

Veekogude ummuksile jäämine hüdrobioloogia seisukohast

Toomas Kõiv, Ingmar Ott, Peeter Nõges, Arvo Tuvikene

EPMÜ ZBI Võrtsjärve Limnoloogiajaam

Järvede ummuksilejäämine on tänavusel karmil talvel meedias väga suurt ja tihti vastakat tähelepanu leidnud. Võrtsjärve Limnoloogiajaama teadurid on selles küsimuses saatnud ekspertarvamusi ja hinnanguid erinevatesse asutustesse ning ajakirjandusse, kuid need on olnud lühiteated, kus ei ole põhjalikumalt seletatud järvedes toimuvat. Pealegi peetakse reeglina ummuksilejäämise probleemi all silmas vaid kalade talvist suremist, arvestamata toimuva mõju kogu ökosüsteemile. Samas ei saa seda probleemi alati käsitleda kui tohutut looduskatastroofi. Seepärast peame vajalikuks anda lisateavet arvestades esilekerkinud küsimusi.

Miks järved jäävad ummuksile?

Vaatamata sellele, et ummuksilejäämise protsess iseenesest tundub olevat küllaltki lihtne, on talvise hapnikupuuduse põhjused mitmekesised ja sageli üksteisega läbipõimunud ning praktiliselt mitte kunagi ei saa väita, et ummuksilejäämises on süüdi ainult mingi konkreetne üksiktegur. Enamasti on tegemist mitme faktori võimenduva koosmõjuga (sünergism), mis soodsate tingimuste koosmõjul käituvad nagu veerev lumepall. Järvede olulisemad ummuksilejäämise põhjused oleksid:

- Kliimaatilised – Ummuksilejäämist soodustavad varajane jäätumine ning karm talv paksu jää- ja lumikattega. Pakaselistele talvedele järgneb reeglina jahe ja hiline kevad, mis pikendab jääkatte kestvust veelgi. Olukorda halvendab ka vähene sademete hulk või pöud eelneval suvel-sügisel ja seetõttu madal veeseis jäätumise ajal.
- Morfomeetrilised – Talvine hapnikupuudus on tavaline madalates, väikese veevahetusega või umbjärvedes. Kriitiliseks loetakse vähem kui 3 m keskmist sügavust, millest allpool kipuvad suurtaimed vohama hakkama ja veemass jääb piisava hapnikuarvu säilitamise jaoks väikeseks. Veevahetuse puhul on hulgalistest näitajatest tihti olulisem selle jagunemine aasta ja vahetuvate veekihtide lõikes. Nii pole rohkemal veevahetuskordadel suurt tähtsust, kui need toimuvad peamiselt kevadise suurvee ajal või vahetub veesamba tugeva termilise kihistumise tõttu vaid õhuke pindmine veekiht. Küllaltki määrav on ka järvenõo, eriti just kaldanõlva kuju. Hapnikupuudus algab madalaveelisest litoraaliast ning vastupidavamad on järskude kallastega kausitaolised veekogud, kus nõlva kalle on vähemalt 3:1 (iga 3 pikkusemeetri kohta suureneb sügavus 1 m võrra) või rohkem.
- Hüdrokeemilis-füüsikalised – Neist tegureist on kõige olulisem setetes olev aastakümnete jooksul talletunud orgaanilise aine hulk ja veesambasse talve jooksul kogunevad mitmesugused redutseeritud anorgaanilised ühendid (näiteks väävelvesinik, metaan), mis tarbivad kiiresti suures hulgas hapnikku. Määrav on ka veekogu valguskliima. Lisaks paksule jää- ja lumekihile halvendab valgustingimusi oluliselt tume ja heljumirikas vesi. Üldjuhul on hüdrokeemilis-füüsikalised põhjused otseselt seotud veekogu toitelisusega. Mida kõrgemal tasemel on toitelisus, seda suurem on ummuksilejäämise oht.
- Hüdrobioloogilised – Järvede elustiku hulk ja koosseis pole olulised mitte niivõrd hapnikutarbijate, vaid hoopis tootjate seisukohast lähtudes. Kõige olulisemat rolli mängib siin suurtaimestiku ja talvise fütoplanktoni, kui peamiste hapnikutootjate liigiline koosseis ja hulk. Samas on surnud ja lagunevad taimemassid ühed peamised hapnikutarbijad veekogus.

Millised järved on Eestis ohustatud?

