat järve ökoloogilist seisundit pidada foonitingimustele vastavaks või siis foonitingimustele lähedaseks.



Joonis 13. Saadjärve ränivetikate akumulatsioon, ränivetikatest tuletatud järvevee üldfosfori sisaldus ja järve ökoloogiline seisund Bray-Curtise indeksi järgi.

Setteanalüüsid näitavad, et alates 1980-ndatest (settevahemik 0–20 cm) on Saadjärve seisundis toimunud selge muutus ja seda kahjuks halvemuse suunas. Vähetoitelisele järvele iseloomuliku *Cyclotella comensis* ohtrus järsult väheneb ja see vetikaliik asendub rohketoitelisele järvele iseloomuliku *Stephanodiscus parvus*'ga. Suureneb ka *Asterionella formosa* ja *Fragilaria crotonensis*'e esinemissagedus. Ränivetikate akumulatsioon suureneb (kuni 300 × 10^5 rakku cm^{-2} a^{-1}). Ränivetikate põhjal modelleeritud järve pindmise veekihi üldfosfori sisaldus suureneb hüppeliselt 24–36 µg l^{-1}. Kui võtta Saadjärve foonitingimusteks 1800–1970-ndate algusaastatele vastav ränivetikakooslus, siis on Bray-Curtis indeksi järgi järve seisund küll viimastel aastel halvenenud, kuid veekvaliteedi klass on veel keskmine. Võrreldes 1800–1910-ndadetele aastatega on Bray-Curtise indeksi järgi järve ökoloogiline seisund 1980-1990-ndatel veel keskmine ja viimastel aastatel muutunud koguni halvaks.

Tabel 1. Saadjärve arengu erinevatel etappidel sagedamini esinevad ränivetikaliigid, ränivetikatest tuletatud järve pinnavee üldfosfori sisaldus ja Bray-Curtis indeksi järgi arvutatud järve veekvaliteedi klass.

	Foonitingimused 1800–1910-ndad (60–120 cm)	Foonilähedased tingimused/ foonitingimused 1930-ndad–1970-ndad 25–50 cm	Halvenenud vee-kvaliteediga järv 1980-ndad–tänapäev 0–20 cm
Sagedasemad ränivetikad	*Cyclotella comensis* (dominant) *Aulacoseira ambigua* *Synedra* spp. *Stephanodiscus alpinus* *Fragilaria brevistriata* *Fragilaria construens* var. *venter*	*Cyclotella comensis* (subdominant) *Cyclotella comta* *Asterionella formosa* *Fragilaria crotonensis* *Stephanodiscus parvus* *Tabellaria flocculosa* agg.	*Stephanodiscus parvus* (dominant) *Asterionella formosa* *Fragilaria crotonensis* *Cyclotella ocellata* *Cyclotella comensis* *Achnanthes minutissima* *Amphora pediculus* *Fragilaria brevistriata*
Ränivetikatest tuletatud järve pinnavee üld-P, $\mu g\ l^{-1}$	7–10	11–12	24–36
Bray-Curtis indeksi järgi järve kvaliteedi klass:			
foon 1815–1960-ndad	foon–väga hea	foon–väga hea	keskmine
foon 1815–1910-ndad	foon–väga hea	hea	keskmine/halb

4. KOKKUVÕTE

Veepoliitika Raamdirektiivi nõuete kohaselt on järvede seisundi määratlemise aluseks eri tüüpi veekogude nüüdisolukorra võrdlemine foonitingimustega, st looduslähedase intensiivsest inimmõjust veel puutumatu seisundiga. Käesoleva rakendusuuringu eesmärk oli paleolimnoloogiliste meetoditega taastuletada viimase paarisaja aasta keskkonnaseisundi muutused Saadjärves, määratleda intensiivse inimmõju algusaeg ning selgitada sellele eelnenud veekogu foonitingimused.

Saadjärve setteläbilõikest uuriti detailselt ränivetikakooslusi ja füüsikalis-keemilisi omadusi (kuivaine, orgaaniline aine, $CaCO_3$, mineraalaine), setete vanust hinnati setteprofiilis lendtuhaosakeste jaotumise põhjal. Tuginedes setete ränivetikakooslustele modelleeriti järve kunagine pinnavee üldfosfori sisaldus ja Bray-Curtis indeksi abil hinnati ränivetikakooslustes toimunud muutusi ning klassifitseeriti veekogu ökoloogilise seisundi järgi.

Saadjärv on viimase kahesaja aasta jooksul läbi teinud kolm erinevat arenguetappi:

1) Vaatamata ekstensiivsele põlluharimisele Saadjärve ümbritsevate voorte nõlvadel oli 19. sajandil ja 20. sajandi algul selle veekogu puhul tegu veel looduslähedases seisundis kihistunud karedaveelise vähetoitelise järvega, mille ränivetikatest modelleeritud pinnavee üldfosfori väärtus oli alla 10 µg l^{-1};
2) 1930-ndatest aastatest alates hakkas Saadjärves kuhjuma rohkem orgaanilist ainet, ränivetikakooslusesse tekib enam rohketoitelistele järvedele iseloomulikke ränivetikaid, ränivetikate põhjal modelleeritud järve pindmise veekihi üldfosfori sisaldus küll tõuseb, kuid püsib jätkuvalt madalana (11–12 µg l^{-1}) ning järve ökoloogiline seisund on Bray-Curtis indeksi järgi veel hea;
3) Ränivetikate koosluse ja arvukuse, modelleeritud järvevee üldfosfori sisalduse (24–36 µg l^{-1}) ja Bray-Curtise indeksi järgi on Saadjärv alates 1980-ndatest võrreldes foonitingimustega muutunud ja järve ökoloogiline seisund vastab viimastel aastatel keskmise või isegi halva veekogu klassile.

