

Est. 13-628

Tartu Ülikooli Eesti veekogude uurimise komisjoni väljaanne No 8

Suvisest hapnikukihitusest eutroofsetes järvedes

Über die sommerliche Sauerstoffschiebung in den eutrophen Seen

H. Riikoja

13. joonisega

Tartu 1929

Suvisest hapnikukihitusest eutroofsetes järvedes

Über die sommerliche Sauerstoffschichtung in den eutrophen Seen

H. Riikoja

13. joonisega

Tartu 1929

Äratrükk „Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi aruandest“
XXXV, 3—4.

24577133

TARTU ÜLIKOO LI
RAAMATUKOGU

K. Mattiesen'i trükk, Tartu.

Suvisest hapnikukihitusest eütroofsetes järvedes.

H. Riikoja.

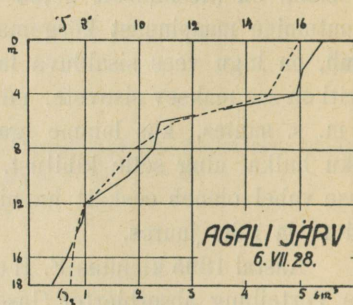
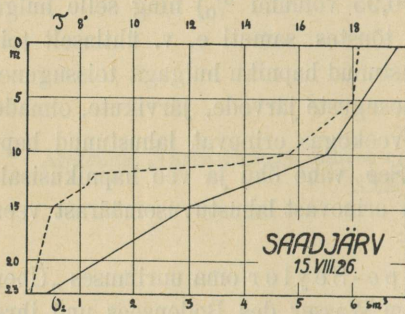
Kuna hapnikuhulk õhus, üldiselt võetult, maapinnal kõikjal e. v. sama on (keskmiselt 20,93—20,95 voluumi %) ning selle hulga muutumine maapinnast kõrgemale tõustes samuti e. v. ühtlaselt toimub, on lugu vees sisalduva lahustunud hapniku hulgaga teissugune. Eriti on see maksev sisevete, mitmesuguste järvede, järvikute, olmade j. m. s. suhtes, kus leiame igas veekogus erinevat lahustunud hapniku hulka ning selle kihitust. See vahe õhu ja vee hapnikusisalduse vahel oleneb eeskätt hapniku erinevast lahustuvusemäärast vees eri t^o ja rõhu juures.

Aastal 1895 kirjutas F. Hoppe-Seyler oma uurimuses „Über die Verteilung absorbierter Gase im Wasser des Bodensees und ihre Beziehungen zu den in ihm lebenden Tieren und Pflanzen“: „So bietet sich also eine Fülle von unerledigten Fragen dar, sobald man daran geht, die Schicksale des im Wasser absorbierten Sauerstoffes näher ins Auge zu fassen; aber wir dürfen die Kenntnis der Verteilung des Sauerstoffdefizits in den verschiedenen Wasserschichten als den ersten Schritt ansehen auf dem Wege, der zur Erkenntnis der Vorgänge führt, welche sich durch das Leben der Organismen im Wasser von Seen und Meeren vollziehen“. Sellest ajast on ilmunud rida töid, mis kas ainuüksi pühendatud teatud veekogu hapnikusisalduse käsitlemisele või mis puudutavad seda küsimust kõrvalküsimsena. Selle üle veerandsajandi vältel tehtud töö kokkuvõttena ilmus käesoleva aasta alul A. Thienemanni töö „Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See“.

Vaatamata Hoppe-Seyleri töö ilmunisest Thienemanni töö ilmuniseni tehtud suurele tööhulgale pole siiski järvede hapnikurežiimi ehk -majandamise puutuvad küsimused leidnud täielikku ning üksmeelset lahendamist. Käesolevas ülevaates ei saa kõne alla võtta tervet küsimust kogu ulatuses, vaid peatun ainult olude juures, mida tähele võime panna suvel nn. eütroofsetes ehk heatoitelistes —

toitesoolade, seega ka planktoni ja enamasti ka põhjafauna poolest rikastes järvedes.

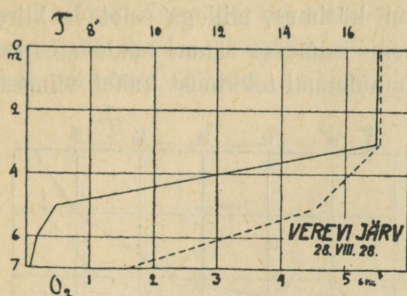
Jättes kõrvale üksikasjad ja vähemad erinevused võime mainitud järvi suviste hapnikuolude järele liigitada kolme rühma. Esimese rühma järvedes leiame pinnakihis hapnikurikkust: vesi on siin pinna t^0 vastavalt e. v. hapnikuga küllastatud või koguni üle küllastatud. Laskudes sügavamale paneme tähele t^0 langemist, ühtlasi ka hapnikusisalduse langemist. See langemine toimub kuni nn. thermocline'ini ehk temperatuuri hüppekihini kaunis ühtlaselt ja aeglaselt. Temperatuuri hüppekihis, kihis, kus vee t^0 võrdlemisi lühikese maa ulatusel, mõnikord vaid paari, isegi ühe või koguni meetri teatud murdosa



1. joon. Saadjärve temperatuuri-
(.....) ja hapnikukõver (——).

2. joon. Agali järve temperatuuri-
(.....) ja hapnikukõver (——).