Eesti veekogudest on kõige ohtlikumas olukorras rohketoitelised, aeglase veevahetusega madalad järved, mis Aare Mäemetsa tüpoloogia kohaselt võib jagada veel mitmesse rühma. Esimese neist moodustavad nn. makrofüüdi järved, mis on väikese keskmise sügavuse ja väga rikkaliku suurtaimestikuga. Viimane katab tavaliselt rohkem kui $\frac{3}{4}$ järve pindalast. Tüüpilised esindajad on Vooremaa järved, veel Ermistu, Tõhela. Teise rühma kuuluvad madalad segatoitelised veekogud, mis sisaldavad rikkalikult orgaanilisi ja rohkelt või mõõdukal hulgal mineraalaineid. Selle küllaltki eripalgelise järvederühma vesi on kollane või pruunikas ja põhi tihti kaetud paksu lendmuda kihiga. Ka suuruselt on see väga varieeruv rühm, kus leidub pisemaid (Kantküla Mustjärv, Udujärv) ja Eesti mõistes “korralike” mõõtmetega järvi nagu näiteks Veisjärv, Kahala, Maardu. Kolmanda rühma potentsiaalsetest ummuksile jääjatest moodustavad paljud Lääne-Eesti rannikul ja saartel paiknevad rannajärved, kuna talveks nende ühendus merega enamasti katkeb ja põhjamudas tekib rohkelt mürgist väävelvesinikku.

Lisaks madalatele veekogudele on samuti ohus liigtoitelised ja suhteliselt sügavad kihistunud järved, kuid need on enamasti väikesed ja vaid kohaliku tähtsusega. Kehvade hapnikutingimuste põhjuseks on neis hüpolimnioni suur ulatus ja mittetäielik segunemine kevadel või sügisel. Tüüpilised näited oleksid Verevi, Ruusmäe, Kokora Mustjärv, Vasula jne.

Kui arvestada tüpoloogilist kuuluvust ja morfomeetrilisi näitajaid, siis karmidel talvedel potentsiaalselt ummuksile jäävaid järvi võib olla 25-30 % koguarvust. Sellesse numbrisse tuleks aga suhtuda teatava ettevaatusega, sest meil on seni olnud kasutada väga vähe andmeid talvise hapnikurežiimi kohta. Ka hüdrokeemiliste taustandmete read on pikemad vaid vähestes monitooringujärvedes.

Kuidas prognoosida ummuksile jäämist?

Ummuksile jäämist on üsna raske ennustada, kuna pikaajalised ilmaprognoosid ulatuvad reeglina vaid kolme-nelja kuu taha ja oluliste mõjurite hulk on suur, mis teeb modelleerimise keerukaks. Kahtlemata on olulisel kohal pidev hapnikutingimuste monitooring.

Võrtsjärvel tehtud pikaajaliste talviste vaatluste põhjal saame esitada väga üldise hapniku vähenemise prognoosi kõige karmimate olude kohta rohketoitelistes järvedes. Tingimustes, kus gaasivahetust takistab jääkaas, veevahetus jõgede kaudu on soikunud ja kus vetikate fotosünteesi takistab jääl olev paks lumikate, jäävad järgi vaid hapnikku tarbivad protsessid - orgaanilise aine lagunemine, anorgaaniliste ainete oksüdeerumine ja veeorganismide hingamine. Kolmekümne aasta keskmiseks hapniku kahanemise kiiruseks detsembrist märtsini on Võrtsjärves arvatud 100 mg hapnikku ruutmeetri kohta ööpäevas. Ebasoodsates tingimustes, nagu seda pakub tänavune talv, võib see näitaja tõusta väärtuseni 600 mg/m² ööpäevas. Umbes sellistes piirides toimub hapniku langus ka teistes rohketoitelistes järvedes. Liigtoitelistes järvedes on prognoos kehvem ja mõõdukama toitelisusega järvedes parem.

Kui nüüd oletada, et meil on ühe meetri sügavune järv, mis aastavahetusel on hapnikuga küllastunud (0°C ≈14,6 mg/l, 4°C ≈13,1 mg/l), jätkuks keskmistes oludes seal hapnikku kuni 150 päevaks ehk 30. maini, mil jää on ammu sulanud. Rasketes oludes saaks hapnik otsa aga juba enne 25. jaanuari. Kuna hapnikku tarbivad talvel peamiselt setted, on selge, et viie meetri sügavune järv peaks samades oludes umbes viis korda kauem vastu. Sellised arvutused võimaldavad teha mingeid ligikaudseid ennustusi, kuid tegelikkuses käitub iga järv pisut erinevalt.

Kalade ja muude loomade osa talvises hapnikurežiimis?