5. KASUTATUD KIRJANDUS

Alliksaar, T. 2000. Spatial and temporal variability of the distribution of spherical fly-ash particles in sediments in Estonia. Tallinn Pedagogical University, Dissertations on Natural Sciences 4, 1–44.

Battarbee, R. W., Juggins, S., Gasse, F., Anderson, N. J., Bennion, H. & Cameron, N. G. 2000. European Diatom Database (EDDI). An Information System for Palaeoenvironmental Reconstruction. European Climate Science Conference, Vienna City Hall, Vienna, Austria, 19.-23. October 1998, 1–10.

Battarbee, R., Jones, V. J., Flower, R. J., Cameron, N. G., Bennion, H., Carvalho, L. & Juggins, S. 2001. Diatoms. In: Smol, J. P., Birks, H. J. B. & Last, W. M. (Eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 155–202.

Bengtsson, L. & Enell, M. 1986. Chemical analysis. In: Berglund, B. E. (Ed.) Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. John Wiley and Sons, Chichester, 405–451.

Bennion, H., Fluin, J. & Simpson, G.L. 2004. Assessing eutrophication and reference conditions for Scottish freshwater lochs using subfossil diatoms. Journal of Applied Ecology 41, 124–138.

Bradshaw, E.G., Anderson, N.J., Jensen, J.J. & Jeppesen, E., 2002. Phosphorus dynamics in Danish lakes and the implications for diatom ecology and palaeoecology. Freshwater Biology 47, 1963–1975.

Bradshaw, E. & Anderson, N.J. 2001. Validation of a diatom-phosphorus calibration set for Sweden. Freshwater Biology 46, 1035–1048.

Directive 2000/60/EC, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327, 1–72.

Glew, J. R., Smol, J. P. & Last, W. M. 2001. Sediment core collection and extrusion. In: Last, W.M. & Smol, J.P. (Eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 1: Basin Analysis, Coring and Chronological Techniques. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 73–105.

Håkanson, L. & Jansson, M. 1983. Principles of lake sedimentology. Springer-Verlag, Berlin, 316 pp.

Hall, R. I. & Smol, J. P. 1999. Diatoms as indicators of lake eutrophication. In: Stoermer, E. F. & Smol, J. P. (eds.), The Diatoms: Application for the Environmental and Earth Sciences. University Press, Cambridge, 128–168.

Heinsalu, A., Alliksaar, T. & Veski, S. 2003. Reconstruction of past lake-water quality from sediment diatom assemblages: a pilot study. Viru-Peipsi Catchment Area Management Plan (LIFE00ENV/000925; Viru-Peipsi CAMP). Institute of Geology at Tallinn Technical University Report Series 16, 1–59.

Heinsalu, A. & Alliksaar, T. 2005. Järvetüüpide interkalibreerimiseks vajalike foonitingimuste väljaselgitamine paleolimnoloogiliste uuringute abil. TTÜ Geoloogia Instituudi Aruanne 29, 1–98 + lisad 51 lk.

Michelutti, N., Laing, T. & Smol, J. 2001. Diatom assessment of past environmental changes in lakes located near the Noril'sk (Siberia) smelters. Water, Air and Soil Pollution 125, 231–241.

Miettinen, J.O., Kukkonen, M. & Simola, H. 2005. Hindcasting baseline values for water colour and total phosphorus concentration in lakes using sedimentary diatoms – implications for lake typology in Finland. Boreal Environment Research 10, 31–43.

Renberg, I. & Wik, M. 1985. Soot particle counting in recent lake sediments: An indirect counting method. Ecological Bulletins 37, 53–57.

Rose, N. L. 1990. A method for the extraction of carbonaceous particles from lake sediment. Journal of Paleolimnology 3, 45–53.

Rose, N. L., Harlock, S., Appleby, P. G. & Battarbee, R. W. 1995. The dating of recent lake sediments in the United Kingdom and Ireland using spheroidal carbonaceous particle concentration profiles. Holocene 5, 328–335.

Rõuk, A.–M., 1992. Laminated sediments in Estonian lakes – preliminary data. Geological Survey of Finland, Special Paper 14, 105–107.

Räsänen, J., Kauppila, T. & Salonen, V.-P. 2005. Sediment-based investigation of naturally or historically eutrophic lakes – implications for lake management. Journal of Environmental Management X, 1–13.

Schönfelder, I., Gelbrecht, J. Schönfelder, J. & Steinberg, C.E.W. 2002. Relationships between littoral diatoms and their chemical environment in northeastern German lakes and rivers. Journal of Phycology 38, 66–82.

Stoermer, E. F. & Smol, J. P. (Eds.) 1999. The Diatoms: Application for the Environmental and Earth Sciences. University Press, Cambridge, 469 pp.

Veber, K. 1964. Sapropeel Eesti järvedes. Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse Teadusliku Uurimise Instituut Teaduslike Tööde Kogumik 4, 155–173.

zur Mühlen, M. 1911. Садьервское озеро. Sitzungsberichte der Naturforscher-Gesellschaft bei der Universität Jurjew (Dorbat) XIX, 3, 1–9.

Каяк, К., Каяак, Х., Пастухова, А., Паульман, В., Пылма, Л. & Тасса, В. 1963. Отчет Тартуской партии о комплектной геолого-гидрогеологической сьемке юго-восточной части ЭССР (лист О-35-ХУ) за 1959–1962 годы. Käsikiri Eesti Geoloogiakeskuse arhiivis.