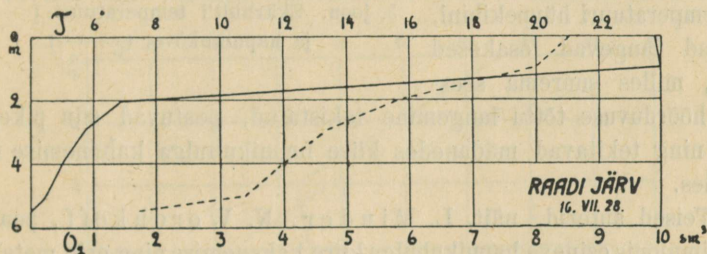
ulatuses tunduvalt — kuni mitme kraadi võrra — langeb, näeme sama järsku toimuvat hapnikusisalduse langust. Allpool temperatuuri hüppekihti — nn. hüpolimnionis — toimub t^0 kui ka hapnikusisalduse langemine sügavuse kasvades jällegi aeglaselt ning e. v. ühtlaselt. Teiste sõnadega: temperatuuri ja hapnikusisalduse kõverad on sääraustes järvedes paralleelsed. See pilt esineb kõige sagedamini. Kodumaa järvedest näeme seda minu poolt läbi uuritud Saadjärves (1. joon.), Agali j. (2. joon.), Vasula j. ning reas teistes. Sama pilti leiame enamikus kaunis põhjalikult läbi uuritud Põhja-Saksa ja Põhja-Ameerika järvedes; ka enamik muid temperereeritud eutroofseid järvi omab samasugust hapnikukihitust. Niverdis sellises hapnikukõveras on suuremates ja sügavamates järvedes tavaliselt nõrgemalt välja kujunenud, väiksemates ja madalamates järvedes esineb ta aga eriti ilmselt, hapnikuhulga kahanemine metalimnionis toimub seega sügavuse kasvades eriti kiiresti, mida on märgata näit. Verevi (3. joon.) ja Raadi (4. joon.) järve kõveraid vaadeldes.



3. joon. Verevi järve temperatuuri- (.....) ja hapnikukõver (——).

juhul. Säärastest järvedest võiks nimetada Bjeloe järve Venemaalt, mõnd Põhja-Saksa järve, näit. Tollensesee, Pielburger See ja m. t., Nagowicka, North Lake ja paari teist Põhja-Ameerikast, Skärhult'i Rootsist (5. joon.) jne.

Kolmas veel haruldasem juht on, et hapnikusisaldus on väiksem metalimnionis, siit peale aga kasvab hapnikuhulk põhjani järjekindlalt.



4. joon. Raadi järve temperatuuri- (.....) ja hapnikukõver (——).

Säärased järvi tuntakse seni vaid üksikuid; klassikalise näitena tuleb nimetada Glubokoje järve Venemaal (6. joon.), teistest võiks mainida Ukleisee Saksamaal (ka Plöni järve Bosautief'is on mõnda puhku sellist hapniku stratifikatsiooni tähele pandud) ning Wigry järve Poolas. Tänu stud. zool. A. Määr'ile, kes minule oma andmed lahkeks kasutamiseks andis, tunnen Eesti järvede seas kaht säärast järve, nimelt Viljandi ja Karula järve (7. joon.), kus võime tähele panna sama asjaolu.

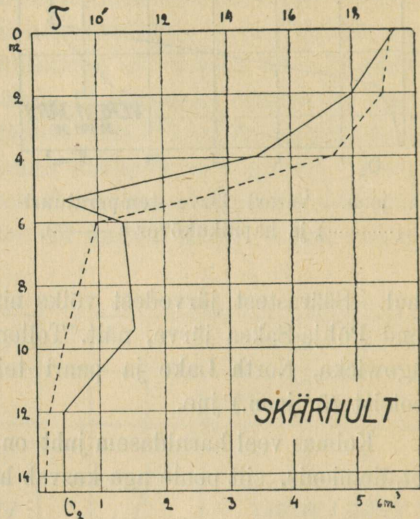
Põhja lähikonnas esineva hapnikuhulga järk-järgulist kahanemist põhjustavaks teguriks peetakse üldiselt põhjasetet: gytija ehk kõnts tarvitab mädanemiseks hapnikku ning hangib seda peal asuvatest vee-

kihtidest. Vaidlusealuseks aga on küsimus, millega seletada kiiret hapnikuhulga langemist metalimnionis esimesse rühma kuulvates järvedes ning metalimnilise hapnikumiinimumi tekkimist kahel viimasel juhul.

Esimestena püüdsid hapnikukihituse tekkimist seletada E. A. Birge ja Ch. Juday. Nimelt arvasid nad, et siin on tegemist hapniku kaduga, mis tingitud organismide mädanemisest metalimnionis. Fütoplankton, tekkides ülemistes, soojemates ja valgustatud veekihtides, langeb aeglaselt sügavamale, eriti surevad ja juba surnud organismid. Ülemistes, soojemates veekihtides toimub see langemine kiiremini. Jões temperatuuri hüppekihini, satuvad langevad osakesed vette, milles suurema seemise hõõrdvuse tõttu langemine takistatud, peatuvad siin pikemat aega ning tekitavad mädanedes kiire hapnikuhulga kahanemise neis kihtides.

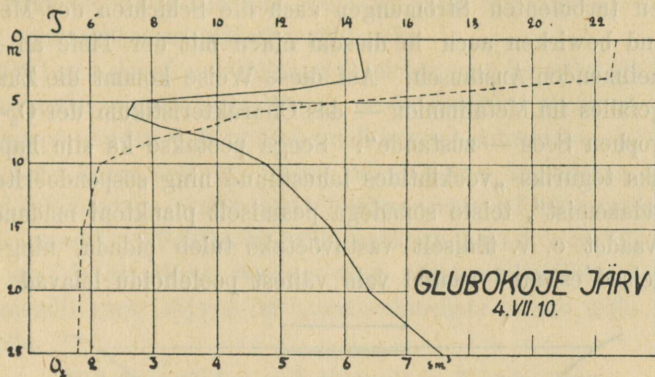
Teised autorid, näit. L. Minder, N. Woronkoff, peavad metalimnionis esineva hapnikuhulga kiire kahanemise ning eriti metalimnilise hapnikumiinimumi tekitajateks loomorganisme, zooplanktereid, kes vastavasse kihti koondunult hingamiseks hapniku ära tarvitavad.