Tihti ollakse arvamusel, et peamise osa hapnikust tarbivad elusorganismid. Siiski on kalade osa üldises järvede hapnikusisalduse vähenemises väike ja veelgi tühisem on selles selgrootute osa. Peamine hapnikutarbija on ikkagi elutu orgaanilise aine lagunemine. Kalade hapnikutarvet iseloomustavad järgmised arvutused. Hapniku kulu parasvöötme kaladel puhkeolekus 4°C juures on

keskmiselt 40 mg O₂/kg tunnis. Karplastel on see näitaja madalam (20 mg/l) ja lõhilastel kõrgem (80 mg/l). Aeglasel ujumisel (üks kehapiikkus sekundis) kalade hapniku tarbimine kahekordistub, kiirel ujumisel võib see olla aga kuni kümme korda suurem kui puhkeolekus. Kuna talvel kalad toituvad ja ka ujuvad vähe, siis võiks arvutuste aluseks võtta keskmise tarbimise 60 mg O₂/kg tunnis. Arvestades Eesti järvede keskmiseks kalamassiks 200 kg/ha (keskmise saagikus ca 10-20 kg/ha) ja võtame kalkulatsioonide aluseks eelpool toodud meetrisügavuse mudeljärve, saame kalade ööpäevaseks hapnikutarbeks umbes 30 mg/m², mis moodustab vaid 5% lahustunud hapniku üldisest vähenemisest kõige mustema prognoosi korral. Surnud kalade osa orgaanilise aine koguhulgas on samuti väike, seepärast pole arvatav oht surnud kalade lagunemisest kuigi suur.

Ummuksilejäämise mõju järve edaspidisele talitlusele

Talvine ummuksilejäämine muudab järve ökosüsteemi seisundit mitmeks aastaks, mis väljendub kalastiku ümberkujundamises ja seoses sellega ka toiduahela alumiste lülide vahekorra ja koosseisu muutuses. Enamik kalu ei suuda taluda isegi madala veetemperatuuri juures hapnikusisalduse langust alla 2 mg/l. Madal hapnikukontsentratsioon viib lõpuks kalade valikulise suremuseni ja koosluste ümberkujunemiseni järgnevatel aastatel. Osaliselt või täielikult hävinevad rööv- ja lepiskalade populatsioonid. Meie oludes on nendeks peamiselt ahven, särg ja haug. Säilub bentosetoiduliste kalade populatsioon, kuna ummuksile jäänud järvedes on kaladest võimelised talvituma vaid koger ja linask.

Edasine mõju ökosüsteemile sõltub olulisel määral järvetüübist ja seni eksisteerinud ökosüsteemi struktuurist. Suure pindalaga ja taimestikuga segatoiteliste järvede vesi peaks väiksemate ahvenate ja särgede kadumisega minema selgemaks ja puhtamaks. Selle põhjuseks on väikeste kalade ühe olulisema toiduobjekti, loomse hõljumi arvukuse, eriti suuremõõtmeliste populatsioonide, tõus. Loomse hõljumi toiduks on aga mikrovetikad, kes põhjustavadki sageli vee vähest läbipaistvust. Seega toimib üks karm talv nagu veekogude seisundi parandamise üks tuntud meetod, biomanipulatsioon, mis näebki ette just peenkala hulga olulist vähendamist. Seda järvetaastamise võimalust on laialdaselt kasutatud näiteks Hollandis ja Taanis, aga ka Soomes. Neis riikides on inimesed huvitatud eelkõige selgest ja puhtast järveveest ning harrastuskalapüügiga tegeldakse neil veekogudel, kuhu on selleks spetsiaalselt kalu asustatud või kust on loota vääriskala kätte saada.

Suurtaimestiku poolest rikastes veekogudes ehk nn. makrofüüdijärvedes kalade suremine taolist "tervistavat" mõju ökosüsteemile ei avalda. Põhjuseks on iseärasus, et selles järvetüübis pole peamiseks orgaanilise aine tootjaks mitte mikrovetikad, vaid hoopis veesisene ja kaldaveetaimestik. Rohke veetaimestik tarvitab kiiresti veest ära vähesedki toitesoolad ja mikrovetikatele jääb väheseks. Lisaks tuleb mainida veel ka suurtaimede allelopaatilist mõju. Kuna taimset hõljumit on vähe, on vesi hea läbipaistvusega praktiliselt kogu vegetatsiooniperioodi ning loomse hõljumi hulk ja suurus ning kalapopulatsioonide koosseis siin praktiliselt mõju ei avalda. Küll aga tuleb rõhutada, et kalarikkamates järvedes peale täielikku ummuksilejäämist võib pärast jäälagnemist järsult tõusta kergestilaguneva orgaanilise aine hulk, mis pärineb hapnikupuudusesse surnud vee-elustikust. Veetemperatuuri tõustes lagundatakse see kiiresti bakterite poolt ning võimalik on kevadine toitesoolade hulga tõus. Kuna suurtaimestik on kevadel veel vähearvukas, siis võivad esialgu ülekaalu saada makrovetikad ning vees hõljuva niitvetikamassi põhjal jääda mulje veekogu seisundi järsust halvenemisest. Arenev veetaimestik tarbib suve jooksul kiirelt ülemäärased toitesoolad ning hiljemalt järgmiseks vegetatsiooniperioodiks on olukord normaliseerunud.