M. Auerbach oma Bodeni järve uurimiste põhjal tuli lõpptulemusele, et järve vee hapnikusisalduse kõikumine on tingitud eeskätt t° muutuse käigust — seega puhtfüüsikalist laadi nähtus, ning võib olla vaid vähesel määral hapnikuproduktide ja -konsumentide elutegevusest mõjustatud. Kuid samu Auerbachi arvulisi andmeid kasutades püüab H. Utermöhl teisest seisukohast lähtudes näidata, et hapnikukonsumentide ja -produktide tähtsus Bodeni järve hapnikumajandamisele siiski suurem on kui Auerbach seda oletab. Omalt poolt püüab ta planktoni mitmesugust koosseisu („kerget“ plankterid — näit. *Cyanophyceae*, „keskmise raskusega vormid“ — näit. *Diatomeae*) ja nende rühmituste mitmesugust mäda-



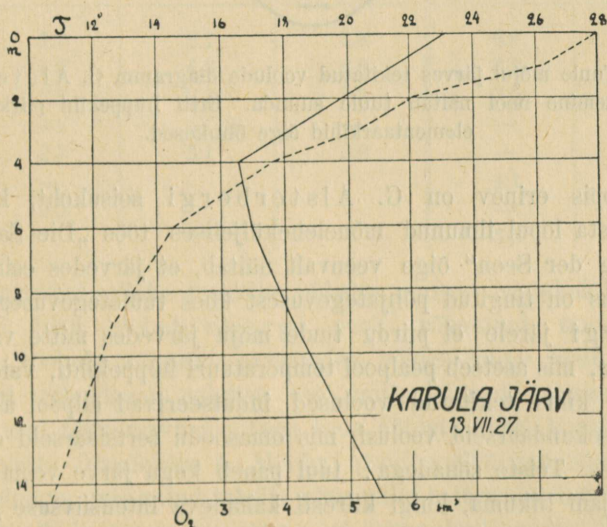
5. joon. Skärhult'i temperatuuri (-----) ja hapnikukõver (—).

nemiskiirust silmas pidades seletada mitmesuguseid eutroofsete järvede hapnikukõveraid. Zooplankterite tegevusele ei taha Utermöhl anda suuremat tähtsust.



6. joon. Glubokoje järve temperatuuri- (.....) ja hapnikukõver (——).

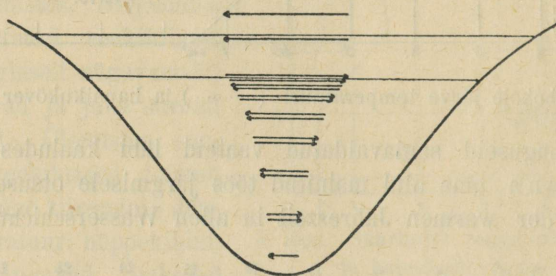
Mitmesuguseid seniavaldatud vaateid läbi kaaludes jõuab A. Thienemann oma alul mainitud töös järgmisele otsusele: „Die im Verlauf der warmen Jahreszeit in allen Wasserschichten zuneh-



7. joon. Karula järve temperatuuri- (.....) ja hapnikukõver (——).

mende, durch Fäulnis der gelösten und suspendierten Stoffe bewirkte O_2 -zehrung wird in den Wasserschichten oberhalb der Assimilationsgrenze durch die O_2 -produktion des lebenden Phytoplanktons ausge-

glichen. Zugleich werden die Schichten des Epilimnions durch die thermischen Konvektionsströmungen durchmischt; dazu ergreifen die durch die Windströmungen an der unteren Grenze des Epilimnions erzeugten turbulenten Strömungen auch die Schichten des Metalimnions und bewirken auch in diesem einen mit der Tiefe an Intensität abnehmenden Austausch. Auf diese Weise kommt die Zunahme des O_2 -gefälles im Metalimnion — das Charakteristikum der O_2 -kurve des eutrophen Sees — zustande“. Seega peetakse ka siin hapnikku hävitavaks teguriks „veekihtides lahustunud ning suspendeeritud oluste mädanemist“, teiste sõnadega peamiselt planktoni mädanemist, millist vaadet e. v. üldiselt vastuvõetuks tuleb pidada, ning mille kõrval teised esitatud vaated vaid vähest poolehoidu leiavad.



8. joon. Tuule mõjul järves tekitatud voolude diagramm G. Alsterbergi järele. Ülemine nool näitab tuule suunda. Eriti hüppekihi piirkonnas on elementaarkihid õige õhukesed.

Hoopis erinev on G. Alsterbergi seisukoht, kes oma 1927. aasta lõpul ilmunud mõneleheküljelises töös „Die Sauerstoffschichtung der Seen“ õige veenvalt näitab, et järvedes esinev hapnikukihitus on tingitud põhjategevusest ühes tuuletegevusega. Alsterbergi järele ei piirdu tuule mõju järvedes mitte vaid selle järveosaga, mis asetseb pealpool temperatuuri hüppekihti, vaid tuulest pealmises kihis tekitatud voolused indutseerivad allpool asetsevais kihtides sekundaarseid voolusi, mis omasoodu tertsiarseid ellu kutsuvad jne. Teiste sõnadega: tuul paneb kogu järve veemassi pinnast põhjani liikuma, kuigi kiiresti kahaneva intensiivsuse ja kiirusega sügavamates kihtides. See liikumine on eriti temperatuuri hüppekihi piirkonnas kontsentritud õhukestesse elementaarkihtidesse („auf dünne Elementarschichten begrenzt ist“). Nii oleks vesi järvedes mitte ainult t^0 ja keemiliste olude suhtes — vaid t^0 tingitud tihkuse vahesid silmas pidades — ka voolude suhtes kihitatud. Asja

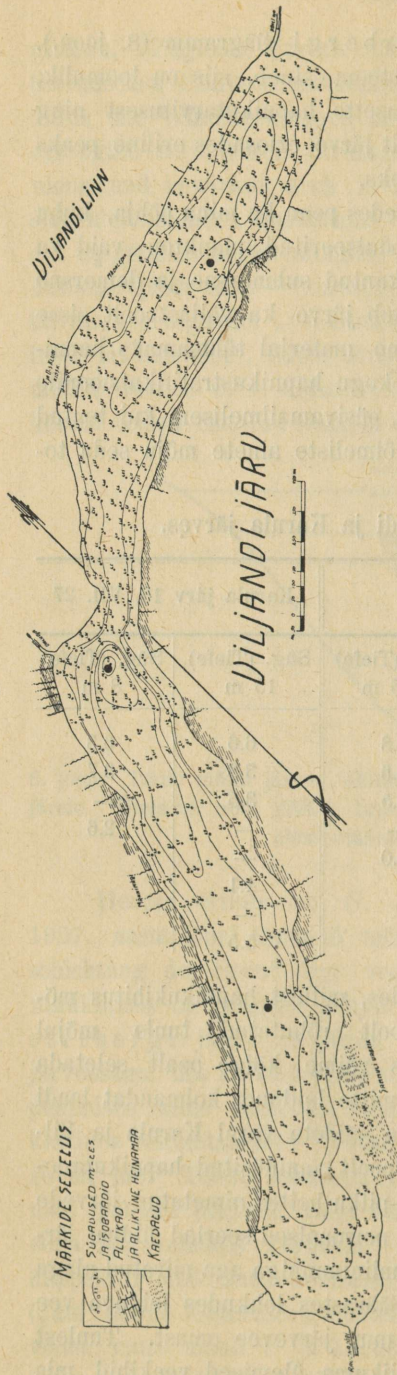
kujutella aitab kõige paremini Alsterbergi diagramm (8. joon.). Kui säärane horisontaalsete voolude süsteem esineb, siis on loomulik, et hapnikukihitus, mis tingitud põhjasette hapnikutarvitusest ning seega põhja konfiguratsioonile vastavalt järve eriosades eriline peaks olema, muutub horisontaalseks nähtuseks.

Alsterbergi seisukohaga ühinedes pean ka mina põhja, kuhu ei seti mitte ainult kogu järves produtseeritud plankton vaid ka lainetest peenendatud ja tuulest laiali kantud submersne ja demersne floora ning kuhu lõppude lõpuks langeb järve ka väljastpoolt sisse kantud allohtoonne mädanemisvõimeline materjal tähtsamaks hapnikukonsumendiks. Põhjasette mõju veekogu hapnikustratifikatsioonile peab igal juhul olema suurem ning püsivamailmelisem kui teatud ajamomendil vees hõljuva mädanemisvõimeliste ainete mõju seda tohiks olla.

Hapnikusisaldus sm^3 Viljandi ja Karula järves.

Viljandi järv 11. ja 12. VII. 27			Karula järv 13. VII. 27		
	Süg. (Tiefe) 11 m	Süg. (Tiefe) 9 m	Süg. (Tiefe) 8.55 m	Süg. (Tiefe) 15 m	Süg. (Tiefe) 8 m
0 m	7.7	8.1	7.8	6.6	6.3
4	6.6	4.9	6.6	3.3	3.7
6	2.3	2.2	3.5	3.5	—
7	—	—	—	—	2.6
8	2.7	3.1	3.0	—	—
9	—	—	—	4.1	—
10	3.5	—	—	—	—
14	—	—	—	5.5	—

Põhjasetet selleks teguriks pidades, millest hapnikukihitus mõjustatud, ning Alsterbergi poolt rõhutatud tuule mõjul tekkinud voolude tähtsust arvestades võime kõige pealt seletada seni õieti rahuldavat seletust veel mitte leidnud kolmandat laadi hapnikukurvi tekkimisviisi. Teen seda näidete varal Karula ja Viljandi järvest. Vaadeldes A. Määri poolt analüüsitud hapnikuproovide resultaate, mis antud tabelis ning pilku heites nimetatud järvede kaartidele (9. ja 10. joon.) näeme, et normaalsed seeriad üldise järvepõhja nivoost, seeriad metalimnilise miinimumiga aga piiratud alaga sügavamatest lohkudest on pärit. Sääraustes lohkudes leiduva vee hapnikumajandamine on seega erinev muu järvevee omast. Tuulest tekitatud voolud panevad peamiselt liikuma ülemised veekihi, mis

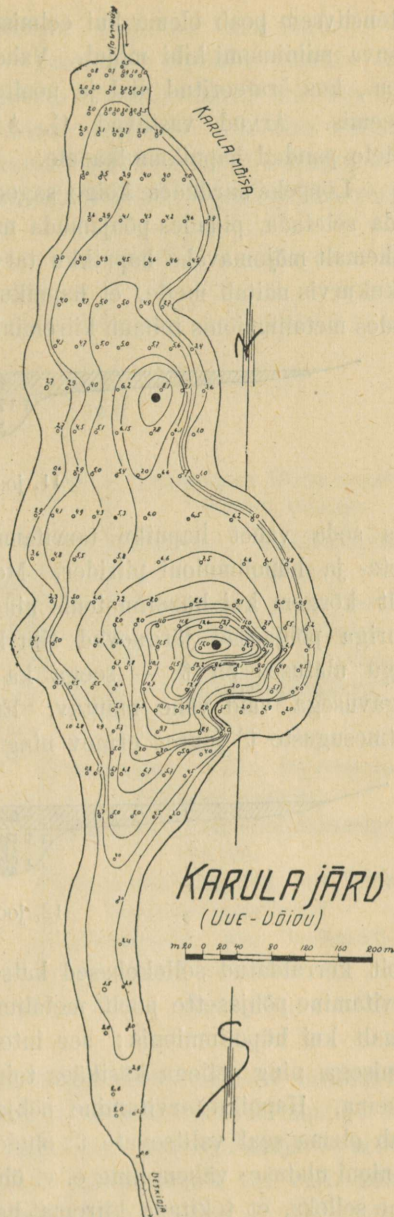


9. joon. Viljandi järve sügavustekkaart. Mustade täppidega on tähistatud proovide võtmise kohad; vasema täpi kohal on sügavus 8,55 m, keskmise kohal 11 m ja parempoolse kohal 9 m.