Rannajärvedes on ummuksilejäämise mõju ökosüsteemile kõige väiksem, kuna talvine hapnikupuudus on seal tihti üheks loomulikuks etapiks. Kalastiku koosseis on seal väga muutlik ja kujuneb igal kevadel uuesti merest sisserändavatest kaladest. Kuigi põhjaloomade arengut soodustavad väike sügavus, tugev läbisoojenemine ja taimestikurohkus, on nende liigiline koosseis riimvee sissetungimise ja ummuksilejäämise tõttu suhteliselt vaene. Ebastabiilsete tingimuste tõttu on enimlevinud mitmesugused pioneerliigid.

Seega pole järve ökosüsteemi seisukohalt talvine kalade suremine kuigi oluline. Eestis on taoline suhtumine kalasse harjumatu ning ajakirjanduses tsiteeritud seisukoht, et kalade surm võib veekogule mõnes mõttes ka kasu tuua, on juba põhjastanud pahameelt loodusesõprade hulgas. Hooliv suhtumine elusolenditesse on sümpaatne, kuid kalade päästmise aktsioonidele peaks eelnema siiski väärtuste ja võimaluste analüüs. Kui on tegemist näiteks liigilise mitmekesisuse seisukohast olulise või mõne haruldase liigi elupaigaga, siis on päästetööd õigustatud. Kui järvele kui turismiobjektile lisab väärtust harrastuskalastajate huvi, on kaheldavate ning tihti lootusetute talviste päästetööde asemel mõistlikum järgmisel suvel kalastiku taastamisega tegelda. Teadlastega koostöös võib üritada kalastikku ka veidi ümber kujundada, asustades veekvaliteedi seisukohalt kasulikumaid röövkalu. Kalamajanduslikult olulistes järvedes on vääriskala hukkumine aga suureks löögiks, mis võib kogu järveäärse piirkonna elu pikaks ajaks rivist välja viia.

Järvede ummuksilejäämisel on seega mitmed otsesed ja kaudsed, lihtsad ja keerulisemad aspektid. Peale kalade hukkuvad ka teised loomad. Teiste seas kindlasti vähid, osa kahepaiksetest, putukatest, limustest ning veel mitmete selgrootute rühmade esindajad. Mõju kaladele on aga kindlasti olulisim. Paljud selgrootud talvituvad püsivormidena või on nii väheaktiivsed, et suudavad ellu jääda. Näiteks taluvad surusääskede vastsed järvede põhjas mõnda aega täielikku hapnikupuudust. Neil on mitmesugused kaitsemehhanismid talveks: diapaus, spetsiaalsed kookonid. Mõned vastsed ei hukku ka külmunud substraadis, kuna vett sisaldavad kehavedelikud asendatakse spetsiaalsete antifriisidega. Paljud karbid taluvad anaeroobseid tingimusi, kuna kasutavad energia saamiseks glükogeeni või aminohappeid. Selliste protsesside ATP saagis on tunduvalt kõrgem kui glükolüüsil. Tekkivad happelised jäägid neutraliseeritakse lubikodade erosiooniga. Selgrootute puhul on veel märkimisväärne, et potentsiaalselt ummuksilejäävaid järvi asustavad vähemalt selgrootute osas juba nn. pioneerkooslused, mis on keskkonnamuutustele väga vastupidavad. Kui talvine ummuksilejäämine kahandab oluliselt meie veekogude liigilist mitmekesisust, on kahju tõesti korvamatu.

Kuidas võidelda ummuksile jäämisega?