asuvad kuni selle sügavuseni, mis suuremale osale järvest omane, kuna vesi üksikutes sügavamates lohkudes — mille maht järve üldmahuga võrreldes õige väike — neist vooludest vaid õige nõrgalt puudutatakse või peaaegu hoopis puutumata jäetakse. Siin leiduv vesi saab kevadise täistsirkulatsiooni ajal hapnikust e. v. küllastatud. Temperatuuri hüppekihi kujunedes hakkab selle all järve suuremas osas intensiivne hapniku tarvitamine põhjasette poolt, tuulevoolud vett segades tekitavad hüppekihi all horisontaalselt üle kogu järve levinud madala hapnikusisaldusega kihi. See, olles tekkinud, ei jäta mõjustamata allpool olevat lohus esinevat vett, mille hapnikusisaldus, oletades, et põhjasette hapnikutarvitamine lohus põhjamauda erinevate omuste tõttu (vesi lohus järve omapärase konfiguratsiooni tõttu pikemat aega aastas hapnikurikas kui madalamates järveosades, seega sete lohu põhjas rohkem läbi mädanenud) ja siin esineva madalama t^o tõttu väike, teatud ajaks pealpool oleva vee hapnikusisaldusest suuremaks võib osutada. Seega võime järve jaotada kahte teineteise peal asetsevasse erinevasse ossa: pinna pool suu-

remat osa järvest haarav osa normaalse hapnikukihitusega, lohus vesi, milles peal lasuva madala hapnikusaldusega kihi mõjust tingitud hapniku kahanemine põhjast ülespoole esineb. Kirjeldatud vahekordi aitab selgitada 11. joon. kujutatud skeem, mille šrafeeritud ala üle kogu järve levinud üldise põhjanivoo mõjul tekkinud hapnikuvaest kihti kujutab, nooled aga hapniku kahanemise suunda lohus, selle miinimumikihi mõjul ära märgivad. Arvud näitavad hapnikusaldust sm^3 vastavalt A. Määri andmetele Viljandi järvest.

Eelnimetatud seisukohast lähtudes on seletatav ka kõvera tekkimine metalimnilise miinimumi ning hapnikuhulga kahanemisega põhja poole. Siin tuleb lihtsalt kõvera ülemist ja alumist osa iseseisvana vaadelda, järve aga kahekorralisena kujutella, sest ka need järved — niipalju kui minul tarvitada olevatest andmetest näha — on sama kujuga nagu eelmainitudki: üldiselt madal järv piiratudalalise sügavama lohuga. Siin on ülemine, nn. metalimniline miinimum tekkinud üldise põhjanivoo mõjul, kuna lohus esinev kihitus on kujunenud osalt põhja mõjul — mille hapnikutarvitus siin



10. joon. Karula järve sügavustekaart. Mustade täppidega on tähistatud proovide võtmise kohad; alumise täpi kohal on sügavus 15 m ja ülemise kohal 8 m.

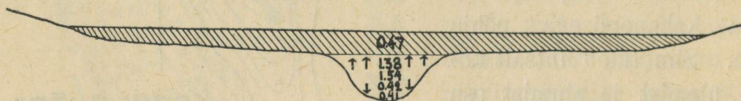
intensiivsem peab olema kui eelmisel juhul —, osalt aga selle peal lasuva miinimumi kihi mõjul. Vahekordi sellises järves kujutab 12. joon., kus šrafeeritud alal ja nootel sama tähendus, mis eelmiseski skeemis. Arvud vastavad G. Alsterbergi poolt Skärhult'is tähele pandud hapnikuhulkadele.

Lõppeksi siirdudes kõige sagedamini esinevale juhule võime ka seda seletada, pidades põhjamuda mädanemist kui mitte ainsaks, siis vähemalt mõjumavaks hapnikku tarvitavaks teguriks. Niverdis hapnikukurvis näitab meile, et hapnikuhulga kahanemine sügavuse kasvades metalimnionis toimub kiiremini kui hüpolimnionis. Peateguriks,



11. joon.

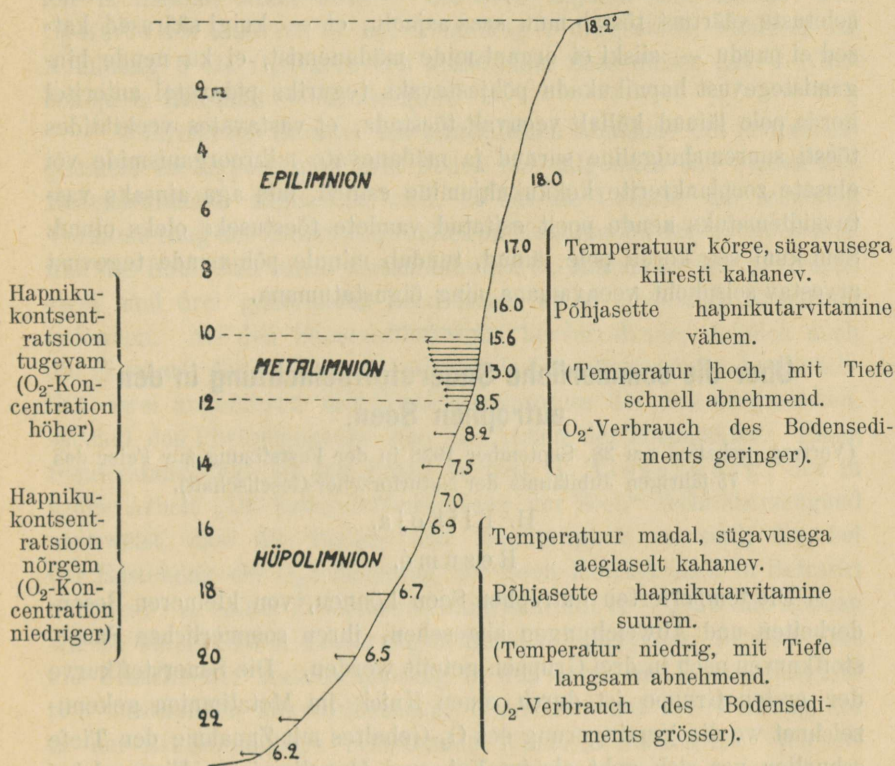
mis seda vahet hapniku tarvitamises tingib, pean põhja t^0 vahet meta- ja hüpolimnioni piirides. Metalimnionis on üldiselt t^0 tunduvalt kõrgem kui hüpolimnionis ning madalamaks muutuva temperatuuriga põhjaosad järgnevad siin kiiresti teineteisele, hüpolimnioni kogu ulatuses on t^0 — seega ka põhja t^0 — üldiselt madal ning sügavusega vaid vähe muutuv. Et põhjamuda hapnikutarvitamine mitmesuguste t^0 juures erinev ning t^0 tõusuga suureneb, mida minu



12. joon.

poolt korraldatud sellekohased katsed tõendavad, siis peab hapniku tarvitamine põhjasette poolt metalimnioni piirides toimuma intensiivsemalt kui hüpolimnionis; see intensiivsus peab aga sügavuse kasvamisega ning sellega käsikäes toimuva t^0 langemisega kiiresti kahanema. Hapniku tarvitamine põhjasette poolt hüpolimnioni piirides peab olema seal valitsevate t^0 olude iseloomust tingitud kogu hüpolimnioni ulatuses vähem ning e. v. ühtlane. Kuid t^0 vahest üksi oleks vähe selleks, et tekitada kiiremat hapnikuhulga kahanemist metalimnioni piirkonnas, sest põhjamuda aktiivsus on sügavamal tavaliselt suurem kui madalal, mida minul ka katseliselt korda on läinud ära näidata. Teisest küljest aga on hapniku kontsentratsioon metalimnionis kõrgem kui sügaval, põhja lähedal, mis omasoodu hapniku ära

tarvitamise kiirust metalimnionis tõstab. Mainitud kahe teguri — t⁰ ja hapniku kontsentratsioonivahe — koostoimel osutubki hapniku tarvitamine põhjasette poolt metalimnionis intensiivsemaks kui hüpolimnionis, kuid see intensiivsus kahaneb sügavuse kasvades kiiresti. Tuulevoolud uhavad põhjaga kokkupuutumisel tekkinud hapnikuvaese vee ära, asendades seda vahet pidamata värsket, hapnikurikka vee



13. joon.

ning muutes seega hapnikukihituse kogu järve ulatuses horisontaalseks. Asja kujutella aitab 13. joon., kus noolte pikkus hapniku tarvitamise määra kujutab. Arvud diagrammis käivad Saadjärve kohta; vasempoolsed märgivad ära sügavusi, parempoolsed 15. VIII. 26. a. vastavas sügavuses esinenud temperatuure.

Nii tuleks hapniku kadu põhjustavate — seega ka hapnikukõvera iseloomu tingivate — teguritena kõne alla: mikroorganismide, eriti fütoplankterite, mädanemine, zooplankterite hingamine ning põhjasette mädanemine. Viimane oletus tekkis minul juba enne Als-

terbergi tööga tutvumist mõningate Saadjärve uurimisel tehtud tähelepanekute põhjal, ning eriti möödunud sügisel Karula ja Viljandi järve kohta käivate andmetega tutvumisel. Alsterbergi tööst oma seisukohale kinnitust leides korraldasin käesoleval suvel rea katseid põhjasetete hapnikutarvitamise määra kindlakstegemiseks, mis katsed minu seisukohta vaid kinnitavad ning mille üheks tulemuseks esitatud mitmet liiki hapnikukihituse tekkimisviisi seletus. Nende seletuste väärtust tõstab muu seas asjaolu, et — kuigi säärased katsed ei puudu — siiski ei organismide mädanemist, ei ka nende hingamistegevust hapnikukadu põhjustavaks teguriks pidavatel autoritel korda pole läinud küllalt veenvalt tõestada, et vastavates veekihtides tõesti suuremahuline surnud ja mädanevate mikroorganismide või elusate zooplankterite kokkukuhjumine esineb, mis aga ainsaks vastuvaidlematuks nende poolt esitatud vaadete tõestuseks oleks olnud. Seni kuni see korda pole läinud, tundub minule põhjamuda tegevust arvestav seisukoht veenvamana ning õigustatumana.

Über die sommerliche Sauerstoffschichtung in den eutrophen Seen.

(Vortrag, gehalten am 28. September 1928 in der Festsitzung zur Feier des 75-jährigen Jubiläums der Naturforscher-Gesellschaft).

H. Riikoja.

Resumé.

Die temperierten eutrophen Seen können, von kleineren Besonderheiten und Abweichungen abgesehen, ihren sommerlichen Sauerstoffkurven nach in drei Gruppen geteilt werden. Die Sauerstoffkurve der ersten Gruppe ist durch einen Knick im Metalimnion gekennzeichnet wo die Verringerung des O_2 -Gehaltes mit Zunahme der Tiefe schneller vor sich geht als im Epi- und Hypolimnion. Eine solche, von A. Thienemann als „normale“ bezeichnete O_2 -Kurve, die die gewöhnlichste Kurve in eutrophen Seen ist, findet sich auch in den meisten Seen Estlands. Als Beispiele solcher Kurven sind in den Abbildungen 1 und 2 die O_2 -Kurven der Seen Saadjärv und Agali gegeben. Der Knick der O_2 -Kurve grösserer und tieferer Seen ist gewöhnlich weniger scharf ausgeprägt, als der kleinerer und seichter Seen, wie zum Beispiel in den Seen Verevi (Abb. 3) und Raadi (Abb. 4).