Võitlust ummuksilejäämisega tuleks alustada juba sügisel. Madalaveelistel aastatel tuleks kõne alla veetaseme tõstmine ja makrofüüdijärvedes surnud taimemassi eemaldamine. Talvistest meetoditest oleksid olulisemad:

Jää lumest puhastamine. Kõige lihtsam meetod, mis suurendab läbi jää vette tungivat valguse hulka ning võib panna vees olevad mikrovetikad fotosünteesima ja hapnikku tootma. Puhas ja värvitu jää pole valguse läbimisel oluliselt suuremaks takistuseks kui vesi. Nii läbib 43 cm paksust jääkihti kuni 70 % pinnalangevast valgusest. Võrtsjärves on mõõdetud vetikate ööpäevaseks hapnikutootmise kiiruseks südatalvel kuni 100 mg/m², mis kompenseerib osaliselt või ideaaljuhul täielikult lagunemisprotsesside käigus tarbitava. Valguse jääst läbitungimist halvendavad oluliselt jääs olev heljum, õhumullid ja muidugi lumikate. Juba 5 cm paksusest värskelt sadanud lumest suudab läbi tungida vaid 20 % valgusest. Lumest puhastamine on efektiivsem alates talve teisest poolest, mil päev on pikem. Üldjuhul piisab kui puhastada juba kolmandik järve pinnast, soovitavalt kaldavöötmet, kus on rohkem veesisest taimestikku.

Aukude raiumine. Omab mõtet vaid sissevoolude lähedal, kus vee liikumine kannab hapniku järve laiali. Siiski suhteliselt väheefektiivne meetod, kuna avada suudetakse tühine osa veepinnast ja augud külmuvad kiiresti kinni. Pahatihti on veevool talvel tavaliselt nõrk või puudub hoopis. Märkimata ei saa ka jätta aukude raiumisel tekkivat müra, mis häirib kalu ja suurendab nende hapnikutarvet. Varem väga populaarne jää murdmine jääkeldrite tarvis võiks tuua samuti mõningast leevendust ja leida rohkem rakendust kalamajanduslike veekogude puhul.

Kunstlik aereerimine. Vee kunstlik aereerimine on mõistlik ainult väikejärvedes ning võimalik juhul, kui selleks leitakse ressursse. Õhu otsene pumpamine jää alla on võrdlemisi ebaefektiivne ja lokaalse mõjuga. Veekogu põhjas lebavate perforeeritud torusüsteemide tõhusus on õhu parema pihustamise tõttu küll suurem, kuid neid võib lubada kasutada vaid kõva põhjaga mittekihistuvates veekogudes. Tunduvalt mõistlikum ja tehniliselt lihtsam on vee pumpamine jääle.

Väljapumbatav vesi suunatakse taas järve eemalasuvate aukude kaudu. Mida kaugem on vahemaa väljapumbatava ja sissevalguva veega aukude vahel, seda parem on tulemus. Näiteks 100-meetrine voolutee peaks õhukese kihina voolava vee hapnikuga küllastama isegi siis, kui väljapumbatavas vees on hapnikku vaid 1 mg/l. Jää peal voolav vesi sulatab ka lund, nii et jää alla pääseb rohkem valgust. Vältida tuleks vee liigset pihustumist, seda eriti tugeva pakase korral, kus tekkivad piisad jäätuvad kiirelt ja jääkiht hoopis pakseneb. Välja tuleks pumbata vaid pindmisest veekihist. Põhjalähedase vee pumpamine võib hoopis kahju teha, kuna lagunemisprotsesside käigus tekib seal suurel hulgal väävelvesinikku, metaani ja süsihappegaasi, mis aereerimisel hapnikku neelates oksüdeeruvad ja selle efektiivsust vähendavad. Mürgise H₂S veemassi segamine ohustab sealset elustikku ka otseselt.

Lõpetuseks tuleks öelda, et talvine ummuksilejäämine on üks looduslikke protsesse, olgugi, et inimese poolt võimendatud. Suuremas ohus olevad järved aga on niivõrd inimese poolt ümberkujundatud, et haruldasi liike ja kooslusi neis peaaegu pole. Haruldasterikkamad on reeglina puhtamad veekogud, milles ka oht väiksem. Elustiku päästmine talvisest hapnikuvaesusest on rohkem humaanne tegevus ja majanduslikku tulu sellisest tegevusest on raske loota.

LISAD

PÕUA- JA TALVEKAHJUDE SELGITAMINE EESTI VÄIKEJÄRVEDE JA VOOLUVEEKOGUDE KALASTIKULE JA VÄHISTIKULE NING KALASTIKU TAASTUMISE UURINGUD

2005.a. ARUANNE

I osa

**Arvo Tuvikene, Margo Hurt, Jaak Tambets, Meelis Tambets,
Rein Järvekülg**

EMÜ Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi Limnoloogiakeskus

Loodushoiu Keskus

Tartu 2005

4.4. Meetodid hapnikupuuduse ennetamiseks ja nende tõhusus.

Hapnikupuuduse ennetavaid meetodeid uuritud järvedes kasutati aastatel 2003-2005 ainult Prossa järves. 2005. aasta kevadtalvel märtsi kuus tekkis selles järves jää all hüpoksia ja vee hapnikusisaldus langes alla 2 mg/l (meie mõõtmiste järgi oli maksimaalne hapnikusisaldus jää all 1,3 mg/l). Samal ajal oli järve jää kaetud paksu lumega, mis takistas valguse tungimist läbi jää ja vetikate fotosünteesi ja hapniku produtseerimise puudumine järves.

Jõgevamaa keskkonnateenistus eesotsas Ene Ilvesega organiseeris jäält buldooseriga lumelükkamise. See üks odavamaid ja lihtsamini teostatav kalade suremise ennetavaid meetodeid andis sellel korral rahuldava tulemuse. Samal ajal tehtud mõõtmised näitasid, et hapnikusisalduse langus peatus ja paar päeva pärast jää lumest puhastamist hakkas uuest tõusma (kahe päevaga tõusis hapnikusisaldus 1,3 mg/l 1,7 mg/l) ja kalde suremist 2005. aasta kevadel ei esinenud.

2003. aasta vee õhustamise tulemused ja hinnang on esitatud põhjalikumalt 2003. aasta aruandes. Siinkohal võiks mainida, et vee õhustamisega alustati tol

korral liialt hilja. Samuti tuleb puuduseks lugeda seda, et tehnilistel põhjustel oli pumbataval veel liialt lühiajaline kontakt õhuga ja hapnikuga rikastumine oli minimaalne (kolmest seadmest üks andis rahuldava tulemuse). Tol korral hapnikusisaldus oli veesambas langenud alla 1 mg/l ja sellisel juhul kalad adapteeruvad madala hapnikusisaldusele aeglasema ainevahetusega ja minimaalse liikumisega. Sellega kaasneb see, et nad ei leia neid väheseidki õhustatud hapnikurikkaid kohti ülesse (vaata Lisa 1).

4.5. Millised järved on ummuksilejäämisest enim ohustatud. Talvine hapnikupuudus tekib esmaselt väikse mahuga madalates eutrofeerunud järvedes, millel on väike veevahetus ja suur orgaanilise aine sisaldus vees ja setetes. Keskmise veetaseme korral on pika ja külma talve korral enim ohustatud Prossa, Eistvere ja Järvi Pikkjärv. Madala veeseisu korral on aga enim ohustatud Kahala järv, kuna keskmine sügavus järvel on ca 1 m.

Kalad ja hapnikupuudus

Arvo Tuvikene

Võrreldes õhuga sisaldab vesi tunduvalt vähem hapnikku. Nii on vees ligikaudu 3% hapnikku võrreldes sama ruumala õhuga. Temperatuuri tõustes gaaside lahustuvus vees väheneb. Ka lahustunud soolad vähendavad gaaside lahustuvust vees, näiteks on hapniku lahustuvus samal temperatuuril merevees 20% väiksem kui magevees.

Kuna vesi on võrreldes õhuga umbes 800 korda tihedam ja palju viskoossem, siis vee liigutamine läbi lõpuste nõuab kaladelt suhteliselt palju energiat. Sellega on seletatav, miks enamuse kaladel toimub vee liikumine üle lõpuste ühesuunaliselt. Erandiks on sõõrsuud ja tuurad, kellel oma toitumiskohastumuste tõttu on suu pikka aega suletud peremehe kehas või põhjasettes ja nad on sunnitud vett pumpama edasi-tagasi.

Enamusel kalaliikidel liigub lõpusliistakute tasandil vesi ja veri vastassuundades. Selline vastuvoolu mehhanism tagab maksimaalse hapniku difusiooni verre, mõnel kalaliigil võib see ulatuda kuni 80%-ni vee hapnikusisaldusest. Kaladel kaasneb hingamisega suur energiakulu. Kuna nad pumpavad vett, mis on 800 korda tihedam õhust, siis kaladel kulub hingamise peale puhkeolekus 18-43% kulutatavast energiast, hingamiskiiruse kolmekordistumisel juba 44-69%. Võrdluseks võib tuua, et inimesel kulub puhkeolekus hingamiseks kogu kulutatavast energiast 2%.