Viel seltener sind die Seen der zweiten Gruppe, die neben dem O_2 -Minimum in der Tiefe noch ein anderes, das sogenannte metalim-

nische Minimum, aufweisen. Derartige Seen sind in Estland noch nicht bekannt. Abbildung 5 gibt eine derartige Sauerstoffkurve des Sees Skärhult in Schweden wieder.

In den Seen der am seltensten vorkommenden dritten Gruppe aber ist der O_2 -Gehalt am geringsten im Metalimnion und wächst dann wieder mit zunehmender Tiefe. Von Seen dieser Art kenne ich in Estland bisher zwei — die Seen Viljandi und Karula. Die O_2 -Kurve des letzteren ist auf Abbildung 7 dargestellt, während die Abbildung 6 die O_2 -Kurve des klassischen Sees dieser Art — Glubokoje in Russland — wiedergibt.

Während als Ursache der allmählichen Abnahme des Sauerstoffgehaltes im Hypolimnion zum Boden hin, allgemein das Faulen des Bodensediments angesehen wird, so hat die Ursache der schnellen Verminderung des Sauerstoffgehaltes im Metalimnion der ersten Gruppe und das Entstehen eines metalimnischen O_2 -Minimums der zu Gruppe zwei und drei gehörenden Seen bisher keine eindeutige Erklärung gefunden. Als den Sauerstoffschwund hervorrufende, folglich auch die Eigenart der O_2 -Kurven bedingende Ursachen werden hauptsächlich zwei angeführt: der Zersetzungsprozess der Mikroorganismen, speziell des Phytoplanktons, und das Atmen der Zooplankter. Einen Sonderstandpunkt in der Frage vertritt G. Alsterberg, der in seiner Arbeit „Die Sauerstoffsichtung der Seen“ recht überzeugend nachweist, dass die Boden- und Windtätigkeit es sind, die bei der Entstehung der O_2 -Schichtung der Seen hauptsächlich in Betracht kommen. In seiner Zusammenfassung schreibt er; „Hiermit können wir zu einer dritten Erklärungsmöglichkeit übergehen, nämlich dass die Ursache der Makroschichtung in der durch die Bodenkonfiguration bestimmten Mikroschichtung, kombiniert mit der Wirkung der in der Horizontalebene arbeitenden Winde zu suchen ist. Wir erhalten als Resultat eine sekundäre Makroschichtung, die der Horizontalebene folgt“.

Mich an Alsterbergs Annahme anschliessend finde auch ich, dass der Seeboden, wohin nicht nur das im ganzen See produzierte Plankton, sondern auch die von den Wellen zerkleinerten und vom Winde über den See zerstreuten Überreste der sub- und demersen Flora, sowie das von auswärts in den See gelangende fäulnisfähige allochtone Material ablagert, als der bedeutendste Sauerstoffkonsument angesehen werden muss. Jedenfalls dürfte die Wirkung des Bodensediments auf die Sauerstoffstratifikation des Wassers grösser und andauernder sein, als die der nur zu gewisser Zeit im Wasser

7
 schwebenden fäulnisfähigen Körper. Von dieser Annahme ausgehend und die von Alsterberg hervorgehobene Bedeutung der durch den Wind erzeugten horizontalen Strömungen in Betracht ziehend, ergäbe sich die Erklärung der bisher noch nicht befriedigend gelösten Frage der Entstehung der Sauerstoffkurve der zu Gruppe drei gehörenden Seen. Einen Blick auf die nach den von stud. zool. A. M ä ä r mir freundlich zur Verfügung gestellten Analysenresultaten zusammengesetzte Tabelle (Seite ~~XXVI~~) und auf die von ihm gefertigten Tiefenkarten der Seen Karula und Viljandi (Abb. 9 u. 10) werfend¹⁾, sehen wir, dass die normalen Serien vom allgemeinen Bodenniveau, die Serien mit dem Sauerstoffminimum im Metalimnion aber von begrenzten Vertiefungen stammen. Der O₂-Gehalt solcher kesselartiger Vertiefungen weicht folglich von dem der übrigen Wassermasse ab. Die vom Winde hervorgerufenen Strömungen setzen in erster Linie die Wasserschichten bis zum allgemeinen Bodenniveau in Bewegung, während das Wasser der einzelnen Vertiefungen diese Bewegung nur schwach oder fast garnicht mitmacht. Das Wasser dieser Vertiefungen wird im Frühling zur Zeit der Vollzirkulation von Sauerstoff mehr oder weniger gesättigt. Nach dem Entstehen der Temperatursprungschicht beginnt unter derselben im grössten Teil des Sees ein intensiver O₂-Konsum. Die Windströmungen setzen das Wasser in Bewegung und es entsteht derart eine unter der Sprungschicht horizontal über den ganzen See verbreitete sauerstoffarme Schicht. Ist eine derartige Schicht entstanden, so dürfte sie unter Annahme, dass der O₂-Verbrauch in der Vertiefung wegen der abweichenden Eigenschaften des Bodenschlammes²⁾ und wegen der hier niedrigeren Temperatur gering ist, nicht verfehlen ihren Einfluss auf das Wasser der Vertiefung, das infolge der in der Anmerkung angegebenen Gründe zu gewisser Zeit sich als sauerstoffreicher erweisen kann als das darüberliegende, auszuüben. Folglich kann der See in zwei übereinander liegende seinen Eigenschaften nach verschiedene Teile geteilt werden: erstens das Wasser der Vertiefung mit Verminderung des O₂-Gehaltes in der Richtung vom Boden nach oben zu, und zweitens das über diesem liegende, eine normale O₂-Schichtung aufweisende übrige Wasser des Sees. Die beschriebenen

1) Die schwarzen Punkte bezeichnen die Stellen der Probenentnahme.

2) Wegen der eigenartigen Konfiguration des Sees ist das Wasser der Vertiefung längere Zeit im Laufe des Jahres reicher an Sauerstoff als in den seichterem, den grösseren Teil des Sees umfassenden Stellen, wodurch die Bodenablagerungen dort in grösserer Masse durchfault sein müssen.

Verhältnisse hilft die Abbildung 11 zu erläutern. Der schraffierte Teil stellt die über den ganzen See verbreitete, unter Einfluss des allgemeinen Bodenniveaus entstandene sauerstoffarme Schicht dar, die Pfeile geben die Richtung des durch diese Minimumschicht bedingten O_2 -Schwundes im Wasser der Vertiefung, die Zahlen aber den Sauerstoffgehalt der entsprechenden Schichten des Sees Viljandi am 11. VII. 27 in sm^3 an.

Auf die oben angeführte Annahme bauend können wir auch das Entstehen der Kurve der zweiten Art mit dem O_2 -Minimum im Meta- und im Hypolimnion erklären. Hier müssen wir die Kurve als aus zwei selbständigen Teilen — dem oberen und dem unteren — bestehend betrachten und uns auch hier den See als aus zwei übereinander liegenden Teilen bestehend denken, denn die Bodenkonfiguration dieser Art von Seen ist, wie aus dem mir zur Verfügung stehenden Material ersichtlich, dieselbe, wie die der oben besprochenen Seen. Hier ist das obere, sogenannte metalimnische Minimum unter Einfluss des allgemeinen Bodenniveaus entstanden, während die Schichtung der Vertiefung zum Teil vom Boden, dessen O_2 -Verbrauch hier intensiver sein muss als im vorher behandelten Fall, zum Teil aber von der darüber liegenden Minimumschicht bedingt sein muss. Diese Verhältnisse veranschaulicht die Abbildung 12 wo der schraffierte Teil, die Pfeile und die Zahlen in demselben Sinn gebraucht sind wie oben; die Zahlen beziehen sich auf den See Skärhult wie sie Alsterberg angibt.

Zum Schluss den am häufigsten vorkommenden Fall betrachtend und dabei den Fäulnisprozess des Bodensediments wenn nicht für den einzigen, so doch für den wichtigsten Grund der Verzehrerung des Sauerstoffes haltend, können wir auch das Entstehen der „normalen“ Kurve erklären. Der Knick in dieser Kurve zeigt uns, dass der Verbrauch des Sauerstoffes im Metalimnion schneller vor sich geht als im Hypolimnion. Als Hauptgrund, der diesen Unterschied im Sauerstoffverbrauch des Meta- und Hypolimnions bedingt, käme der Unterschied in der Temperatur des Bodenschlammes im Bereiche dieser beiden Schichten in Betracht. Die Temperatur des Metalimnions ist im allgemeinen bedeutend höher als im Hypolimnion und Bodenabschnitte mit abnehmender Temperatur folgen hier rasch aufeinander, während im Hypolimnion die Temperatur des Wassers sowie des Bodensediments niedrig ist und mit zunehmender Tiefe nur wenig fällt. Da, wie ich experimentell festgestellt habe, mit dem Steigen der Temperatur der O_2 -Verbrauch des Bodenschlammes zunimmt,

so muss der O_2 -Schwund im Metalimnion im Bereiche des Bodens intensiver vor sich gehen als im Hypolimnion; diese Intensivität muss jedoch mit zunehmender Tiefe und damit verbundenem Fallen der Temperatur rasch abnehmen. Der O_2 -Verbrauch des Bodensediments in den Grenzen des Hypolimnions aber muss, gemäss den dort herrschenden Temperaturverhältnissen, im Bereiche des ganzen Hypolimnions geringer sein und mit zunehmender Tiefe nur geringe Veränderungen aufweisen. Doch die Wirkung der Temperaturendifferenz allein dürfte noch nicht ausreichend sein um eine derartige Verminderung des Sauerstoffes im Bereiche des Metalimnions zu erzeugen, denn die Aktivität des Bodenschlammes ist für gewöhnlich zur Tiefe hin grösser, was ich auch experimentell feststellen konnte. Andererseits ist aber die O_2 -Konzentration grösser im Metalimnion als tiefer hin, in der Nähe des Bodens, eine Tatsache, die ihrerseits auf den Prozess des O_2 -Verbrauches im Metalimnion beschleunigend einwirken muss. Durch das Zusammenwirken dieser beiden Faktoren — der Temperatur und des Konzentrationsunterschiedes des Sauerstoffes — ergibt es sich, dass der Verbrauch des O_2 durch das Bodensediment intensiver im Metalimnion als im Hypolimnion vor sich geht und dass diese Intensivität mit wachsender Tiefe sich rasch vermindert. Die Windströmungen schweben das bei der Berührung mit dem Boden entstandene sauerstoffarme Wasser fort und ersetzen es unaufhörlich durch neues, sauerstoffreiches wodurch die O_2 -Schichtung eine sich horizontal über den ganzen See verbreitende wird. Wie die Sache vorzustellen ist hilft das Diagramm auf Abbildung 13 zu veranschaulichen, wo die Länge der Pfeile die Grösse des O_2 -Verbrauches veranschaulicht. Die Temperaturangaben (rechts) beziehen sich auf die den 15. VIII. 26 im See Saadjärv gemachten Beobachtungen; links sind die entsprechenden Tiefen angegeben.

Den Wert dieser meiner Ausführungen hebt bedeutend auch die Tatsache, dass es weder den Vertretern der Ansicht, dass das Faulen der Organismen der Grund zum O_2 -Schwund ist, noch denen, die den Atmungsprozess der Zooplankter als Grund desselben annehmen, bisher noch nicht gelungen ist genügend einwandfrei eine Ansammlung von faulenden Mikroorganismen oder von lebenden Zooplanktern in den entsprechenden Wasserschichten nachzuweisen. Solange ein derartiger Beweis fehlt, scheint mir eine auf die Tätigkeit des Bodenschlammes bauende Erklärung der Entstehung der O_2 -Schichtung überzeugender und berechtigter.

ESTICA

B-628

8.

i24177133