Enamus parasvöötme kaladest omandavad hapnikku peamiselt veest ja kasutavad selleks lõpuseid. Vähemal määral toimub gaasivahetus läbi naha. Erandina toimub näiteks vingerjal gaasivahetus osaliselt soole kaudu. Kuna kalad on võimelised omandama hapnikku veest ainult difusiooni teel, siis peab neil olema suhteliselt suur lõpuste pind. Seoses sellega, et kaladel toimub eluliselt oluliste ionide vahetus läbi lõpuste, ei ole ülisuurte lõpuspindade omamine energeetiliselt otstarbekas.

Väheliikuvatel põhjakaladel on lõpuste pindala ligikaudu 2 cm²/g kehakaalu kohta.

Enamusel kalaliikidel on see

4 cm²/g kehakaalu kohta, aga aktiivsetel kaladel (näiteks heeringas, makrell) kuni 10 cm²/g kehakaalu kohta. Huvitav on ka fakt, et nahaalused kapillaarid moodustavad 10-25% kogu respiratsioonipinnast.

Kaladele surmav hapnikusisaldus vees

Kaladele surmav hapnikusisaldus vees sõltub mitmest tegurist. Olulisematest tuleks nimetada temperatuuri, aklimatiseerimisaega, kalaliiki, haiguste esinemist.

Nimetamata ei saa ka jätta toksiliste ainete esinemist vees, mis tunduvalt tõstab kalade tundlikkust madala hapnikusisalduse suhtes. Kiiresti juuvad kalad, nagu lõhe ja heeringas, on madalate hapnikusisalduste suhtes palju tundlikumad kui vähemaktiivsed kalad.

Hapnik mg/l

Meie kaladest taluvad kõige paremini hapnikupuudust koger ja linask. Koger on ainsana võimeline pikka aega, kuni 3 kuud, omandama energiat anaeroobselt (ilma hapnikuta), kusjuures eraldab lõpuste kaudu vette etanooli. Eelnev aklimeerimine madalal O₂ kontsentratsioonil tõstab kalade vastupanuvõimet madalate O₂ kontsentratsiooni suhtes kuni 50%. Kalade tundlikust hüpoksia suhtes mõõdetakse sagedamini 24-96 tunniliste 50% letaalsuse testide abil (Joonis 1). Jooniselt on selgesti näha, et mida madalam on veetemperatuur, seda suuremat hapnikupuudust kalad taluvad.

Hemoglobiin (Hb). Kalad erinevad oma tundlikkuselt hapniku suhtes peamiselt selle tõttu, et eri liikide veres esineb eri tüüpi hapnikku siduv pigment – hemoglobiin. Nõrga sidumisvõimega hemoglobiin seob veest halvasti hapnikku, aga kudedes annab seda kiiresti ära. Tugeva sidumisvõimega hemoglobiin seob seda veest väga efektiivselt, kuid kudedes vabastab seda aeglasemalt. Viimane grupp on võimeline kuni 80% hapnikku veest verre ekstraheerima. Nõrga O₂ sidumisvõimega Hb esineb näiteks forellil, tugeva O₂ sidumisvõimega kogrel.

Kalade käitumine hüpoksia tingimustes

Vee hapnikusisalduse väljendamiseks on kasutusele võetud terminid hüpoksia ja anoksia. Hüpoksiaks loetakse olukorda, kus vee hapnikusisaldus on alla 2 mg/l. Anoksia puhul puudub hapnik vees täielikult.

Hapnikusisaldus üle 5 mg/l O₂ rahuldab enamikku kaladest kõikidel arenguetappidel. Lõhilaste koelmutes peab hapnikusisaldus US EPA kriteerium järgi olema 5 mg/l O₂. Peab mainima, et vee hapnikusisaldus ja küllastus üksi ei näita seda, kas kaladele on seda piisavalt või ei. See, kas ta on kalale letaalne või ei, sõltub otseselt vee temperatuurist.

Kalade käitumine hapnikupuuduse tingimustes oleneb hüpoksia tugevusest ja kalaliigist. Enamusel kaladest on refleks liikuda veesambas ülespoole, kuna seal on reeglina hapnikusisaldus suurem. Ka on talvel otse jää all veetemperatuur madalam ja seega lahustub seal rohkem hapnikku. Sageli liiguvad kalad hapnikupuuduse tingimustes horisontaalselt ja üritavad leida hapnikurikkamaid/madalama temperatuuriga paiku. Suvel, kui kaladel on vaba juurdepääs veepinnale, siis paljud kalaliigid lähevad hapnikudefitsiidi tingimustes üle nn. pinnahingamisele, mil nad ahmivad suhu vee ja õhu segu. Karpkalalased on paremini kohastunud pinnahingamist kasutama, kui siiglased ja eriti ahvenlased. Samas suurendab pinnahingamine kaladel ärasöömise riski lindude poolt.

Hüpoksiaga kaasneb paljudel kalaliikidel aktiivsuse muutus. Kalaliigid, kes fülogeneetiliselt on palju kokku puutunud hapnikupuudusega, langetavad oma ainevahetuse intensiivsust. Eriti suurtes piirides suudab seda teha koger. Kalad, kes harva puutuvad kokku hapnikuprobleemidega, näiteks lõhelised, suudavad oma ainevahetuse intensiivsust suhteliselt vähe alandada.

Vee hapnikusisaldus ja kalade ujumiskiirus

Mõõdukas hüpoksia (75% küllastusest) põhjustab kõrgematel temperatuuridel (20-25°C) kaladel maksimaalse ujumiskiiruse langust. Madalamatel temperatuuridel see nii selgelt ei avaldu. Näiteks vikerforell on võimeline ujuma kõige kiiremini 15°C juures ja ujumiskiirus väheneb nii madalamal kui ka kõrgemal temperatuuril. Madalamal limiteerib vee temperatuur, kõrgemal hapniku kättesaadavus.

Kalade poolt talvel tarbitav hapniku hulk järves

Kalad tarbivad puhkeolekus 4°C juures hapnikku järgmiselt: karpkalalased 15 mg O₂/kg/h, ahvenlased 25 mg O₂/kg/h, lõhilased 60 mg O₂/kg/h. Võrreldes puhkeolekuga kahekordistub hapnikutarve aeglase ujumiskiiruse korral (üks

kehapikkus sekundis). Maksimaalsete ujumiskiiruste juures tõuseb hapnikutarve kuni 10 korda.

Talvel kulutavad kalad keskmiselt 60 mg O₂/kg/h. Eesti järvedes on kalade biomass keskmiselt 200 kg/ha. Kui me võtame veesamba kõrguseks jää all 2 m ja hapniku sisalduseks enne jäätumist 13 mg/l ning letaalseks kontsentratsiooniks 2 mg/l ja kui kalad oleksid ainsad tarbijad, siis jätkuks neile hapnikku ligikaudu 2 aastaks. Siit võib järeldada, et järvede ummuksilejäämine ei ole tingitud kalade hapnikutarbimisest. Peamiseks hapnikutarbijaks järvedes on hoopis orgaanilise aine oksüdeerimine.

Hapnikusisalduse vähenemine kalaparves

On täheldatud, et suurtes ja tihedates kalaparvedes võib esineda vee hapnikusisaldus langeda eriti parve tagaosas. See võib olla ka üheks Peipsi tindi massilise suremise põhjuseks, mida aeg-ajalt on Peipsi ja Pihkva järves registreeritud. Nagu juba eelnevalt mainitud, suurendab parasitidega nakatumine kala tundlikkust madalale hapnikusisaldusele. Peipsi tindid on peaaegu 100%-liselt nakatunud imiussi *Tetrahyle* vastsetega. Kuna need kahjustavad peamiselt südant ja veresooni, siis on kalade hapniku transport kahjustatud.

Füsioloogilised muutused hüpoksia korral

Hapnikupuuduse süvenedes teevad kalad läbi rea füsioloogilisi muutusi, et tagada ellujäämiseks vajalik energia. Näiteks suureneb ventilatsiooni intensiivsus kuni teatud minimaalse hapnikutasemeni ja sellest alates ventilatsiooni intensiivsus ja hapniku omastatavus väheneb. Südamerütm aeglustub, kuid löögimaht suureneb. Lõpuseid läbiv vere kogus suureneb. Samuti suureneb vere hulk organismis. Punaliblede arv suureneb ja sellele aitab kaasa hormoon erütropoetiin. Samuti suureneb hüpoksia tingimustes anaeroobsete ainevahetusprotsesside osakaal, samas aeroobsete protsesside osakaal väheneb.

Hapniku tarbimine ja toksiliste ainete omastatavus

Vee hapnikusisalduse langedes suurendavad kalad veevoolu üle lõpuste, et tagada kudede küllaldane hapnikuvarustus. Sellega kaasnevalt pumbatakse üle kala lõpuste ka rohkem vees lahustunud toksilisi aineid ja nende akumulatsioon kalas kasvab.